

# КОСМОЛОГИЯ И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ, ИЛИ НЕБЕСНЫЕ ТАЙНЫ

*А. Д. Долгов\**

Университет Феррары и Национальный институт ядерной физики, Феррара, Италия  
Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

ВВЕДЕНИЕ	529
НЕСКОЛЬКО СЛОВ О КОСМОЛОГИИ	534
ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ	538
ПРОБЛЕМА ВАКУУМНОЙ ЭНЕРГИИ	541
ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ	545
КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФЛЯЦИЯ	550
БАРИОСИНТЕЗ	555
НЕСКОЛЬКО СЛОВ О НОВОЙ ФИЗИКЕ	559
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	567
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	567

---

\*E-mail: [dolgov@fe.infn.it](mailto:dolgov@fe.infn.it)

## КОСМОЛОГИЯ И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ, ИЛИ НЕБЕСНЫЕ ТАЙНЫ

*А. Д. Долгов\**

Университет Феррары и Национальный институт ядерной физики, Феррара, Италия  
Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

Представлена расширенная версия доклада на 2-м круглом столе Италия–Россия в Дубне «Физика космоса и биология». По возможности популярно, с учетом разнородности аудитории, изложены космологические проблемы, которые требуют для своего решения новых явлений вне рамок минимальной стандартной модели физики элементарных частиц. Обсуждаются космологические темная и вакуумная энергии, темная материя, инфляция и бариосинтез. В заключение кратко рассмотрены варианты фундаментальной ломки законов современной физики.

The present review is an extended version of the talk presented at the 2nd Round Table Italy–Russia at Dubna, «Space Physics and Biology». At a popular level, taking into account the diversity of the audience, the cosmological problems are described which demand for their solution new phenomena beyond the minimal standard model in elementary particle physics. Cosmological dark and vacuum energies, dark matter, inflation, and baryogenesis are considered. In conclusion a brief discussion of breaking of the fundamental physical laws is presented.

PACS: 95.30.Cq

### ВВЕДЕНИЕ

За последние 30 лет прошлого века были установлены две великих фундаментальных теории, которые находятся в блестящем согласии с экспериментом и астрономическими наблюдениями, за исключением нескольких «небольших облачков». Этими замечательными теориями являются:

1) минимальная стандартная модель в физике элементарных частиц (английская аббревиатура MSM), классифицирующая все известные частицы и описывающая все их известные взаимодействия, т. е. электрослабое и сильное;

2) стандартная космологическая модель (английская аббревиатура SCM), которая описывает эволюцию Вселенной от «сотворения» до наших дней.

«Небольшая» проблема состоит в том, что феноменология этих двух теорий прекрасно согласуется с наблюдениями/экспериментом, но на более

---

\*E-mail: [dolgov@fe.infn.it](mailto:dolgov@fe.infn.it)

глубоком уровне эти фундаментальные теории не стыкуются друг с другом и требуют наличия новой, возможно, совершенно неожиданной физики для объяснения наблюдаемой картины.

В минимальной стандартной модели имеется следующий набор элементарных частиц (и никаких иных частиц не требуется). Это, во-первых, три семейства кварков, каждое из которых состоит из пары кварков, верхнего и нижнего:  $(u, d)$ ,  $(c, s)$  и  $(t, b)$ . Верхние кварки имеют заряд  $(+2/3)e$ , а нижние —  $(-1/3)e$ , где  $e$  — абсолютная величина заряда электрона. Каждый из шести кварков имеет три цвета, и их свойства от цвета не зависят. Однако свойства кварков зависят от того, к какому семейству они принадлежат. В первую очередь очень сильно различаются их массы [1]:  $m_u \approx 2,5$  МэВ,  $m_d \approx 5$  МэВ,  $m_c = 1,27$  ГэВ,  $m_s \approx 100$  МэВ,  $m_t \approx 170$  ГэВ и  $m_b \approx 4,5$  ГэВ. Все кварки, кроме  $t$ -кварка, обнаружены в прямом эксперименте, а последний «виден» по анализу радиационных поправок к слабому взаимодействию. Забегая вперед, отметим, что кварки обнаружены не сами по себе, а лишь в связанном виде, в составе элементарных частиц.

Каждому семейству кварков отвечает семейство лептонов:  $(e^-, \nu_e)$ ,  $(\mu^-, \nu_\mu)$  и  $(\tau^-, \nu_\tau)$ . Все нейтрино почти безмассовые, а массы заряженных лептонов весьма сильно различаются:  $m_e = 0,511$  МэВ,  $m_\mu = 105$  МэВ и  $m_\tau \approx 1,78$  ГэВ. В отличие от кварков лептоны бесцветны и поэтому не участвуют в сильных взаимодействиях. Никаких различий в электро-слабых взаимодействиях лептонов из разных семейств не обнаружено. А вот взаимодействия электрически заряженных лептонов и нейтрино заметно отличаются.

Кроме вышеперечисленных частиц вещества имеются частицы — переносчики взаимодействия. К ним относятся переносчик электромагнитного взаимодействия — фотон,  $\gamma$ , переносчики слабого взаимодействия,  $W^\pm$  и  $Z^0$ , и восемь глюонов, которые переносят сильные взаимодействия. Все эти частицы являются векторными, т. е. имеют спин единица. Перенося взаимодействия, они «работают» аналогично фотонам, но роль заряда играет цвет для глюонов и так называемые слабый изоспин и гиперзаряд для  $W^\pm$  и  $Z^0$ . Важным отличием этих переносчиков от фотона является то, что они сами обладают зарядом, с которым они и взаимодействуют. Это как бы электрически заряженные фотоны.

Несколько особняком стоит скалярный хиггсовский бозон, классический конденсат которого (не путать с бозе-конденсатом) создает массу кваркам, лептонам и  $W^\pm$ - и  $Z^0$ -бозонам. Фотон и глюоны остаются безмассовыми.

Имеется еще одна безмассовая частица — гравитон, который переносит гравитационные взаимодействия. В отличие от векторных бозонов-переносчиков гравитон имеет спин два. Гравитон экспериментально не обнаружен, но мало кто сомневается в его существовании. Наблюдаемое возрастание частоты вращения двойного пульсара [2] хорошо описывается гипотезой, что потеря

энергии идет на излучение гравитационных волн, но говорить о наблюдении квантов гравитационного поля, по-видимому, преждевременно. Более того, в отличие от остальных типов взаимодействий, квантовая теория гравитации еще не построена.

Кварки, в отличие от лептонов, не наблюдаются в свободном виде. Их связанные состояния образуют различные элементарные частицы. В частности, три кварка из первого, самого легкого, семейства составляют протоны и нейтроны, т. е. обычное вещество, которое мы наблюдаем вокруг. Протоны, нейтроны, а также любые другие частицы, «сделанные» из трех кварков, называются барионами. Барионы, включающие в себя более тяжелые кварки, нестабильны и быстро распадаются, производя в конечном состоянии более легкие барионы, т. е. протоны или нейтроны, а также лептоны и/или фотоны. Согласно всем имеющимся экспериментальным данным самый легкий из барионов, протон, стабилен, хотя законы сохранения не запрещают его распад, например, по каналам  $p \rightarrow e^+\gamma$  или  $p \rightarrow \pi^+\nu$  и т. п. Для описания этого факта было введено понятие сохраняющегося барионного числа (или барионного заряда)  $B$ , равного  $+1$  для всех барионов, состоящих из трех кварков, и, соответственно,  $+1/3$  для кварков. Однако в последнее время было установлено, что  $B$  немножко не сохраняется, так что протон живет долго, но все же оказывается нестабильным (см. разд. 6).

Непосредственно наблюдаются лишь частицы, состоящие из пары кварк–антикварк, как, например,  $\pi$ -,  $K$ - и другие мезоны, а также барионы, состоящие из трех кварков, или же антибарионы, состоящие из трех антикварков. Возможны и многокварковые состояния, построенные из комбинаций вышеупомянутых. Все это так называемые белые состояния, нейтральные по цвету. Цвет несколько напоминает электрический заряд. Электрически заряженные состояния гораздо сильнее взаимодействуют между собой, чем нейтральные. Сила взаимодействия между заряженными частицами медленно спадает с расстоянием по известному закону Кулона,  $F \sim 1/r^2$ . Такие силы называются дальнедействующими. А силы между цветными состояниями уместно назвать супердальнедействующими. Они не убывают с расстоянием, а стремятся к постоянной величине,  $F \rightarrow \text{const}$ , при больших  $r$ . Поэтому любые цветные частицы не существуют в свободном виде. При попытке вытянуть цветное состояние из белой системы на макроскопическое расстояние струна глюонного поля, соединяющая два цветных объекта, рвется, рождая на концах пару кварк–антикварк, которые нейтрализуют или, другими словами, обесцвечивают вытягиваемое состояние.

Прямых противоречий минимальной стандартной модели с опытом пока не обнаружено, но имеется ряд теоретических проблем, ясное понимание которых отсутствует. Это, во-первых, спектр масс кварков, который простирается от 3 МэВ до 170 ГэВ, и аналогичная проблема иерархии масс лептонов. Массы заряженных лептонов различаются в 200 или даже 3000 раз,

достигая примерно двойной массы протона, тогда как нейтрино почти безмассовые. Механизм, который мог бы объяснить такую иерархию масс, не известен.

Имеется еще одна непонятая иерархия масштабов электрослабого,  $10^2 - 10^3$  ГэВ, и гравитационного,  $10^{19}$  ГэВ, взаимодействий.

Возможно, наличие столь разных масштабов взаимодействий скрывает за собой какую-то новую физику, например, тот факт, что мир имеет больше трех пространственных измерений, или другие столь же радикальные возможности.

Тем не менее хотелось бы повторить, что все эти проблемы не являются прямым противоречием теории и никоим образом не требуют расширения минимальной стандартной модели. Все это находится на уровне естественности или неестественности. Положение меняется кардинальным образом, когда в игру вступает космология.

Стандартная космологическая модель основана на простом и хорошо установленном фундаменте. Во-первых, это общая теория относительности (ОТО) для описания гравитации от космологических до планетарных масштабов. Ее применимость на этих расстояниях хорошо установлена. Справедливость нерелятивистского предела, т. е. ньютоновской гравитации, проверена до очень малых расстояний, порядка 10 микрон [3].

Во-вторых, это информация о кирпичиках мироздания, т. е. об элементарных частицах, населяющих наш мир, и о взаимодействиях между ними. Для описания космологической эволюции часто бывает достаточно знать уравнение состояния, выражающее плотность давления как функцию плотности энергии,  $P = f(\rho)$ . Стоит отметить, что уравнение состояния не всегда имеет место в том смысле, что давление не всегда локально (по времени или пространству) определяется плотностью энергии, но и в этом случае космологическая динамика хорошо определена благодаря уравнениям движения соответствующих полей.

В-третьих, это предположение об изотропном и однородном распределении материи в ранней Вселенной. И это тоже очень хорошо согласуется с наблюдательными данными.

Космологическая эволюция малых возмущений плотности энергии,  $\Delta = \delta\rho/\rho$ , на более поздней космологической стадии рассчитывается в низшем порядке теории возмущений, а когда  $\Delta$  возрастают до величины порядка единицы, используется численное моделирование. При известном спектре начальных возмущений плотности теория однозначно и аккуратно определяет характеристики крупномасштабной структуры Вселенной. Предполагается, что спектр возмущений плотности сформировался на инфляционной стадии (об этом чуть позже) и потому его форма достаточно хорошо определена. Наблюдения вкупе с теорией прекрасно описывают наблюдаемую картину крупномасштабной структуры Вселенной. Для завершения картины необходимо,

кроме спектра, знать еще свойства элементарных частиц или каких-либо других объектов, участвующих в формировании структуры.

Такой подход при небольшом количестве свободных параметров очень хорошо описывает всю историю Вселенной. Феноменология оказывается замечательной, но на более фундаментальном уровне в теории оказывается множество белых пятен, для устранения которых необходимо расширение минимальной стандартной модели и введение новой физики. Это очень сильное утверждение стало очевидным после ряда фундаментальных открытий в астрономии во второй половине XX в., а также существенного продвижения в теоретической космологии.

Краткий список новых явлений или проблем, подробнее обсуждаемых ниже, включает:

1) антигравитирующую субстанцию, которая вызывает ускоренное космологическое расширение и получила название темной энергии (ТЭ);

2) доказательство наличия во Вселенной новой формы материи, так называемой темной материи (ТМ), которая не взаимодействует со светом и потому невидима и проявляется пока только своим гравитационным действием;

3) утверждение о том, что протоны «не навсегда», т. е. что барионное число не сохраняется и протон должен иметь хоть и большое, но конечное время жизни или же нейтрон должен переходить в антинейтрон;

4) утверждение об экспоненциальном расширении Вселенной на очень ранней стадии, т. е. о так называемой инфляции;

5) проблему возникновения космологической асимметрии между веществом и антивеществом и возможности существования астрономически больших доменов антивещества во Вселенной;

6) проблему вакуумной энергии, которая, по-видимому, является наиболее впечатляющей загадкой космологии и квантовой теории поля. Согласно теоретическим ожиданиям, вакуумная энергия на 50–100 порядков превышает наблюдаемое значение. Механизм «низведения» теоретически предсказываемого значения до наблюдаемой величины неизвестен. Для проникновения в эту глубочайшую тайну наверняка потребуется серьезная модификация существующей теории.

Скорее всего, эта проблема и проблема ускоренного космологического расширения тесно связаны и решение второй невозможно без решения первой.

К числу не объясненных пока явлений, которые, возможно, и не потребуют новой физики, можно отнести, в частности, следующие: наблюдаемую в галактическом центре интенсивную линию с энергией 0,511 МэВ [4], которая, очевидно, идет от аннигиляции  $e^+e^-$ -пар; открытие на итальянско-русском спутнике-детекторе PAMELA значительного избытка высокоэнергичных позитронов [5]; существование галактических и, возможно, межгалактических магнитных полей с напряженностью порядка микрогаусса [6];

аномалии в низших мультиполях угловых флуктуаций космического микроволнового фона [7, 8]. Скорее всего, этот список можно значительно продолжить.

## 1. НЕСКОЛЬКО СЛОВ О КОСМОЛОГИИ

В этом разделе мы приведем основные космологические уравнения (уравнения Фридмана) и определения необходимых для дальнейшего космологических параметров.

Широко известно, что Вселенная расширяется по закону Хаббла, согласно которому все удаленные объекты удаляются друг от друга со скоростью, пропорциональной расстоянию между ними:

$$v = Hl, \quad (1)$$

где  $H$  — постоянная Хаббла, точнее, параметр Хаббла, так как  $H$  зависит от времени и примерно равен обратному возрасту Вселенной. Заметим, что это расширение можно упрощенно представить как движение по инерции после первоначального толчка. Поэтому связанные системы не расширяются. Например, размер галактик и тем более размер атомов сейчас не растет, хотя иногда и встречаются противоположные утверждения.

Интересно также отметить, что объекты, разнесенные на расстояния, превышающие  $1/H$ , убегают друг от друга со скоростью выше скорости света. Оказывается, в ОТО, в отличие от специальной теории относительности, возможно движение быстрее света, но только для пространственно разделенных объектов. Локально, т. е. в совпадающих точках, относительная скорость не может превышать скорость света. Возможность сверхсветового движения связана с общим растяжением мира.

Здесь уместно сделать отступление о системе единиц. Мы будем использовать естественную систему, в которой скорость света равна единице. Эта система хорошо известна в астрономии, где расстояния измеряются в (световых) годах. Кроме того (уже для специалистов), предполагается, что редуцированная постоянная Планка равна единице, т. е. частота колебаний и энергия имеют одинаковую размерность. Также равна единице постоянная Больцмана, и, следовательно, температура и энергия тоже величины одинаковой размерности.

Как отмечалось выше, в основе космологии лежит общая теория относительности, которая обобщает специальную теорию относительности (СТО) на произвольные преобразования координат и требует инвариантности физических законов в произвольных системах отсчета. Напомним, что инвариантность СТО требуется лишь для поворота системы координат и движения одной инерциальной системы относительно другой с постоянной скоростью. При таких преобразованиях сохраняется величина четырехмерного интервала

между событиями, произошедшими в момент  $t_1$  в точке  $x_1$  и в момент  $t_2$  в точке  $x_2$ :

$$ds^2 = dt^2 - d\mathbf{r}^2, \quad (2)$$

где  $dt = t_2 - t_1$  и  $d\mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$ . Пространство с таким интервалом называется пространством Минковского и является плоским. Его трехмерная часть имеет обычную геометрию Евклида, да и четырехмерная кривизна тоже равна нулю.

Понятие инвариантного интервала можно обобщить на произвольное искривленное пространство:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu, \quad (3)$$

где  $g_{\mu\nu}$  называется метрическим тензором пространства. Теперь  $ds^2$  остается инвариантным при любых преобразованиях координат.

Существенная физическая гипотеза ОТО состоит в том, что геометрия пространства-времени определяется материей, которая «живет» в этом четырехмерном пространстве. Материя искривляет пространство-время. Соответственно, метрический тензор  $g_{\mu\nu}$  является динамической переменной, определяемой уравнениями Эйнштейна:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi G_N T_{\mu\nu}. \quad (4)$$

Источником поля в правой части является тензор энергии-импульса материи  $T_{\mu\nu}$ . Величина  $G_N$  — ньютоновская константа гравитационного взаимодействия. Ее часто записывают в виде  $G_N = m_{\text{Pl}}^{-2}$ , где  $m_{\text{Pl}} \approx 1,2 \cdot 10^{19}$  ГэВ называют планковской массой. Величины  $R$  и  $R_{\mu\nu}$  характеризуют кривизну пространства-времени и выражаются через вторые производные метрического тензора.  $R_{\mu\nu}$  носит название тензора Риччи, а  $R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$  является скаляром кривизны. Решение уравнения (4) определяет метрику пространства  $g_{\mu\nu}$ . В отсутствие материи метрический тензор имеет вид диагональной матрицы со следующими элементами на диагонали:  $g_{\mu\nu} = \text{diag}[1, -1, -1, -1]$ . Соответственно, пространство будет плоским с интервалом (2).

Предполагается, что в ранней Вселенной, т. е. когда ее возраст не превышал нескольких сот миллионов лет, распределение материи было однородным и изотропным. В пользу этого предположения в первую очередь говорит одинаковая величина температуры микроволнового реликтового излучения (о нем немного позже), приходящего из разных точек небесной сферы.

Из соображений симметрии можно заключить, что для однородно и изотропно распределенной материи пространство будет иметь постоянную трехмерную кривизну с интервалом вида

$$ds^2 = dt^2 - \frac{a^2(t) d\mathbf{r}^2}{1 + k\mathbf{r}^2}. \quad (5)$$

При  $k = +1$  трехмерное пространство является трехмерной сферической поверхностью, вложенной в плоское четырехмерное пространство. В этом случае говорят о замкнутой Вселенной. В остальных случаях Вселенная будет



открытая. При  $k = -1$  трехмерное пространство представляет собой гипер-болоид, а при  $k = 0$  наше пространство является трехмерно плоским, описываемым обычной (известной по школе) геометрией Евклида. В каждом из этих трех случаев четырехмерное пространство-время при наличии вещества будет искривленным. Заметим сразу же, что согласно астрономическим наблюдениям трехмерное пространство в среднем является плоским, т. е.  $k = 0$  с очень хорошей точностью.

Величина  $a(t)$  называется космологическим масштабным фактором. В отсутствие гравитации четырехмерное пространство-время будет плоским, т. е. пространством Минковского с постоянным масштабным фактором  $a(t) = \text{const}$ . Обычно полагают  $a(t) = 1$ .

Зависимость масштабного фактора от времени означает, что расстояния между «неподвижными» в такой системе координат объектами изменяются со временем:  $\Delta l = a(t)\Delta r$ , где  $r$  — постоянная (сопутствующая) координата, отвечающая неподвижной в данной точке частице. Терминология, возможно, не вполне удачная, так как неподвижные в данной точке частицы разлетаются друг от друга за счет общего космологического расширения.

Из выражения (5) следует, что

$$v \equiv \frac{d\Delta l}{dt} = \dot{a}\Delta r = Hl, \quad (6)$$

где  $H = \dot{a}/a$ , что и является законом Хаббла, который уместно назвать законом Фридмана–Хаббла, поскольку первый предсказал его теоретически [9], а второй подтвердил это предсказание астрономическими наблюдениями [10], правда, с очень плохой точностью: измеренное в работе [10] значение  $H$  примерно на порядок превышает правильную величину, установленную значительно позже.

Параметр Хаббла  $H$  в течение всей космологической истории, кроме периода инфляции, менялся со временем и в каждый момент был близок по величине к обратному возрасту Вселенной. Согласно астрономическим данным, современное значение  $H$  составляет  $H = 100h$  км/с/Мпк, где безразмерная величина  $h$  равна  $h = 0,72 \pm 0,03$  (см., например, [1]). Иными словами, объект, находящийся от нас на расстоянии 100 Мпк, т. е. примерно 300 млн световых лет, имеет относительно нас скорость 7200 км/с.

Получаемые из уравнений Эйнштейна уравнения, описывающие эволюцию масштабного фактора  $a(t)$ , в случае однородно и равномерно распределенной материи носят название уравнений Фридмана [9].

Первое уравнение Фридмана выражает параметр Хаббла через плотность энергии во Вселенной:

$$H^2 = \frac{8\pi}{3} \frac{\rho}{m_{\text{Pl}}^2} - \frac{k}{a^2}. \quad (7)$$

По определению, если  $k = 0$ , то считается, что плотность энергии равна критической,  $\rho_{\text{tot}} = \rho_c = 3H^2 m_{\text{Pl}}^2 / 8\pi$ . Плотность энергии той или иной

формы материи во Вселенной характеризуется безразмерным параметром  $\Omega_j = \rho_j / \rho_c$ . Согласно астрономическим данным полная плотность энергии во Вселенной близка к критической, т. е.  $\rho_{\text{tot}} \approx 10^{-29}$  г/см<sup>3</sup>, или в естественных единицах  $\rho_{\text{tot}} \approx 10^{-46}$  ГэВ<sup>4</sup>. Соответственно,

$$\Omega_{\text{tot}} = \sum_j \Omega_j = 1 \pm 0,03, \quad (8)$$

из которых нормальная барионная материя составляет совсем немного:  $\Omega_B \approx 0,05$ . Неизвестного невидимого вещества примерно в пять раз больше:  $\Omega_{\text{DM}} \approx 0,25$ . И совсем много загадочной субстанции, темной энергии:  $\Omega_{\text{DE}} \approx 0,75$ .

Второе уравнение Фридмана выражает ускорение при расширении через плотность энергии и давление материи:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi}{3m_{\text{Pl}}^2}(\rho + 3P). \quad (9)$$

Заметим, что при  $P < -\rho/3$  ускорение окажется положительным, т. е. гравитация превращается в антигравитацию. Как мы увидим ниже, это является причиной расширения Вселенной.

Приведем еще уравнение, описывающее эволюцию плотности энергии во фридмановской космологии:

$$\dot{\rho} = -3H(\rho + P). \quad (10)$$

Это уравнение представляет собой ковариантный закон сохранения тензора энергии-импульса,

$$D_\mu T_\mu^\nu = 0, \quad (11)$$

где  $D_\mu$  — ковариантная производная в гравитационном поле. Уравнение (11) является следствием двух уравнений Фридмана (7) и (9), но выделено тут в силу его важности.

Обычно предполагается, что материя описывается весьма простым, линейным уравнением состояния, т. е. связь между плотностью энергии и плотностью давления имеет вид

$$P = P(\rho) = w\rho. \quad (12)$$

Плотность давления нерелятивистского вещества,  $P \sim \rho v$ , намного меньше его плотности энергии, т. е. можно с хорошей точностью положить  $P = 0$ . В этом случае  $\rho \sim 1/a^3$  и  $a \sim t^{2/3}$ . Последнее справедливо при  $k = 0$ . Для релятивистского вещества  $P = \rho/3$ , и тогда  $\rho \sim 1/a^4$  и  $a \sim t^{1/2}$ . Представляет интерес также вакуумное или вакуумоподобное состояние материи, когда  $T_{\mu\nu} \sim g_{\mu\nu}$  и, соответственно,  $P = -\rho$ . При этом  $a(t) \sim \exp(Ht)$  с постоянным параметром Хаббла и, что совершенно удивительно, при этом

законе расширения плотность энергии остается постоянной. Все эти три режима существовали во Вселенной в различные периоды ее эволюции. Физически реализуемый пример уравнения состояния с отрицательным давлением приводится в следующем разделе, уравнение (13).

Ранее считалось, что судьба нашей Вселенной и геометрия трехмерного пространства однозначно связаны. В частности, при  $k = +1$  расширение сменится сжатием. Действительно, из уравнения (7) следует, что для нормального релятивистского или нерелятивистского вещества второй член при увеличении масштабного фактора  $a(t)$  в какой-то момент превзойдет первый. Это означает, что по дороге параметр Хаббла обратится в ноль. Расширение остановится и перейдет в сжатие. Для открытой Вселенной  $H(t)$  всегда будет положительным, а расширение вечным. Однако при наличии вакуумоподобной энергии расширение может оказаться вечным и для замкнутой Вселенной, так как если в какой-то момент  $\rho_{vac} > 1/a^2$ , то это неравенство никогда не изменится.

Упомянем в заключение заполняющий всю Вселенную фон микроволновых фотонов (Cosmic Microwave Background Radiation, CMB) с температурой  $T_{CMB} = 2,725 \pm 0,001$ . Это микроволновое излучение изотропно с точностью порядка  $10^{-5}$  — угловые вариации температуры не превышают этой величины. Но на более низком уровне угловые флуктуации этого излучения отличны от нуля и аккуратно измерены [7]. Эти флуктуации весьма чувствительны к различным космологическим параметрам, в частности, к параметру Хаббла, кривизне пространства, количеству барионной и темной материи, к доле темной энергии и многому другому [7]. Измерение этих флуктуаций представляет собой один из основных способов определения космологических параметров.

## 2. ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ

Космологическое расширение можно наглядно (хотя и не совсем точно) представить, как движение камня в поле тяжести Земли. Камень, брошенный вертикально вверх, будет постепенно терять свою скорость, в какой-то момент остановится и повернет обратно к поверхности Земли, если его скорость будет не очень большой. При большой скорости камень никогда не остановится и улетит на бесконечность. Промежуточный случай — это когда при специально подобранной скорости камень все же улетит на бесконечность, но его скорость на бесконечности будет равна нулю. Не столь давно было принято считать, что именно так качественно происходит расширение и в космологии. При изначально небольшой скорости космологического разлета расширение когда-то прекратится и сменится сжатием. Как было описано в предыдущем разделе, это отвечает геометрически замкнутой Вселенной. При

большей начальной скорости расширение будет продолжаться вечно. В этом случае Вселенная будет открытая.

До последнего времени предполагалось, что космологическое расширение происходит именно таким образом. Однако в последние два десятилетия было без всяких сомнений установлено, что в какой-то момент в прошлом первоначальное расширение с уменьшающейся скоростью сменилось на расширение с ускорением. Используя аналогию с камнем, мы бы увидели следующую картину. Вначале камень летел бы вверх и его скорость падала бы нормальным образом, но вдруг камень стал бы удаляться от Земли с возрастающей скоростью, как будто у него включился ракетный двигатель. Именно такая картина имеет место в космологии. На ранней стадии Вселенная расширялась нормально с уменьшающейся скоростью. Потом, относительно недавно, расширение стало ускоренным и таковым является и в настоящее время. Удобным параметром для описания космологической эволюции является красное смещение,  $z + 1 = a_0/a(t)$ , где  $a(t)$  — космологический масштабный фактор в момент времени  $t$ , а  $a_0$  — его величина в настоящее время. Переход к ускоренному расширению происходит при  $z \approx 0,7$ , когда Вселенная была примерно вдвое меньше. По времени это означает, что ускорение началось, грубо говоря, 10 млрд лет назад, тогда как полный возраст Вселенной 13–14 млрд лет.

Следует отметить, что совсем на ранней, инфляционной, стадии (см. разд. 5) Вселенная также расширялась ускоренно, затем перешла на замедляющееся расширение и лишь заметно позже вернулась к ускоренному.

Расширение с ускорением, т. е. антигравитация, не противоречит общей теории относительности, но невозможно в ньютоновской теории. Дело в том, что в ОТО источником гравитационного поля является не только энергия или масса, которые должны быть положительными, но и давление, которому разрешено быть отрицательным. Роль давления видна из второго уравнения Фридмана (9). Из сказанного следует, что для нашего существования жизненно необходима эйнштейновская гравитация, в которой возможен антигравитационный режим. Иначе Вселенная никогда бы не начала расширяться и была бы маленькой, тесной и непригодной для жизни (см. разд. 5). Быстрое расширение с ускорением происходило в самом начале и было совершенно необходимо для создания нашей просторной Вселенной. Однако абсолютно неясно, зачем нужно, и нужно ли вообще, ускоренное расширение сегодня.

Чтобы не возникло недоразумение, следует сказать, что аналогия с камнем не вполне точная. Антигравитация может существовать лишь для бесконечно больших систем. Любой конечный объект с положительной энергией может иметь только нормальное гравитационное притяжение. Так что антигравитирующие космические корабли невозможны, во всяком случае в рамках канонической общей теории относительности.

Что конкретно вызывает современное космологическое ускорение, не известно. Эта неизвестная субстанция получила название темная энергия. Считается, что она описывается уравнением состояния (12), причем согласно астрономическим данным  $w \approx -1$ .

Существование темной энергии доказано многими независимыми способами. Без темной энергии Вселенная была бы слишком молодой, что противоречит возрасту старых звездных скоплений и данным ядерной хронологии. Большая совокупность данных по крупномасштабной структуре Вселенной говорит, что обычное гравитирующее вещество составляет порядка 30% от полной плотности энергии во Вселенной. О том же свидетельствует и спектр угловых флуктуаций микроволнового фона. И наконец, анализ светимости некоторого класса сверхновых (типа Ia) непосредственно указывает, что расширение ускоренное. Яркость сверхновых с красным смещением порядка единицы оказывается меньше яркости таких же сверхновых при малых  $z$ . Сразу приходит в голову, что одной из возможных интерпретаций этого уменьшения яркости было бы более далекое расстояние до этих сверхновых по сравнению с обычным замедляющимся расширением. Другими словами, расширение должно быть более быстрым. Количественный анализ показывает, что расширение должно быть не просто менее медленным, но даже ускоренным. Весьма существенно, что эффект имеет максимум при  $z \approx 0,7$ . Это исключает другие интерпретации эффекта, например, поглощение света от сверхновых в межзвездной среде или эволюционные эффекты. Работы по измерению яркости отдаленных сверхновых [11], где было непосредственно обнаружено ускоренное расширение, были удостоены Нобелевской премии за 2011 г. (С. Перлмуттер, Б. П. Шмидт, А. Г. Райсс).

Таким образом, большая совокупность данных твердо говорит о том, что Вселенная расширяется ускоренно. Источником этого ускорения является, скорее всего, какая-то неизвестная темная энергия, но этой темной энергии не находится места в минимальной стандартной модели физики элементарных частиц.

Имеются две принципиальные возможности объяснения ускоренного космологического расширения. Во-первых, как отмечалось выше, это добавление нового члена (темной энергии) в правую часть уравнений Эйнштейна, т. е. в тензор энергии-импульса. Вторая возможность — это изменение левой части, т. е. модификация гравитационного взаимодействия на больших расстояниях. В первом случае уравнения ОТО сохраняют свою форму (4), причем в полный источник гравитационного поля,  $T_{\mu\nu}^{(tot)}$ , помимо обычной (видимой или невидимой) материи, включается и вклад темной энергии.

На роль темной энергии «пробуются» не столь уж много кандидатов. Прежде всего это новое легкое или безмассовое скалярное поле. Предполагается, что это поле слабо меняется во времени и пространстве, так что в тензоре

энергии-импульса можно пренебречь его производными:

$$T_{\mu\nu} = \partial_\mu\phi\partial_\nu\phi - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}[\partial_\alpha\phi\partial^\alpha\phi - U(\phi)] \approx \frac{1}{2}g_{\mu\nu}U(\phi), \quad (13)$$

где  $U(\phi)$  — потенциал самодействия поля  $\phi$ . В этом пределе  $P \approx -\rho$ , что достаточно для феноменологического описания ускоренного расширения.

Темной энергией могла бы быть не полностью компенсированная вакуумная энергия, которая обсуждается в следующем разделе. В принципе, поля высоких спинов также могли бы создавать космологическое ускорение. Интересные возможности открывают высшие пространственные измерения. Впрочем, неясно, куда отнести последний механизм, к темной энергии или к модификации гравитации.

В качестве моделей модифицированной гравитации рассматриваются, как правило, теории, в которых к обычному гравитационному действию общей теории относительности добавляется нелинейная функция кривизны:  $R \rightarrow R + F(R)$  [12]. Нелинейность действия по  $R$  приводит к существенному усложнению уравнений движения. В них появляются производные выше второго порядка, из-за чего может возникать серьезная неустойчивость [13]. Для устранения последней требуются специальные нетривиальные усилия, что приводит к дальнейшему усложнению моделей. Тем не менее модификация гравитации открывает весьма интересные космологические перспективы. Исследования в этом направлении активно ведутся.

### 3. ПРОБЛЕМА ВАКУУМНОЙ ЭНЕРГИИ

Скорее всего, проблема темной энергии тесно связана с проблемой вакуумной энергии, и решение одной невозможно без решения другой. Вакуумная энергия представляет собой уникальный пример в физике, когда теоретические ожидания предсказывают результат, который превышает наблюдения на 50–100 порядков величины. До настоящего времени все попытки естественно объяснить малость вакуумной энергии были безрезультатны. Иногда даже заходит речь, что это объяснение потребует коренной ломки фундаментальных физических представлений.

Из общих соображений тензор энергии-импульса вакуума должен быть пропорционален метрическому тензору:

$$T_{\mu\nu}^{(\text{vac})} = \rho^{(\text{vac})} g_{\mu\nu}, \quad (14)$$

поскольку это единственный симметричный *инвариантный* тензор второго порядка, а вакуум должен выглядеть одинаково во всех системах отсчета. Здесь  $\rho^{(\text{vac})}$  — плотность энергии вакуума. Из сказанного выше ясно, что если

$\rho^{(\text{vac})} > 0$  и доминирует в космологической плотности энергии, то  $P = -\rho$  и Вселенная должна расширяться ускоренно.

Квантовая теория поля естественно приводит к ненулевой и очень большой плотности энергии вакуума  $\rho^{(\text{vac})}$ . Прежде всего, квантовые флуктуации приводят к бесконечно большой  $\rho^{(\text{vac})}$ :

$$\langle \mathcal{H}_b \rangle_{\text{vac}} = \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \frac{\omega_k}{2} \langle a_k^\dagger a_k + b_k b_k^\dagger \rangle_{\text{vac}} = \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \omega_k = \infty^4. \quad (15)$$

Здесь  $\langle \mathcal{H}_b \rangle_{\text{vac}}$  — среднее вакуумное значение гамильтониана некоторого бозонного поля, а  $\omega_k = (k^2 + m^2)^{1/2}$  — энергия кванта с импульсом  $k$  и массой  $m$ . Жизнь в таком мире была бы невозможна, но, к счастью, фермионные поля вносят точно такой же по величине, но противоположный по знаку вклад. Поэтому если бы для каждого бозона существовал бы фермионный партнер с точно равной по величине массой, то вакуумная энергия квантовых флуктуаций обратилась бы в ноль. Это обстоятельство было отмечено Зельдовичем [14] еще до открытия суперсимметрии [15]. Однако суперсимметрия не является точной и массы бозонов и фермионов сильно различаются. Поэтому даже если бесконечные вклады в вакуумную энергию сокращаются, что, впрочем, не тривиально из-за наличия не только расходимостей четвертой степени, но и квадратичных, тем не менее конечный остаток оказывается почти бесконечным,  $\rho^{(\text{vac})} \sim m_{\text{SUSY}}^4 > 10^{55} \rho_{\text{cosm}}$ . Здесь  $m_{\text{SUSY}}$  — массовый масштаб нарушения суперсимметрии, который, согласно имеющимся экспериментальным ограничениям, должен быть выше 100 ГэВ.

Проблема значительно усугубляется тем, что фактически экспериментально известен вклад в вакуумную энергию, который на 45 порядков превышает наблюдаемое значение. Это энергии кваркового [16] и глюонного [17] вакуумных конденсатов. Установлено, что, к примеру, протон состоит из трех кварков, следовательно, его масса должна быть меньше суммы масс кварков в вакууме на энергию связи, т. е. мы получим, что масса протона не должна превышать 15 МэВ и никак не быть равной 940 МэВ. Но дело в том, что вакуум заполнен глюонным конденсатом с отрицательной плотностью энергии ( $-\rho_G$ ), а в протоне кварки уничтожают этот конденсат. Посему масса протона приобретает положительную добавку  $\Delta m_p = \rho_G l_p^3$ , где  $l_p \sim \text{ГэВ}^{-1}$  — размер протона. В действительности размер протона несколько больше, и для создания правильной массы требуется плотность энергии конденсата около 0,01 ГэВ<sup>4</sup>.

Возникает невероятная ситуация. Известен объект, который вносит вклад в вакуумную энергию на 45 порядков выше наблюдаемого. Значит, что-то еще «живет» в вакууме и компенсирует вакуумную энергию с потрясающей точностью. Причем это «что-то» ничего не знает ни о кварках, ни о глюонах, иначе оно было бы обнаружено экспериментально.

Любопытно отметить, что не в столь уж давние времена, когда большинство считало, что вакуумная энергия тождественно равна нулю, мало кто беспокоился о громадных вкладах в вакуумную энергию. Почему-то было принято считать, почти по Фейнману, что «поправки бесконечны, но малы». И лишь открытие последних двух десятилетий того, что вакуумоподобная энергия не ноль, хотя и фантастически мала, привлекло общее внимание к этой, видимо, наиболее серьезной проблеме современной фундаментальной физики.

Фактически вакуумная энергия, но в слегка иной ипостаси, была введена в физику Эйнштейном в 1918 г. [18] при попытке сконструировать стационарную космологическую модель, в которой гравитация материи компенсировалась бы антигравитацией вакуума. Точнее говоря, Эйнштейн добавил в левую часть уравнений ОТО слагаемое, пропорциональное метрическому тензору с постоянным коэффициентом  $\Lambda$ :

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G_N T_{\mu\nu}. \quad (16)$$

Этот дополнительный член получил название лямбда-члена или космологической постоянной. Ковариантное сохранение всех остальных слагаемых требует, чтобы  $\Lambda$  не зависело бы ни от времени, ни от пространственных координат.

Введение лямбда-члена в левую часть абсолютно эквивалентно добавлению вакуумной энергии в правую часть, хотя до сих пор в литературе встречаются противоположные утверждения.

Впоследствии Эйнштейн отказался от своего творения, и большинство последовало его примеру, но были и достойные исключения, считавшие введение лямбда-члена чрезвычайно важным обобщением ОТО [19].

Существует несколько различных типов попыток объяснения малости энергии вакуума. Среди них антропный принцип, который гласит, что наше существование подразумевает, что условия во Вселенной должны быть подходящими для жизни, а это, в свою очередь, запрещает слишком большую вакуумную энергию [20]. При большой отрицательной вакуумной энергии Вселенная схлопнется задолго до того, как смогут образоваться звезды и планеты. Если же вакуумная энергия была бы большой и положительной, то космологическое расширение было бы настолько быстрым, что планеты и звезды тоже не смогли бы образоваться. Хотя и есть теоретические модели, согласно которым существует почти бесконечное множество вселенных с самыми разными значениями вакуумной энергии, и среди них могут быть и те, в которых вакуумная энергия имеет наблюдаемую сейчас величину, у них есть по крайней мере два существенных недостатка. Во-первых, модели пока недостаточно разработаны и неясно, какова вероятность состояний с достаточно малой вакуумной энергией. Во-вторых, такие модели предполагают



произвольную величину затравочной вакуумной энергии, различную в разных вселенных, которая вместе с вкладами физических полей должна в какой-то из вселенных скомпенсироваться до необходимых для существования жизни условий. Другими словами, антропный принцип может работать, если вакуумная энергия, по существу, является произвольной вычитательной константой теории, т. е. всегда должен быть введен произвольный лямбда-член, различный для разных вселенных, и тогда можно надеяться, что где-нибудь он скомпенсирует вклады вакуумных энергий физических полей. Если же вакуумная энергия представляет собой только совокупность физических вкладов различных полей, живущих во Вселенной, то тогда нет простора для реализации антропного принципа.

Наконец, имеется общее психологическое возражение против антропного принципа, состоящее в том, что он не определяет динамику системы, а все решается случайным образом. Посему антропный принцип не позволяет сделать тех мощных предсказаний, которые возможны при наличии динамической теории. В связи с этим уместно вспомнить инфляционную космологию, которая не только разрешила загадки старой фридмановской космологии (для этого в какой-то степени тоже хватило бы антропного принципа), но и дала четкие предсказания о спектре начальных возмущений плотности, согласующиеся с наблюдениями.

Еще одна проблема, которая определенно не решается антропным принципом, — это проблема космического совпадения. Совершенно неясно, почему вакуумная энергия, которая должна оставаться постоянной при расширении Вселенной, сегодня оказывается близкой (с точностью до двойки) к плотности энергии обычной материи, которая убывает как квадрат обратного времени жизни Вселенной. Но, возможно, эта проблема не столь остра, как проблема компенсации громадных вкладов в вакуумную энергию от физических полей. В принципе, обе эти проблемы могли бы быть решены механизмом динамической компенсации вакуумной энергии, который мы опишем ниже.

Заметим сразу же, что проблема космического совпадения более широка, чем совпадения по порядку величины темной энергии и энергии обычного вещества. До сих пор остается непонятным механизм, который приводит к тому, что плотности энергий обычного барионного вещества и темной материи различаются всего в пять раз, хотя это различие могло бы составлять несколько порядков. Возможно, и эту ношу может взвалить на себя антропный принцип.

Весьма обещающей, хотя бы на первый взгляд, выглядит идея динамической компенсации вакуумной энергии [21, 22]. Принцип этого механизма довольно прост. Предполагается, что существует очень легкое или безмассовое поле  $\Phi$ . Оно может быть скалярным полем или полем с ненулевым спином (в последнем случае ему надо приписать лоренцевы индексы), взаимо-

действующим с кривизной пространства-времени. Нетрудно сформулировать модель, в которой это поле будет неустойчиво при ненулевой кривизне и в силу этого будет развиваться конденсат  $\Phi$ . По принципу Ле Шателье энергия этого конденсата должна уменьшать эффект исходной вакуумной энергии и приводить к замедлению расширения Вселенной. Во всех рассмотренных моделях так и происходит. Экспоненциальное расширение превращается в степенное, подобное обычному фридмановскому. Однако вакуумная энергия компенсируется не полностью, а лишь до величины порядка зависящей от времени обычной космологической энергии,  $\sim m_{\text{P}1}^2/t^2$ . Качественно такая картина замечательно согласуется с наблюдениями. В этом смысле в работах [21, 22] было предсказано существование темной энергии задолго до ее открытия. Однако, несмотря на все привлекательные черты, модель остается неудовлетворительной, так как до сих пор не найдено ни одной реалистической космологической модели, где бы это осуществлялось.

Ряд других предложений по решению проблемы вакуумной энергии включает в себя учет компенсирующего влияния квантовой инфракрасной неустойчивости безмассовых полей, в том числе самих гравитонов, возможность компенсации вакуумной энергии за счет «утекания» ее в высшие измерения, в частности за счет модификации гравитации на больших расстояниях, симметричные соображения (типа ненарушенной суперсимметрии, где вакуумные энергии бозонов и фермионов точно сокращаются) и ряд других, в том числе и ломку всех фундаментальных законов физики. Для более подробного ознакомления с этими вопросами следует обратиться к обзорам [23].

#### 4. ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ

Если мы оглядимся вокруг, то увидим, что Земля и все, что есть на Земле, а также Солнце и другие звезды состоят из протонов, нейтронов и электронов. Долгое время считалось, что именно такое нормальное барионное вещество представляет собой доминантную форму материи во Вселенной. Незначительное (по весу, но не по числу) количество фотонов микроволнового фона и реликтовых нейтрино играет не слишком большую роль в космологической эволюции, по крайней мере на достаточно поздней стадии. Однако сейчас твердо установлено, что эти барионы вовсе не доминируют и масса невидимой (темной) материи во Вселенной в пять раз больше, чем полная масса барионной материи. Как уже отмечалось выше, эта материя (практически) не излучает и не поглощает свет и проявляется только своим гравитационным действием. Первые указания на наличие в космосе такого невидимого вещества появились еще в тридцатые годы прошлого века. В частности, голландский астроном Оорт первым обнаружил наличие невидимой материи, изучая движение звезд в нашей Галактике [24]. Несколько позже аналогич-

ный вывод был сделан Цвикки [25] на основе анализа угловых скоростей в галактическом кластере Кома.

После этих пионерских работ, не воспринятых серьезно, в частности из-за невысокой точности измерений, проблема была забыта до 1964 г., когда две группы [26] опубликовали данные по измерению скоростей вращения газа вокруг галактик (то же имеет место и для галактических спутников). Если все вещество, создающее гравитационное поле, сосредоточено в центральной светящейся области, то скорости должны убывать как обратный корень из расстояния,  $v \sim 1/\sqrt{r}$ . Это прекрасно выполняется для скоростей планет в Солнечной системе. На этом основании Ньютон вывел свой знаменитый закон, что сила притяжения обратно пропорциональна квадрату расстояния. Наблюдения же показали, что ротационные скорости в галактиках стремятся к постоянной величине при росте расстояния. Поэтому кривые, описывающие зависимость скорости от расстояния, получили название плоских ротационных кривых. Подобное поведение должно иметь место, если вокруг галактик, вне светящейся части, имеется невидимое вещество, плотность массы которого падает как обратный квадрат расстояния. В настоящее время измерено порядка тысячи ротационных кривых, и все они демонстрируют подобное поведение (см., например, [27]).

Любопытно, какой бы вывод сделал Ньютон, если бы ему были доступны только данные о галактических ротационных кривых, но не о Солнечной системе? Если не привлекать гипотезы о невидимом веществе, то пришлось бы сделать вывод, что сила притяжения падает с расстоянием не как  $1/r^2$ , а всего лишь как  $1/r$ . Это быстрее, чем падает сила между цветными элементарными частицами (см. введение), но тем не менее довольно необычно, так как потенциал не падает, а растет как  $\ln r$ , а значит, гравитационная энергия взаимодействия двух тел стремится к бесконечности при их удалении.

Ротационные кривые — не единственное доказательство наличия темной материи. Имеется целый ряд *независимых* данных, доказывающих ее существование.

Простое качественное доказательство существования темной материи состоит в следующем. В обычном барионном веществе формирование крупномасштабной структуры (галактик, их скоплений) может начаться только при достаточно низкой температуре космологической плазмы  $T \approx 3000$  К. Это температура рекомбинации водорода. При более высокой температуре плазма полностью ионизована и давление микроволнового фотонного фона на электроны препятствует их гравитационному сгущиванию. Согласно теории, неоднородности плотности массы, пока они малы, не могут расти быстрее, чем космологический масштабный фактор. От момента рекомбинации до наших дней этот фактор вырастает как отношение температур микроволнового фона тогда и сейчас:  $3000/2,7 \approx 10^3$ . С другой стороны, измерение угловых флуктуаций микроволнового фона показывает, что флуктуации плотности энергии

в момент рекомбинации не превышали  $10^{-4}$ . Следовательно, к нашему времени они едва ли смогут достичь относительной величины  $\delta\rho/\rho \sim 10^{-1}$ . Таким образом, в чисто барионной Вселенной структура не успела бы образоваться к нашему времени. Наблюдения же показывают, что величина неоднородности плотности вплоть до масштабов галактических сверхскоплений в настоящее время заметно превышает единицу.

Количественные измерения полного вклада всей гравитирующей материи (включая барионы) получены на основании анализа совершенно различных эффектов в космологии. Сюда входит гравитационное линзирование, анализ равновесия горячего газа в богатых галактических скоплениях, наблюдения количества галактических скоплений при разных красных смещениях, сравнение предсказаний теории образования крупномасштабной структуры с наблюдениями и, наконец, данные по угловым флуктуациям микроволнового фона. Все эти полностью независимые данные согласуются друг с другом и приводят к результату, что плотность всех типов нерелятивистского вещества, обладающего нормальным гравитационным взаимодействием, равна  $\Omega_m \approx 0,3$ . Сюда входят обычное барионное вещество и неизвестная темная материя.

Вывод о наличии во Вселенной нового неизвестного вещества, помимо барионного, радикальным образом меняет наши представления о мире, и очень желательно убедиться в том, что не существует альтернативных объяснений астрономических наблюдений. В литературе обсуждаются две возможности: изменение гравитационного взаимодействия на больших расстояниях и изменение ньютоновской механики при очень малых ускорениях. Ни одна из них не описывает всей совокупности имеющихся данных без дальнейших довольно сложных модификаций уже модифицированной теории.

Третья, консервативная, возможность заключается в том, что все вещество во Вселенной состоит из барионов, но значительная часть этих барионов по какой-то причине не видна и единственным наблюдаемым ее проявлением являются гравитационные эффекты. Однако эта гипотеза исключается данными по обилию легких элементов и по угловым флуктуациям реликтового фона. Оба набора данных говорят, что количество барионов примерно в пять раз меньше, чем количество невидимой материи, т. е.  $\Omega_B \approx 0,05$ . Впрочем, последний вывод справедлив, если все барионы в ранней Вселенной были однородно распределены в первичной плазме. Компактные барионные объекты с высокой плотностью не противоречат ни данным по первичным элементам, ни микроволновому фону. Они могли бы занимать малую долю общего объема Вселенной, но иметь заметно большую массу, чем те барионы, которые были равномерно распределены в ранней Вселенной (см. ниже).

Поясним качественно, как получены выводы о космологической плотности однородно распределенных барионов, в то время как барионы в компактных объектах оказываются ненаблюдаемыми.

Начнем с первичного нуклеосинтеза. Легкие элементы были синтезированы во Вселенной посредством процессов, которые происходили на очень ранней стадии, когда возраст Вселенной был от одной до примерно ста секунд. Количество первичного дейтерия очень сильно зависит от полной плотности барионов. Чем больше барионов, тем выше шанс, что дейтерий подхватит протон или нейтрон и в конечном счете перейдет в наиболее сильно связанное ядро  ${}^4\text{He}$ . Наблюдения первичного дейтерия с помощью телескопа «Хаббл» очень хорошо ложатся на приведенное выше значение  $\Omega_B \approx 0,05$  (см., например, таблицы [1] и ссылки в них). С другой стороны, нуклеосинтез в компактных объектах приводит к очень малой плотности первичного дейтерия и к несколько большей, чем обычно, плотности первичного  ${}^4\text{He}$ . Однако наблюдение обилия легких элементов проводится в основном в межзвездном газе, а наблюдения в компактных объектах существенно труднее, особенно если последние представляют собой слабо светящиеся звезды.

Другой независимый способ определения полного числа барионов, основанный на угловых флуктуациях фона реликтовых фотонов, опирается на явления в уже довольно старой Вселенной, когда ее возраст был около 100 тысяч лет. Этот период был непосредственно перед рекомбинацией водорода, когда протоны и электроны сформировали нейтральный водород. После этого момента фотоны микроволнового фона свободно распространялись во Вселенной. Наблюдаемые сейчас флуктуации реликтового фона представляют собой «фотографию» распределения неоднородностей температуры реликта в момент рекомбинации. До рекомбинации в первичной плазме, состоящей из фотонов, протонов и электронов, существовали акустические колебания, амплитуда которых для разных длин волн зависела от отношения числа барионов (масса осциллятора) к числу фотонов (упругость осциллятора). Зарегистрированные в целом ряде детекторов [1, 7] угловые вариации температуры как раз отвечают этим акустическим колебаниям перед стадией рекомбинации, и по отношению высот пиков в распределении температуры можно сделать тот же вывод, что  $\Omega_B \approx 0,05$ . Эти наблюдения чувствительны к барионной материи, распределенной на масштабах в несколько десятков мегапарсек, и не чувствительны на малых масштабах.

Заметим, что из этого 5 %-го вклада барионов в массу Вселенной примерно девять десятых все же невидимы, т. е. они не составляют ни светящиеся звезды, ни межзвездный или межгалактический газ, а где-то прячутся. Скорее всего, в ближайшее время эти невидимые барионы будут найдены.

На роль носителей небарионной темной материи претендует довольно большой ряд гипотетических объектов. Мы перечислим здесь лишь некоторые из них. Это в первую очередь легчайшие суперсимметричные частицы (LSP), которые должны быть стабильны при сохранении так называемой R-четности. Это сохранение приводит к тому, что в любом процессе число суперчастиц

минус число их античастиц сохраняется. Поэтому легчайшие суперчастицы не могут распадаться. Ожидаемая масса этих частиц в простейшем варианте низкоэнергетической суперсимметрии должна быть, грубо говоря, в интервале 100–1000 ГэВ. При этом весьма естественно получается, что их вклад в космологическую плотность был бы порядка единицы. В настоящее время идет активный поиск этих частиц как в низкофонных подземных детекторах, так и непосредственно на ускорителях, особенно на LHC в ЦЕРН. Имеются указания на обнаружение подобных частиц в детекторе DAMA/LIBRA [28] по годовой модуляции сигнала. Пока эти данные не подтверждены другими независимыми наблюдениями.

Второй по популярности гипотезой о частицах темной материи является аксион. Это частица с очень малой массой, около  $10^{-5}$  эВ. Она появляется в модели решения проблемы сильного нарушения  $CP$  в квантовой хромодинамике. Несмотря на малость массы, аксион оказывается нерелятивистской частицей при рождении и на всех более поздних космологических этапах и так же, как LSP, образует так называемую холодную скрытую материю. Для такой материи характерный размер формируемых астрономических структур гораздо меньше галактического, что делает их весьма привлекательными для объяснения наблюдаемой картины на масштабах галактик и их скоплений. Однако на меньших масштабах теория предсказывает слишком большие возмущения плотности, что противоречит наблюдениям. В частности, предсказывается количество галактических спутников, т. е. малых галактик, связанных с большими (типа нашего Млечного Пути), примерно на порядок больше наблюдаемого. Кроме того, теории с холодной темной материей приводят к слишком большой плотности в центральных областях галактик. Впрочем, пока не вполне ясно, являются ли упомянутые проблемы присущими именно холодной темной материи и успешно разрешаются с помощью теплой или же возникают вследствие неточности численного моделирования. Обсуждение этих вопросов можно найти, например, в обзорах [29] и приведенных там в списках литературы.

Противоположным примером является горячая темная материя, для которой флуктуации в плотности энергии замываются на масштабах порядка размера галактических сверхскоплений и всех меньших масштабах. Очевидным примером горячей темной материи является нейтрино. Горячая темная материя не может быть единственной формой темной материи, поскольку в ней структура образуется довольно поздно, когда частицы темной материи становятся нерелятивистскими. При этом вначале структура образуется на очень больших масштабах порядка галактических сверхскоплений, а более мелкие объекты, например галактики, образуются значительно позже за счет фрагментации крупных. В мире, где единственной формой темной материи оказывается горячая материя, галактики не успели бы образоваться к настоящему времени. В силу сказанного нейтрино не может быть единственной

частицей темной материи и могут понадобиться новые, пока не открытые элементарные частицы.

Промежуточный случай — это теплая скрытая материя, для которой характерный размер образования структуры порядка галактического. Такой частицей могли бы быть стерильные нейтрино, которые не принимают участия в обычных слабых взаимодействиях, а связаны с нашим миром лишь за счет перемешивания в массовой матрице нейтрино. Масса таких стерильных нейтрино должна быть порядка кэВ. Теории с теплой невидимой материей стали довольно популярными в последнее время из-за ряда проблем в описании деталей галактической структуры в моделях с холодной невидимой материей, упомянутых выше.

Повторим в заключение, что темная материя могла бы быть барионной, если бы эти барионы образовывали компактные звездоподобные объекты. В частности, не исключены первичные черные дыры, сформированные из барионов [30]. Ни первичный нуклеосинтез, ни угловые флуктуации микроволнового фона не будут чувствительны к таким плотно «упакованным» барионам, которых могло бы быть в пять раз больше, чем барионов в обычной форме.

Подчеркнем еще раз, что для любой формы темной материи, новых ли частиц или же компактных барионных образований, необходима новая физика вне рамок минимальной стандартной модели.

## 5. КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФЛЯЦИЯ

Осознание того, что на самой ранней стадии Вселенная расширялась экспоненциально, было, по-видимому, самым важным открытием в теоретической космологии во второй половине XX в. Существование экспоненциальной или, другими словами, инфляционной стадии позволило объяснить многие черты фридмановской космологии, казавшиеся ранее абсолютно непостижимыми.

Во-первых, инфляция объясняет, почему расширяется Вселенная. Действительно, нормальное гравитационное взаимодействие является притягивающим и, скорее, надо бы ожидать космологического сжатия, стягивающего всю Вселенную в сингулярную горячую и плотную «точку». Очевидно, жить в такой Вселенной не было бы никакой возможности. К счастью, мы видим обратную картину космологического расширения, причем, как мы уже отмечали, недавно было открыто, что и сейчас расширение идет ускоренно в антигравитационном режиме. Теперь-то мы понимаем, в чем тут дело. Подобное расширение могло быть реализовано, если материя во Вселенной имела отрицательное давление. Тогда, как видно из уравнения (9), в космологических масштабах должно быть гравитационное отталкивание и, следовательно, расширение. Отрицательное давление в кос-

мологии — вовсе не экзотика и естественно может быть реализовано скалярным полем. Его тензор энергии-импульса имеет вид (13). Если поле  $\phi$  мало менялось по пространству на масштабах тогдашнего космологического горизонта и имело бы место неравенство  $(\partial_\mu \phi)^2 \ll U(\phi)$ , то тензор энергии-импульса имел бы вакуумоподобную форму  $T_{\mu\nu} \sim g_{\mu\nu}$  и создавал необходимую для нашего существования антигравитацию, как уже было отмечено выше.

Наличие антигравитации на ранней стадии существования мира нам совершенно необходимо, но зачем нужна обсуждаемая в разд. 2 антигравитация в современную космологическую эпоху, пока остается тайной (разве что для того, чтобы спасти Вселенную от коллапса в весьма отдаленном будущем). Инфляционная модель предсказывает, что без темной энергии Вселенная обязательно бы схлопнулась. Дело в том, что инфляция приводит к тому, что космологическая плотность энергии должна быть экспоненциально близка к критической, т. е.  $\Omega_{\text{tot}} = 1$ . Однако из-за флуктуаций в плотности энергии параметр  $\Omega_{\text{tot}}$  на масштабе космологического горизонта может быть как больше, так и меньше единицы. Даже если  $\Omega_{\text{tot}} < 1$  внутри сегодняшнего горизонта, то надо помнить, что отклонение от единицы является хаотическим и на большем масштабе  $\Omega_{\text{tot}}$  может оказаться выше единицы. Ясно, что в конечном итоге вероятность этого приближается к единице с ростом масштаба. Поэтому этот большой кусок Вселенной окажется геометрически замкнутым. Он отделится от общего космологического расширения, и если он населен обычным веществом, то, как мы отмечали выше, он схлопнется назад к горячей сингулярности. Однако при наличии антигравитирующей темной энергии такая печальная судьба нам уже не грозит и расширение будет продолжаться вечно к все более холодному состоянию, что, впрочем, тоже печально. Хотя в последнем случае можно попытаться локально продлить жизнь за счет своих местных источников энергии, тогда как от ультравысокой температуры не спрячешься.

Инфляция не только объясняет происхождение первичного толчка, который привел к наблюдаемому расширению Вселенной, но и решает множество других проблем, которые казались совершенно неразрешимыми в традиционной фридмановской космологии.

Прежде всего это так называемая проблема горизонта. Мы сейчас наблюдаем области Вселенной, которые в старой фридмановской космологии никогда в прошлом не взаимодействовали бы друг с другом. Например, микроволновой фон, который приходит к нам с расстояний, отвечающих красному смещению  $10^3$ , т. е. от момента, когда Вселенная имела возраст всего 100 тысяч лет (а теперешний возраст примерно 13 млрд лет), имеет одинаковую температуру 2,7 К по всему небу. А с другой стороны, при обычном степенном (фридмановском) законе расширения области на небе, которые



разделены более чем на один градус, никогда не взаимодействовали друг с другом. Как же в таком случае они могут иметь совершенно одинаковую температуру, с точностью до угловых флуктуаций порядка  $10^{-5}$ ? Экспоненциальное (инфляционное) расширение легко создает одинаковые условия на космологических расстояниях, которые намного превышают теперешний видимый размер Вселенной.

Другим удивительным космологическим фактом является близость геометрии пространства к обычной евклидовой плоской геометрии, изучаемой в средней школе, хотя естественно ожидать, что пространство могло бы быть сильно искривлено. Численно кривизна трехмерного пространства в космологии характеризуется параметром  $\Omega = \rho/\rho_c$ , где  $\rho$  — полная плотность массы/энергии во Вселенной, а  $\rho_c = 3H^2 m_{\text{Pl}}^2/8\pi$  — так называемая критическая плотность. Если  $\Omega = 1$ , то пространство в среднем плоское, если  $\Omega > 1$ , то Вселенная пространственно замкнутая и выглядит, как трехмерная сфера в четырехмерном пространстве, а если  $\Omega < 1$ , то Вселенная открытая и выглядит, как трехмерный гиперboloид. К сожалению, мы не можем наглядно представить такие многомерные структуры, но легко формально описываем их математически. Согласно астрономическим измерениям, в настоящее время  $\Omega = 1,005 \pm 0,006$  [1]. При степенном законе космологического расширения параметр  $\Omega$  уходит все дальше от единицы, даже если исходно он был близок, но не равен единице. Чтобы получить наблюдаемое значение  $\Omega$  в современной Вселенной, его величина в ранней Вселенной должна быть близка к единице с потрясающей точностью. Например, в эпоху первичного нуклеосинтеза необходимо иметь  $|\Omega - 1| < 10^{-15}$ , а в момент «сотворения» мира с планковской плотностью энергии  $\rho \sim m_{\text{Pl}}^4$  начальное условие должно быть выбрано с совсем уж фантастической точностью:  $|\Omega - 1| < 10^{-60}$ , что выглядит очень неестественным. С другой стороны, при экспоненциальном законе расширения исходно отличное от единицы значение  $\Omega$  экспоненциально быстро (по времени) приближается к единице, динамически реализуя указанную выше точную настройку начальных значений.

Экспоненциальное расширение «разглаживает» Вселенную, делая ее все более и более однородной на больших масштабах. Это легко понять наглядно. Действительно, любое, даже большое, возмущение плотности  $\delta\rho/\rho \sim 1$  с длиной волны  $\lambda_0$  превратится в возмущение с экспоненциально большей длиной волны  $\lambda_i = \exp(H_i t_i)\lambda_0$ , где  $H_i$  — параметр Хаббла во время инфляции, а  $t_i$  — ее продолжительность. Очевидно, что на длинах волн  $\lambda \ll \lambda_i$  амплитуда возмущения будет экспоненциально подавлена.

Хотя инфляция и сильно сглаживает начальные возмущения плотности, одновременно она сама на конечной стадии создает малые возмущения на уровне  $\delta\rho/\rho \sim 10^{-5}$ . Генерация возмущений плотности происходит в результате усиления квантовых флуктуаций во внешнем космологическом гравита-

ционном поле и, что чрезвычайно важно и присуще только инфляции или близкому типу расширения, характерные длины волн этих возмущений становятся астрономически велики. Их спектр близок к так называемому плоскому спектру Харрисона–Зельдовича [31], который не содержит никакого размерного параметра в безразмерном гравитационном потенциале возмущения,  $\delta\Psi \sim dk/k$ . Инфляционная теория предсказывает небольшие отклонения от плоского спектра, которые подтверждаются астрономическими данными. Согласие предсказанного спектра с наблюдениями представляет собой сильнейший аргумент в пользу того, что на самой ранней стадии Вселенная расширялась экспоненциально.

Если ставить вехи в истории развития космологии XX в., то первым фундаментальным шагом было полученное Фридманом решение уравнений Эйнштейна, говорящее о расширении Вселенной, затем — формулировка Гамовым теории «горячей» Вселенной, возникшей в результате Большого взрыва (Big bang), и, наконец, инфляционная космология. Исторически первая работа, в которой экспоненциальное расширение Вселенной на ранней стадии было предложено для решения проблемы горизонта и однородности и изотропии Вселенной, принадлежит Казанасу [32]. Несколькими месяцами позже была опубликована знаменитая статья Гуса «Инфляционная космология. Возможное решение проблемы горизонта и плоскостности Вселенной» («Inflationary Universe: A Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems») [33], которая инициировала мощный поток статей, не иссякающий до сих пор. В сценариях обеих работ экспоненциальное расширение было вызвано вакуумоподобной энергией, существовавшей при сильно затянутом фазовом переходе первого рода в калибровочных теориях со спонтанно нарушенной симметрией. Однако вскоре было осознано, что основанный на этом механизм инфляции оказался неудовлетворительным, так как он приводит к сильно неоднородной Вселенной, состоящей из множества довольно малых пузырей, заполненных нормальным веществом, которые экспоненциально быстро разлетаются друг от друга в пустом пространстве, заполненном вакуумоподобной энергией, где фазовый переход не успел произойти.

Первая реалистическая модель инфляции была предложена Линде [34] и Альбрехтом со Штейнхардтом [35]. По-видимому, наиболее красивый механизм инфляции, так называемая хаотическая инфляция, принадлежит Линде [36]. Согласно этой гипотезе Вселенная «начиналась» с квантовой стадии, когда не существовали ни классическое пространство, ни время. Мир был заполнен квантовыми флуктуациями всех возможных полей. Существовала (и существует) ненулевая, возможно, очень малая вероятность, что какая-то флуктуация какого-то скалярного поля оказалась квазиоднородной на планковском масштабе. Тогда можно показать, что эта область начнет экспоненциально расширяться, пространство и время станут нормальными, классическими и в конце концов эта область вырастет до космологически

громдного размера, внутри которого будет находиться вся наша видимая Вселенная. В этой картине мега-Вселенная состоит из относительно небольшого числа громадных вселенных, подобных нашей, и вне их — из квантового пространства-времени относительно малого объема. Обзор этих и обсуждаемых ниже вопросов можно найти в работах [37].

Кроме отмеченных выше работ существует заметная «преинфляционная» литература. Идея о том, что Вселенная избежала сингулярного состояния, пройдя период экспоненциального расширения, во время которого масса космологического вещества выросла на десятки порядков величины, была рассмотрена в работах Глинера [38] и Глинера и Дымниковой [39]. Деситтеровская несингулярная космологическая модель (т.е. модель с экспоненциальным расширением) обсуждалась Гуровичем и Старобинским [40] и Старобинским [41]. В последней статье был получен очень важный результат, что во время начального экспоненциального режима возникают гравитационные волны, которые, возможно, удастся обнаружить в ближайшее время. Их обнаружение было бы одним из наиболее сильных «экспериментальных» указаний на первичную инфляцию.

Другое очень важное предсказание инфляционной космологии — это спектр первичных возмущений плотности. Оно замечательно согласуется с существующими астрономическими наблюдениями. Пионерская работа на эту тему была сделана Мухановым и Чибисовым [42]. Их результаты подтверждены многочисленными последующими исследованиями (см., например, обзоры [37]).

В работе Сато [43], написанной до классических работ по инфляции, было показано, что экспоненциальное расширение, которое могло бы возникнуть при затянутом фазовом переходе первого рода, никогда бы не закончилось для широкого диапазона значений параметров теории. Этот результат привел к серьезным трудностям первоначальных моделей инфляции. В другой своей работе [44] Сато также заметил, что относительно короткое экспоненциальное расширение могло бы при спонтанном нарушении зарядовой четности,  $CP$ , привести к возникновению во Вселенной астрономически значительных доменов антивещества.

Завершая этот раздел, отметим, что мы не смогли бы существовать без инфляции. Инфляция, если не единственная, то, по крайней мере, наиболее изящная теория, описывающая глобальные свойства Вселенной и делающая Вселенную пригодной для жизни. Инфляционная космология проверена не только качественно, но и количественно. Количественное предсказание формы спектра первичных возмущений хорошо согласуется с наблюдениями. Так что не будет преувеличением сказать, что сама инфляция — экспериментальный факт. И этот факт говорит о том, что должна быть новая физика за пределами стандартной теории элементарных частиц.

## 6. БАРИОСИНТЕЗ

После осознания того факта, что для каждой частицы существует античастица\* с равной массой, но противоположным знаком заряда, остро встал вопрос, почему весь мир вокруг нас состоит только из вещества. Ответ на этот фундаментальный вопрос был дан Сахаровым [45] в 1967 г. Им были сформулированы три условия динамической генерации избытка вещества над антивеществом в космологии:

1. Несохранение барионного числа.
2. Различие взаимодействий частиц и античастиц.
3. Отклонение от термодинамического равновесия.

(Заметим, что ни одно из этих условий не является абсолютно необходимым и возможны модели космологической генерации избытка частиц над античастицами, в которых какие-либо из этих условий не выполняются. Однако более простые, а значит, и более красивые теории требуют их выполнения.)

Обсудим эти условия немного подробнее.

1. Все имеющиеся экспериментальные данные говорят, что протон стабилен, хотя он и мог бы распадаться, например, на позитрон и фотон или по многим другим каналам, разрешенным квантовыми числами. Нейтрон распадается, и при его распаде всегда возникает протон. Для описания этих фактов было введено понятие барионного числа (или барионного заряда)  $B$ . Протону и нейтрону был приписан барионный заряд, равный  $+1$ , а их античастицам — равный  $-1$ . Предположение о сохранении  $B$  хорошо описывало все имеющиеся тогда, да и сейчас, экспериментальные данные.

Было принято считать, что наше существование доказывает стабильность протона, так как иначе атомные ядра и в нашем теле, и в окружающем мире все бы распались и жить было бы некому и негде.

Сахаров, однако, предположил, что барионное число не сохраняется, протон может быть нестабилен, но время жизни протона очень велико, значительно больше возраста Вселенной. По тем временам это была революционная гипотеза, ломающая устоявшиеся понятия. Впоследствии было показано теоретически, что барионное число может, и даже должно, не сохраняться. Поразительным образом последнее осуществляется, в частности, за счет электрослабых взаимодействий в рамках минимальной стандартной модели. Хотя классический лагранжиан теории сохраняет  $B$ , этот закон сохранения нарушается квантовыми поправками, возникающими вследствие так называемой киральной аномалии (квантовое несохранение аксиального тока) [46].

---

\*Точнее говоря, есть некие частицы, не обладающие никакими зарядами и в силу этого тождественные своим античастицам, например, фотон, гравитон или  $\pi^0$ -мезон.

Более того, в моделях унификации электрослабого и сильного взаимодействий [47], т.е. в моделях «великого объединения», в которых кварки и лептоны объединяются в одном мультиплете соответствующей группы симметрии, возможно превращение трех кварков в один лептон и, следовательно, барионный заряд также не сохраняется. Отметим, однако, существенную разницу между электрослабым несохранением  $B$  и несохранением  $B$  в моделях «великого объединения». В первом случае этот теоретический вывод опирается на хорошо установленную, проверенную на опыте теорию, тогда как само существование «великого объединения» остается под вопросом.

Как в электрослабой теории, так и в моделях «великого объединения» несохранение барионного числа чрезвычайно мало при низких энергиях и не противоречит экспериментальным данным по стабильности протона и атомных ядер, а также по превращению нейтрона в антинейтрон\*. Однако при высоких температурах в ранней Вселенной процессы с несохранением  $B$  могли быть не подавлены и привести к наблюдаемой сегодня космологической асимметрии между частицами и античастицами.

2. В течение длительного времени считалось, что свойства частиц и античастиц абсолютно тождественны. Иными словами, предполагалось, что физические законы не меняются при замене частиц на античастицы, т.е. при так называемом зарядовом или  $C$ -сопряжении. Эта вера покачнулась после открытия несохранения четности [48], когда было экспериментально доказано, что отраженные в зеркале процессы ( $P$ -сопряженные) отличаются от исходных. Одновременно было установлено, что природа также не инвариантна и относительно  $C$ -сопряжения, т.е. свойства частиц и античастиц несколько различны. Желание спасти симметрию привело к гипотезе  $CP$ -инвариантности [49], согласно которой физика не меняется при одновременной замене частиц на античастицы и зеркальном отражении. Однако и эта гипотеза прожила недолго. В 1964 г. было обнаружено [50], что зеркальное отражение не помогает,  $CP$ -инвариантность нарушается и частицы по-настоящему отличаются от античастиц. Толчком к работе Сахарова о барионной асимметрии Вселенной, по-видимому, было именно это открытие. Хочется сказать, что открытие нарушения  $CP$  сделало возможным возникновение жизни во Вселенной, так как при локально (не разнесенном далеко) равном количестве вещества и антивещества практически вся материя аннигилировала бы, не оставив для нас строительного материала.

---

\*Современные ограничения на время жизни протона и на время превращения нейтрона в антинейтрон составляют соответственно порядка  $\tau_p > 10^{33}$  и  $\tau_{n\bar{n}} > 10^8$  с [1]. Несмотря на столь большое различие, оба предела отвечают сравнимой по величине энергетической шкале этих процессов.

Стоит отметить, что для возникновения космологического избытка барионов недостаточно только нарушения зарядовой инвариантности  $C$ . Нужно нарушение и  $C$ , и  $CP$ . Если нарушается только  $C$ , а  $CP$  сохраняется, то дифференциальные вероятности процессов с частицами и античастицами могут быть различны, но полные вероятности, проинтегрированные по углам, будут одинаковыми, и никакого различия в количестве частиц и античастиц не возникнет.

Нередко задают вопрос: откуда известно, что предсказывает теория — избыток барионов или антибарионов? Ответ неизвестен, так как неизвестен знак амплитуды нарушения  $CP$  в процессах бариогенезиса. Но так как мы все же знаем, что в избытке получается материя, а не антиматерия, то можем сказать, какой знак  $CP$ -нечетной амплитуды необходим в каждой конкретной модели. Экспериментально известен знак  $CP$ -нарушения при низких энергиях в распадах  $K$ - и  $D$ -мезонов, но неизвестно, как эти процессы соотносятся с бариосинтезом.

Заметим в заключение, что в настоящее время установлено, что нарушается инвариантность относительно  $C$ -,  $P$ - и  $CP$ -преобразований, а также инвариантность относительно обращения времени,  $T$ -инвариантность. Скорее всего, остается ненарушенной комбинация всех трех этих преобразований,  $CPT$ . Основанием для этого служит  $CPT$ -теорема, которая верна в любой локальной лоренц-инвариантной теории поля с канонической связью спина и статистики. В силу  $CPT$ -теоремы массы частиц и античастиц и их времена жизни должны быть равны.

3. Необходимость отклонения от термодинамического равновесия для возникновения различия между количеством частиц и античастиц видна из того, что равновесное количество частиц определяется их температурой, массой и химическим потенциалом. В равновесии температуры частиц и античастиц одинаковы, химические потенциалы, отвечающие барионному числу, должны быть равны нулю в силу несохранения этого числа, а массы одинаковы в силу  $CPT$ -инвариантности. Поэтому равновесные плотности частиц и античастиц должны быть равны.

Горячая первичная плазма в ранней Вселенной находилась в состоянии, весьма близком к идеальному тепловому равновесию, так как темп расширения Вселенной

$$H \sim \frac{\sqrt{\rho}}{m_{\text{Pl}}} \sim \frac{T^2}{m_{\text{Pl}}} \quad (17)$$

был мал по сравнению с темпом реакций между частицами,  $\Gamma \sim \alpha T$ , где  $T$  — температура первичной плазмы, а  $\alpha \sim 10^{-2}$  — типичная величина константы связи, характеризующей силу взаимодействия. Можно показать, что отклонение от равновесия для частиц с массой  $m$  пропорционально отношению  $m/(\alpha m_{\text{Pl}})$ . Поэтому эффективная генерация барионной асимметрии возможна лишь при участии достаточно тяжелых частиц.

Другим источником нарушения равновесия мог бы быть затянутый фазовый переход первого рода при сосуществовании разных фаз в первичной плазме. Такое состояние аналогично состоянию кипящей воды, когда одновременно существуют две фазы: вода и пар. В таком случае отклонение от равновесия может быть весьма сильным.

Оба варианта нарушения теплового равновесия могли бы реализоваться в первичной плазме вполне естественным образом.

Для получения наблюдаемого сегодня избытка барионов над антибарионами последний должен быть весьма малым на ранней стадии, примерно один избыточный протон на миллиард протонов и антипротонов. Однако эти два миллиарда взаимно уничтожили друг друга и оставшаяся малая часть составила основу нашего мира. Обычно барионную асимметрию выражают в виде безразмерного отношения плотности барионного числа в единице объема к плотности фотонов в космологической плазме:

$$\beta = \frac{N_B - N_{\bar{B}}}{N_\gamma} \approx 6 \cdot 10^{-10}, \quad (18)$$

где  $N_B$  и  $N_{\bar{B}}$  — плотности барионного и антибарионного чисел соответственно, а  $N_\gamma$  — плотность числа фотонов. В настоящее время  $N_\gamma = 412 \text{ см}^{-3}$  — плотность числа фотонов микроволнового фона, а  $N_{\bar{B}} \ll N_B$ , по крайней мере в традиционных сценариях.

Заметим, что инфляция требует несохранения барионов [51], так как при сохраняющемся  $B$  плотность энергии  $\rho$  не может оставаться постоянной, в то время как для экспоненциального расширения необходимо примерное постоянство  $\rho$ . В этом смысле уместно утверждать, что несохранение  $B$  — экспериментальный факт, доказанный астрономией. Мы можем сказать сейчас, что наше существование требует несохранения барионов, что прямо противоположно точке зрения полувекковой давности, когда говорилось, что наше существование доказывает сохранение барионного числа.

А что будет с миром, когда распадутся протоны? Ранее мы опасались, что наша Вселенная закончит свое существование в горячем плотно сжатом состоянии, а теперь, когда темная энергия не даст Вселенной сжаться обратно к горячему сингулярному состоянию, все закончится холодным почти пустым миром с редкими электронами и позитронами. Сохранение электрического заряда  $Q$  не даст им распасться. Разумеется, можно поставить под сомнение и сохранение электрического заряда, но мы не знаем, как построить непротиворечивую теорию с несохранением  $Q$  при нулевой массе фотона. Кроме остаточных электронов и позитронов во Вселенной выживут черные дыры, но и они постепенно исчезнут за счет испарения. Однако этот процесс будет чрезвычайно медленным. К примеру, время жизни черной дыры солнечной массы относительно испарения должно превышать  $10^{65}$  лет, что намного дольше времени жизни протона в моделях «великого объединения», но все

же намного быстрее, чем распад протона в электрослабой теории, согласно которой вероятность распада экспоненциально мала,  $\sim \exp(-700)$ .

Все три условия Сахарова выполняются в минимальной стандартной модели физики элементарных частиц, однако бариосинтез в рамках этой модели чрезвычайно слаб и приводит к барионной асимметрии, по крайней мере, на десять порядков ниже наблюдаемой величины. Поэтому необходимо расширение стандартной модели с сопутствующей новой физикой. В литературе обсуждается большое количество механизмов бариогенезиса с новыми частицами и взаимодействиями, успешно объясняющих наблюдаемую барионную асимметрию Вселенной. В простейших версиях все модели говорят, что величина избытка барионов над антибарионами универсально постоянна по всей Вселенной, причем независимо от начальных условий.

К сожалению, не видно, как можно выбрать из этого множества моделей генерации барионной асимметрии единственно правильную по одному-единственному измеряемому числу — величине космологической барионной асимметрии  $\beta$  (уравнение (18)) или, другими словами, плотности барионного числа в единице объема.

Гораздо интереснее с точки зрения возможной проверки более сложные сценарии бариогенезиса, приводящие к неоднородной асимметрии  $\beta = \beta(x)$ . Хотя наблюдательные ограничения на пространственную вариацию  $\beta(x)$  довольно сильны, но все же остается значительная неисключенная и интересная для космологии область. Особенно интересны модели, где  $\beta(x)$  изменяет знак в каких-то «кусках» пространства, т. е. такие модели, которые предсказывают, что наряду с веществом во Вселенной существуют астрономически большие области, заселенные антивеществом. Согласно механизму, предложенному в работах [30], во Вселенной может быть большое количество антиматерии, сравнимое по величине с обычной материей и пока не исключенное наблюдениями, несмотря на то, что эта антиматерия может находиться у нас в Галактике, т. е. очень близко к нам по космическим меркам. Трудность обнаружения такого антивещества связана с тем, что, согласно теории, оно сосредоточено в компактных звездоподобных объектах. Анализу возможных проявлений антиматерии в нашей Галактике посвящена работа [52]. Поиск космологически значимого антивещества представляет весьма важную задачу для установления механизма бариогенезиса и в настоящее время активно ведется на существующих детекторах (BESS, PAMELA, AMS), а в разработке находятся еще более чувствительные инструменты (PEBS, GAPS).

## 7. НЕСКОЛЬКО СЛОВ О НОВОЙ ФИЗИКЕ

Мы уже отмечали, что многое из наблюдаемого на небе требует для своего объяснения новой физики. Но надо сказать, что новая физика может оказаться очень многоликой — от довольно мягкой модификации приня-



тых физических законов до революционных изменений, которые сейчас даже трудно представить. В общих чертах новая физика включает в себя:

1. Новые объекты, например, новые (стабильные) элементарные частицы.
2. Новые типы взаимодействий, отсутствующие в стандартной модели, где нам известны сильное (КХД), электрослабое и гравитационное взаимодействия. Возможно, для описания масс нейтрино и их осцилляций понадобится новый класс взаимодействия.
3. Нарушение установленных правил и законов сохранения.
4. Нарушение лоренц-инвариантности, *CPT*-теоремы, связи спина и статистики.
5. Отсутствие лагранжева или гамильтонова подхода к теории.
6. Новые принципы, например, отклонение от принципа наименьшего действия и нечто новое вместо него.

Начнем с наиболее простой и наиболее вероятной модификации, которую уместно назвать естественной новой физикой. Она включает практически неизбежное существование новых элементарных частиц, стабильных или очень долгоживущих, со временем жизни, сравнимым с возрастом Вселенной. Такие частицы являются наиболее естественными кандидатами на роль носителей темной материи. Они могут формировать как холодную, так и теплую темную материю. В первом случае эти частицы должны быть достаточно тяжелыми, чтобы в момент, когда их взаимодействие с первичной плазмой станет пренебрежимо мало, они были бы нерелятивистскими. Имеется, впрочем, популярный пример холодной темной материи, состоящей из очень легких элементарных частиц — аксионов, масса которых должна быть, грубо говоря, в 100 млрд раз меньше массы электрона. Аксионы являются холодными, так как в отличие от других частиц — кандидатов на роль носителей темной материи они никогда не были в тепловом равновесии с первичной плазмой и всегда были нерелятивистскими, несмотря на малость их массы. Другим примером носителей темной материи являются черные дыры, которые могли бы образоваться в ранней Вселенной. Их масса должна быть макроскопически велика, заметно выше  $10^{15}$  г, например,  $10^{20}$  г. В противном случае они бы испарились до нашего времени или во Вселенной оказалось бы непозволительно много продуктов их испарения. Из-за большой массы эти черные дыры всегда были нерелятивистскими.

Наиболее популярным кандидатом на роль частиц теплой темной материи является стерильное нейтрино с массой в кэВ-ном диапазоне. Эта частица не имеет обычного слабого взаимодействия и связана с нашим миром либо за счет перемешивания в массовой матрице обычных нейтрино, либо за счет каких-то новых сверхслабых взаимодействий.

Так или иначе, новые стабильные частицы, которые отсутствуют в стандартной модели, абсолютно необходимы. Первичные черные дыры не требуют

для своего создания новых частиц, но новая физика, скорее всего, необходима в процессах их формирования в ранней Вселенной.

Вполне естественным представляется нарушение законов сохранения многих зарядов или, что то же, квантовых чисел. Мы уже отмечали, что несохранение барионного числа, которое так долго казалось неизблемым, теперь — практически экспериментальный факт. Нейтринные осцилляции показывают, что не сохраняются индивидуальные лептонные квантовые числа: электронное, мюонное и тауонное. Пока неизвестно, нарушается ли сохранение полного лептонного числа, но мало кто в этом сомневается. По-видимому, невозможно нарушить сохранение электрического заряда из-за того, что фотон безмассовый, но даже и при ненулевой массе фотона не очевидно, что такое нарушение можно осуществить самосогласованным образом. Электродинамика с несохраняющимся током наталкивается на серьезные инфракрасные проблемы из-за малости разрешенной экспериментом величины массы фотона [53].

Интересно, что при любой сколь угодно малой массе фотона электрический заряд будет эффективно не сохраняться при поглощении его черными дырами. При строго безмассовом фотоне кулоновское поле электрического заряда, поглощенного черной дырой, остается снаружи черной дыры, и в этом смысле электрический заряд остается в нашем мире. Однако если фотон массивен, то заряд исчезнет в черной дыре без следа и, соответственно, в нашем мире заряд не будет сохраняться [54]. Можно сказать, что в результате при ненулевой массе фотона Вселенная может (должна!) быть в целом электрически заряжена. Известно, что величина электрического заряда Вселенной мала, но насколько мала, неизвестно, поскольку существующие в литературе ограничения на космологическую плотность электрического заряда, по-видимому, не точны, так как они существенно зависят от инфракрасного поведения теории, которое не было аккуратно учтено. Дело в том, что в теории с безмассовым фотоном электрическое поле в среде с постоянной плотностью заряда должно расти как первая степень расстояния, как это следует из уравнения Гаусса. Однако наличие заряженной среды привело бы к возникновению эффективной ненулевой массы фотона и возможному изменению поведения поля. Для массивных фотонов ограничение существенно зависит от массы фотона.

В число менее вероятных, но не безумных расширений стандартной модели можно включить существование топологических и нетопологических солитонов. К числу первых относятся объекты, возникающие при спонтанном нарушении симметрии теории, когда имеется более одного вакуумного состояния. Обзор по топологическим солитонам (или, что то же, топологическим дефектам) в космологии можно найти, например, в работах [51, 55]. Простейшими из них являются доменные стенки, разделяющие различные вакуумные состояния, при нарушении дискретной симметрии, например,  $CP$ .

Такие стенки должны иметь космологически большой размер и колоссальную поверхностную плотность энергии,  $\sigma \sim M^3$ , где  $M$  — масштаб нарушения калибровочной симметрии; в этой оценке опущена константа связи, которая может изменить результат на несколько (не много) порядков. Для теории «великого объединения» с  $M \sim 10^{15}$  ГэВ плотность массы доменной стенки составляет  $10^{49}$  г/см<sup>2</sup>. Даже для весьма низкого масштаба нарушения симметрии,  $M \sim 10^3$  ГэВ, масса на единицу площади будет  $10^{13}$  г/см<sup>2</sup>. Астрономические наблюдения исключают существование подобных доменных стенок, поскольку они разрушили бы наблюдаемую изотропию Вселенной [56].

Другим примером космологически больших топологических солитонов являются космические струны [57]. Они подобны известным вихревым структурам в сверхпроводниках. Струны гораздо менее «зловредны», чем доменные стенки, и могли бы приводить к генерации возмущений плотности на астрономических масштабах, что важно для образования структуры, или «работать» как гравитационные линзы. При довольно простой модификации теории струны могли бы быть сверхпроводящими и генерировать астрономически интересное радиоизлучение при движении в космических магнитных полях. К сожалению, никакие из этих весьма интересных эффектов до настоящего времени не обнаружены.

Упомянем еще точечные топологические дефекты — монополи. Они напоминают элементарные частицы, но с размером, который примерно в 100 раз больше их комптоновской длины волны, т. е. их обратной массы. В этом смысле монополи являются классическими, т. е. не квантовыми объектами. Особенно интересно, что при спонтанном нарушении симметрии в калибровочной теории, включающей электромагнетизм, такие топологические дефекты несут элементарный магнитный заряд, т. е. оказываются магнитными монополями [58], существование которых обсуждал еще Дирак.

Вполне возможным является наличие в природе новых, еще неизвестных сил, которые должны быть либо достаточно слабыми, либо иметь своим источником не обычные протоны, нейтроны и электроны, а какую-то иную материю. Иначе мы бы их давно наблюдали. Эти новые силы могли бы быть дальнедействующими, т. е. такими, как гравитационные или электрические силы, убывающие как квадрат расстояния до источника. Для этого необходимо существование новых безмассовых бозонных полей, т. е. полей с целым спином, которые вполне могут существовать в разумных модификациях существующей теории. Если такими переносчиками взаимодействия являются калибровочные бозоны неабелевой группы симметрии, то сила взаимодействия, как мы полагаем, будет расти с расстоянием (так сейчас объясняется невылетание кварков). В обычной теории взаимодействия кварков с глюонами (квантовой хромодинамике) эти силы действуют лишь на расстояниях порядка  $10^{-13}$  см. При попытке раздвинуть кварки дальше соединяющее их глюонное

поле рвется и на концах глюонной струны рождается кварк-антикварковая пара. Так что такое растущее с расстоянием дальное действие «работает» лишь на микроскопически малых расстояниях. Однако при небольшом изменении параметров теории разрыв струны мог бы происходить при макроскопически больших размерах [59]. Космологические приложения такой теории рассмотрены в работе [60]. Относительно недавний обзор по дальнедействующим силам содержится в [61].

К близкому классу относится модификация гравитации на больших расстояниях за счет добавления к обычному лагранжиану ОТО нелинейных по кривизне членов. При этом характер гравитационного (дально)действия на астрономически больших расстояниях может заметно измениться.

Возможно, весьма перспективным расширением стандартной модели является предположение, что число измерений пространства больше обычно предполагаемых трех. Предлагаемые модели с высшими размерностями можно разделить на две группы. Первая группа — это случай очень маленьких дополнительных измерений, и чтобы их «увидеть», нужны пока недоступные (или уже доступные на большом адронном коллайдере, LHC) энергии. Например, чтобы отличить одномерную линию от двумерной трубочки, надо осветить ее светом с длиной волны меньше радиуса этой трубочки. Значит, фотоны должны иметь достаточно большую энергию. Модели такого типа восходят к работам Калуцы и Кляйна в начале прошлого века [62].

Другой тип моделей — это модели с большими дополнительными измерениями, когда наше трехмерное пространство погружено в бесконечное пространство высшей размерности. Однако мы и все частицы, «живущие» в нашем трехмерном мире, не можем выбраться в высшие размерности по динамическим причинам, например, потому, что массы частиц на нашем трехмерном многообразии гораздо меньше, чем массы этих частиц в окружающем многомерном пространстве. В простейшем и наиболее изящном варианте мы живем на трехмерной доменной стенке, находящейся в пространстве высшей размерности, согласно пионерской работе [63]. Эта идея использовалась в большом количестве последующих работ. При этом высшие измерения могут быть как большими, так и малыми, но тем не менее гораздо больше, чем в варианте Калуцы–Кляйна.

В последние годы гипотеза о многомерном мире получила дальнейшее развитие. Большую популярность приобрела модель, согласно которой все (или почти все) частицы и поля живут в нашем трехмерном многообразии, а гравитация распространяется во всех высших измерениях [64]. Высшие измерения предполагаются компактными и значительно превосходящими планковскую шкалу,  $l_{Pl} = 1/m_{Pl} \sim 10^{-33}$  см. Главной в предлагаемой конструкции была идея сформулировать теорию, в которой характерный масштаб гравитации был бы не планковский, как обычно полагают, а тот же, что и масштаб электрослабого взаимодействия, т. е. порядка ТэВ. При этом характерный

радиус высших компактных измерений должен бы оказаться меньше или порядка микрона при двух дополнительных измерениях или значительно меньше микрона при большем количестве высших измерений. Теория предсказывает обильное рождение черных дыр с массой около 1 ТэВ, т. е.  $10^{-21}$  г, на LHC, но пока это яркое явление не наблюдается. Космологические и астрофизические приложения этой модели рассматриваются в работе [65]. В частности, бариогенезис может эффективно идти на электрослабой шкале, что невозможно в стандартной теории.

Высшие измерения не обязательно должны быть маленькими и/или компактными. Важна динамика, которая держит наши частицы в нашей Вселенной, чтобы не возникло немедленных противоречий с наблюдаемой картиной мира. Высшие измерения могут быть при этом либо плоскими, либо (сильно) искривленными за счет гравитации. Пионерскими работами на эту тему являются работы [66], а обзоры могут быть найдены в [67]. Эти расширения стандартной теории не очень хорошо определены и открывают большой простор фантазии теоретика.

Явления и объекты, рассмотренные в предыдущих разделах, скорее всего, не требуют кардинального изменения физических законов. Наверняка понадобится введение новых (стабильных?) частиц и новых типов взаимодействий, но все основополагающие принципы предполагаются неизменными. Возможное исключение составляет решение проблемы темной/вакуумной энергии. Тем не менее в этом разделе мы кратко обсудим некоторые революционные изменения «правил игры» и их роль в космологии.

В последнее время широко обсуждается возможное нарушение лоренц-инвариантности и, следовательно, модификации специальной теории относительности (СТО). Интересно, что астрономия сыграла очень важную положительную роль в установлении основополагающего принципа СТО — постоянства скорости света вне зависимости от движения наблюдателя, а теперь на нее же возлагаются надежды в поиске разрушения СТО.

Как отмечалось выше, все три дискретные симметрии —  $C$ ,  $P$  и  $T$  — оказались нарушенными — и в этом наше счастье, так как жизнь во Вселенной, где имеет место зарядовая,  $C$ , или комбинированная,  $CP$ , симметрия, была бы невозможна. Однако остается незыблемой симметрия относительно произведения всех трех преобразований,  $CPT$ . В отличие от каждого отдельного преобразования, инвариантность относительно  $CPT$  может быть строго доказана в обычной, т. е. локальной, лоренц-инвариантной квантовой теории поля с канонической связью спина со статистикой [68]. Последнее означает, что частицы с целым спином (бозоны) описываются симметричными по перестановке волновыми функциями, а частицы с полуцелым спином (фермионы), напротив, антисимметричны при перестановке. В литературе существует утверждение, что нарушение  $CPT$  автоматически приводит к нарушению лоренц-инвариантности [69]. По-видимому, это действительно имеет

место, если массы частиц и античастиц предполагать различными. Однако был предложен контрпример лоренц-инвариантного нарушения  $CPT$  [70] при сохранении  $C$ -инвариантности, когда массы частиц и античастиц оказываются равными. Более того, можно показать, что лоренц-инвариантное нарушение  $CPT$  при нарушении  $C$ , и  $CP$  оставляет массы частиц и античастиц равными. В теориях с разными массами частиц и античастиц возникает такое яркое явление, как несохранение электрического заряда [70], вопреки тому, что заряд, как известно, сохраняется с очень хорошей точностью. Это соображение, по-видимому, позволит получить более сильное ограничение на величину нарушения  $CPT$ , чем это следует из сравнения масс частиц и античастиц.

Более того, теория с неравными массами частиц и античастиц обладает целым рядом других патологических свойств и, скорее всего, не может быть разумным образом реализована. Так что можно думать, что поиск нарушения  $CPT$  по разности масс частиц и античастиц окажется, скорее всего, безрезультатным даже и при значительном нарушении  $CPT$ . Однако не исключено, что кроме нарушения  $CPT$  нарушается еще «много всякого», и тогда в таком патологическом мире не будет ничего невозможного, в том числе и неравенства масс. Заметим, что при нарушении  $CPT$  бариогенезис пойдет более эффективно, чем в  $CPT$ -инвариантной теории. При этом кинетика может заметно отличаться от канонической [71], в частности, обычные равновесные распределения могут заметно измениться.

Теорема о связи спина и статистики, упомянутая выше, стоит особняком среди других основополагающих принципов теории поля, которые мы обсуждаем в этом разделе. Дело в том, что обычно обсуждаемые симметрии могут быть немного нарушены без противоречия с опытом. В таком случае имеет смысл говорить о точности выполнения той или иной симметрии. Однако пока неизвестен последовательный теоретический способ описания маленького нарушения связи спина со статистикой. Здесь — либо все, либо ничего. Большое нарушение этой теоремы исключено экспериментом, и очень хотелось бы сформулировать теоретические рамки, в которые можно было бы втиснуть маленькое нарушение этой теоремы, и обсудить ограничения на величину этого нарушения. Однако до сих пор подобного формализма не найдено. Тем не менее феноменология нарушения (вне разумных теоретических рамок) довольно широко обсуждается. В частности, не исключено заметное нарушение соотношения между спином и статистикой для нейтрино [72]. Если бы нейтрино были бы частично бозонами, то они могли бы образовывать бозе-конденсат во Вселенной и представлять собой не только горячую, но и холодную темную материю. Возможно, это единственный способ «сделать» темную материю из известных элементарных частиц, правда, заплатив при этом нарушением одного из основополагающих принципов квантовой теории поля.

Большой интерес как с теоретической, так и с практической точки зрения представляет возможность нарушения закона сохранения энергии. Идея черпать энергию из «ничего» очень привлекательна, однако, похоже, не реализуема. Дело в том, что закон сохранения энергии тесно связан с установленной на опыте нулевой массой гравитона,  $m_g$ . Если энергия не сохраняется, а  $m_g = 0$ , то теория немедленно приводит к неприемлемой инфракрасной сингулярности. В рамках релятивистской теории гравитации, прекрасно описываемой общей теорией относительности, нет непрерывного предельного перехода от ненулевой  $m_g$  к  $m_g = 0$ . Следствия теории с  $m_g \neq 0$  и  $m_g = 0$  при сколь угодно малой  $m_g$  отличаются на конечную величину [73], исключенную наблюдениями. Поэтому для того чтобы нарушить закон сохранения энергии, надо ломать общую теорию относительности, а это непростая задача. Приходится, по крайней мере, нарушать лоренц-инвариантность, и вместо поразительно красивой теории, ОТО, возникают довольно безобразные конструкции. Тем не менее это направление интенсивно исследуется в последнее время, правда, не в связи с нарушением закона сохранения энергии, а в связи с возможностью получить массивный гравитон, и вероятно, что разумная модификация ОТО будет когда-нибудь найдена.

Когда заходит речь о новой физике, нередко возникает вопрос о машине времени. В пользу последней говорит тот факт, что ОТО допускает решения для пространства-времени с замкнутыми времениподобными траекториями, т.е. в таком пространстве можно бы путешествовать вспять (или вперед) по времени. Однако источники гравитационного поля, приводящие к подобному искривлению пространства, скорее всего, не могут быть реализованы с использованием нормальной материи. Здесь, тем не менее, надо отметить, что распространение света со скоростью, превышающей каноническую скорость света, возможно в самой обычной электродинамике во внешнем гравитационном поле. Действительно, если рассмотреть радиационную поправку за счет электронного треугольника к распространению фотона, например, в сферически-симметричном гравитационном поле (поле Шварцшильда), то одно из поляризационных состояний фотона будет идти нормально внутри канонического светового конуса, а другое состояние будет идти вне конуса, т.е. свет идет быстрее света [74]. Как показано в работах [75], этот эффект приводит к нарушению причинности. В настоящее время в литературе отсутствует согласие по поводу интерпретации этого эффекта.

Как возможный пример коренной ломки физических теорий рассматривается отказ от гамильтоновой или лагранжевой формулировки теории и нарушение принципа наименьшего действия. Все фундаментальные теории в настоящее время строятся на этом принципе, хотя совсем неясно, почему он универсально работает. С другой стороны, отказ от принципа наименьшего

действия потребует введения чего-то нового, но мы сейчас совершенно не представляем, чем же его можно заменить.

Завершая этот раздел о возможных будущих фундаментальных модификациях физики, надо отметить: вполне вероятно, что эта модификация будет чем-то совершенно новым, не содержащимся в упоминаемых выше возможностях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Заключая, отметим, что астрономические наблюдения однозначно говорят, что новая физика существует. Однако мы пока не можем с определенностью сказать, в чем же конкретно она состоит. Темная материя естественно описывается новыми элементарными частицами и, возможно, в этом отношении никаких революционных преобразований не потребуется. Это же справедливо для многих других физических явлений, о которых шла речь выше. Единственное, что может потребовать коренной ломки существующей теории, — это проблема вакуумной энергии. Но «лиха беда начало»: раз уж начали обсуждать серьезную модификацию физики, то процесс пошел просто вразнос. Все, что не запрещено опытом, разрешено. Ни один в прошлом священный принцип не остается более таковым. Все сейчас подвергается сомнению. Однако если от всего отказаться, то совершенно теряется предсказательная сила теории. Когда нет правил, то нет и физических законов, и мы можем открыть ящик Пандоры с совершенно непредсказуемыми результатами новых «беспринципных» физических теорий, для которых нет «ничего святого».

Нам пока неизвестен разумный вариант коренной ломки физики. И неизвестно, надо ли нам ее серьезно ломать. Существует ряд общих физических законов, которые очень экономно и красиво описывают природу. Правда, надо признать, что происхождение этих общих законов совершенно таинственно, но без них пока не удавалось добиться никакого заметного прогресса в описании природы. Возможно, тут уместно вспомнить Достоевского, сказавшего устами Ивана Карамазова: «Если бога нет, то все дозволено», и не стремиться разрушить все на свете.

Эта работа была поддержана грантом Правительства Российской Федерации № 11.G34.31.047.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nakamura K. et al. (Particle Data Group) // J. Phys. G. 2010. V. 37. P. 075021.*
2. *Hulse R. A., Taylor J. H. // Astrophys. J. 1975. V. 195. P. L51–L53.*
3. *Geraci A. A. et al. // Phys. Rev. D. 2008. V. 78. P. 022002.*



4. *Johnson W. N. et al.* // *Astrophys. J.* 1972. V. 172. P. L1;  
*Leventhal M., MacCallum C. J., Stang P. D.* // *Astrophys. J.* 1978. V. 225. P. L11;  
*Purcell W. R. et al.* // *Astrophys. J.* 1997. V. 491. P. 725;  
*Milne P. A. et al.* // *New Astron. Rev.* 2002. V. 46. P. 553;  
*Knodlseder J. et al.* // *Astron. Astrophys.* 2005. V. 441. P. 513;  
*Jean P. et al.* // *Astron. Astrophys.* 2006. V. 445. P. 579;  
*Weidenspointner G. et al.* // *Ibid.* V. 450. P. 1013.
5. *Adriani O. et al.* // *Nature.* 2009. V. 458. P. 607.
6. *Grasso D., Rubinstein H. R.* // *Phys. Rep.* 2001. V. 348. P. 163;  
*Dolgov A. D.* // Collection of Papers Dedicated to 70th Anniversary of S. G. Matinyan;  
hep-ph/0110293;  
*Widrow L. M.* // *Rev. Mod. Phys.* 2002. V. 74. P. 775;  
*Giovannini M.* // *Intern. J. Mod. Phys. D.* 2004. V. 13. P. 391.
7. *Bennett C. L. et al.* // *Astrophys. J. Suppl.* 2011. V. 192. P. 17.
8. *Eriksen H. K.* // *Astrophys. J.* 2004. V. 605. P. 14;  
*Hansen M. et al.* // *Phys. Rev. D.* 2011. V. 83. P. 103508.
9. *Friedmann A.* // *Z. Phys.* 1922. V. 10. P. 377;  
*Friedmann A.* // *Z. Phys.* 1924. V. 21. P. 326.
10. *Hubble E.* // *PNAS.* 1929. V. 15. P. 168;  
*Lemaître G.* // *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles. Sér. A.* 1927. V. 47.  
P. 49; English transl.: *MNRAS.* 1931. V. 91. P. 483;  
see also *Nussbaumer H., Bieri V.* arXiv:1107.2281v2 [physics.hist-ph].
11. *Perlmutter S. et al.* // *Nature.* 1998. V. 391. P. 51;  
*Schmidt B. P. et al.* // *Astrophys. J.* 1998. V. 507. P. 46.
12. *Capozziello S., Carloni S., Troisi A.* // *Recent Res. Dev. Astron. Astrophys.* 2003.  
V. 1. P. 625; astro-ph/0303041;  
*Carroll S. M. et al.* // *Phys. Rev. D.* 2004. V. 70. P. 043528; astro-ph/0306438;  
*Appleby S. A., Battye R. A., Starobinsky A. A.* // *JCAP.* 2010. V. 1006. P. 005;  
arXiv:0909.1737v2;  
*Nojiri S., Odintsov S.* arXiv:1011.0544v2.
13. *Dolgov A. D., Kawasaki M.* // *Phys. Lett. B.* 2003. V. 573. P. 1.
14. *Зельдович Я. Б.* // *УФН.* 1968. T. 95. C. 209.
15. *Гольфанг Ю. А., Лихтман Е. П.* // *Письма в ЖЭТФ.* 1971. T. 13. C. 452;  
*Волков Д. В., Акулов В. П.* // *Письма в ЖЭТФ.* 1972. T. 16. C. 621;  
*Wess J., Zumino B.* // *Phys. Lett.* 1974. V. 49. P. 52.
16. *Gell Mann M., Oakes R. J., Renner V.* // *Phys. Rev.* 1968. V. 175. P. 2195.
17. *Shifman M. A., Vainshtein A. I., Zakharov V. I.* // *Nucl. Phys. B.* 1978. V. 147. P. 385.
18. *Einstein A.* // *Sitzgsber. Preuss. Acad. Wiss.* 1918. V. 1. P. 142.
19. *de Sitter W.* // *Proc. Kon. Ned. Acad. Wet.* 1917. V. 20. P. 229;  
*Lemaître G.* // *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles.* 1927. V. 47. P. 49;  
*Lemaître G.* // *Nature.* 1931. V. 127. P. 706;  
*Eddington A. S.* // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1930. V. 90. P. 668.

20. *Linde A. D.* // Rep. Prog. Phys. 1984. V. 47. P. 925;  
*Weinberg S.* // Phys. Rev. Lett. 1987. V. 59. P. 2607;  
*Vilenkin A.* // Phys. Rev. Lett. 1995. V. 74. P. 846.
21. *Dolgov A. D.* The Very Early Universe / Ed.: G. Gibbons, S. W. Hawking, and S. T. Tiklos. Cambridge Univ. Press, 1982.
22. *Долгов А. Д.* // Письма в ЖЭТФ. 1985. Т. 41. С. 280;  
*Dolgov A. D.* // Phys. Rev. D. 1987. V. 55. P. 5881;  
*Emelyanov V., Klinkhamer F. R.* arXiv:1107.0961 [hep-th].
23. *Weinberg S.* // Rev. Mod. Phys. 1989. V. 61. P. 1;  
*Dolgov A. D.* // Proc. of the XXIV Rencontre de Moriond; Ser. «Moriond Astrophysics Meetings» / Eds.: J. Adouse and J. Tran Thanh Van. Les Arcs, France, 1989. P. 227;  
*Dolgov A. D.* // Fourth Paris Cosmology Colloquium / Eds.: H. J. De Vega and N. Sanchez. Singapore: World Sci., 1998. P. 61;  
*Binetruy P.* // Intern. J. Theor. Phys. 2000. V. 39. P. 1859. Lectures at Les Houches Summer School «The Early Universe» and Peyresq 4 Meeting, July 1999;  
*Sahni V., Starobinsky A.* // Intern. J. Mod. Phys. D. 2000. V. 9. P. 373;  
*Weinberg S.* Talk given at «Dark Matter 2000», Feb. 2000; astro-ph/0005265;  
*Fujii Y.* // Grav. Cosmol. 2000. V. 6. P. 107;  
*Vilenkin A.* Talks given at «The Dark Universe». Space Telescope Institute and PASCOS-2001, April 2001; hep-th/0106083;  
*Sahni V.* Invited review at «The Early Universe and Cosmological Observations: A Critical Review», UCT, Cape Town, July 2001; astro-ph/0202076;  
*Straumann N.* Invited lecture at the first «Séminaire Poincaré», Paris, March 2002; astro-ph/0203330;  
*Peebles P. J. E., Ratra B.* // Rev. Mod. Phys. 2003. V. 75. P. 559;  
*Kim J. E.* Talk presented at COSPA-03, Taipei, Taiwan, Nov. 13–15, 2003; hep-ph/0402043;  
*Burgess C. P.* Contribution to the Proc. of SUSY 2003, Univ. of Arizona, Tucson, AZ, USA, June 2003; hep-th/0402200.
24. *Oort J. H.* // Bull. Astron. Inst. Netherlands. 1932. V. 6. P. 249.
25. *Zwicky F.* // Helv. Phys. Acta. 1933. V. 6. P. 110.
26. *Einasto J., Kaasik A., Saar E.* // Nature. 1974. V. 250. P. 309;  
*Ostriker J. P., Peebles P. J. E., Yahil A.* // Astrophys. J. 1974. V. 193. P. L1.
27. *Persic M., Salucci P., Stel F.* // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 1996. V. 281. P. 27.
28. *Bernabei R. et al. (DAMA)* // Eur. Phys. J. C. 2008. V. 56. P. 333;  
*Bernabei R. et al.* // Eur. Phys. J. C. 2010. V. 67. P. 39.
29. *Boyarsky A., Ruchayskiy O., Shaposhnikov M.* // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 2009. V. 59. P. 191;  
*Perivolaropoulos L.* Invited talk at the «New Directions in Modern Cosmology» Workshop, Lorentz Center, Leiden, Sept. 2010; arXiv:1104.0539v1 [astro-ph.CO];  
*Clarkson C. et al.* Invited Key Issues Review // Rep. on Progress in Phys. (submitted); arXiv:1109.2314v1 [astro-ph.CO].

30. Dolgov A., Silk J. // Phys. Rev. D. 1993. V.47. P.4244;  
Dolgov A. D., Kawasaki M., Kevlishvili N. // Nucl. Phys. B. 2009. V. 807. P. 229.
31. Harrison E. R. // Phys. Rev. D. 1970. V. 1. P. 2726;  
Zeldovich Ya. B. // MNRAS. 1972. V. 160. P. 1.
32. Kazanas D. // Astrophys. J. 1980. V. 241. P. L59.
33. Guth A. H. // Phys. Rev. D. 1981. V. 23. P. 347.
34. Linde A. D. // Phys. Lett. B. 1982. V. 108. P. 389.
35. Albrecht A. J., Steinhardt P. J. // Phys. Rev. Lett. 1982. V. 48. P. 1220.
36. Linde A. D. // Phys. Lett. B. 1983. V. 129. P. 177.
37. Linde A. D. Particle Physics and Inflationary Cosmology. Chur, Switzerland: Harwood, 1990. Contemporary Concepts in Physics, 5; e-Print: hep-th/0503203;  
Kinney W. H. TASI Lectures on Inflation. e-Print: arXiv:0902.1529.
38. Глинер Е. Б. // ЖЭТФ. 1965. Т. 49. С. 542.
39. Глинер Е. Б. // Письма в Астрон. журн. 1975. Т. 1. С. 7.
40. Гурович В. Ц., Старобинский А. А. // ЖЭТФ. 1979. Т. 50. С. 844.
41. Старобинский А. А. // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 30. С. 682.
42. Муханов В. Ф., Чибисов Г. В. // Письма в ЖЭТФ. 1981. Т. 33. С. 549.
43. Sato K. // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 1981. V. 195. P. 467.
44. Sato K. // Phys. Lett. B. 1981. V. 99. P. 66.
45. Сахаров А. Д. // Письма в ЖЭТФ. 1967. Т. 5. С. 32.
46. 't Hooft G. // Phys. Rev. Lett. 1976. V. 37. P. 8; Phys. Rev. D. 1976. V. 14. P. 3432;  
Erratum // Phys. Rev. D. 1978. V. 18. P. 2199.
47. Pati J. C., Salam A. // Phys. Rev. D. 1974. V. 10. P. 275;  
Georgi H., Glashow S. L. // Phys. Rev. Lett. 1974. V. 32. P. 438.
48. Lee T. D., Yang C.-N. // Phys. Rev. 1956. V. 104. P. 254;  
Wu C. S. et al. // Phys. Rev. 1957. V. 105. P. 1413.
49. Landau L. D. // Nucl. Phys. 1957. V. 3. P. 127.
50. Christenson J. H. et al. // Phys. Rev. Lett. 1964. V. 13. P. 138.
51. Dolgov A. D. // Phys. Rep. 1992. V. 222, No. 6.
52. Vambi C., Dolgov A. D. // Nucl. Phys. B. 2007. V. 784. P. 132.
53. Волошин М. Б., Окунь Л. Б. // Письма в ЖЭТФ. 1978. Т. 28. С. 156;  
Okun L. B., Zeldovich Y. B. // Phys. Lett. B. 1978. V. 78. P. 597.
54. Vilenkin A. // Phys. Rev. D. 1979. V. 20. P. 373;  
Leaute B., Linet B. // Gen. Rel. Grav. 1985. V. 17. P. 783;  
Dolgov A. D., Maeda H., Torii T. WU-AP-154-02. Oct. 2002; hep-ph/0210267;  
Dolgov A., Pelliccia D. N. // Phys. Lett. B. 2007. V. 650. P. 97.

55. *Vilenkin A.* // Phys. Rep. 1985. V. 121. P. 263;  
*Vilenkin A., Shellard E. P. S.* Cosmic Strings and Other Topological Defects. Cambridge Monographs on Math. Phys. 2000.
56. *Зельдович Я. Б., Кобзарев И. Ю., Окунь Л. Б.* // ЖЭТФ. 1974. Т. 67. С. 3.
57. *Nielsen H. B., Olesen P.* // Nucl. Phys. B. 1973. V. 61. P. 45.
58. *Поляков А. М.* // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т. 20. С. 194;  
*'t Hooft G.* // Nucl. Phys. B. 1974. V. 79. P. 276.
59. *Okun L. B.* // Nucl. Phys. B. 1980. V. 173. P. 1.
60. *Долгов А. Д.* // ЯФ. 1980. Т. 31. С. 1522.
61. *Dolgov A. D.* // Phys. Rep. 1999. V. 320. P. 1.
62. *Kaluza M.* // Sitzungsberichte Preußische Akademie der Wissenschaften. 1921. V. 96. P. 69;  
*Klein O.* // Z. Phys. 1926. V. 37. P. 895.
63. *Rubakov V. A., Shaposhnikov M. E.* // Phys. Lett. B. 1983. V. 125. P. 136.
64. *Arkani-Hamed N., Dimopoulos S., Dvali G.* // Phys. Lett. B. 1998. V. 429. P. 263.
65. *Dvali G. R., Gabadadze G.* // Phys. Lett. B. 1999. V. 460. P. 47;  
*Bambi C., Dolgov A. D., Freese K.* // JCAP. 2007. V. 0704. P. 005.
66. *Gogberashvili M.* // Intern. J. Mod. Phys. D. 2002. V. 11. P. 1635; hep-ph/9812296; Europhys. Lett. 2000. V. 49. P. 396; hep-ph/9812365; Intern. J. Mod. Phys. D. 2002. V. 11. P. 1639; hep-ph/9908347;  
*Randall L., Sundrum R.* // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 83. P. 3370; hep-ph/9905221; Phys. Rev. Lett. 1999. V. 83. P. 4690; hep-ph/9906064.
67. *Рубаков В. А.* // УФН. 2001. Т. 171. С. 913; arXiv:hep-ph/0104152;  
*Gabadadze G.* ICTP Lectures on Large Extra Dimensions. arXiv:hep-ph/0308112;  
*Csaki C.* TASI Lectures on Extra Dimensions and Branes. e-Print: hep-ph/0404096;  
*Csaki C., Hubisz J., Meade P.* TASI Lectures on Electroweak Symmetry Breaking from Extra Dimensions. e-Print: hep-ph/0510275.
68. *Lüders G.* // Det. Kong. Danske Videnskabernes Selskab. Mat.-fys. Medd. 1954. V. 28. No. 5; Ann. Phys. 1957. V. 2. P. 1;  
*Schwinger J.* // Phys. Rev. 1954. V. 82. P. 914;  
*Pauli W.* // Niels Bohr and the Development of Physics. N. Y.: McGraw-Hill, 1955. P. 30–51;  
*Jost R.* // Helv. Phys. Acta. 1957. V. 30. P. 409;  
*Jost R.* Theoretical Physics in the Twentieth Century. N. Y.: Intersci., 1960;  
*Streater R. F., Wightman A. S.* PCT, Spin, Statistics, and All That. N. Y.: Benjamin, 1964;  
*Bogoliubov N. N., Logunov A. A., Todorov I. T.* Introduction to Axiomatic Quantum Field Theory. Reading: Benjamin, 1975.
69. *Greenberg O. W.* // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 89. P. 231602.
70. *Chaichian M. et al.* // Phys. Lett. B. 2011. V. 699. P. 177.

71. Долгов А. Д. // ЯФ. 2010. Т. 73. С. 614.
72. Dolgov A. D., Smirnov A. Yu. // Phys. Lett. B. 2005. V. 621. P. 1.
73. van Dam H., Veltman M. G. // Nucl. Phys. B. 1970. V. 22. P. 397;  
Захаров В. И. // Письма в ЖЭТФ. 1970. Т. 12. С. 447.
74. Drummond I. T., Hathrell S. J. // Phys. Rev. D. 1980. V. 22. P. 343.
75. Dolgov A. D., Novikov I. D. // Phys. Lett. B. 1998. V. 442. P. 82;  
Akhoury R., Dolgov A. D. e-Print: arXiv:1003.6110.