

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ И.Я. ПОМЕРАНЧУКА

Космология: от Померанчука до наших дней

А.Д. Долгов

Приведён краткий и по недостатку времени (полвека развития науки за полчаса доклада, положенного в основу этой статьи, на семинаре ИТЭФ) поверхностный обзор развития космологии для физиков, занимающихся элементарными частицами. Вводная историческая часть в значительной степени посвящена фундаментальным трудам, сделанным в России (СССР), не всегда хорошо известным за пределами страны. Обсуждаются основополагающие работы и результаты астрономических наблюдений, определившие развитие космологии за прошедшие полвека, а также проблемы космологии, такие как инфляция, бариосинтез, тёмная материя и тёмная энергия, энергия вакуума, модификация гравитации на больших масштабах и угловые флуктуации микроволнового фона. Изложение материала, возможно, не вполне объективно, скорее это представление о космологии, как она видится из России (или из ИТЭФ), отражающее мнение и личные пристрастия автора.

PACS numbers: 95.35.+d, 95.36.+x, 98.80.-k

DOI: 10.3367/UFNr.0184.201402k.0211

Содержание

1. Введение. Немного истории (211).
2. Современная Вселенная (212).
3. Инфляция (214).
4. Стандартная космологическая модель (215).
 - 4.1. Инфляционная стадия.
 - 4.2. Большой взрыв.
 - 4.3. Бариогенез и антиматерия.
 - 4.4. Первичный нуклеосинтез.
 - 4.5. Рекомбинация водорода и микроволновый фон.
 - 4.6. Формирование крупномасштабной структуры Вселенной.
5. Тёмная материя (217).
6. Тёмная энергия или модифицированная гравитация? (218).
7. Заключение (219).

Список литературы (220).

1. Введение. Немного истории

Чуть более полувека назад космология была "падчерией" в добродорожном семействе физических наук.

А.Д. Долгов. Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова 2, 630090 Новосибирск, Российская Федерация; Государственный научный центр Российской Федерации "Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова", ул. Б. Черёмушкинская 25, 117218 Москва, Российская Федерация
E-mail: dolgov@fe.infn.it

Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara Polo Scientifico e Tecnologico – Edificio C, Via Saragat 1, 44122 Ferrara, Italy;
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Sezione di Ferrara Polo Scientifico e Tecnologico – Edificio C, Via Saragat 1, 44122 Ferrara, Italy

Статья поступила 13 ноября 2013 г.

Известно насмешливое высказывание о ней Л.Д. Ландау: "Всегда ошибается, но никогда не сомневается", — которое автор данной статьи слышал от Я.Б. Зельдовича. Тем не менее именно в те времена были сделаны многие замечательные работы, вошедшие в золотой фонд современной космологии. Конечно, в связи с теорией горячей Вселенной (или с космологией Большого взрыва) нельзя не упомянуть имён Фридмана [1, 2], который на основе уравнений Эйнштейна предсказал расширение Вселенной, впоследствии открытное Леметром [3] (см. также [4]) и Хабблом [5], и, конечно, Гамова [6], которого можно назвать отцом космологии Большого взрыва.

Возвращаясь к более близким временам, надо вспомнить работы Зельдовича [7, 8] 1965 г., в которых впервые была вычислена закалка (в англоязычной литературе — "freezing" (замерзание)) концентрации массивных стабильных частиц в космологии и было выведено уравнение, в настоящее время служащее основой для вычисления плотности частиц тёмной материи во Вселенной. Двенадцатью годами позднее это уравнение было использовано для вычисления космологической концентрации тяжёлых нейтральных лептонов [9, 10] и не вполне справедливо получило название уравнения Ли и Вайнберга.

ПIONерская работа Кобзарева, Окуни и Померанчука [11] о возможных частцах зеркальной тёмной материи была создана примерно в то же время, в 1966 г., задолго до того, как тёмная материя стала одной из самых популярных тем в космологии и физике элементарных частиц.

В том же 1966 г. была опубликована статья Герштейна и Зельдовича о космологическом ограничении на массу нейтрино [12]. Надо сказать, что отношение научной

общественности к этому результату было довольно скептическим, вполне в духе высказывания Ландау, приведённого выше. Однако сейчас общепризнано, что наиболее точным прибором для измерения массы нейтрино является телескоп (см. раздел 2). Работа Герштейна и Зельдовича была повторена шестью годами позднее Каусиком и Мак-Клелланом [13], однако авторы [13] сделали две существенные ошибки, которые привели к усилению результата примерно в семь раз. Тем не менее космологическое ограничение на массу нейтрино долгое время называлось ограничением Каусика – Мак-Клелланда, что совершенно несправедливо.

Годом позднее, в 1967 г., Сахаров [14] предложил замечательный механизм объяснения барионной асимметрии Вселенной, т.е. наблюдаемого во Вселенной преобладания вещества над антивеществом, сформулировав три достаточных для этого условия: 1) нарушение C - и CP -инвариантности; 2) отклонение от термодинамического равновесия в первичной плазме; 3) несохранение барионного числа. Если первые два условия уже тогда не вызывали сомнений, то в несохранение барионов почти никто не верил. Сейчас, однако, это практически экспериментальный факт, доказанный астрономами.

До 1965 г. среди российских космологов преобладала точка зрения, что справедлива холодная модель Вселенной, что объяснялось доминирующим влиянием Зельдовича. Ситуация изменилась после открытия реликтового, или фонового космического микроволнового излучения (Cosmic Microwave Background Radiation — CMB), сделанного Пензиасом и Вильсоном [15], которые обнаружили это излучение случайно, работая с 6-метровой антенной конструируемого радиотелескопа. За несколько лет до этого открытия, в 1957 г., Т.А. Тер-Шмаонов [16] обнаружил аналогичное излучение, хотя и с худшей точностью, занимаясь калибровкой антенн для гигантского радиотелескопа РАТАН-600 (РАТАН — сокращение от Радиотелескоп Академии наук). Важность этого результата не была оценена из-за непопулярности в СССР модели горячей Вселенной. Тем не менее именно в СССР Дорошкевичем и Новиковым [17] была опубликована примерно за полгода до открытия Пензиаса и Вильсона первая работа о возможности наблюдения реликтового фона, в которой было указано, в какой области спектра космического электромагнитного излучения условия для наблюдения СМВ наиболее благоприятны. И разумеется, не следует забывать Гамова [6], который предсказал существование микроволнового фона, приходящего к нам от ранней горячей стадии эволюции Вселенной. (См. также опубликованный в УФН исторический обзор [18].)

Частотный спектр микроволнового фона с прекрасной точностью, около 10^{-4} , является равновесным спектром Бозе – Эйнштейна:

$$f = \left(\exp \frac{\omega}{T} - 1 \right)^{-1} \quad (1.1)$$

с температурой $T = 2,7260 \pm 0,0013$ К и почти нулевым химическим потенциалом, $\mu/T < 10^{-4}$. Температура излучения, приходящего с разных участков неба, оказывается почти идеально одинаковой, и это до 1980-х годов являлось одной из величайших загадок космологии, так как участки небесной сферы, разделённые более чем

одним градусом, в обычной фридмановской космологии никогда ничего не знали друг о друге (см. обсуждение инфляционной теории в разделе 3).

Однако это унылое совершенство чуть-чуть нарушило: очень малые угловые флуктуации температуры δT должны существовать, и они действительно наблюдаются. Дело в том, что Вселенная в настоящее время заметно неоднородна. В ней наблюдаются звёзды, галактики, их скопления и сверхскопления. Всё это не может развиться из идеально однородного мира. Должны быть небольшие, но не нулевые неоднородности плотности, и эти неоднородности должны быть запечатлены в угловых флуктуациях температуры микроволнового фона.

Первые результаты по измерению δT появились в начале 1990-х годов [19]. Согласно этим измерениям $\delta T/T = 10^{-4} - 10^{-5}$ в различных интервалах частот. В несколько более ранней работе, выполненной на российском спутнике "Реликт" [20], была измерена лишь квадрупольная анизотропия, к сожалению, с довольно большой ошибкой, $6,6 \times 10^{-6} < \delta T_2/T < 3,3 \times 10^{-5}$.

Интересно отметить, что в то время, когда планировались эксперименты по измерению угловых флуктуаций микроволнового фона, считалось, что эти флуктуации должны быть существенно больше, чем те, которые впоследствии были обнаружены. Это действительно имело бы место во Вселенной без тёмной материи (Dark Matter — DM). Доминирующее присутствие DM во Вселенной позволило иметь существенно меньшее значение $\delta T/T$. Если бы это было известно заранее, то, возможно, поиск флуктуаций температуры был бы отложен до лучших времён. Так неверные теоретические ожидания иной раз стимулируют развитие эксперимента.

2. Современная Вселенная

К настоящему времени накоплено множество измерений $\delta T/T$ на воздушных шарах и на спутниковом детекторе WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) (рис. 1).

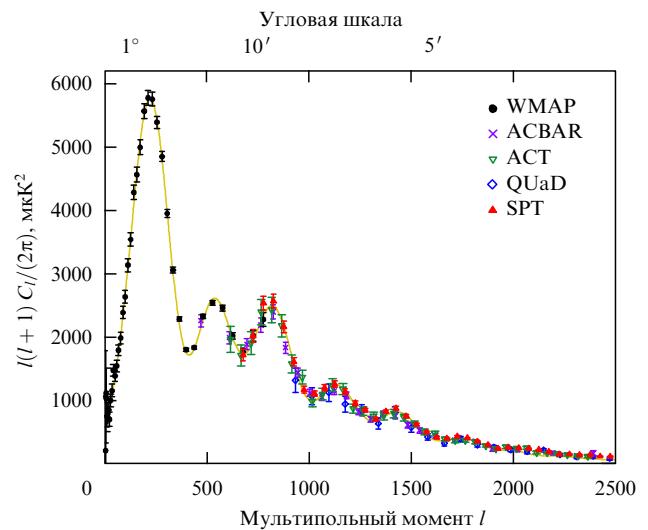


Рис. 1. Данные по измерению флуктуаций температуры микроволнового фона до получения результатов телескопа Planck. C_l — амплитуда квадрата флуктуации δT при функции Лежандра с номером l . ACBAR — Arcminute Cosmology Bolometer Array Receiver; ACT — Advanced Communications Technology satellite; QUaD — QUEST (Q and U Extra-Galactic Sub-mm Telescope) at DASI (Degree Angular Scale Interferometer); SPT — Satellite Positioning Technology.

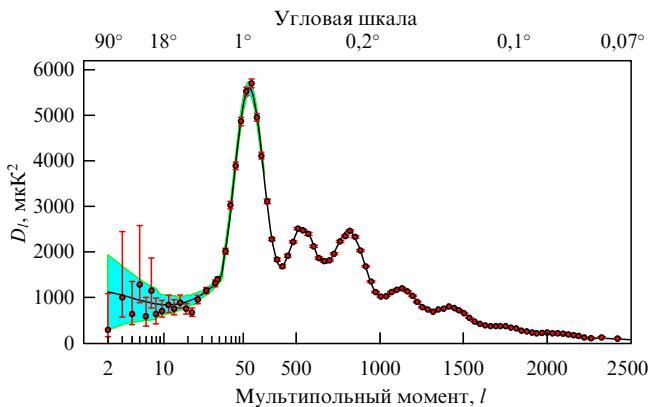


Рис. 2. Спектр флуктуаций микроволнового фона согласно измерениям космической обсерватории Planck. $D_l = C_l/(l+1)/(2\pi)$.

Недавно были опубликованы данные измерений на космическом телескопе Planck (рис. 2), которые значительно превосходят по точности предыдущие измерения. Анализ спектра угловых флуктуаций СМВ позволяет определить космологические параметры с беспрецедентно высокой точностью. Измерение флуктуаций температуры СМВ окончательно закрепило переход космологии в "клуб" точных наук.

Возвращаясь к точности измерений 1960-х годов, вспомним, что параметр Хаббла тогда был известен с точностью "двойка": $H = 50 - 100 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$. Отношение числа барионов к числу фотонов было известно и того хуже: $N_B/N_\gamma = 10^{-9 \pm 1}$. В связи с этим вспоминается ядовитое высказывание одного известного физика во время моего доклада о барионной асимметрии на семинаре Института теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ): "Что это за наука, где ошибка входит в показатель степени?" В те далёкие времена все верили, что наше обычное барионное вещество вносит практически 100%-ный вклад в массу Вселенной. Первые данные о тёмной материи, поколебавшие эту веру, появились лишь в 1974 г. [21, 22], хотя за 40 лет до них уже были серьёзные указания, чтобы полагать, что это далеко не так [23, 24].

Сейчас почти никто не сомневается, что барионы составляют лишь ничтожные 5% от всей материи, а форма основной части вещества, составляющего 95% массы Вселенной, нам неизвестна. Эта неизвестная часть в свою очередь делится на две части: тёмную материю (примерно 25%) и тёмную энергию (примерно 70%). Возможные формы тёмной материи не вызывают особых сомнений. Например, это могут быть пока неизвестные элементарные частицы, компактные звездоподобные объекты или чёрные дыры, но в любом случае они должны иметь обычное гравитационное взаимодействие. Что касается тёмной энергии (Dark Energy — DE), то это загадочная субстанция, про которую мы знаем лишь то, что она приводит к ускоренному расширению Вселенной и в этом смысле является антигравитирующей. В основном рассматриваются два источника этого космологического ускорения: лёгкое скалярное поле или модификация гравитационного взаимодействия на больших расстояниях. К их обсуждению мы вернёмся в разделах 3–6.

Долю плотности энергии той или иной формы материи ρ_j в космологии выражают в виде безразмерного параметра, $\Omega_j = \rho_j/\rho_c$, где ρ_c — так называемая

критическая плотность энергии, определяемая из первого уравнения Фридмана

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi \rho_{\text{tot}}}{3m_{\text{Pl}}^2} - \frac{k}{a^2} \quad (2.1)$$

при $k = 0$, где k — постоянная; обычно принимается: $k = 1$ (замкнутая Вселенная), или $k = -1$ (открытая, "кривая" Вселенная), или $k = 0$ (открытая, плоская Вселенная); $a(t)$ — масштабный фактор, характеризующий расширение мира, ρ_{tot} — средняя полная космологическая плотность энергии.

Согласно современным комбинированным данным разных типов измерений параметр Хаббла известен с точностью около 2 %: $H = 67,3 \pm 1,2 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ (точность измерений H на основе одних лишь данных Planck немного хуже (см. ниже)). По известной величине H можно получить весьма точное значение критической плотности энергии:

$$\rho_c = \frac{3H^2 m_{\text{Pl}}^2}{8\pi} = 0,85 \times 10^{-29} \text{ г см}^{-3}. \quad (2.2)$$

Отношение $\Omega_{\text{tot}} = \rho_{\text{tot}}/\rho_c$, как было фактически сказано выше, определяет геометрию Вселенной. Если $\Omega_{\text{tot}} > 1$, то Вселенная является замкнутой и имеет геометрию трёхмерной сферы. При $\Omega_{\text{tot}} < 1$ Вселенная открытая с геометрией трёхмерного гиперболоида. В специальном, на первый взгляд, маловероятном, случае $\Omega_{\text{tot}} = 1$ Вселенная имеет обычную плоскую евклидову геометрию. Поразительно, что именно этот вариант реализуется в природе. Согласно имеющимся данным, $\Omega_{\text{tot}} = 1,00 \pm 0,02$. Теория предсказывает, что $\Omega_{\text{tot}} = 1$ с гораздо более высокой точностью, на уровне 10^{-4} .

Ранее считалось, что судьба Вселенной однозначно связана с геометрией: открытая Вселенная, в том числе плоская, будет расширяться вечно, а расширение замкнутой Вселенной сменится сжатием. Действительно, в силу того что плотность энергии обычной материи убывает быстрее, чем $1/a^2$, из уравнения (2.1) следует, что для замкнутой Вселенной H в конце концов обращается в нуль, а для открытой Вселенной всегда будет больше нуля, стремясь к нулю лишь асимптотически. Однако наличие тёмной энергии нарушает эту связь, и независимо от своей геометрии Вселенная будет расширяться вечно, если только в далёком будущем не изменится уравнение состояния тёмной энергии. Обычно предполагается справедливость линейного уравнения состояния (т.е. связи плотностей давления и энергии)

$$P = w\rho, \quad (2.3)$$

где w — постоянный параметр, различный для разных форм материи; так, например, для нерелятивистского вещества $w_{\text{nr}} = 0$, а для релятивистского — $w_{\text{rel}} = 1/3$. Согласно имеющимся данным, для тёмной энергии $w_{\text{DE}} = -1,13^{+0,13}_{-0,10}$.

Если посмотреть на второе уравнение Фридмана,

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G_N}{3} (\rho + 3P), \quad (2.4)$$

то можно сделать вывод, что при $w < -1/3$ космологическое ускорение окажется положительным, как и показывают современные астрономические данные. Можно

считать установленным, что Вселенная ускоренно расширялась на самой ранней стадии, во время так называемой инфляции. Этот первоначальный толчок привёл к созданию нашей большой, пригодной для жизни Вселенной. Антигравитация, создаваемая отрицательным давлением, необходима для жизни. В мире, где управляла бы ньютоновская теория, в которой гравитирует лишь положительно определённая масса, а значит, в ней нет антигравитации, жизнь была бы невозможна.

Здесь уместно сделать два замечания. Во-первых, даже в общей теории относительности (ОТО) антигравитация возникает лишь для бесконечных систем; любой конечный объект всегда гравитирует. Во-вторых, космологическое ускорение может возникать в результате модификации ОТО (см. раздел 6), а тогда возможна антигравитация и для систем с конечным размером [25].

Измерения, проделанные на космическом аппарате (КА) Planck, дают следующие значения основных космологических параметров:

$$H = 67,9 \pm 1,5 \quad (71,0 \pm 2,5) \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}, \quad (2.5)$$

$$\Omega_b = 4,9 \% \quad (4,5 \%), \quad (2.6)$$

$$\Omega_{DM} = 26,8 \% \quad (22,7 \%), \quad (2.7)$$

$$\Omega_{DE} = 68,3 \% \quad (72,8 \%), \quad (2.8)$$

где в скобках указаны значения соответствующих параметров, которые были приняты до появления данных КА Planck.

Близость по величине приведённых значений Ω для абсолютно разных форм материи является собой так называемую проблему *космического заговора* (*cosmic conspiracy*). Действительно, согласно современному представлению, плотности барионов, тёмной материи и тёмной энергии не связаны между собой и могли бы различаться на несколько порядков. Причина их близости пока не ясна.

Интересно отметить, что в не столь давние времена наиболее точным способом определения полного количества барионной материи во Вселенной был анализ первичного нуклеосинтеза (см. раздел 4). Сейчас микроволновый фон даёт соглашающееся с нуклеосинтезом, но более точное значение. Непосредственно наблюдается менее 10 % барионов из этих 0,05, а где прячутся остальные, пока не ясно.

Кроме барионов, тёмной материи и тёмной энергии, во Вселенной живут фотоны микроволнового фона с $\Omega_{CMB} = 4,8 \times 10^{-5}$ и нейтрино, для плотности которых известна верхняя, $\Omega_v < 5 \times 10^{-3}$, и нижняя, $\Omega_v > 10^{-3}$, границы. Последнее ограничение следует не из астрономии, а из того, что нейтринные осцилляции определяют разность масс нейтрино, $\Delta m^2 = 0,0024 \text{ эВ}^2$, а космология позволяет вычислить плотность нейтрино во Вселенной: $n_v = 112 \text{ см}^{-3}$.

Одним из наиболее впечатляющих результатов КА Planck является чрезвычайно сильное ограничение сверху на массу нейтрино:

$$\sum m_v < 0,23 \text{ эВ}, \quad (2.9)$$

где сумма берётся по трём известным типам нейтрино. С учётом малых разностей масс нейтрино получается, что масса любого типа нейтрино не превосходит 0,08 эВ. Для

сравнения, лучшее ограничение на m_v , полученное в прямом эксперименте, составляет около 2 эВ. Поразительно, но факт: лучший прибор для взвешивания нейтрино — это телескоп.

Кроме этого, данные КА Planck приводят к ограничению на эффективное число типов нейтрино: $N_v^{\text{eff}} = 3,30 \pm 0,27$, которое сравнимо с ограничением, получаемым на основе анализа первичного нуклеосинтеза, и даже несколько сильнее его. Поясним, что N_v^{eff} — это число типов лёгких или безмассовых частиц с плотностью энергии, равной плотности энергии обычных равновесных нейтрино. Так, например, $N_v^{\text{eff}} = 3,1$ означает, что в плазме находятся новые лёгкие частицы с плотностью энергии, равной 0,1 от плотности энергии нейтрино. Стандартная теория предсказывает величину $N_v^{\text{eff}} = 3,046$. Отличие от трёх на 0,012 связано с уменьшением равновесной плотности фотонов [26], относительно которых нормируется плотность нейтрино, а оставшиеся 0,034 происходят от нагревания нейтрино аннигиляцией более горячих электрон-позитронных пар в первичной плазме [27–31].

В заключение заметим, что форма спектра угловых флуктуаций микроволнового фона замечательно подтверждает качественные черты стандартной космологической модели и позволяет весьма точно определить основные космологические параметры. Однако на больших углах наблюдаются непонятные аномалии, именно слишком низкая амплитуда мультиполей с малым l и очень большая асимметрия (лево-правая) относительно эклиптики.

3. Инфляция

Космологическая модель Фридмана прекрасно описывала эволюцию Вселенной от некой непонятной сингулярной точки до наших дней, объясняя барионную асимметрию Вселенной, наблюдавшуюся обилием лёгких элементов, рожденных в первые секунды от "создания" в результате первичного нуклеосинтеза, равновесный микроволновый фон, формирование крупномасштабной структуры (см., например, обзоры [32, 33]). Однако многие свойства фридмановской модели выглядели совершенно таинственными:

1. Постоянство (с точностью до 10^{-4}) температуры реликтового фона по всему небу, тогда как две точки на небе, разделённые углом более чем в один градус, никогда ничего не знали друг о друге.

2. Квазиоднородность Вселенной на больших масштабах.

3. Близость параметра Ω_{tot} к единице, пусть даже с очень плохой, порядка единицы, точностью. Для реализации этого была бы необходима очень тонкая подгонка в ранней Вселенной, $|\Omega_{tot} - 1| < 10^{-16}$ во время первичного нуклеосинтеза и $|\Omega_{tot} - 1| < 10^{-60}$ на планковской стадии, когда кривизна пространства была порядка m_P^2 и выше этой точки классическое пространство-время уже не существовало.

4. Наличие небольших флуктуаций плотности, но на астрономически больших масштабах. Было совершенно непонятно, какой механизм мог их создать на таких расстояниях.

5. И наконец, первоначальный взрыв, который вызвал расширение Вселенной повсюду на огромных масштабах. Что явилось его причиной?

На все эти вопросы экономно и красиво ответила гипотеза об экспоненциальном (или квазиэкспоненциальном) расширении Вселенной на очень ранней стадии, предшествующей Большому взрыву. Здесь уместно привести несколько простых формул. Согласно ковариантному закону сохранения тензора энергии-импульса для однородно распределённой материи,

$$\dot{\rho} + 3H(\rho + P) = 0. \quad (3.1)$$

Для вакуумно-подобного состояния вещества с $P = -\rho$ (или $w = -1$) плотность энергии при расширении не изменяется, а при $\rho = \text{const}$ и параметр Хаббла (2.1) оказывается постоянным, т.е. расширение идёт экспоненциально вследствие мощной антигравитации вакуумно-подобной энергии. Такое пространство-время называется пространством де Ситтера.

Если по какой-то причине в ранней Вселенной реализовалось уравнение состояния с $w = -1$, пусть даже локально в небольшой области пространства, то из этой небольшой, даже крошечной, области могла возникнуть вся наша громадная Вселенная, причём условия в ней повсюду (кроме приграничных областей) должны быть одинаковыми. Это решает проблемы 1 и 2, указанные выше. Согласно уравнению (2.1), при экспоненциально возрастающем масштабном факторе и постоянной ρ роль последнего слагаемого быстро уменьшается, т.е. $\rho \rightarrow \rho_c$ и Ω экспоненциально стремится к единице, что обеспечивает необходимую тонкую настройку, о которой говорилось выше в связи с проблемой 3. Длина волны квантовых флуктуаций плотности экспоненциально возрастает и из микроскопически малой превращается в астрономически большую. (Кроме того, и амплитуда флуктуаций несколько увеличивается.) В настоящее время это практически общепринятый механизм возникновения флуктуаций плотности, необходимых для образования крупномасштабной структуры Вселенной (галактик, их скоплений).

Пионерской работой, в которой гипотеза инфляции привлекалась для решения некоторых из указанных выше проблем, была работа Казаноса [34]. Несколько позднее появилась подробная работа Гуса [35]. Генерация флуктуаций плотности и их спектр были рассчитаны Мухановым и Чибисовым [36] в рамках R^2 -модели Старобинского [37, 38] (см. ниже). Было показано, что спектр имеет степенную форму с показателем $n = 0,96$, что хорошо согласуется с последними данными КА Planck. Заметим, однако, что этот результат модельно-зависим, например, в модели с миллизаряженными частицами [39] показатель спектра может быть выше. В частности, не исключён плоский спектр Харрисона – Зельдовича [40, 41] с $n = 1$.

В литературе обсуждаются главным образом два источника инфляции: квазиоднородное скалярное поле, инфлатон, и модификация гравитации при больших кривизнах. Из инфлатонных моделей, пожалуй, наиболее красивой является предложенная Линде [42] модель хаотической инфляции, согласно которой любое скалярное поле ϕ , однородное на хаббловском масштабе в ранней Вселенной, с медленно изменяющимся потенциалом, $U''(\phi) < H^2$, приведёт к экспоненциальному расширению, так что вся видимая Вселенная и далёкая область вне её будут порождены этим колоссально раздувшимся микроскопическим пузырьком. Модификация гравита-

ции при большой кривизне предполагает введение в действие ОТО дополнительного нелинейного по кривизне члена $R \rightarrow R - R^2/m^2$, где m — параметр с размерностью массы. Такие слагаемые могут возникать за счёт радиационных поправок к обычному действию [37, 38]. Однако радиационные поправки генерируют не только R^2 -добавки, но и, например, члены, квадратичные по тензору Риччи, $R_{\mu\nu}R^{\mu\nu}$, которые приводят к неприятным последствиям в виде дубов и тахионов.

Успешное решение фундаментальных проблем фридмановской космологии и количественное предсказание спектра флуктуаций плотности позволяют считать инфляцию экспериментально/наблюдательно установленным фактом. Дополнительным указанием на справедливость инфляционной гипотезы была бы регистрация гравитационных волн, генерированных во время инфляции [43, 44]. Однако интенсивность этих волн зависит от модели и может быть очень низкой. Так что отсутствие таких волн не убьёт инфляционную модель, а их обнаружение будет дополнительным указанием на её справедливость.

Согласно инфляционному сценарию, Вселенная является собой тёмную расширяющуюся пустоту до тех пор, пока поле инфлатона не опустилось вниз, так что параметр Хаббла стал меньше массы инфлатона. Тогда ϕ начало "одновременно" и повсюду осциллировать, рождая всевозможные элементарные частицы с меньшей массой. Этот процесс уместно назвать Большим взрывом (Big Bang). Видна поразительная аналогия с библейской картиной. Сначала — "тьма над бездной", а затем — "да будет свет". Правда, в отличие от библейской, картина, отвечающая инфляционному сценарию, описывается математическими уравнениями и приводит к количественным наблюдаемым предсказаниям.

Отметим ещё один важный факт: инфляция возможна только при несохранении барионного числа [45, 46]. Дело в том, что для достаточно длительной инфляции необходимо постоянство (приближённое) плотности энергии. Если барионное число сохраняется, то необходимое постоянство ρ невозможно. Поскольку инфляция представляется единственным способом создать пригодную для жизни Вселенную, из самого факта нашего существования следует несохранение барионного числа и появляется ненулевой шанс обнаружить распад протона или нейтрон-антинейтронные осцилляции. Забавно, что полвека назад утверждение было прямо противоположным: "наше существование доказывает, что барионное число сохраняется", однако, как мы сейчас знаем, это неверно.

4. Стандартная космологическая модель

В результате бурного развития теории и фантастического повышения точности астрономических наблюдений в течение последних десятилетий можно считать, что установлена стандартная космологическая модель (СКМ) (Standard Cosmological Model, SCM), которая вряд ли претерпит значительные изменения на феноменологическом уровне. СКМ хорошо описывает космологическую историю и эволюцию Вселенной начиная от инфляции и до наших дней. Однако в этой картине имеются "небольшие тучки", которые, возможно, не столь серьёзны, как два известных "облака" лорда Кельвина: ультрафиолетовая катастрофа и проблема Майклсона – Морли, из которых пролился "дождь" квантовой

механики и теории относительности. Впрочем, нельзя исключить того, что космологические "тучки" приведут к не менее серьёзным последствиям. Во всяком случае современная космология, несомненно, требует новой физики вне рамок Минимальной стандартной модели элементарных частиц.

Теоретической основой СКМ является общая теория относительности, хотя и предпринимаются активные попытки её модификации как при больших (например, упомянутая в разделе 3 R^2 -теория), так и при малых кривизнах (см. раздел 6). Кроме ОТО, необходимо знать "химический" состав вещества, т.е. набор фундаментальных элементарных частиц и полей и их уравнения состояния. Состояние системы не всегда описывается уравнением состояния, иными словами, не всегда можно выразить давление как функцию энергии локально, т.е. в один и тот же момент времени и в одной и той же пространственной точке. В таком случае на помощь приходят динамические уравнения движения.

Основные эпизоды истории Вселенной в грубом приближении описаны в разделах 4.1 – 4.6.

4.1. Инфляционная стадия

Начальная инфляционная стадия — это возникновение нашей Вселенной вследствие экспоненциального расширения из исходного микроскопически малого объёма. Необходимое для этого возрастание масштабного фактора должно быть не менее 60–70 хаббловских времён, т.е. масштабный фактор должен увеличиться не менее чем в $\exp(60–70) = 10^{26}–10^{30}$ раз. Как отмечалось в разделе 3, инфляция — практически "экспериментальный" факт. Строго говоря, мы ничего не знаем об эпохе, предшествующей инфляции, и даже неясно, можно ли вообще говорить о времени до инфляции. Скорее всего, до инфляции не существовало ни классического пространства, ни времени, в соответствии с идеей Линде [42], и эта область (пока?) — *terra incognita*. Тем не менее в ряде работ предпринимались попытки описать Вселенную в прединфляционный период, в так называемую эпоху космологии до Большого взрыва (pre-Big Bang cosmology), хотя точнее было бы называть Большим взрывом момент окончания инфляции.

4.2. Большой взрыв

В какой-то момент плотность энергии инфлатона убывает до такого значения, при котором масса инфлатона (если $m_\phi = 0$, то можно говорить о наклоне его потенциала) становится меньше, чем параметр Хаббла, $H \sim \sqrt{\rho_{\text{inf}}/m_{\text{Pl}}}$. Начиная с этого момента медленное скатывание инфлатона вниз, в минимум потенциала, превращается в осцилляции около этого минимума и начинается процесс рождения частиц классическим инфлатонным полем. Именно этот момент уместно называть Большим взрывом. Из пионерских работ по расчёту эффективности рождения частиц в этом процессе отметим [47–53].

4.3. Бариогенезис и антиматерия

Наблюдаемый во Вселенной избыток вещества относительно антивещества красиво и экономно объясняется механизмом Сахарова [14], но это лишь в принципе. Существует большое количество различных моделей бариосинтеза [54–58], но какой именно сценарий реализуется в космологии, пока неясно. Более того, имеются

модели бариогенезиса, в которых не требуется выполнения любого из трёх условий Сахарова (см. [55]).

Очень важным для понимания механизма бариогенезиса было бы наблюдение космической антиматерии, активные поиски которой сейчас ведутся на нескольких аппаратах: BESS (Ballon-borne Experiment with Superconducting Spectrometer), PAMELA (Payload for Anti-matter-Matter Exploration and Light nuclei Astrophysics), AMS (Alpha Magnetic Spectrometer) — более чувствительные детекторы находятся в стадии разработки. Однако до настоящего времени не обнаружено ни одного ядра антигелия, на поиск которого нацелены эти аппараты. Все наблюдаемые до настоящего времени антипротоны и позитроны имеют, вернее всего, вторичное происхождение, представляя собой результат взаимодействия космических лучей или катастрофических звёздных процессов. Тем не менее и на этом унылом фоне имеются два явления непонятного происхождения. Первое — это интенсивный источник фотонов в центре Галактики с энергией 0,511 МэВ [59–65], что точно совпадает с энергией от двухфотонной e^+e^- -аннигиляции в покое. Было бы крайне интересным, если бы в центре Галактики находился сгусток антиматерии, но, похоже, отсутствие высокозергичных квантов от $\bar{p}\bar{p}$ -аннигиляции исключает такую возможность. Второе загадочное явление — это избыток позитронов при энергиях около 100 ГэВ, обнаруженный на детекторе PAMELA [66] и недавно подтверждённый космическим телескопом Fermi [67] и AMS [68].

4.4. Первичный нуклеосинтез

Первичный нуклеосинтез всегда считался одним из столпов космологии Большого взрыва, так как обилия лёгких элементов, ${}^4\text{He}$, ${}^2\text{H}$, ${}^3\text{He}$, синтезированных в очень ранней Вселенной при температурах от 1 МэВ до 60–70 кэВ, когда возраст Вселенной был от 1 с до 200 с, хорошо согласуются с наблюдениями, и никаким другим образом получить такие результаты не удаётся. В настоящее время имеется расхождение теоретических результатов с наблюдениями для ${}^7\text{Li}$ примерно в два раза. Возможно, это указывает на какие-то новые физические явления, например на существование новых частиц, или, что более вероятно, это противоречие является результатом ошибочной интерпретации измерений. Данные по обилиям ${}^4\text{He}$ идейтерия уже много лет используются, чтобы получить ограничение на наличие в первичной плазме каких-либо лёгких частиц, которые параметризуются, как эффективное число нейтрино (см. обсуждение после уравнения (2.9)). В разные времена это ограничение составляло от $N_v^{\text{eff}} < 4$ и до $N_v^{\text{eff}} < 3,1$. В последнее время наблюдения удивительным образом говорят, что $N_v^{\text{eff}} > 3$, хотя и согласуются с 3,046 в пределах ошибок. Например, на основе недавних измерений количества ${}^4\text{He}$ [69] можно заключить, что $N_v^{\text{eff}} = 3,51 \pm 0,35$ (68 % CL), а измерение дейтерия [70] лучше всего описывается при $N_v^{\text{eff}} = 3,28 \pm 0,28$. Означают ли эти результаты, что во Вселенной существуют неизвестные лёгкие элементарные частицы, которые сейчас называют тёмной радиацией (dark radiation), или уточнённые измерения благополучно приведут к $N_v^{\text{eff}} = 3,046$, покажет будущее, но было бы замечательно, если бы, глядя на небо, удалось открыть новую элементарную частицу, например стерильное нейтрино, которое помогло бы объяснить аномалии в нейтриноных осцилляциях. Отметим также,

что количество рожденного дейтерия сильно зависит от полной плотности барионов, поэтому дейтерий называли "бариометром". Сейчас на это звание может претендовать и микроволновый фон.

4.5. Рекомбинация водорода и микроволновый фон

Из-за большой величины сечения упругого рассеяния фотонов на заряженных частицах — электронах — длина свободного пробега фотонов в первичной плазме оказывается заметно меньше космологического горизонта, так что фотоны лишь медленно диффундируют в этой среде. Положение кардинально изменяется после рекомбинации водорода при температуре около 3000 К, т.е. при красном смещении $z_{\text{rec}} \approx 1100$, когда электроны и протоны образуют нейтральные атомы, на которых сечение рассеяния длинноволновых фотонов резко уменьшается. После этого фотоны микроволнового фона начинают свободно распространяться во Вселенной, принося нам информацию о температуре по всему небу. Как отмечалось в разделе 2, анализ флуктуаций температуры позволяет весьма точно измерить космологические параметры.

4.6. Формирование крупномасштабной структуры

Вселенной

Небольшие флуктуации плотности, образовавшиеся во время инфляции, долгое время остаются практически постоянными по величине. Точнее, остаётся постоянным относительный контраст плотности $\Delta = \delta\rho/\rho$. В статическом мире гравитационное притяжение областей с избытком плотности привело бы к экспоненциальному возрастанию Δ , как было показано ещё в начале XX в. Джинсом [71]. Космологическое расширение, очевидно, замедляет возрастание Δ , которое вместо экспоненциального становится степенным¹. Более того, как можно показать, на стадии доминирования релятивистского вещества возмущения возрастают как максимум логарифмически, т.е. можно считать, что они практически не увеличиваются. Возрастание возмущений должно начаться в эпоху доминирования нерелятивистского вещества, которая наступает при красном смещении $z_{\text{eq}} \approx 10^4$. Теория говорит, что на этой стадии Δ возрастает как масштабный фактор, т.е. с момента начала роста возмущений Δ может увеличиться в 10^4 раз. Это именно то, что требуется при исходных возмущениях $\Delta \sim 10^{-4}$, величина которых известна по измеренным угловым флуктуациям температуры микроволнового фона.

5. Тёмная материя

Приведённые в разделе 4.6 простые соображения уже позволяют заключить, что значительную часть вещества во Вселенной должна составлять материя, которая не взаимодействует с электромагнитным излучением, в частности со светом. Её называют тёмной материи, хотя точнее было бы называть её невидимой, так как тёмная материя по самому смыслу своего названия должна поглощать свет, а невидимая со светом просто не взаимодействует. В отсутствие тёмной материи образо-

вание структуры в обычном веществе не могло бы начаться при $z \approx 10^4$, поскольку сильное давление света на заряженные частицы препятствовало бы росту флуктуаций плотности, который смог бы начаться лишь после рекомбинации при $z \approx 10^3$. Значит, возмущения могли бы вырасти не более чем в тысячу раз и не достигли бы к нашему времени величины порядка единицы. Однако давление света не препятствует возрастанию возмущений в тёмной материи, и в ней рост возмущений может начаться уже при $z_{\text{eq}} \approx 10^4$. А позднее обычное вещество будет падать в уготованную ему тёмной материей яму. Так что без тёмной материи жизнь во Вселенной в настоящее время не возникла бы.

Кроме приведённого выше качественного аргумента, имеется большой ряд совершенно независимых данных, доказывающих существование тёмной материи:

1) наличие плоских ротационных кривых. Скорости частиц газа или галактик-спутников вокруг большой галактики не уменьшаются при удалении от светящегося центра как $v \sim 1/\sqrt{r}$, а выходят на постоянное значение. Это показывает, что вокруг галактики имеется невидимое вещество, плотность которого убывает как $1/r^2$;

2) данные по гравитационному линзированию далёких объектов, позволяющему оценить массу всего вещества по пути распространения луча света, которые показывают, что невидимого вещества примерно в пять раз больше, чем видимого;

3) равновесие горячего газа в богатых галактических кластерах, также требующее примерно в пять раз больше вещества, чем непосредственно наблюдается;

4) результаты количественного анализа формирования крупномасштабной структуры (в частности, так называемых барионных акустических осцилляций (BAO)), которые также требуют доминирующей роли тёмной материи;

5) данные анализа углового спектра флуктуаций температуры микроволнового фона.

Все эти данные очень хорошо согласуются друг с другом, давая для суммарной плотности тёмной и обычной материи значение $\Omega_m \approx 0,3$, при этом плотность обычной барионной материи составляет $\Omega_b \approx 0,05$. Более точные значения приведены в (2.6), (2.7).

С астрономической точки зрения, тёмная материя подразделяется на три вида: горячую (HDM), тёплую (WDM) и холодную (CDM) — в зависимости от той шкалы, на которой рассасываются возмущения плотности. Эта шкала определяется длиной свободного разлёта (free streaming) l_{FS} частиц до их остановки по причине космологического красного смещения. Для горячей тёмной материи масса внутри радиуса l_{FS} больше массы галактики, $M_{\text{FS}} > M_{\text{gal}} \sim 10^{12} M_\odot$. Примером частицы горячей тёмной материи является нейтрино, для которого $M_{\text{FS}} \sim m_{\nu}^3/m_v^2 \sim 10^{17} M_\odot (1 \text{ эВ}/m_v)^2$.

Тёплой тёмной материи называют такую материю, для которой $M_{\text{FS}} \sim M_{\text{gal}}$. Примером WDM могло бы быть стабильное или долгоживущее стерильное нейтрино с массой в кэВ-ном диапазоне или псевдоголдстоуновский бозон с похожими свойствами.

Для холодной тёмной материи справедливо соотношение $M_{\text{FS}} < M_{\text{gal}}$, обычно выполняющееся с большим запасом. Примерами частиц-носителей CDM являются легчайшие суперсимметричные частицы (Lightest Supersymmetric Particle — LSP) с массой $m \sim 100 - 1000 \text{ ГэВ}$

¹ ПIONЕРСКИЕ РАБОТЫ ПО ЭВОЛЮЦИИ ВОЗМУЩЕНИЙ В КОСМОЛОГИИ ПРИНАДЛЕЖАТ ЛИФШИЦУ [72, 73]. СОВРЕМЕННОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ТЕОРИИ МОЖНО НАЙТИ, НАПРИМЕР, В КНИГАХ [74, 75].

или какие-то другие слабовзаимодействующие массивные частицы (Weakly Interacting Massive Particle — WIMP). В последнее время LSP несколько потеряли свою привлекательность, так как на Большом адронном коллайдере их не нашли. Тем не менее LSP остаётся в игре, но при некоторой модификации стандартного космологического сценария. Весьма популярным кандидатом на роль частиц CDM является аксион, несмотря на свою исчезающую малую массу, $m_a \lesssim 10^{-5}$ эВ. Аксионы оказываются холодными, так как они с самого начала рождаются в покое и длина их свободного разлёта заметно меньше галактической.

Отдельную группу возможных частиц CDM составляют так называемые MACHOs (Massive Astrophysical Compact Halo Objects). Это уже звездоподобные объекты, возможно карликовые малосветящиеся звёзды массой, сравнимой с солнечной, или первичные чёрные дыры с $M > 10^{16}$ г.

Очень интересную группу частиц всякой тёмной материи могли бы составлять зеркальные частицы, точнее целый зеркальный мир, похожий на наш, но не тождественный ему.

Кроме того, возможны и более экзотические варианты, такие как, например, кварковые самородки (quark nuggets), топологические или нетопологические солитоны или нечто новое, не включённое в этот список.

Канонической, наиболее популярной в настоящее время, моделью является Λ CDM-модель, т.е. модель, в которой доминирующей формой материи во Вселенной является холодная тёмная материя плюс тёмная энергия в виде лямбда-члена, или вакуумной энергии (подробнее про лямбда-член говорится в разделе 6). Эта модель в основных чертах хорошо описывает наблюдения, но ряд деталей в ней сейчас не вписывается:

1) отсутствующие спутники. CDM-модель предсказывает на порядок больше галактических спутников (т.е. более мелких галактик, гравитационно-связанных с центральной), чем наблюдается;

2) разрушение галактического диска. Даже если количество спутников может быть уменьшено за счёт действия "ветра", возникающего при рождении звёзд, многие тесно связанные кластеры тёмной материи выживают и разрушают галактический диск вследствие гравитационного нагрева;

3) острые выступы (cusps) в центрах галактик. Теория предсказывает сингулярное распределение материи в центрах галактик, $\rho_{\text{DM}} \sim r^{-\kappa}$, $\kappa = 1 - 2$, тогда как наблюдается гладкий профиль;

4) избыточный угловой момент галактик. CDM-модель предсказывает угловой момент, в несколько раз меньший, чем наблюдаемый.

Возможно, эти проблемы возникают из-за недостаточной точности численного моделирования или из-за пренебрежения существенными физическими эффектами, например ролью нормального барионного вещества. Более революционным объяснением было бы введение иной формы тёмной материи, например самодействующей, такой как зеркальная материя. Однако и эта гипотеза приводит к проблемам. Сейчас становится популярной гипотеза о тёплой тёмной материи, в рамках которой все эти проблемы либо устраняются, либо заметно смягчаются. Наилучшим вариантом была бы смесь холодной и тёплой тёмной материи, но такое предположение усугубляет проблему космического заго-

вора: теперь должны иметь близкие значения плотности не трёх, а четырёх разных форм материи.

6. Тёмная энергия или модифицированная гравитация?

Тёмной энергией мы называем неизвестную субстанцию, которая приводит к ускоренному космологическому расширению и, согласно наблюдательным данным, имеет уравнение состояния $P = w\rho$ с $w = -1,13^{+0,13}_{-0,10}$. Заметим, что при $w < -1$ космологическая плотность энергии возрастает со временем и за конечное время ρ становится бесконечно большой. Остаётся надеяться, что w окажется больше или равно -1 , что находится в пределах ошибок, или w зависит от времени и с возрастанием t увеличивается до -1 или более.

Уравнение (2.4) показывает, что ускорение, как и требуется, в этом случае будет положительным. В последние два десятилетия происходило накопление разнообразных данных об ускоренном расширении.

1. В 1990-е годы говорили о кризисе возраста Вселенной (Universe age crisis). При параметре Хаббла, превышающем $70 \text{ км с}^{-1} \text{Мпк}^{-1}$, возраст Вселенной оказывался заметно меньше 10 млрд лет, особенно если полная плотность энергии равна критической, как предсказывает инфляционная теория. С другой стороны, ядерная хронология и возраст старых звёздных скоплений требуют $t_U \geq 13$ млрд лет. Возраст Вселенной можно выразить через современное значение параметра Хаббла и плотности энергий различных форм материи как

$$t_U = \frac{1}{H} \int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{1 - \Omega_{\text{tot}} + \Omega_m/x + \Omega_r/x^2 + x^2 \Omega_v}}, \quad (6.1)$$

где Ω_{tot} — полная относительная плотность энергии, $\Omega_{r,m,v}$ — соответственно вклады релятивистского, нерелятивистского вещества и вакуумно-подобной энергии. Легко увидеть, что при $\Omega_m = 0,3$ и $\Omega_v = 0,7$ возраст Вселенной будет близок к 13 млрд лет.

2. Как отмечалось выше, совокупность многих независимых типов измерений давала значение $\Omega_m = 0,3$, а форма спектра угловых флуктуаций микроволнового фона (в частности, положение первого акустического пика) требовала $\Omega_{\text{tot}} = 1$ в соответствии с инфляционными предсказаниями. Кроме того, анализ крупномасштабной структуры Вселенной не только показывал, что $\Omega_m = 0,3$, но и демонстрировал подавление образования структуры на больших масштабах, что могло быть объяснено ускоренным расширением.

3. Прямое измерение ускоренного расширения, обнаруженное по уменьшению яркости отдалённых сверхновых на красном смещении порядка единицы. Есть основания считать, что сверхновые типа SN1a являются стандартными свечами, тогда их уменьшенная яркость показывает, что они находятся на большем расстоянии, чем ожидалось, а для этого Вселенная должна расширяться скорее, чем при обычном фридмановском законе. Три астронома, С. Перлмуттер, Б.П. Шмидт и А.Дж. Рисс, обнаружившие этот эффект, получили в 2011 г. Нобелевскую премию "за открытие ускоренного расширения Вселенной по наблюдению отдалённых сверхновых". Заметим, что напрашивающееся возможное объяснение эффекта как обусловленного поглощением светового

потока от отдалённых сверхновых в межзвёздной и межгалактической среде можно считать исключённым, так как эффект не монотонен по красному смещению. Сначала эффект с возрастанием z увеличивается, а потом уменьшается. Последнее возникает из-за того, что ρ_m возрастает при увеличении z , а ρ_v остаётся постоянной.

В качестве простейшего кандидата на роль носителя тёмной энергии рассматривают лёгкое скалярное поле, амплитуда которого почти постоянна. Тензор энергии-импульса такого поля имеет вид

$$T_{\mu\nu} = \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} [\partial_x \phi \partial^x \phi - U(\phi)]. \quad (6.2)$$

Для квазипостоянного поля $T_{\mu\nu}$ становится пропорциональным метрическому тензору, $T_{\mu\nu} \sim g_{\mu\nu}$, реализуя вакуумно-подобное уравнение состояния $w \approx -1$, что и приводит к ускоренному расширению.

Другая популярная возможность — это модификация гравитации на больших расстояниях посредством введения дополнительного нелинейного по кривизне слагаемого в действие ОТО:

$$S = \frac{m_{Pl}^2}{16\pi} \int d^4x \sqrt{-g} [R + F(R)]. \quad (6.3)$$

Первоначальные модели [76, 77] с $F(R) = -\mu^4/R$, где μ — постоянный параметр с размерностью массы, хотя и порождали ускоренное космологическое расширение, приводили к сильной неустойчивости внутри любых небесных тел [78]. Для устранения этого недостатка было предложено дальнейшее видоизменение модифицированной гравитации, например, такое как [79–81]

$$F(R) = \lambda R_0 \left[\left(1 + \frac{R^2}{R_0^2} \right)^{-n} - 1 \right] - \frac{R^2}{6m^2} \quad (6.4)$$

или ему подобное, где функция $F(R)$ выбирается, в частности, так, чтобы гравитационные уравнения имели в вакууме решение $R = \text{const}$, описывающее пространство де Ситтера.

Проблема тёмной энергии тесно связана с проблемой вакуумной энергии или, что то же самое, с проблемой космологической постоянной, или лямбда-члена. Пытаясь применить ОТО к космологии, Эйнштейн обнаружил, что стационарные решения отсутствуют и для "спасения" стационарной Вселенной предложил ввести в уравнения гравитации дополнительную космологическую постоянную Λ [82]:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R - \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi}{m_{Pl}^2} T_{\mu\nu}. \quad (6.5)$$

Впоследствии стало ясно, что космологическая постоянная эквивалентна энергии вакуума с тензором энергии-импульса

$$T_{\mu\nu}^{\text{vac}} = g_{\mu\nu} \rho^{\text{vac}} \quad (6.6)$$

и уравнением состояния $P = -\rho$.

Можно было бы предположить, что тёмная энергия совпадает с вакуумной, однако теоретические оценки различных вкладов в величину вакуумной энергии превышают наблюдаемое значение на 50–100 порядков. Особенно впечатляющей является проблема вакуумной энергии в квантовой хромодинамике (КХД). Дело в том,

что вакуум в КХД не пустой, а заполненный конденсатом глюонных и кварковых полей [83, 84] с плотностью энергии, на 45 порядков превышающей космологическую плотность и отрицательной по знаку. Наличие таких конденсатов совершенно необходимо для того, чтобы получить верную величину массы протона, которая намного превышает сумму масс составляющих夸克ов. Внутри протона конденсаты разрушаются кварками, и его масса оказывается равной не сумме масс夸克ов минус энергия связи, как обычно, а сумме масс夸克ов минус энергия конденсата в объёме протона $V_p \sim 1/(100 \text{ МэВ})^3$:

$$m_p = 2m_u + m_d + |\rho_{\text{vac}}^{\text{QCD}}| V_p \approx 1 \text{ ГэВ}, \quad (6.7)$$

где $m_u \sim m_d \sim 5 \text{ МэВ}$,

$$\rho_{\text{vac}}^{\text{QCD}} \approx -10^{45} \rho_c. \quad (6.8)$$

Одна из глубочайших загадок природы состоит в том, чем компенсируется отрицательная $\rho_{\text{vac}}^{\text{QCD}}$, так что в результате получается положительная, но в 10^{45} раз меньшая величина вакуумной энергии, которая наблюдается в космологии. Кажется очевидным, что в вакууме должно "жить" нечто, способное осуществить эту компенсацию. Конечно, нельзя исключить весьма унылую гипотезу о том, что вакуумная энергия почти полностью компенсируется фантастически точно подогнанной вычитательной константой. Если принять во внимание антропный принцип и предположение о почти бесконечном количестве миров с разными вычитательными константами, то такое решение проблемы вакуумной энергии даже не выглядит слишком неестественным. Но так или иначе решение проблемы тёмной энергии, по-видимому, не будет достигнуто без решения проблемы вакуумной энергии.

7. Заключение

Здесь уместно перечислить нерешённые проблемы в космологии. Часть из них была упомянута выше, а часть приводится для полноты картины. Итак, вопросы, на которые пока нет ответов:

1. Что является носителем частиц тёмной материи?
2. Каков механизм космологического ускорения: скалярное поле, модифицированная гравитация или нечто третьё?
3. Что является причиной "космического заговора", который приводит к сравнимым величинам плотностей энергии различных форм материи: $\Omega_b \sim \Omega_{\text{DM}} \sim \Omega_{\text{DE}}$?
4. Какой из многих возможных механизмов бариогенезиса реализуется в природе? Или таковых несколько?
5. Существует ли первичная космическая антиматерия? Окажутся ли успешными поиски антиядер на детекторах PAMELA, BESS и AMS или надо будет ждать детекторов нового поколения?
6. Какой механизм приводит к интенсивному излучению линии 0,511 МэВ из центра Галактики?
7. В чём причина избытка позитронов в космических лучах при энергии около 100 ГэВ, наблюдавшихся детекторами PAMELA, BESS, AMS?
8. Каков механизм рождения космических лучей ультравысоких энергий? Имеет ли место обрезание Грайзена – Зацепина – Кузьмина (GZK-cutoff)?

9. Каков механизм возникновения сверхтяжёлых чёрных дыр, наблюдаемых в центрах галактик? Возникали ли такие чёрные дыры в уже сформировавшейся галактике или образовались ранее и были зародышами формирования галактик?

10. Как объясняются существование квазаров при больших красных смещениях и заметная плотность металлов в их окрестности?

11. Как взрываются гамма-вспышки?

12. Каков механизм генерации галактических и межгалактических магнитных полей?

13. В чём причина аномалий микроволнового фона на больших углах или при низших мультипольях?

14. Как разрешится противоречие между наблюдениями и предсказанием теории для ^7Li ? Что это — ошибка наблюдений (или их интерпретации) или новая физика?

15. Существует ли тёмная радиация, на которую указывают спектр флуктуаций микроволнового фона и первичный нуклеосинтез?

16. И наконец, что компенсирует экспериментально (!?) известный вклад конденсатов квантовой хромодинамики в вакуумную энергию с точностью 10^{-45} ?

Это, безусловно, не полный список проблем, но даже он показывает, насколько продвинулась космология за последние полвека и насколько увлекательной стала эта область науки. Став точной наукой, космология пришла к решению старых проблем, открыв по пути множество новых.

Я благодарен Е.В. Арбузовой за полезные замечания. Работа поддержана грантом Правительства Российской Федерации 11.G34.31.0047.

Список литературы

1. Friedmann A Z. *Phys.* **10** 377 (1922) [Фридман А А *Журн. Русск. физ.-хим. общ-ва* **56** (1) 59 (1924); УФН **93** 280 (1967)]
2. Friedmann A Z. *Phys.* **21** 326 (1924) [Фридман А А УФН **80** 447 (1963)]
3. Lemaître G *Ann. Soc. Sci. Bruxelles A* **47** 49 (1927) [Translated into English: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **91** 483 (1931)]
4. Nussbaumer H, Bieri L, arXiv:1107.2281
5. Hubble E *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **15** 168 (1929)
6. Gamow G *Phys. Rev.* **70** 572 (1946)
7. Zeldovich Ya B *Adv. Astron. Astrophys.* **3** 42 (1965)
8. Зельдович Я Б, Окунь Л Б, Пикельнер С Б УФН **87** 113 (1965) [Zel'dovich Ya B, Okun L B, Pikel'ner S B Sov. Phys. Usp. **8** 702 (1966)]
9. Lee B W, Weinberg S *Phys. Rev. Lett.* **39** 165 (1977)
10. Высоцкий М И, Долгов А Д, Зельдович Я Б *Письма в ЖЭТФ* **26** 200 (1977) [Vysotskii M I, Dolgov A D, Zel'dovich Ya B JETP Lett. **26** 188 (1977)]
11. Кобзарев И Ю, Окунь Л Б, Померанчук И Я ЯФ **3** 1154 (1966) [Kobzarev I Yu, Okun L B, Pomeranchuk I Ya Sov. J. Nucl. Phys. **3** 837 (1966)]
12. Герштейн С С, Зельдович Я Б *Письма в ЖЭТФ* **4** 174 (1966) [Gershtein S S, Zel'dovich Ya B JETP Lett. **4** 120 (1966)]
13. Cowsik R, McClelland J *Phys. Rev. Lett.* **29** 669 (1972)
14. Сахаров А Д *Письма в ЖЭТФ* **5** 32 (1967) [Sakharov A D JETP Lett. **5** 24 (1967)]
15. Penzias A A, Wilson R W *Astrophys. J.* **142** 419 (1965)
16. Шмаонов Т А *Приборы и техника эксперимента* (1) 83 (1957)
17. Дорошкевич А Г, Новиков И Д *ДАН СССР* **154** 809 (1964) [Doroshkevich A G, Novikov I D Sov. Phys. Dokl. **9** 111 (1964)]
18. Черепашук А М УФН **183** 535 (2013) [Cherepashchuk A M Phys. Usp. **56** 509 (2013)]
19. Smoot G F et al. *Astrophys. J.* **396** L1 (1992)
20. Струков И А и др. *Письма в Астрон. журн.* **18** 387 (1992) [Strukov I A et al. Sov. Astron. Lett. **18** 153 (1992)]
21. Einasto J, Kaasik A, Saar E *Nature* **250** 309 (1974)
22. Ostriker J P, Peebles P J E, Yahil A *Astrophys. J.* **193** L1 (1974)
23. Oort J H *Bull. Astron. Inst. Netherlands* **6** 249 (1932)
24. Zwicky F *Helv. Phys. Acta* **6** 110 (1933)
25. Arbuzova E V, Dolgov A D, Reverberi L, arXiv:1306.5694
26. Lopez R E et al. *Phys. Rev. Lett.* **82** 3952 (1999)
27. Dolgov A D, Fukugita M *Письма в ЖЭТФ* **56** 129 (1992) [JETP Lett. **56** 123 (1992)]
28. Dolgov A D, Fukugita M *Phys. Rev. D* **46** 5378 (1992)
29. Dolgov A D, Hansen S H, Semikoz D V *Nucl. Phys. B* **503** 426 (1997)
30. Dolgov A D, Hansen S H, Semikoz D V *Nucl. Phys. B* **543** 269 (1999)
31. Dolgov A D *Phys. Rep.* **370** 333 (2002)
32. Долгов А Д, Зельдович Я Б УФН **130** 559 (1980)
33. Dolgov A D, Zeldovich Ya B *Rev. Mod. Phys.* **53** 1 (1981)
34. Kazanas D *Astrophys. J.* **241** L59 (1980)
35. Guth A H *Phys. Rev. D* **23** 347 (1981)
36. Муханов В Ф, Чибисов Г В *Письма в ЖЭТФ* **33** 549 (1981) [Mukhanov V F, Chibisov G V JETP Lett. **33** 532 (1981)]
37. Stabobinskii A A *Phys. Lett. B* **91** 99 (1980)
38. Гурович В Ц, Старобинский А А ЖЭТФ **77** 1683 (1979) [Gurovich V Ts, Starobinskii A A Sov. Phys. JETP **50** 844 (1979)]
39. Dolgov A D et al. *Phys. Rev. D* **88** 117701 (2013); arXiv:1310.2376
40. Harrison E R *Phys. Rev. D* **1** 2726 (1970)
41. Zeldovich Ya B *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **160** 1P (1972)
42. Linde A D *Phys. Lett. B* **129** 177 (1983)
43. Старобинский А А *Письма в ЖЭТФ* **30** 719 (1979) [Starobinskii A A JETP Lett. **30** 682 (1979)]
44. Rubakov V A, Sazhin M V, Veryaskin A V *Phys. Lett. B* **115** 189 (1982)
45. Dolgov A D *Phys. Rep.* **222** 309 (1992)
46. Dolgov A D *Surv. High Energy Phys.* **13** 83 (1998)
47. Dolgov A D, Linde A D *Phys. Lett. B* **116** 329 (1982)
48. Abbott L F, Farhi E, Wise M B *Phys. Lett. B* **117** 29 (1982)
49. Albrecht A et al. *Phys. Rev. Lett.* **48** 1437 (1982)
50. Долгов А Д, Кирилова Д П ЯФ **51** 273 (1990) [Dolgov A D, Kirilova D P Sov. J. Nucl. Phys. **51** 172 (1990)]
51. Traschen J H, Brandenberger R H *Phys. Rev. D* **42** 2491 (1990)
52. Kofman L, Linde A, Starobinsky A A *Phys. Rev. Lett.* **73** 3195 (1994)
53. Kofman L, Linde A, Starobinsky A A *Phys. Rev. D* **56** 3258 (1997)
54. Dolgov A D *Phys. Rep.* **222** 309 (1992)
55. Dolgov A D, hep-ph/9707419
56. Рубаков В А, Шапошников М Е УФН **166** 493 (1996) [Rubakov V A, Shaposhnikov M E Phys. Usp. **39** 461 (1996)]
57. Riotto A, Trodden M *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **49** 35 (1999)
58. Dine M, Kusenko A *Rev. Mod. Phys.* **76** 1 (2004)
59. Johnson W N (III), Harnden F R (Jr.), Haymes R C *Astrophys. J.* **172** L1 (1972)
60. Leventhal M, MacCallum C J, Stang P D *Astrophys. J.* **225** L11 (1978)
61. Purcell W R et al. *Astrophys. J.* **491** 725 (1997)
62. Milne P A et al. *New Astron. Rev.* **46** 553 (2002)
63. Knöldlseder J et al. *Astron. Astrophys.* **441** 513 (2005)
64. Jean P et al. *Astron. Astrophys.* **445** 579 (2006)
65. Weidenspointner G et al. *Astron. Astrophys.* **450** 1013 (2006)
66. Adriani O et al. *Nature* **458** 607 (2009)
67. Ackermann M et al. (Fermi LAT Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **108** 011103 (2012)
68. Aguilar M et al. (AMS Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **110** 141102 (2013)
69. Izotov Y I, Stasińska G, Guseva N G *Astron. Astrophys.* **558** A57 (2013); arXiv:1308.2100
70. Cooke R J et al. *Astrophys. J.* **781** 31 (2014); arXiv:1308.3240
71. Jeans J H *Philos. Trans. R. Soc. London A* **199** 1 (1902)
72. Лифшиц Е М ЖЭТФ **16** 587 (1946)
73. Лифшиц Е М, Халатников И М УФН **80** 391 (1963) [Lifshitz E M, Khalatnikov I M Sov. Phys. Usp. **6** 495 (1964)]
74. Mukhanov V *Physical Foundations of Cosmology* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2005)

75. Горбунов Д С, Рубаков В А *Введение в теорию ранней Вселенной. Космологические возмущения. Инфляционная теория* (М.: КРАСАНД, 2010) [Gorbunov D S, Rubakov V A *Introduction to the Theory of the Early Universe: Cosmological Perturbations and Inflationary Theory* (Singapore: World Scientific, 2011)]
76. Capozziello S, Carloni S, Troisi A *Recent Res. Dev. Astron. Astrophys.* **1** 625 (2003)
77. Carroll S M et al. *Phys. Rev. D* **70** 043528 (2004)
78. Dolgov A D, Kawasaki M *Phys. Lett. B* **573** 1 (2003)
79. Starobinsky A A *Письма в ЖЭТФ* **86** 183 (2007) [*JETP Lett.* **86** 157 (2007)]
80. Hu W, Sawicki I *Phys. Rev. D* **76** 064004 (2007)
81. Appleby S A, Battye R A *Phys. Lett. B* **654** 7 (2007)
82. Einstein A *Sitzungsber. Preuß. Acad. Wiss. Berlin* **1** 142 (1917)
83. Gell-Mann M, Oakes R J, Renner B *Phys. Rev.* **175** 2195 (1968)
84. Shifman M A, Vainshtein A I, Zakharov V I *Nucl. Phys. B* **147** 385 (1979)

Cosmology: from Pomeranchuk to the present day

A.D. Dolgov

Novosibirsk State University,

ul. Pirogova 2, 630090 Novosibirsk, Russian Federation;

Alikhanov Institute for Theoretical and Experimental Physics, Russian Federation State Scientific Center,

ul. B. Cheremushkinskaya 25, 117218 Moscow, Russian Federation

E-mail: dolgov@fe.infn.it

Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara Polo Scientifico e Tecnologico — Edificio C,

Via Saragat 1, 44122 Ferrara, Italy;

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Sezione di Ferrara

Polo Scientifico e Tecnologico — Edificio C,

Via Saragat 1, 44122 Ferrara, Italy

A review of the half-a-century of cosmology is presented for an intended audience of elementary particle physicists. The review is based on a mere half-an-hour seminar talk (at the Institute of Theoretical and Experimental Physics — ITEP) and is accordingly brief and superficial. The introductory historical section is mostly devoted to the fundamental work done in, but not always known outside, Russia (USSR). Foundational works and astronomical observations instrumental in shaping the field are discussed, as are such aspects as inflation, baryosynthesis, dark matter and dark energy, vacuum energy, large-scale gravity modification and microwave background angular fluctuations. The presentation of the material is admittedly not entirely objective but rather is given from the Russian (ITEP) perspective and is influenced by the author's personal views and biases.

PACS numbers: **95.35.+d, 95.36.+x, 98.80.-k**

DOI: 10.3367/UFNr.0184.201402k.0211

Bibliography — 84 references

Received 13 November 2013

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **184** (2) 211–221 (2014)

Physics – Uspekhi **57** (2) (2014)