

ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

Элементарные частицы и космология (Метагалактика и Вселенная)

И.Л. Розенталь

Анализируется тесная взаимосвязь теории элементарных частиц и космологии в свете перспектив развития единой теории поля. Указывается на общность проблем и путей их разрешения. Подчеркивается различие понятий "Метагалактика" и "Вселенная" и отмечаются некоторые возможности оценки "размеров" Вселенной.

PACS numbers: 98.80.-k

Содержание

1. Введение (801).
 2. Вселенная как совокупность познаваемых объектов (802).
 3. Метагалактика и ее основные характеристики (802).
 - 3.1. Космологические постулаты. 3.2. Космология Фридмана.
 - 3.3. Постоянная Хаббла. 3.4. Реликтовое излучение. 3.5. Относительное содержание легких элементов. 3.6. Проблема темной материи. 3.7. Барийная асимметрия Метагалактики. 3.8. Проблемы фридмановской космологии.
 4. Инфляционная космология и ее экспериментальная проверка (805).
 - 4.1. Основные идеи инфляционной космологии. 4.2. Экспериментальное подтверждение инфляционного сценария. 4.3. О фундаментальных постоянных. 4.4. О стадии формирования фундаментальных констант.
 5. Интерпретация фундаментальных проблем физики элементарных частиц (807).
 - 5.1. Перечисление проблем. 5.2. Интерпретация проблем.
 6. О "размерах" Вселенной (808).
 7. Заключение (809).
- Дополнение. Большое объединение и распад протона (810).
Список литературы (810).

1. Введение

Стремительно расширяются наши представления об окружающем мире. Для предтеч западной цивилизации еще 2–3 тысячи лет назад он был ограничен бассейном Средиземноморья (Геркулесовы столбы) и сферой неподвижных звезд, Солнцем и планетами. Лишь по

приказу египетских фараонов были установлены истинные размеры африканского континента. Размеры Земли ($\sim 10^9$ см) были определены только после путешествий Колумба и Магеллана (рубеж XV и XVI вв.). Революционные идеи Галилея и Коперника не изменили представлений о размерах "Вселенной", а лишь внесли новый элемент в понятие "центра" Мира (Земля \rightarrow Солнце). Лишь в конце XVIII столетия Гершель обратил внимание на особенности туманностей и звездных скоплений и сделал предварительные заключения о том, что туманности являются совокупностью звезд. Однако полное понимание природы туманностей — основы концепции островной Вселенной — пришло лишь в начале XX века благодаря техническому прогрессу — развитию фотографического метода, позволившего достоверно интерпретировать туманности (названные галактиками) как совокупность звезд. В дальнейшем, благодаря техническому прогрессу и усовершенствованию статистических методов обработки наблюдений удалось установить, что галактики группируются в скопления, а в последнее время (примерно 30 лет назад) обнаружили, что скопления галактик, в свою очередь, группируются в сверхскопления. Совокупность всех наблюдаемых на небе объектов назвали Метагалактикой; однако чаще к этой совокупности применяли термин "Вселенная". (В дальнейшем мы попытаемся четко разграничить оба эти понятия.) В таблице 1 приведены средние характеристики основных классов небесных объектов.

Таблица 1. Средние характеристики небесных объектов ($M_{\odot} \sim 10^{33}$ г — масса Солнца; $1 \text{ пс} \simeq 3 \times 10^{18}$ см)

Система	Масса, $10^{10} M_{\odot}$	Размер, пс
Галактики	1	10^4
Бедные скопления	40	10^6
Богатые скопления	270	2×10^6
Сверхскопления	1500	2×10^7
Метагалактика	6×10^9	4×10^9

И.Л. Розенталь. Институт космических исследований РАН
117810 Москва, Профсоюзная ул. 84/32
Тел. (095) 333-53-35; 134-53-40

Статья поступила 16 января 1997 г.,
после доработки 21 апреля 1997 г.

2. Вселенная как совокупность познаваемых объектов

Из введения можно заключить, что размеры "Вселенной" существенно возрастали с прогрессом техники исследований и наблюдений. Следовательно, понятие "Вселенная" не может быть эквивалентом "всего сущего", оно лишь отражает наше знание о мире в данный момент. Тем не менее как в популярных изданиях, так и в серьезных монографиях укоренилось тождество: Вселенная — все сущее. В этом заблуждении есть две причины. Одна не научная: "Вселенная" звучит гораздо эффектнее, чем, например, сверхскопление или Метагалактика. Но есть и второй, научный, аргумент. В течение многих десятилетий существовало убеждение, что размеры Метагалактики ($\sim 10^{28}$ см) — границы мира, и поэтому ее следует отождествить со Вселенной. Однако в последнее время в космологии утвердилась точка зрения, что Метагалактика лишь небольшая часть нашего мира и поэтому отождествление Метагалактики со Вселенной весьма неправомерно.

В связи с темой статьи целесообразно дать более точное определение обоих понятий. Метагалактикой мы будем называть совокупность объектов, расположенных сейчас в пространственном объеме радиусом $\sim 10^{28}$ см. В данном определении мы не учитываем (для простоты) эволюцию Метагалактики во времени.

Вселенная — это совокупность объектов, познаваемых в данный момент. Это понятие отражает уровень наших знаний о мире. Лишь совпадение обоих понятий в течение нескольких десятилетий привело к атавизму их отождествления.

И в заключение одно замечание. До сих пор космология и физика элементарных частиц обычно рассматриваются как разные разделы физики. В последнее время наметилась тенденция к их объединению (см., например, [1]). Задача данной статьи — узаконить эту тенденцию. Однако на этом пути возникает одно препятствие: строгое изложение обеих ветвей физики в рамках статьи невозможно. Поэтому автор вынужден иногда для общности жертвовать строгостью. Полное изложение отдельных этапов в космологии дано в монографиях [1–4].

3. Метагалактика и ее основные характеристики

3.1. Космологические постулаты

Основное предположение классической космологии — допущение, что эволюция Метагалактики определяется гравитационными силами. Впервые эта идея была реализована Эйнштейном (1917 г.), который исходил из традиционных представлений о неизменности мира. Поскольку уравнения общей теории относительности (ОТО), обобщающие ньютоновскую гравитацию, не имели стационарного решения, Эйнштейн ввел *ad hoc* в уравнения ОТО λ -член, который по сути был эквивалентен силам отталкивания, уравновешивающим гравитационное притяжение.

Фридман в 1922 г. получил решение уравнений ОТО при весьма общих начальных и граничных условиях (см. раздел 3.2), которое оказалось нестационарным. После недолгой полемики между основоположниками совре-

менной космологии решение Фридмана получило право на существование. Основным физическим выводом из модели Фридмана было расширение Метагалактики, что и было подтверждено Хабблом (1929 г.), и тогда эта теория получила признание научного сообщества.

Впоследствии было установлено, что основное заключение о расширении Метагалактики не только вытекает из ОТО, но и является естественным следствием ньютоновской теории тяготения, в рамках которой также отсутствует статическое состояние для гравитирующей сферы с равномерным распределением массы. И здесь полезно сделать небольшое отступление. Кроме уравнений теории гравитации необходимо постулировать начальные и граничные условия. Фридман их сформулировал в следующей форме: Метагалактика во время своей эволюции всегда однородна и изотропна. Эти гипотезы, которые получили впоследствии название основных космологических постулатов, хорошо оправдались наблюдениями. Так, однородность выполняется с точностью $\sim 10^{-2}$, а изотропия — лучше, чем 5×10^{-1} . Во всяком случае, с такой точностью не наблюдали достоверного отклонения от изотропии.

3.2. Космология Фридмана

Основные космологические постулаты — очень сильные гипотезы. Так, из простых кинематических соображений можно получить, что поскольку "центр" Метагалактики отсутствует, то физический смысл имеет лишь относительное расстояние r_{12} между двумя любыми телами и их относительная скорость v_{12} . Обе характеристики связаны между собой соотношением

$$v_{12} = H(t_M)r_{12}, \quad (1)$$

$H(t_M)$ — постоянная Хаббла, t_M — время, отсчитываемое от начала расширения. Из соображений размерности следует, что относительное расстояние

$$r_{12} \propto t_M^a, \quad (2)$$

где $a = \text{const}(t_M)$, что совпадает с результатом ОТО.

При выводе (2) постулировалось, что $H(t) \propto t^{-1}$. Однако существует и другой вариант интерпретации соотношения (1). Фактор $H(t)$ может быть постоянной величиной, имеющей размерность обратного времени. Поскольку рассматривается такой глобальный объект, как Метагалактика, естественно допустить, что эта постоянная определяется универсальными константами \hbar , c и G . В этом случае характеристическим временем является планковское время $t_P = G^{1/2} \sim 10^{-43}$ с. Здесь и в дальнейшем $\hbar = c = 1$. Тогда решение уравнения (1)

$$r_{12} \propto \exp\left(\frac{t_M}{t_P}\right). \quad (3)$$

Модель, в которой расширение имеет экспоненциальную форму, носит имя Де Ситтера. И еще два замечания. Соотношения (2), (3) включают относительное расстояние r_{12} . Очевидно, что частным случаем этих соотношений будет описание эволюции размеров r_{12} Метагалактики.

Решения (2), (3), полученные из соображений размерности и основных космологических постулатов, приближенно описывают эволюцию Метагалактики, но, раз-

умеется, не дают полного представления об этом процессе. Прежде всего из простых соображений следует, что в космологии Фридмана существуют два класса решений в зависимости от того, что определяет расширение Метагалактики: кинетическая энергия или потенциальная энергия гравитации. Запишем соответствующие условия на единицу массы:

$$\frac{v^2}{2} > \frac{GM_M}{R_M}, \quad \frac{v^2}{2} < \frac{GM_M}{R_M}, \quad (4)$$

где M_M — масса Метагалактики.

Используя условие (1), эти неравенства можно записать в форме

$$H^2 > \frac{8\pi}{3} G\rho, \quad (5)$$

$$H^2 < \frac{8\pi}{3} G\rho, \quad (6)$$

ρ — средняя плотность материи.

Ясно, что если выполняется условие (5), то Метагалактика будет расширяться неограниченно; при условии (6) расширение сменится сжатием. Если реализуется уравнение

$$\rho = \rho_c = \frac{3}{8} \frac{H^2 \pi}{G}, \quad (7)$$

то расширение не ограничивается, а значение ρ_c называется критической плотностью. И еще одно замечание. Весь предшествующий анализ проводился в рамках геометрии Евклида. В ОТО необходимо учитывать кривизну пространства. Если выполняется условие (5), то пространство характеризуется отрицательной кривизной; при условии (6) — положительной. Соотношение (7) соответствует пространству Евклида.

3.3. Постоянная Хаббла

Далее мы проведем сопоставление основных теоретических и наблюдаемых характеристик Метагалактики. Основной характеристикой эволюции Метагалактики является константа Хаббла $H(t)$. В настоящее время t_{M0} она определена экспериментально с точностью до фактора $\simeq 2$:

$$H_0(t_{M0}) = 100h \text{ км с}^{-1} \text{ Мпс}^{-1}, \quad (8)$$

$h \simeq 0,5 - 1$ (см., например, [5, 6]).

Для простых оценок, если расстояние $R < 10^{28}$ см, можно использовать соотношение

$$H(t_{M0}) \sim 10^{-18} \text{ с}^{-1}.$$

Из соображений размерности следует, что время t_{M0} от начала расширения составляет

$$t_{M0} \sim \frac{1}{H_0} \sim 3 \times 10^{17} \text{ с} \sim 10^{10} \text{ лет}. \quad (9)$$

Это выражение верно с точностью до фактора $\simeq 1,5$.

Важно отметить, что значение t_{M0} , определяемое соотношением (9), хорошо согласуется с временем существования старых звезд в нашей Галактике. Несколько

десятков лет назад, когда наблюдения давали для $H_0(t_{M0})$ значение на порядок больше, чем (8), расхождение между временами жизни звезд и Метагалактики были основным аргументом против теории Фридмана. Важным параметром модели является показатель степени a в соотношении (2). Значение этого показателя зависит от формы материи, доминирующей в Метагалактике. Для вещества показатель $a = 2/3$; для излучения $a = 1/2$.

3.4. Реликтовое излучение

Гамов (1949 г.) постулировал, что при $t_M = 0$ доминировало излучение. Вследствие различных законов изменения плотностей $\rho_m \propto R^{-3}$ (для вещества) и $\rho_r \propto R^{-4}$ (для излучения) при $t_M \sim 10^6$ лет начинает превалировать вещество. Однако наиболее эпохальным было предсказание Гамовым существования изотропного излучения с температурой $T \sim 10$ К. Оно было обнаружено в 1965 г. и было названо реликтовым или фоновым излучением. С тех пор реликтовое излучение изучалось весьма интенсивно. Последние данные, полученные на спутнике COBE [7, 8], таковы.

Температура $T_0 = 2,726 \pm 0,005$ К; отклонение от чернотельного энергетического спектра менее 0,03 %. С высокой точностью подтверждена изотропия реликтового излучения. С меньшей точностью можно вычислить температуру T_0 реликтового излучения. Проблема заключается в том, что теоретическое значение T_0 зависит от числа степеней свободы материи, которое в свою очередь зависит от времени t_M и температуры T_0 . Насколько известно автору, точные теоретические вычисления температуры T_0 не были проведены. Грубые оценки значения этого параметра [9] приводят к следующему выражению:

$$kT \sim \frac{2 \times 10^{-6} g^{-1/2}}{t} [\text{ГэВ}], \quad (10)$$

g — число степеней свободы. На рисунке 1 приведена зависимость числа g от T . Полагая $g \simeq 4$ и $t_0 \simeq 3 \times 10^{17}$ с, можно получить, что $T_0 \sim 10$ К. Учитывая грубость оценки и неопределенность в значениях параметров H_0 и Ω_0 ($\Omega_0 = \rho_M/\rho_c$), можно полагать, что это значение согласуется с результатами наблюдений.

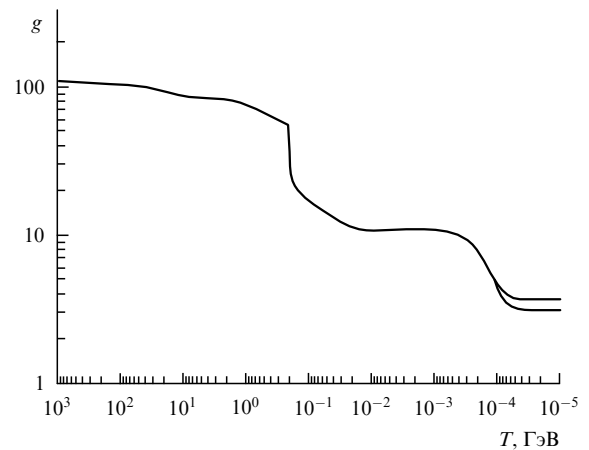


Рис. 1. Зависимость числа степеней свободы от температуры [9].

3.5. Относительное содержание легких элементов

Следующий важный тест для космологии Фридмана — вычисление относительного содержания легких элементов ($A \leq 4$) в Метагалактике. Качественно теорию происхождения элементов можно представить в форме последовательности нескольких этапов:

1. При $T_M \sim 10^{12}$ К ($t_M \sim 10^{-2}$ с) нуклоны, нейтрино и e^\pm , γ находятся в термодинамическом равновесии.

2. При $T_M \sim 10^{11}$ К ($t_M \sim 10^{-1}$ с) из-за разности масс нейтрона и протона увеличивается относительное содержание протонов.

3. При $T_M \leq 5 \times 10^9$ К ($t_M \sim 4$ с) реализуется реакция $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$; отношение числа протонов к числу нейтронов замораживается на уровне 5:1.

4. При $T_M \sim 10^9$ К ($t_M \sim 200$ с) образуются d, ^3He , ^4He . В это время начинается свободный разлет фотонов и (анти)нейтрино, которые практически перестают взаимодействовать.

Количественному расчету относительного содержания легких элементов посвящено множество работ (их обзоры см. в [2, 3]). Результаты расчетов зависят от параметра $\Omega_B = \rho_B/\rho_c$, где ρ_B — средняя плотность барионов в Метагалактике. Хорошее согласие между расчетными данными и наблюдением получаются при значении

$$\Omega_B h^2 = 0,01 - 0,02 \quad (11)$$

(см. [10]).

В работе [11] приводятся величины относительного содержания элементов в Метагалактике (табл. 2).

Таблица 2. Относительное содержание легких элементов

Элемент	H по массе	^4He по массе	$^7\text{Li}/\text{H}$
Содержание	76 %	24 %	10^{-10}

В пределах ошибок ($\sim 1\%$) теоретические и наблюдаемые относительные значения распространенности легких элементов в Метагалактике совпадают.

3.6. Проблема темной материи

Далее следует затронуть один важный вопрос. Отношение Ω_B учитывает суммарную массу атомных протонов, ядер и электронов, порождающих фотоны в оптическом диапазоне. Однако существуют веские аргументы (см., например, [5, 6, 11]) (в первую очередь теорема вириала, из которой следует устойчивость космических объектов), что истинная плотность вещества в Метагалактике значительно превышает значение (11). Так, если учесть Гало в нашей Галактике, являющейся типичной, то $\Omega \sim 0,1$. Теорема вириала, примененная к скоплениям галактик, дает значение для величины Ω , близкое к 0,5–1,0, и здесь возникает серьезнейшая проблема, которой посвящено множество работ, к сожалению, не внесших ясности в очевидный вопрос о природе вещества, превышающего по массе светящуюся материю примерно на два порядка.

Простейшая гипотеза — темное вещество состоит из хорошо изученных электронных нейтрино — не дает ответа на данный вопрос. Масса ν_e менее 5,1 эВ [12]; чтобы обеспечить соотношение $\Omega \sim 1$, масса нейтрино

должна иметь значение $m_\nu \sim 90h^2$ эВ [6], что превышает верхний предел для экспериментального значения m_ν . Пределы для масс μ - и τ -нейтрино существенно выше, однако массивные нейтрино должны распадаться на три более легких нейтрино (распад на два нейтрино запрещен законом сохранения лептонного числа). Поэтому для решения проблемы скрытой массы (темной материи) допускают существование частиц с относительно экзотическими характеристиками, затрудняющими их обнаружение на современных ускорителях. Например, постулируется существование аксионов с массой $10^{-6} - 10^{-4}$ эВ или тяжелых нейтрино (10 ГэВ–2 ТэВ) [6].

Напомним, что аксионом называют нейтральную частицу с нулевым спином, слабо взаимодействующую с веществом. Аксион "придуман" для решения проблемы сохранения CP-четности в сильных взаимодействиях. Нейтрино — нейтральная суперсимметричная частица.

К сожалению, упомянутые частицы не были обнаружены на ускорителях (о суперсимметрии и экспериментах по ее обнаружению см. в заключении). Более подробно о проблеме скрытой массы и возможных путях ее решения см. в [13, 14].

3.7. Барионная асимметрия Метагалактики

Как известно, наша Галактика (и, по-видимому, вся Метагалактика) состоит из протонов, электронов и нейтральных частиц. В природе антипротоны и позитроны встречаются крайне редко и только в космических лучах. Учитывая, что отношение потоков антипротонов и протонов в космических лучах составляет величину $\sim 10^{-5}$, можно получить, что отношение концентраций антипротонов и протонов $\sim 10^{-20}$. Подробная зарядовая асимметрия требует обоснованного разъяснения. Несколько десятков лет назад допускали, что в Галактике существуют разделенные области, содержащие исключительно протоны и электроны или антипротоны и позитроны. Однако с развитием гамма-астрономии эта гипотеза полностью отпала, поскольку на границе таких областей должны были активно происходить процессы аннигиляции и, следовательно, образование фотонов, которые без труда можно было зарегистрировать.

В этой ситуации Сахаров (1967 г.) для интерпретации барионной асимметрии выдвинул две идеи: 1) барионный заряд может не сохраняться, 2) вследствие несохранения CP-четности времена жизни барионов и антибарионов различаются, что и приводит к зарядовой асимметрии.

Вначале эта гипотеза была встречена с большим недоверием. Однако в связи с прогрессом в теории большого объединения гипотеза о несохранении барионного заряда начала доминировать в физике элементарных частиц, поскольку она приводила к эпохальному предсказанию — распаду протона с характерным временем $t_p \geq 10^{30}$ лет (см. [15], а также дополнение). Оценки, проведенные на основе гипотез о распаде протона, позволили правильно оценить одну из основных характеристик Метагалактики: отношение $n_\gamma/n_p \sim 10^8$ (n_γ , n_p — концентрации фотонов и протонов).

Отметим в заключение, что при анализе кинетики возникновения барионной асимметрии важнейшую роль играет нестационарность Метагалактики — ее расширение.

3.8. Проблемы фридмановской космологии

Таким образом, космология Фрийдмана хорошо интерпретирует почти все глобальные характеристики Метагалактики. Исключение составляет отождествление природы скрытой массы; однако эта проблема относится, скорее, к физике элементарных частиц, чем к космологии.

Тем не менее нельзя утверждать, что космология Метагалактики — законченная наука. Несмотря на успехи, существует ряд серьезных внутренних противоречий, указывающих на ее незавершенность. Отметим главные (полный анализ этой темы см. в [1]).

1. Сингулярность. Из соотношения (2) следует, что при $t_M = 0$ плотность ρ обращается в бесконечность. Существование физической сингулярности свидетельствует о незавершенности концепции.

2. Проблема горизонта. Как отмечалось выше, значение $R_{M0} \sim 10^{28}$ см $\sim t_{M0}$ свидетельствует, что Метагалактика расширялась со скоростью ~ 1 . Рассмотрим ситуацию при $t_M \ll t_{M0} \sim 10^{10}$ лет. Поскольку в соотношении (2) параметр a заключен в пределах $0 < a < 1$, то скорость расширения "границ" Метагалактики при значении t_M равна $v_M = (t_{M0}/t_M)^{1-a} > 1$ или $R_M > t_M$, что противоречит теории относительности. Простейшая попытка разрешить это противоречие — допущение, что в ранние периоды Метагалактика была разделена на множество причинно-несвязанных областей, — противоречит ее поразительной изотропии.

3. Проблема плоскостности. Как известно, кривизна в Метагалактике равна нулю, о чем свидетельствует евклидова геометрия ее пространства, а также то обстоятельство, что плотность $\rho \sim \rho_c$. Возникает вопрос: почему среди бесконечного числа геометрий с радиусом кривизны не равным нулю Природа "выбрала" евклидову?

4. Инфляционная космология и ее экспериментальная проверка

4.1. Основные идеи инфляционной космологии

Гипотеза, на которой базируется инфляционная космология, заключается в том, что первоматерией во Вселенной является физический вакуум. Эта идея, высказанная, как одна из возможностей [16, 17], приобрела большую популярность после работы [18], где была сделана попытка решения проблем фридмановской космологии на основе этой гипотезы. Физическая привлекательность этой идеи связана с основным свойством вакуума, рассматриваемым как макроскопическая релятивистская форма материи. В этом случае свободная частица, проходящая через вакуум, должна сохранять свою скорость. В противном случае (частица тормозится) вакуум будет эфиром, давно опровергнутым теорией относительности. Но такая особенность материи сохранять скорость частицы возможна лишь при уникальном уравнении состояния: $\epsilon_v = -p_v$ (ϵ_v — плотность энергии вакуума, p_v — его давление). В этом случае торможение частицы полностью компенсируется ускорением, обусловленным давлением.

Но подобное уравнение состояния характеризует метастабильность материи. Чтобы предотвратить быстрый распад вакуума, необходимо допустить существование потенциального барьера. На квантовом языке это означает, что зависимость $V(\varphi)$ потенциальной

энергии от волновой функции φ вакуума имела бы минимум (рис. 2). Этот минимум при $\varphi = 0$ соответствует основному состоянию вакуума. Метастабильность, т.е. возможность медленного распада вакуума обеспечивается квантовомеханическим туннелированием через потенциальный барьер. Флуктуации вакуума при $\varphi = 0$ могут просачиваться через потенциальный барьер и распространяться далее через вакуум (символически этот процесс представлен на рисунке линиями $C'O, B'O, A'O$). Чтобы вакуумная стадия возмущения продолжалась достаточно долго, необходимо, чтобы зависимость $V(\varphi)$ после максимума была квазиплоской (часть MO на зависимости $V(\varphi)$). В момент C происходит фазовый переход в вакууме, и возмущение, которое иногда называется пузырьком (bubble), распадается на малые области, которые определяют начальное расширение для фридмановской стадии. Схематически образование и эволюция Метагалактики представлены на рис. 3. Очевидно, что поскольку размеры областей не равны нулю, ликвидируется основной порок фридмановской модели — сингулярность. Во время эволюции "пузыря" он будет распространяться в вакуум, плотность которого практически не меняется. Такое расширение соответствует экспоненциальному закону (3) (модель Де Ситтера). Основной характеристикой этой фазы, называемой инфляционной, является ее время t_i . Это время можно оценить (очень качественно) исходя из размерных соображений и современных представлений об объединенной теории полей. Начало расширения

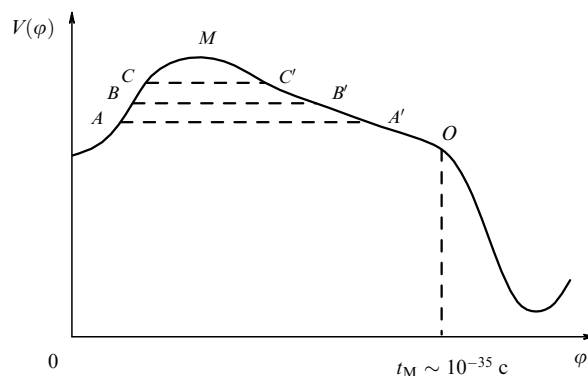


Рис. 2. Зависимость потенциальной энергии вакуума от ее волновой функции. Расстояния $C'O, B'O, A'O$ символизируют возможные различия в характеристиках переходов вакуум–инфляционная стадия–фридмановское расширение. Точка $O(t_M \sim 10^{-35}$ с) соответствует фазовому переходу.

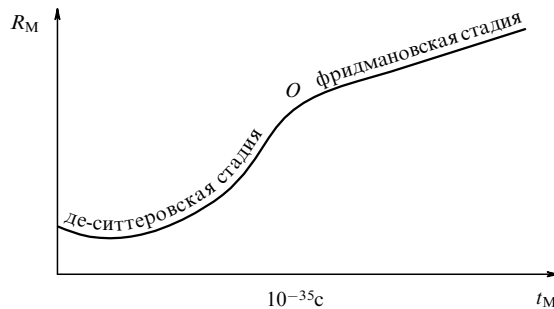


Рис. 3. Схема образования и эволюции Метагалактики.

"пузыря" должно происходить из области с планковскими размерами $R_p \sim G^{1/2} \sim 10^{-33}$ см. На этом этапе эволюция определяется объединенным взаимодействием, включающим гравитацию. В момент t_f происходит фазовый переход и такое взаимодействие расщепляется на гравитационное и все остальные (так называемое большое объединение).

Большое объединение определяется массой Х-бозона: $m_X \sim 10^{15}$ ГэВ (см. дополнение). Соответствующее массе m_X характеристическое время $t_f \sim 1/m_X$. Используя соотношение (3), получаем конечный размер "пузыря" $\sim 10^{10^4}$ см, что на много порядков превышает размеры Метагалактики.

Существование инфляционной стадии объясняет также и другие проблемы фридмановской космологии. Все области "пузыря" причинно-связаны между собой; поэтому та его часть, которая является началом Метагалактики, также состоит из причинно-связанных элементов. Проблема плоскостности также просто разрешается в рамках инфляционного сценария. Размеры "пузыря" многократно превышают размеры Метагалактики. Из дифференциальной геометрии известно, что малую область любой гладкой функции можно аппроксимировать соответствующим плоским пространством.

Таким образом, введение инфляционной стадии снимает трудности фридмановской космологии. Однако возникает вопрос: не является ли введение *ad hoc* инфляционной стадии слишком дорогой ценой за разрешение некоторой незамкнутости хорошей космологии? На наш взгляд, ответ должен быть отрицательным, поскольку кроме интерпретации дефектов фридмановской модели введение инфляционной стадии приводит к одному важному предсказанию. Чтобы его сформулировать, обратимся снова к рис. 2. В основном состоянии $\varphi = 0$ должны существовать очень сильные флуктуации вакуума [19]. Хотя точные расчеты в этой области невозможны, вывод кажется правдоподобным. Тогда можно сделать одно важное предсказание: вероятность туннелирования и время инфляционной стадии также должны флуктуировать [20, 21], что может привести к тому, что в "пузырях", а следовательно, и в метагалактиках действуют различные физические закономерности. Этот важный вывод, который можно связать с экспериментальными данными, хорошо (хотя и косвенно) подтверждается на опыте (см. раздел 4.2).

И еще несколько замечаний. Изложенный здесь качественный подход к сценарию инфляции может показаться чрезмерно упрощенным. Однако, к сожалению, вычислить из общих принципов функцию $V(\varphi)$, определяющую характеристики инфляции, невозможно. Поэтому сосуществуют многочисленные модели инфляционного сценария (слова излюбленные современными космологами), которые используют поля, соответствующие безмассовой скалярной электродинамике [21], тензорной гравитации [22], модели струн [23], потенциалу экспоненциального типа [24], теории суперструн [25, 26] и т.д. Поэтому на данном этапе упрощенное изложение инфляционной стадии кажется оправданным.

4.2. Экспериментальное подтверждение инфляционного сценария

Далее мы продемонстрируем на простых примерах некий принцип (названный принципом целесообразности [27] или антропным принципом [28]), утверждающий,

что физические закономерности в Метагалактике не только достаточны для существования основных устойчивых состояний (атомных ядер, атомов, звезд и галактик), но и необходимы.

Конкретно речь идет об исследовании устойчивости структуры Метагалактики к численному значению фундаментальных констант α четырех взаимодействий, масс m_p, m_e и размерности пространства N .

Доказательство упомянутых выше принципов основано на стандартном методе исследований устойчивости. Приведем несколько примеров справедливости упомянутых принципов.

1. Атом водорода — абсолютно устойчивый элемент. Реакция



(p, e^-, n, ν — протон, электрон, нейтрон, нейтрино) абсолютно запрещена при малых энергиях (температурах), поскольку

$$\Delta m_N = m_n - m_p \simeq 1,3 \text{ МэВ} > m_e \simeq 0,5 \text{ МэВ}. \quad (13)$$

Однако, если (мысленно) увеличить массу m_e , то реакция (12) возможна, что привело бы к катастрофическим последствиям — невозможности образования галактик, а следовательно, и звезд, поскольку для образования галактик необходимо существование нейтрального водорода [2–4]. На этом фоне относительно безобидно то, что в случае увеличения m_e втрое невозможна основная реакция термоядерного синтеза:



Отметим, что увеличение m_e втрое мало по сравнению с отношением $\langle m \rangle / m_e \sim 10^3$, где $\langle m \rangle \simeq 1$ ГэВ — средняя масса элементарных частиц.

2. Бипротон ${}^2\text{He}$ — нестабильная частица. Эта нестабильность обусловлена кулоновским отталкиванием протонов (его потенциальная энергия $\simeq 2$ МэВ). Однако, как показывают оценки, если бы потенциальная энергия ядерного притяжения была на 50 кэВ больше, то ядро ${}^2\text{He}$ было бы стабильным, что привело бы к реализации реакции



В этом случае реакция (15) была бы обусловлена электромагнитным взаимодействием, а не слабым, как (14), и все протоны выгорели бы в процессе первичного (космологического) нуклеосинтеза. Эффективную константу α_s сильного (ядерного) взаимодействия нельзя и существенно уменьшить. В последнем случае не выполнялось бы условие $\Delta m_N < \varepsilon_d$ ($\varepsilon_d \sim 2,2$ МэВ — энергия связи дейтрона) и дейтрон был бы нестабильным, что привело бы к разрыву цепи первичного нуклеосинтеза.

3. Для осуществления реакций синтеза элементов с атомным номером $A > 4$, необходима возможность тройного слияния:



Однако тройное слияние эффективно только в резонансе, т.е. при выполнении условия $m_{3\alpha} = m_C$. Однако выполняется условие $m_{3\alpha} = m_C + 7,7$ МэВ. Реакция (16)

возможна лишь при условии существования возбужденного уровня с энергией 7,7 МэВ. Такой уровень действительно существует. Однако при небольшом смещении уровня (изменений α_s) реакция тройного слияния станет неэффективной. Драматическую историю открытия этого уровня см. в книге [29] и статье [30]. Число примеров можно существенно умножить (см. [27, 28]). Однако, на наш взгляд, и приведенных примеров достаточно для доказательства существования принципа целесообразности, который может иметь лишь две интерпретации.

1. Фундаментальные константы изменяются с течением времени t_M . Мы живем в эпоху, когда сочетание констант благоприятно для существования сложных структур. Эта точка зрения была высказана Дираком [31] и в течение длительного времени была предметом многочисленных исследований, которые установили, что константы четырех взаимодействий и отношение m_p/m_e практически не менялись во время расширения Метагалактики. Так, по данным [32], в течение времени 10^9 лет, предшествующего нашей эпохе,

$$\left| \frac{\dot{\alpha}_e}{\alpha_e} \right| < 10^{-17} \text{ год}^{-1}, \quad \left| \frac{\dot{\alpha}_s}{\alpha_s} \right| < 5 \times 10^{-19} \text{ год}^{-1},$$

$$\left| \frac{\dot{\alpha}_w}{\alpha_w} \right| < 10^{-12} \text{ год}^{-1}, \quad \left| \frac{\dot{\alpha}_g}{\alpha_g} \right| < 10^{-10} \text{ год}^{-1}.$$

В докладе [33] приводятся пределы изменения констант за 10^{10} лет:

$$\left| \frac{\Delta\alpha_e}{\alpha_e} \right| < 2 \times 10^{-3}, \quad \frac{\Delta(m_e/m_p)}{m_e/m_p} < 2 \times 10^{-3}.$$

В работе [34] аналогичные отношения имеют следующие пределы:

$$\left| \frac{\dot{\alpha}_e}{\alpha_e} \right| < 5 \times 10^{-14} \text{ год}^{-1}, \quad \left(\frac{\dot{m}_e}{m_p} \right) \left(\frac{m_e}{m_p} \right)^{-1} < 10^{-13} \text{ год}^{-1}$$

($\alpha_e, \alpha_s, \alpha_w, \alpha_g$ — безразмерные константы электромагнитного, сильного, слабого и гравитационного взаимодействий).

Весьма впечатляюще также доказательство неизменности констант вплоть до времен $t_M \sim 1$ с, основанное на согласии теоретических и наблюдательных значений распространенности легких элементов в Метагалактике.

Таким образом, гипотеза Дирака противоречит экспериментальным данным.

2. Тогда остается единственная возможность интерпретации неустойчивости структуры Метагалактики относительно значений фундаментальных постоянных — допустить в соответствии с хаотическим сценарием инфляционной космологии множественность метагалактик со своими фундаментальными постоянными. Сложность структуры Метагалактики сама отобрала среди множества возможностей те значения, которые обеспечили бы ее возникновение.

4.3. О фундаментальных постоянных

В предыдущем разделе перечислялись константы, к изменению которых весьма критична структура Метагалактики. Может вызвать удивление, что в этот список не вошли скорость света c , постоянная Планка \hbar и константа Ньютона G .

Вопрос о кинематике в воображаемом мире с измененным значением скорости света был поставлен Гамо-

вым. Этот подход был критически проанализирован Окунем [30]. В этой статье рассматривались не только кинематические, но и динамические эффекты, связанные с изменением скорости света при неизменности констант \hbar, e, m_e, m_p . Существенное изменение скорости света привело к кардинальному изменению физических законов.

На наш взгляд, это обстоятельство следует трактовать как запрет на изменение скорости света (даже мысленное). Этот вывод согласуется с фундаментальным нетривиальным постулатом большого объединения: пересечения трех бегущих констант электрослабого и сильного взаимодействий (см. [15] и дополнение).

Однако, на наш взгляд, существует более сильный аргумент в пользу того, что с константами c, \hbar и G следует соблюдать осторожность. Если вывод инфляционной космологии о существовании многих метагалактик верен, то нет запрета допустить их столкновения. Анализ, например, взаимодействия частиц, принадлежащих к различным метагалактикам, но с разными значениями m_e или m_p , не представляет трудностей. Но как можно представить динамику частиц в рамках специальной теории относительности с разными значениями скорости света, в ОТО при двух значениях константы G или непротиворечивую квантовую механику с двумя значениями \hbar ? Представляется весьма вероятным, что постоянные c, G и \hbar — суперконстанты, характерные не только для Метагалактики, но и для всей Вселенной.

4.4. О стадии формирования фундаментальных констант

Как отмечалось выше, вплоть до времен $t_M \sim 1$ с фундаментальные постоянные остаются неизменными. Естественно предположить, что эти константы остаются неизменными на протяжении всей фридмановской стадии. Поскольку вакуум в инфляционной космологии не определяется квантовыми характеристиками реальных частиц, то следует допустить, что фундаментальные константы α, m, N формируются на инфляционной стадии.

5. Интерпретация фундаментальных проблем физики элементарных частиц

5.1. Перечисление проблем

1. Иерархия масс элементарных частиц.

В рамках теории большого объединения должен существовать X-бозон с массой $\sim 10^{14} - 10^{15}$ ГэВ, переносящий электромагнитное, слабое и сильное взаимодействия. X-бозон определяет объединенное взаимодействие (см. [15] и дополнение). Массы W- и Z-бозонов, определяющих электрослабое взаимодействие, на много порядков меньше ($m_W = 80,22$ ГэВ, $m_Z = 91,2$ ГэВ). Возникает вопрос: почему отношение $m_X/m_{W,Z} \sim 10^{13}$ столь велико? Еще Дирак [31] постулировал: безразмерные фундаментальные константы должны примерно равняться единице. Попытки интерпретации иерархии масс на основе стандартной теории поля не увенчались успехом из-за существенных расходимостей [35]. Более продуктивным оказался подход, основанный на суперсимметрии [36]. Но и в данном подходе, по-видимому, нельзя полностью избавиться от противоречия [37]. Мы здесь отвлекаемся от отсутствия экспериментальных подтверждений суперсимметрии (см. заключение).

Таким образом, важная проблема иерархии масс сохраняется.

2. Проблема трех поколений лептонов.

Почему в нашей Метагалактике существует три поколения лептонов (e , μ и τ)? Этот вопрос отнюдь не нов. Уже при открытии в космических лучах мюона (1937 г.) возник вопрос: зачем он нужен? Поэтому после его первых публикаций высказывались сомнения в его существовании. Открытие τ -мезона усугубило проблему.

3. Проблема констант взаимодействий.

Почему константы взаимодействий $\alpha_c \sim 1/137$, $\alpha_w \sim 10^{-5}$, $\alpha_g \sim 10^{-38}$ много меньше единицы? (Проблема, сформулированная Дираком.)

4. Проблема взаимодействий.

Почему в Метагалактике реализуются четыре взаимодействия?

5. Проблема вакуума.

Вакуум, как и все другие формы материи, должен гравитировать. Однако суммарная плотность материи $\rho_t < \rho_c < 10^{-29}$ г см⁻³. Очевидно, что $\rho_v < \rho_t$. Однако естественное значение плотности вакуума есть планковская плотность $\rho_v = G^{-2} \sim 10^{94}$ г см⁻³. Как можно объяснить расхождение на 120 порядков?

6. Проблема размерности N пространства.

Все существующие экспериментальные данные прекрасно согласуются с допущением, что в интервале расстояний 10^{-16} см $< r < 10^{28}$ см наше пространство трехмерно. В ряду целых чисел выделенное значение (в терминах теории групп) имеет 0 и 1. Почему же $N = 3$?

5.2. Интерпретация проблем

1. Иерархия масс.

Масса X -бозона m_X очень велика. Однако она не могла бы быть существенно меньше в Метагалактике со сложной структурой. Действительно, экспериментальное время жизни протона $t_p > 2 \times 10^{32}$ лет для распада $p \rightarrow e^+ \pi^0$ [15]. Теоретическое значение не вполне определено, но заключено в пределах примерно $10^{30} - 10^{35}$ лет. Однако существенно, что время $t_p \propto m_X^4$ (см. дополнение). Поэтому, если бы $m_X < 10^{10}$ ГэВ, то все протоны распались бы за время существования Метагалактики 10^{10} лет. Нельзя вообразить решение проблемы иерархии масс за счет увеличения массы m_W . Значение этой массы предопределяет процесс космологического нуклеосинтеза и, следовательно, всю эволюцию материи в Метагалактике.

2. Проблема трех поколений лептонов.

Как отмечалось в разделе 3, барионная асимметрия Метагалактики определяется несохранением барионного числа и CP-нарушением. В рамках большого объединения CP-нарушение возникает, если число поколений n лептонов и кварков удовлетворяет условию $n \geq 3$ [38]. Существование трех поколений лептонов удовлетворяет этому условию и, следовательно, достаточно для возникновения барионной асимметрии.

3, 4. Проблемы констант α и их численных значений.

Все четыре взаимодействия и численные значения констант необходимы для существования сложной структуры Метагалактики.

5. Проблема вакуума.

Плотность энергии вакуума не может быть большой ($\sim \rho_c$) по многим причинам. Прежде всего, потому что время существования Метагалактики t_{ex} определяется плотностью материи. Приблизительно $t_{ex} \propto \rho^{-1/2}$ [3].

Поэтому, если бы выполнялось условие $\rho_v \gg \rho_c$, то реализовалось бы условие $t_{ex} \ll t_{M0}$ и, следовательно, за это время не успели бы возникнуть галактики и звезды.

Вероятно, существует и более глубокая причина малости значения ρ_v . Для реализации инфляционного сценария необходимо условие $\rho_v \leq \rho_c$, что также объясняет малость значения ρ_v .

6. Размерность пространства.

Дальнодействующие силы в N -мерном евклидовом пространстве определяются его размерностью [39]. Так, в N -мерном пространстве аналог законов Ньютона и Кулона имеет вид

$$F \propto \frac{1}{r^{N-1}}. \quad (17)$$

Эренфест (1917 г.) исследовал задачу двух тел в евклидовом пространстве произвольной размерности и показал, что устойчивые состояния системы двух тел могут существовать лишь при условии $N \leq 3$. Поскольку при $N = 1, 2$ невозможно существование сложных структур, $N = 3$ есть единственная размерность, при которой существуют сложные устойчивые связанные состояния. Например, при $N > 3$ не могут существовать аналоги солнечных систем. Эренфест проводил анализ в рамках классической физики. В дальнейшем его вывод был обобщен и на квантовые системы [40]. При $N > 3$ не могут существовать и стабильные атомы.

Таким образом, на основе принципа целесообразности можно интерпретировать важные проблемы физики элементарных частиц.

6. О "размерах" Вселенной

Проводить измерения за пределами Метагалактики невозможно. Однако накопленный опыт позволяет сделать некоторые экстраполяции в эту область.

Прежде всего нужно четко разделить экстраполяцию физических законов и численных значений физических констант. Уравнения динамики в значительной части определяются характеристиками пространства и в первую очередь размерностью (см., например, [39]). Полезно напомнить модное в конце 60-х годов направление — аксиоматическую теорию поля, когда из минимального числа аксиом пытались вывести все следствия релятивистской квантовой механики. И хотя эта попытка закончилась неудачей, можно все же утверждать, что некоторые заключения (конечно, не однозначные) о динамике вне Метагалактики сделать можно. Иная ситуация складывалась относительно численных значений фундаментальных констант. В первую очередь это относится к константам четырех взаимодействий, представляющим набор чисел, расшифровать который сейчас невозможно. По-видимому, существует единственное исключение — распределение элементарных частиц по массам. Сейчас существуют данные о (примерно) 300 частицах [12]. Поэтому можно построить их распределение с достаточной точностью. Далее можно допустить, что это распределение универсально во Вселенной, и сделать некоторые грубые заключения о "размерах" Вселенной [41].

В этой работе экспериментальное распределение элементарных частиц по массам m [12] аппроксимировалось функцией

$$\frac{\Delta n}{\Delta \log(m/m_p)} \sim 300 \left(\frac{m}{m_p}\right)^{-2}, \tag{18}$$

если $m > 2m_p$, и

$$\frac{\Delta n}{\Delta \log(m/m_p)} \sim 30 \left(\frac{m}{m_p}\right)^{1.5},$$

если $m < 2m_p$.

Аппроксимация (18), представленная на рис. 4, была получена без учета электрона и Х-бозона. Однако именно эти частицы играют определяющую роль в формировании структуры Метагалактики. Используя распределение (18), можно оценить вероятность w того, что частицы будут иметь массы в интервалах $0 - m_e$ и $m_X - \infty$. Оказывается, что вероятность $w < 10^{-50}$. В рамках инфляционной космологии метагалактики могут рождаться со своими квантовыми числами (см. раздел 4). Масса m_X , определяющая объединение взаимодействий, может быть существенно меньше, чем 10^{15} ГэВ. В этом случае время жизни протона приблизилось бы к времени существования метагалактики, что привело бы к кардинальному изменению ее структуры. Поэтому полученное неравенство следует трактовать, как характеристику числа n метагалактик, в которых массы распределены по законам (17), (18). Число $n = 1/w > 10^{50}$.

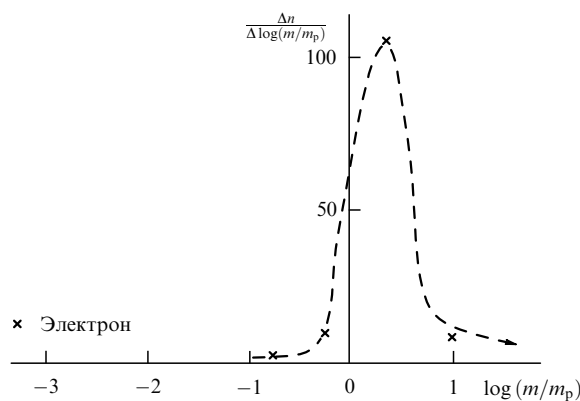


Рис. 4. Распределение элементарных частиц по массам.

При таком выводе мы экстраполировали распределения (17), (18) примерно на 12 порядков, что может вызвать естественные сомнения. Единственный оправдывающий аргумент — весьма популярна экстраполяция физических законов также на 12 порядков при построении большого объединения.

7. Заключение

Гинзбург в своей книге [42] отметил примерно 10 направлений, претендовавших в послевоенное время на титул всеобъемлющих теорий элементарных частиц и тихо почивших в бозе. Единственная выжившая весьма плодотворная теория — метод перенормировок. Но вот как о ней отзывается ее создатель Фейнман: "Я лично считаю, что теория перенормировок — это один из способов заметать под ковер трудности электродинамики, связанные с расходимостью" [43].

Сейчас надежды на построение единой теории поля связывают с очень красивыми (в математическом плане)

направлениями: суперсимметрией и ее обобщением — суперструнами.

Суперсимметрия содержит одно важнейшее экспериментальное предсказание: существование суперсимметричных партнеров элементарных частиц, во всем совпадающих с существующими элементарными частицами, кроме спина. Например, должен был бы существовать s-электрон с целочисленным спином. Однако, несмотря на большие усилия экспериментаторов, s-частицы до сих пор не обнаружили. Так, масса s-нейтрино (если оно существует) > 40 ГэВ, s-электрона $> 50-60$ ГэВ, s-фотона > 20 ГэВ [12]. Еще более высокий предел был получен на массы экзотических частиц, например, s-глюонов: $m_g > 230$ ГэВ [44]. Отсутствие s-частиц не закрывает полностью суперсимметрию (она может существовать, но нарушена).

Теория суперструн включает суперсимметрию; ее фундаментальный объект — суперструна — имеет протяженность $l \sim l_p \sim 10^{-33}$ см. По существу, основная идея этого направления — замена понятия точки на малый одномерный объект. Как известно, именно допущение о точечности истинно элементарных частиц (лептонов и кварков) — главная причина основных расходимостей в квантовой теории поля.

Теория суперструн, опираясь на математические достижения суперсимметрии, имеет основную задачу — построить квантовую теорию поля, свободную от расходимостей и аномалий (отрицательных вероятностей). Для этой цели одномерный малый объект — суперструна — наделяется многими характеристиками: натяжением (играющим роль константы взаимодействия) и различными спинами и симметриями. Суперструны можно трактовать как одномерные объекты в 4-мерном пространстве Минковского или как компактные слои в расслоенном пространстве (в духе идей Калуца–Клейна). Основной критерий теории суперструн — отсутствие внутренних противоречий в теории. В настоящее время эту задачу удалось решить в первом (однопетлевом) приближении. О сложности конструкций, принятых в теории суперструн, свидетельствует тот факт, что в одном из самых распространенных ее вариантов размерность компактного пространства равна 502. Среди многочисленных работ, посвященных теории суперструн можно назвать обзоры [37, 45, 46] и книги [39, 47, 48].

Несмотря на относительно длинный путь суперсимметрий (~ 25 лет) не удалось решить главную задачу создать теорию, полностью свободную от расходимостей и аномалий. Представляется вероятным, что эта проблема не изолирована, а связана с фундаментальными проблемами физики элементарных частиц и космологии. Если интерпретация механизма нарушения суперсимметрии при масштабах ~ 100 ГэВ кажется принадлежащей исключительно ведомству суперсимметрии, то объяснение динамики компактификации и, следовательно, размерности пространства тесно связано с космологией (см. раздел 5). Эта связь, очевидно, проявляется и в том, что образование метагалактик в рамках инфляционной космологии и теории суперструн определяется процессами, происходящими в планковской области.

Представляется существенным, что некоторые фундаментальные характеристики Метагалактики (параметры вакуума, спектр масс элементарных частиц) относятся и к Вселенной (см. разделы 5, 6). Поэтому

теория Всего (Theory of Everything, ТОЕ) невозможна без интерпретации этих характеристик. Ясно, что указанные проблемы — не только задачи теории элементарных частиц, но и космологии.

Создание теорий эволюции Метагалактики, Вселенной и полной теории элементарных частиц — разные аспекты одной проблемы.

Дополнение

Большое объединение и распад протона

Объединение взаимодействий возможно, если существует единая константа связи α_u . Известно [15], что константы слабого электромагнитного и сильного взаимодействий зависят от передаваемого 4-импульса q (соответствующей массы). Поэтому постоянные α называются бегущими константами. Основная надежда на существование большого объединения связана с весьма нетривиальным пересечением бегущих констант α_e , α_w и α_s при $q \sim 10^{15}$ ГэВ. Когда в начале 90-х годов появилось сообщение [49] об отсутствии пересечения, в стане специалистов возникла легкая паника. К счастью, данные работы [49] не подтвердились. Существование пересечения означает в терминах теории поля, что существует некий X-бозон с массой $m_X \sim 10^{15}$ эВ, переносящий электромагнитное, слабое и сильное взаимодействия. Поэтому возможна следующая цепь реакций:

$$p \rightarrow uud \rightarrow e^+ \bar{d} d \rightarrow e^+ \pi^0,$$

где u , \bar{d} и d — кварки.

Одно из звеньев этой цепи представлено на рис. 5. Из этого рисунка легко оценить время жизни t_p протона. Основная идея оценки: из-за большой величины m_X всегда сечения σ испускания и поглощения X-бозона есть $\sigma \sim 1/m_X^2$. Поэтому вероятность w представленного на рис. 5 процесса $w \propto \alpha_u^2/m_X^4$ ($\alpha_u \sim 1/40$ — константа объединенного взаимодействия). Из соображений размерности время жизни $t_p \sim m_X^4/\alpha_u^2 m_p^5 \sim 10^{32}$ лет при $m_X = 10^{15}$ ГэВ.

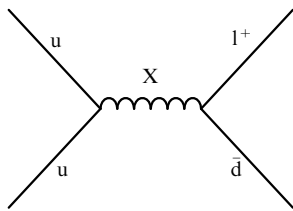


Рис. 5. Диаграмма перехода двух кварков в лептон и антикварк при обмене X-бозоном.

Список литературы

1. Линде А Д *Физика элементарных частиц и инфляционная космология* (М.: Наука, 1990)
2. Вайнберг С *Гравитация и космология* (М.: Мир, 1975)
3. Зельдович Я Б, Новиков И Д *Строение и эволюция Вселенной* (М.: Наука, 1975)
4. Гуревич Л Э, Чернин А Д *Введение в космологию* (М.: Наука, 1978)
5. Gelb J, Bertschinger E, Preprint Fermilab. 92/73 (December 1992)
6. Turner M, Preprint Fermilab. 92/382 (January 1993)
7. Mather J et al. *Astrophys. J.* **420** 439 (1994)
8. Turner M, Preprint Fermilab. Conf. 95-125A
9. Turner M, Preprint Fermilab. Conf. 92/313
10. Walker T et al. *Astrophys. J.* **376** 393 (1991)
11. Schramm D, Preprint Fermilab. Conf. 93/022-A (January 1993)
12. Review of Particle Properties *Phys. Rev. D* **50** 1193 (1994)
13. Turner M, in *The Early Universe* (Eds W Unruh, G Semenoff) (Boston: Reidel Publ. Com., 1988) p. 19
14. Gelmini G, in *The Early Universe* (Eds W Unruh, G Semenoff) (Boston: Reidel Publ. Com., 1988) p. 351
15. Окунь Л Б *Лептоны и кварки* (М.: Наука, 1990)
16. Глинер Э Б *ЖЭТФ* **91** 99 (1965)
17. Старобинский А А *Письма ЖЭТФ* **30** 719 (1979)
18. Guth A H *Phys. Rev. D* **23** 347 (1981)
19. Hawking S W *Nucl. Phys. B* **144** 349 (1978)
20. Linde A D *Phys. Lett. B* **1229** 177 (1983)
21. Linde A D *Phys. Lett. B* **175** 395 (1986)
22. Copeland E J et al. Preprint Fermilab. 93/029-A (March 1993)
23. Barrow J D *Nucl. Phys. B* **310** 743 (1988)
24. Burd A B, Barrow J D *Nucl. Phys. B* **308** 929 (1988)
25. Ellis J et al. *Nucl. Phys. B* **277** 231 (1986)
26. Lonsdale S, Moss I *Phys. Lett. B* **189** 12 (1987)
27. Розенталь И Л *Элементарные частицы и структура Вселенной* (М.: Наука, 1984)
28. Barrow J D, Tipler F J *The Anthropic Cosmological Principle* (Oxford: Oxford Univ. Press, 1986)
29. Хойл Ф *Галактики, ядра, квазары* (М.: Мир, 1968)
30. Окунь Л Б *УФН* **161** 177 (1991)
31. Dirac P A M *Nature* (London) **137** 323 (1937)
32. Чечев В, Крамаровский Я *Радиоактивность и эволюция Вселенной* (М.: Наука, 1978)
33. Варшавович Д А, Левшаков С А, Потехин А Ю *УФН* **163** 111 (1993)
34. Cowie L L, Songla A *Astrophys. J.* **453** 596 (1995)
35. Gildener E, Weinberg S *Phys. Rev. D* **13** 3333 (1976)
36. Witten E *Nucl. Phys. B* **188** 513 (1981)
37. Вайнштейн А И, Захаров В И, Шифман М А *УФН* **146** 583 (1985)
38. Матинян С Г *УФН* **130** 3 (1980)
39. Розенталь И Л *Геометрия, динамика, вселенная* (М.: Наука, 1990)
40. Gurevich L, Mostepanenko V *Phys. Lett. A* **35** 201 (1971)
41. Rozental I *Science Spectra* **2** 64 (1995)
42. Гинзбург В Л *О физике и астрофизике* (М.: Квантум, 1996) с. 86
43. Фейнман Р *Характер физических законов* (М.: Мир, 1968) с. 228
44. Done J P, Preprint Fermilab. Conf. 95/372 (October 1996)
45. Барбашов Б М, Несторенко В В *УФН* **150** 489 (1986)
46. Арефьева И Я, Волович И В *УФН* **146** 655 (1985)
47. Грин М, Шварц Д, Виттен Э *Теория суперструн Т. 2* (М.: Мир, 1990)
48. Polyakov A M *Gauge Fields and Strings* (New York: Harwood Acad. Publ., 1987)
49. Amaldi U, de Boer W, Fuestenau H *Phys. Lett. B* **260** 447 (1991)

Elementary particles and cosmology (Metagalaxy and Universe)

I.L. Rozental'

*Institute for Space Research, Russian, Academy of Sciences
Profsoyuznaya ul. 84/32, 117810 Moscow, Russia
Tel. (7-095) 333-53 35, 134-53 40*

The close liaison between cosmology and the theory of elementary particles is analyzed in the light of prospects of unified field theory. The unity of their respective problems and solution methodologies is indicated. The difference between the concepts 'Metagalaxy' and 'Universe' are emphasized and some possible schemes for estimating the size of the Universe pointed out.

PACS numbers: **98.80.-k**

Bibliography — 49 references

Received 16 January 1997, revised 21 April 1997