

УСТНЫЙ ВЫПУСК ЖУРНАЛА "УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК"

Иерархии фундаментальных констант

(к пунктам 16, 17 и 27 из списка В.Л. Гинзбурга)

В.А. Рубаков

Современное понимание нерешенных проблем физики элементарных частиц и космологии приводит к выводу о том, что перед естествознанием встают вопросы весьма нестандартного характера и в ближайшем будущем, возможно (хотя и далеко не обязательно), произойдет радикальное дополнение имеющихся сегодня представлений о законах природы. Ключевыми с этой точки зрения должны стать эксперименты на вводимом в строй протонном коллайдере LHC в ЦЕРНе.

PACS numbers: 12.60. -i, 95.35. +d, 95.36. +x

Содержание

1. Введение (407).
 2. Иерархии в физике частиц (408).
 3. Темная материя и темная энергия во Вселенной (410).
3.1. Темная материя. 3.2. Темная энергия.
 4. Что все это значит? (412).
- Список литературы (413).

1. Введение

Проблемы из списка В.Л. Гинзбурга, о которых идет речь, относятся, с одной стороны, к физике элементарных частиц (Стандартная модель, Великое объединение, суперобъединение, взаимодействие частиц при высоких энергиях и т.д.), а с другой — к космологии (проблема темной материи; я бы сюда добавил и проблему темной энергии). Современный этап развития этих фундаментальных разделов естествознания — совершенно особый. Многолетние усилия ученых, работающих в области физики высоких энергий (в широком смысле этого слова), позволили выяснить свойства элементарных частиц и их взаимодействий вплоть до энергий и масс¹ порядка 100 ГэВ и расстояний 10^{-16} см. В то же время бурный прогресс в области космологии, в первую очередь наблюдательной, привел к тому, что свойства

¹ В дальнейшем, как это принято в физике частиц, используется система единиц, в которой скорость света и постоянная Планка полагаются равными единице: $c = \hbar = 1$. В этой системе масса (энергия покоя) протона примерно равна 1 ГэВ.

В.А. Рубаков. Институт ядерных исследований РАН,
117312 Москва, просп. 60-летия Октября 7а, Российская Федерация
Тел. (495) 135-77-60. Факс (495) 135-22-68
E-mail: rubakov@ms2.inr.ac.ru

Статья поступила 22 января 2007 г.

современной и ранней Вселенной, особенности ее эволюции сегодня известны не только качественно, но и количественно, причем с хорошей точностью.

Тем не менее обозначенные выше проблемы остаются нерешенными. Более того, современное понимание этих проблем приводит к выводу о том, что перед фундаментальной физикой встают вопросы совершенно нового характера и в ближайшем будущем, возможно (возможно!), произойдет существенное и весьма радикальное дополнение сегодняшних представлений о законах природы.

На такую возможность указывают две группы соображений. Одна из них связана с тем, что для интерпретации космологических наблюдательных данных необходимо привлечь гипотезы, выходящие за рамки известных представлений о физике элементарных частиц и их взаимодействиях; более того, даже с помощью новых гипотез некоторые свойства Вселенной (точнее, наблюдаемой ее части) не находят удовлетворительного объяснения, а выглядят как случайные совпадения. Другая имеется в рамках самой физики частиц, где существуют иерархии — различия на несколько, а нередко и на много порядков величины — между фундаментальными константами, понимаемыми в широком смысле как безразмерные параметры теории; надежного, экспериментально проверенного объяснения этих иерархий до сих пор нет, а некоторые из них не поддаются объяснению даже с помощью сколько-нибудь правдоподобных гипотез.

Цель этого сообщения — кратко изложить некоторые из указанных соображений, пояснить, к какого рода выводам они подталкивают, и обсудить, насколько будущие эксперименты могут подтвердить эти выводы. Ключевыми с этой точки зрения должны стать эксперименты на вводимом в строй протон-протонном коллайдере LHC в ЦЕРНе с энергией сталкивающихся протонов 7×7 ТэВ, где станет доступной новая область энергий, характеризующая масштабом 1 ТэВ и даже несколько большим. Запуск LHC намечен на 2007–2008 гг., так что ситуация должна проясниться в ближайшем буду-

щем. Это еще одна особенность современного этапа развития фундаментальной физики.

2. Иерархии в физике частиц

Все известные элементарные частицы и их взаимодействия, за исключением нейтринных осцилляций, описываются теорией, которую традиционно называют Стандартной моделью физики частиц (см., например, [1]). Эта теория довольно проста. Состав частиц в ней схематически показан на рис. 1, а в качестве взаимодействий выступают электромагнитные (переносчик — фотон), слабые (переносчики — W - и Z -бозоны) и сильные (переносчики — глюоны). Сильные взаимодействия между кварками и глюонами описываются квантовой хромодинамикой — калибровочной теорией, основанной на группе цвета $SU(3)_c$, электромагнитные и слабые взаимодействия объединены в единое электрослабое взаимодействие с калибровочной группой $SU(2)_W \times U(1)_Y$. Для дальнейшего важно, что в теории имеются три константы калибровочных взаимодействий α_3 , α_2 и α_1 в соответствии с тремя сомножителями полной калибровочной группы $SU(3)_c \times SU(2)_W \times U(1)_Y$ (в действительности эти константы зависят от энергии (см. ниже)). Константа электромагнитных взаимодействий $\alpha = 1/137$ является комбинацией α_1 и α_2 .

Массы кварков, заряженных лептонов, W - и Z -бозонов обусловлены, по-видимому, механизмом Хиггса. А именно, предполагается, что помимо известных полей в природе имеется по крайней мере еще одно поле — скалярное поле Хиггса, имеющее отличное от нуля вакуумное среднее — хиггсовский конденсат, взаимодействие с которым и приводит к существованию масс частиц. Ситуация здесь во многом аналогична возникновению эффекта Мейснера (появлению "массы" магнитного поля) в результате образования конденсата эффективного скалярного поля в модели сверхпроводимости Гинзбурга–Ландау. В Минимальной стандартной модели с одним хиггсовским полем имеется всего одна дополнительная частица — бозон Хиггса, поиск которого является одной из основных задач предстоящих экспериментов на ЛHC (см., например, [2]). Вакуумное среднее хиггсовского поля ϕ задает характерный для электрослабой теории масштаб энергий и масс,

$$A_{EW} = \langle \phi \rangle = 247 \text{ ГэВ}. \quad (1)$$

Различие в массах кварков, заряженных лептонов, а также W - и Z -бозонов связаны с различием между

взаимодействиями соответствующих полей с полем Хиггса: масса каждой из частиц пропорциональна соответствующей константе — одной из безразмерных констант связи с хиггсовским полем, которые не равны друг другу. В Стандартной модели эти константы связи являются произвольными параметрами, которые определяются экспериментально на основании измерений масс частиц (и углов смешивания).

В рамках Стандартной модели имеется еще один масштаб энергий. Он характеризует сильные взаимодействия и оценивается величиной

$$A_{QCD} \approx 200 \text{ МэВ}. \quad (2)$$

Именно этим масштабом в основном определяются массы частиц², состоящих из легких кварков, например протона, нейтрона и ρ -мезона (см. [3]). Масштабы A_{EW} и A_{QCD} в рамках Стандартной модели независимы, соотношение между ними в принципе могло бы быть любым.

Разумеется, в природе есть и гравитационное взаимодействие со своим характерным масштабом энергий — массой Планка

$$M_{Pl} \approx 10^{19} \text{ ГэВ}. \quad (3)$$

Видно, что масштабы энергий для разных взаимодействий различны. Это и составляет проблему калибровочных иерархий, которую можно сформулировать так: почему масштабы сильных и электрослабых взаимодействий довольно близки, а масштаб гравитационных взаимодействий так сильно от них отличается?

В рамках самой Стандартной модели ответа на этот вопрос нет, масштабы A_{QCD} , A_{EW} и M_{Pl} совершенно независимы. Традиционный взгляд на эту проблему состоит в том, что Стандартная модель не является полной теорией, а калибровочные иерархии естественным образом возникают в теории, расширяющей Стандартную модель.

Одна из наиболее популярных гипотез, объясняющих малое по сравнению с M_{Pl} значение A_{QCD} , — это гипотеза Большого объединения, предполагающая, что при сверхвысоких энергиях имеется единое калибровочное взаимодействие, которое на масштабе M_{GUT} , не слишком сильно отличающемся от M_{Pl} , "расщепляется" на сильное и электрослабое взаимодействия (единая простая калибровочная группа нарушается, происходит переход к группе $SU(3)_c \times SU(2)_W \times U(1)_Y$). За такое расщепление может также отвечать механизм Хиггса, но уже с большой величиной вакуумного среднего хиггсовского поля $\langle \Phi \rangle \sim M_{GUT}$. Разумеется, поле Φ требуется включать в теорию дополнительно к хиггсовскому полю Стандартной модели ϕ .

В реалистических моделях $M_{GUT} \sim 10^{16}$ ГэВ, что действительно довольно близко³ к M_{Pl} . Калибровочные константы в действительности константами не являются, они изменяются в зависимости от энергии в соответствии с уравнениями ренормгруппы. При энергиях,

² Вакуум квантовой хромодинамики характеризуется кварковыми и глюонными конденсатами, величина которых определяется масштабом A_{QCD} . Эти конденсаты и дают главные вклады в массы частиц, состоящих из легких кварков.

³ Отметим, что между M_{GUT} и M_{Pl} имеется своя иерархия, хотя и не столь драматичная, как иерархия между A_{EW} , A_{QCD} и M_{Pl} .

Три семейства частиц			
Лептоны	$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}$,	$\begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}$,	$\begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$
Кварки	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$,	$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$,	$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$
			e^+ : позитрон, ...
+ АНТИЧАСТИЦЫ			$\bar{\nu}_e$: антинейтрино, ...
			\bar{u} : антикварки, ...

+ частицы, ответственные за взаимодействия: фотон, глюоны, W , Z , гравитон + бозон Хиггса (еще не открыт).

Рис. 1. Частицы Стандартной модели.

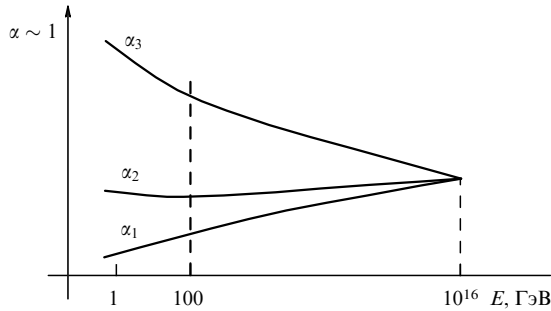


Рис. 2. Зависимость калибровочных констант от энергии в моделях Большого объединения.

превышающих M_{GUT} , имеется единая калибровочная константа, так что

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3, \quad E \geq M_{GUT} \tag{4}$$

(при подходящем определении α_1 , подробности см. в [1]). При $E < M_{GUT}$ калибровочные константы α_1, α_2 и α_3 эволюционируют с понижением энергии по-разному, причем (4) выступает в качестве начального условия ренормгрупповой эволюции, как это схематически изображено на рис. 2.

Существенно, что эта эволюция *логарифмическая*, т.е. калибровочные константы изменяются с энергией медленно. В частности, константа сильных взаимодействий ведет себя как

$$\alpha_3(E) = \frac{\alpha_{GUT}}{1 + \hat{\beta} \alpha_{GUT} \ln(E/M_{GUT})}, \tag{5}$$

где константа $\hat{\beta}$ определяется составом заряженных по цвету частиц с массами в интервале $E < m < M_{GUT}$, а α_{GUT} — калибровочная константа (единая для всех взаимодействий) на масштабе M_{GUT} , которая оказывается довольно малой: $\alpha_{GUT} \sim 1/20 - 1/40$, в зависимости от модели. Константа $\hat{\beta}$ положительна, так что $\alpha_3(E)$ возрастает при понижении энергии (и наоборот, убывает при повышении энергии, что соответствует асимптотической свободе квантовой хромодинамики). Масштаб Λ_{QCD} соответствует значению энергии, при котором константа α_3 становится порядка единицы и квантовая хромодинамика вступает в режим сильной связи. Благодаря логарифмической зависимости в (5) этот масштаб энергии экспоненциально мал по сравнению с масштабом M_{GUT} ,

$$\alpha_3(\Lambda_{QCD}) \sim 1 \iff \Lambda_{QCD} = M_{GUT} \exp\left(-\frac{\text{const}}{\alpha_{GUT}}\right). \tag{6}$$

При таком механизме проблема иерархии между Λ_{QCD} и M_{Pl} (точнее, между Λ_{QCD} и M_{GUT}) находит элегантное решение.

Подобным образом можно решить и проблему иерархии между Λ_{EW} и M_{Pl} . В этом случае речь идет о логарифмическом изменении с энергией параметров хиггсовского сектора. В то же время *соотношение между Λ_{QCD} и Λ_{EW} носит характер случайности*: без специального подбора параметров значения Λ_{QCD} и Λ_{EW} экспоненциально отличались бы друг от друга. Естественного механизма, обеспечивающего равенство Λ_{QCD} и Λ_{EW} в пределах трех порядков величины, до сих пор не предложено.

Объединение калибровочных констант, т.е. равенство $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3$ на некотором масштабе M_{GUT} , не является автоматическим: три кривые, вообще говоря, не проходят через одну точку. Если состав частиц Стандартной модели не расширять, то такое объединение действительно не будет иметь места. Таким образом, Большое объединение требует расширения Стандартной модели, причем при достаточно низких энергиях. Наиболее популярными расширениями, обеспечивающими объединение калибровочных констант, являются модели с низкоэнергетической суперсимметрией (см., например, [2, 4–6]), хотя есть и другие возможности, такие, как расщепленная суперсимметрия (split supersymmetry [7]) или модель с дополнительными изодублетными фермионами [8]. Суперсимметричные теории, в отличие от многих других моделей, обеспечивают и *стабильность* величины Λ_{EW} , которая является еще одной проблемой Стандартной модели. Эта проблема состоит в следующем. К квадрату массы бозона Хиггса m_H и соответственно к квадрату вакуумного среднего хиггсовского поля $\langle \phi \rangle$ имеются, вообще говоря, радиационные поправки. В отличие от других радиационных поправок они расходятся квадратично, а не логарифмически, так что радиационные поправки к электрослабому масштабу имеют следующую структуру:

$$\delta \Lambda_{EW}^2 \sim \delta m_H^2 = F(g) \Lambda_{UV}^2, \tag{7}$$

где $F(g)$ — вполне определенная комбинация констант связи теории, а Λ_{UV} — параметр ультрафиолетового обрезания. В Стандартной модели

$$\delta m_H^2 \approx 0,1 \Lambda_{UV}^2. \tag{8}$$

Если воспринимать Стандартную модель как полную теорию, работающую вплоть до планковских масштабов, и положить $\Lambda_{UV} \sim M_{Pl}$, то затравочное значение m_H^2 нужно подбирать так, чтобы сократить вклады (7) с точностью не хуже, чем 10^{-32} , во всех порядках теории возмущений (!).

На эту проблему можно посмотреть и с другой стороны. А именно, предположим, что Стандартная модель является частью более широкой теории с улучшенным ультрафиолетовым поведением. Конкретнее, предположим, что в этой более широкой теории квадратичные ультрафиолетовые расходимости в δm_H^2 отсутствуют. Тогда в качестве Λ_{UV} будет выступать масштаб "новой физики", т.е. масштаб масс новых частиц: действительно, вплоть до этих энергий вклады в δm_H^2 дают исключительно поля Стандартной модели, и лишь при энергиях, превышающих Λ_{UV} , эти вклады сокращаются благодаря "новой физике". Оценка (8) показывает, что энергетический масштаб "новой физики", если не предполагать тонкой подстройки параметров, должен составлять величину порядка

$$\Lambda_{UV} \sim 300 \text{ ГэВ} - 1 \text{ ТэВ}, \tag{9}$$

т.е. находиться как раз в области энергий ЛНС. Это соображение является главным основанием для того, чтобы ожидать, что помимо хиггсовского бозона на ЛНС будут открыты новые частицы и явления.

Низкоэнергетическая суперсимметрия как раз и является одним из возможных сценариев "новой физики". В суперсимметричных теориях квадратичные

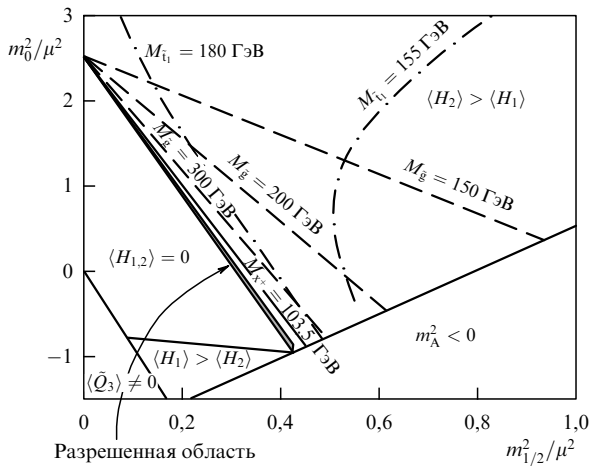


Рис. 3. Разрешенная область параметров [9] модели mSUGRA. Отмечены экспериментальные ограничения, на основе которых та или иная область параметров экспериментально запрещена.

расходимости типа (7) сокращаются благодаря вкладам новых частиц — суперпартнеров частиц Стандартной модели. На основании сказанного выше массы этих частиц должны лежать в области от нескольких сотен гигаэлектронвольт до нескольких тераэлектронвольт, которая вполне доступна для экспериментов на LHC [2]. Нельзя не подчеркнуть, однако, что уже имеющиеся экспериментальные данные существенно ограничивают область разрешенных параметров моделей с низкоэнергетической суперсимметрией. В качестве иллюстрации на рис. 3 приведена вся область теоретически допустимых безразмерных параметров вместе с разрешенной областью [9] в одной из простых моделей — так называемой модели mSUGRA (от англ. — minimal supergravity), где дополнительными по отношению к Стандартной модели являются параметры размерности массы m_0 , $m_{1/2}$ и μ . При взгляде на рис. 3 становится ясно: тот факт, что суперсимметрия до сих пор экспериментально не обнаружена, сам представляет проблему для суперсимметричных теорий⁴. В связи с этим в последнее время интенсивно предпринимаются попытки решить проблему стабильности электрослабого масштаба относительно радиационных поправок с привлечением идей, отличных от идеи низкоэнергетической суперсимметрии (см. обзоры [10–12]); однако в большинстве из предложенных моделей одновременно решить проблему иерархии между Λ_{EW} и M_{Pl} не удается.

В заключение этого раздела упомянем еще одну проблему иерархии, которая существует как в Стандартной модели, так и в ее расширениях. Речь идет о массах известных фермионов — кварков и заряженных лептонов. Масса наиболее тяжелого из них — t -кварка — составляет около 172 ГэВ, а масса легчайшего — электрона — около 0,5 МэВ. Таким образом, мы имеем дело с иерархией⁵

$$\frac{m_e}{m_t} \sim 3 \times 10^{-6}. \quad (10)$$

⁴ Эта проблема получила в литературе название малой проблемы иерархий.

⁵ Массы фермионов пропорциональны безразмерным юкавским константам связи с хиггсовским полем, так что можно говорить об иерархии этих констант, а не об иерархии масс.

Несмотря на многочисленные гипотезы, сколько-нибудь уверенного ответа на вопрос о происхождении этой иерархии до сих пор нет. Вообще, значения масс кварков и заряженных лептонов выглядят довольно случайными, в качестве тенденции можно отметить лишь общее возрастание этих масс от поколения к поколению.

3. Темная материя и темная энергия во Вселенной

Одним из неожиданных результатов, полученных за последние полтора-два десятилетия, стало выяснение того факта, что известные частицы (протоны, нейтроны, ядра, электроны, фотоны и нейтрино) обеспечивают всего около 5% полной энергии в современной Вселенной. Большая часть энергии связана с темной материей (20–25%) и темной энергией (70–75%) (рис. 4). Эти формы энергии существенно различаются по своему поведению в расширяющейся Вселенной и имеют совершенно различные возможные интерпретации с точки зрения физики частиц.

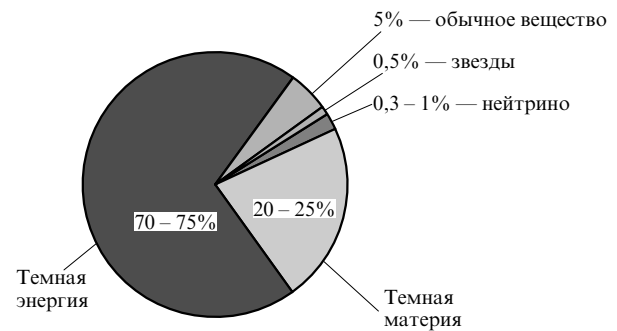


Рис. 4. Баланс энергий в современной Вселенной.

3.1. Темная материя

Темная материя, по-видимому, состоит из новых, неизвестных частиц (см. обзоры [13]). Эти частицы должны быть стабильными или иметь время жизни, сравнимое с возрастом современной Вселенной, $t_U \approx 14$ млрд лет. Таких частиц нет в Стандартной модели, так что уже само представление о темной материи требует выхода за рамки Стандартной модели. Частицы темной материи имеют те же свойства по отношению к гравитационным взаимодействиям, что и обычные частицы; они способны собираться в сгустки (гало галактик и галактические скопления) и формировать гравитационные потенциалы. Исключительно велика роль темной материи в формировании структур во Вселенной — галактик, их скоплений и т.д. Из результатов исследования этих структур, как и из изучения анизотропии и поляризации микроволнового реликтового излучения, следует, что частицы темной материи были нерелятивистскими уже на весьма ранних этапах эволюции Вселенной, что скорее всего (но не обязательно; известным исключением здесь являются аксионы) связано с достаточно большой величиной их массы. В то же время частицы темной материи не имеют электрического заряда и вообще чрезвычайно слабо взаимодействуют с веществом, иначе они были бы уже зарегистрированы в экспериментах по их прямому поиску.

Наиболее простым, а потому и наиболее привлекательным механизмом генерации темной материи во Вселенной является следующий. При температурах ранней Вселенной, сравнимых с массой частиц темной материи⁶ m_{DM} , интенсивно происходили процессы парного рождения и аннигиляции этих частиц, так что их концентрация была велика и близка к равновесной⁷. При понижении температуры концентрация частиц темной материи падала вследствие процессов аннигиляции и за счет расширения Вселенной. При $T \sim m_{\text{DM}}/20$ концентрация стала настолько малой, что процессы парной аннигиляции прекратились, и с тех пор плотность числа частиц темной материи уменьшалась только из-за расширения Вселенной.

Вычисленная в рамках этого механизма современная плотность массы темной материи довольно слабо (логарифмически) зависит от m_{DM} и сильно (как $1/\sigma$) зависит от сечения аннигиляции. Требуемая плотность массы темной материи во Вселенной получается, если предположить, что масса частицы темной материи оценивается величиной $m_{\text{DM}} \sim 10 \text{ ГэВ} - 1 \text{ ТэВ}$, а интенсивность взаимодействий частиц темной материи между собой и с обычным веществом сравнима с интенсивностью слабых взаимодействий (сечение парной аннигиляции в обычные частицы составляет $10^{-35} - 10^{-36} \text{ см}^2$). Указанная область масс и сечений такова, что возможно рождение частиц темной материи в столкновениях протонов на ЛНС, а также, в определенной области параметров, их регистрация в прямых и косвенных экспериментах по поиску темной материи в нашей Галактике. Этот сценарий реализуется во многих моделях с низкоэнергетической суперсимметрией, где среди суперпартнеров известных частиц действительно имеются стабильные нейтральные тяжелые частицы (нейтралино).

Разумеется, существуют и другие гипотетические кандидаты на роль частиц темной материи (аксионы, гравитино, сверхмассивные частицы и т.д.), однако в большинстве других сценариев требуемую плотность массы темной материи во Вселенной удается получить лишь с помощью подгонки параметров модели. Подчеркнем, что в любом случае механизмы генерации темной материи и асимметрии между веществом и антивеществом во Вселенной совершенно различны (за исключением нескольких довольно экзотических сценариев вроде сценария с образованием и последующим распадом Q-шаров [14]), поэтому *приближенное равенство (в пределах порядка величины) между плотностью массы обычного вещества и плотностью массы темной материи во Вселенной носит характер случайного совпадения*. Это обстоятельство тем более замечательно, что безразмерные характеристики концентраций барионов (протонов и нейтронов) и темной материи весьма малы: для барионов такой характеристикой является отноше-

ние η_{B} плотности числа барионов n_{B} к плотности числа реликтовых фотонов n_{γ} , которое не зависит от времени (с точностью до фактора порядка единицы):

$$\eta_{\text{B}} \equiv \frac{n_{\text{B}}}{n_{\gamma}} = 6 \times 10^{-10}. \quad (11)$$

Аналогичное отношение η_{DM} для частиц темной материи тоже мало, однако при этом с точностью до фактора 5 для нашей Вселенной выполняется равенство

$$\frac{\eta_{\text{B}}}{\eta_{\text{DM}}} \approx \frac{m_{\text{DM}}}{m_{\text{p}}}, \quad (12)$$

где m_{p} — масса протона. Как мы только что отмечали, сколько-нибудь правдоподобного механизма, обеспечивающего выполнение соотношения (12) без тонкой подстройки параметров, пока неизвестно.

3.2. Темная энергия

Гравитационные свойства темной энергии сильно отличаются от свойств других форм энергии (см. обзоры [15]). Темная энергия не собирается в сгустки, она равномерно "разлита" во Вселенной. Плотность темной энергии очень слабо изменяется или вообще не изменяется со временем, в то время как плотность любых частиц относительно быстро уменьшается из-за расширения Вселенной. Наличие темной энергии приводит к *ускоренному* расширению Вселенной, так что можно условно сказать, что темная энергия испытывает антигравитацию. В рамках общей теории относительности это возможно, если данная субстанция имеет, помимо положительной энергии, отрицательное давление. Отрицательность давления следует и из общего соотношения

$$dE = -p dV. \quad (13)$$

Действительно, если плотность энергии постоянна или почти постоянна во времени, то при расширении Вселенной энергия (в сопутствующем объеме) растет как объем, так что давление должно быть отрицательным и равным или почти равным по абсолютной величине плотности энергии⁸.

Возможные формы темной энергии и их проявление в космологических наблюдениях обсуждаются сейчас очень широко. Одна из возможностей состоит в том, что темная энергия — это энергия вакуума (или космологическая постоянная, что одно и то же, по крайней мере при современном понимании вопроса). Действительно, лоренц-инвариантность вакуума однозначно диктует вид его тензора энергии-импульса (в локально-лоренцевой системе отсчета):

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

где ε^{vac} — постоянная, а $\eta_{\mu\nu}$ — тензор Минковского. Отсюда следует, что энергия вакуума $T_{00}^{\text{vac}} = \varepsilon^{\text{vac}}$ не зависит от времени, а давление равно $p^{\text{vac}} = -\varepsilon^{\text{vac}}$. Альтернативой вакууму может служить новое свехслабое поле, однородное во Вселенной (точнее, в видимой ее части). Ускоренное расширение Вселенной могло бы в принципе объясняться и тем, что законы гравитации модифицируются на сверхбольших расстояниях.

⁸ Отметим, что в контексте общей теории относительности соотношение (13) это не что иное, как одно из условий ковариантного сохранения тензора энергии-импульса.

⁶ Здесь используется система единиц, в которой помимо \hbar и c положена равной единице и константа Больцмана, $k_{\text{B}} = 1$. В обычных единицах речь идет о температурах, для которых $k_{\text{B}} T \sim m_{\text{DM}} c^2$.

⁷ Предполагается, что других процессов, в которых могли бы рождаться и исчезать частицы темной материи, нет. Это предположение вполне согласуется с требованием стабильности этих частиц. Кроме того, если частицы темной материи отличаются от своих античастиц (т.е. не являются абсолютно нейтральными), то дополнительным предположением является отсутствие асимметрии в секторе темной материи, т.е. предполагается, что числа частиц и античастиц темной материи были и остаются в точности равными.

Проблема темной энергии (ее еще называют проблемой космологической постоянной) имеет два аспекта. Во-первых, с точки зрения физики частиц можно было бы ожидать, что различные взаимодействия дают вклады в энергию вакуума, величины которых определяются характерными энергетическими масштабами этих взаимодействий. Так, вклад сильных взаимодействий можно было бы оценить из размерных соображений⁹ как

$$\epsilon_{\text{QCD}}^{\text{vac}} \sim A_{\text{QCD}}^4 \approx (200 \text{ МэВ})^4. \quad (15)$$

Действительно, вакуум квантовой хромодинамики имеет весьма сложную структуру, и *a priori* нет никаких оснований ожидать, что его энергия на много порядков отличается от оценки (15). В то же время наблюдаемое значение плотности темной энергии равно

$$\epsilon_{\text{DE}} = A_{\text{DE}}^4, \quad (16)$$

где

$$A_{\text{DE}} \approx 2 \times 10^{-3} \text{ эВ}. \quad (17)$$

Видно, что различие между размерной оценкой (15) и реальным значением составляет 44 порядка величины (!). Ситуация становится еще хуже, если учесть вклады электрослабых и самих гравитационных взаимодействий, которые можно было бы оценить как A_{EW}^4 и M_{Pl}^4 соответственно. В этом и состоит первый аспект проблемы: совершенно непонятно, почему реальное значение космологической постоянной столь мало по сравнению с характерными масштабами плотностей энергии в физике частиц.

Нужно сказать, что этот аспект проблемы обсуждался задолго до появления наблюдательных данных, свидетельствующих о ненулевом значении плотности темной энергии (см. обзоры [16, 17]): он имелся бы и в отсутствие темной энергии во Вселенной. В частности, были предложены механизмы, приводящие к релаксации космологической постоянной до нуля или почти до нуля. Эти механизмы выглядят, впрочем, весьма экзотическими; кроме того, реализоваться они могли [18, 19] только на стадиях эволюции Вселенной, предшествовавших всем известным космологическим эпохам и даже эпохе раздувания (инфляции), что делает экспериментальную проверку этих идей безнадёжной задачей.

Второй аспект проблемы темной энергии состоит в том, что в физике частиц нет столь малого энергетического масштаба, как $A_{\text{DE}} \sim 10^{-3} \text{ эВ}$. В большинстве гипотез о носителе темной энергии этот масштаб приходится вводить "вручную"; связать его с известными масштабами типа A_{EW} или M_{Pl} чрезвычайно трудно, если вообще возможно. Таким образом, этот аспект проблемы в определенном смысле аналогичен проблеме калибровочной иерархии, однако в отличие от последней сколь угодно элегантно решение здесь пока не предложено.

4. Что все это значит?

Суммируя, можно сказать, что и в физике частиц, и в космологии многие фундаментальные факты сегодня выглядят как противоречащие критерию естественно-

сти. С одной стороны, однородные параметры теории элементарных частиц оказываются разнесенными на много порядков величины: одним из примеров здесь служат энергетические масштабы, характеризующие различные взаимодействия и темную энергию; другой пример — безразмерные константы, определяющие массы кварков и заряженных лептонов. С другой стороны, разнородные характеристики Вселенной, например плотность темной материи и плотность обычного вещества, оказываются одинаковыми по порядку величины, несмотря на различные, вероятно, механизмы их генерации в ранней Вселенной. Особняком стоит проблема космологической постоянной (энергии вакуума), которая остается нерешенной в течение нескольких десятков лет, несмотря на все усилия теоретиков.

Разумеется, наиболее привлекательной является возможность того, что каждый из этих фактов имеет свое динамическое объяснение. О некоторых гипотезах такого рода мы кратко упомянули в разделах 2, 3. Замечательно, что большинство из них требует расширения известных представлений о физике частиц, доступного экспериментальной проверке в недалеком будущем, в первую очередь на ЛНС. С такой точки зрения надо ожидать открытия целых пластов "новой физики" в ближайшие годы.

Имеется, однако, и другая возможность. А именно, нельзя считать исключенным, что "случайности" действительно имеют место на самом фундаментальном уровне, что значения некоторых (или даже многих) параметров теории действительно не являются естественными. На такую точку зрения позволяет встать *антропный принцип*, согласно которому наблюдаемые нами фундаментальные параметры таковы, чтобы обеспечить возможность нашего существования (см. обзоры [20, 21]). В пользу антропного принципа говорит то, что в природе действительно есть "дружелюбные случайности", например:

— значение космологической постоянной, если его воспринимать как случайность, оказалось на много порядков меньше значений энергии вакуума, характерных для физики частиц. Если бы космологическая постоянная была на 2–3 порядка больше по абсолютной величине, чем реально наблюдаемая, то звезды типа Солнца и планетные системы не могли бы образоваться¹⁰ [17, 22];

— массы легких кварков и электромагнитная константа $\alpha = 1/137$ таковы, что нейтрон тяжелее протона (и поэтому в природе есть водород), но не намного (и поэтому имеется много стабильных ядер). Отметим, что при фиксированных значениях констант связи кварков с полем Хиггса для этого требуется, чтобы хиггсовское вакуумное среднее (электрослабый масштаб A_{EW}) было близко к его реальному значению [8];

— первичные неоднородности плотности во Вселенной $\delta\rho/\rho \sim 10^{-5}$ таковы, что образуются галактики, но не разрушаются планетные системы [23].

Список подобных "дружелюбных случайностей" можно продолжить, довольно подробное их перечисле-

⁹ В используемой системе единиц $c = \hbar = 1$ длина имеет размерность, обратную энергии, так что плотность энергии имеет размерность [(энергия)⁴].

¹⁰ В случае большой положительной космологической постоянной образованию галактик, звезд и планет препятствует слишком быстрое расширение Вселенной; при большой отрицательной космологической постоянной до образования звезд и планет расширение Вселенной прекращается и происходит коллапс обратно в космологическую сингулярность.

ние имеется в книге [24], целиком посвященной антропному принципу.

На первый взгляд антропный принцип противоречит естественно-научному взгляду на законы природы. Однако это не так. Существует возможность того, что Вселенная на самом деле неизмеримо больше, чем ее наблюдаемая часть, и что в разных областях Вселенной, также значительно больших наблюдаемой части, параметры, которые мы считаем фундаментальными, имеют неодинаковые значения (возможно, различны и сами физические законы в нынешнем понимании этого термина). На такую возможность указывают, например, модели "вечной" инфляции [21] или представление о "ландшафте" теории струн [25]. Согласно первой модели во Вселенной имеется огромное (возможно, бесконечное) число областей с разнообразным эффективным возрастом, собственной космологической историей и различным современным состоянием; часть из них по-прежнему находится на инфляционной стадии, часть, наоборот, сколлапсировала; если фундаментальные параметры могут зависеть от времени (пусть на временных масштабах, значительно превышающих масштаб, который мы считаем возрастом нашей части Вселенной), то в этих областях они действительно принимают разные значения. Во втором случае речь идет об огромном числе почти выродившихся вакуумов теории струн, которые могут реализовываться во многих областях Вселенной и иметь не только разные значения фундаментальных параметров, но и различаться по калибровочным группам, набору "элементарных" частиц и т.д. Можно упомянуть и о картине дочерних вселенных [26], в которой имеется бесконечное число вселенных с различающимися значениями фундаментальных параметров.

Если верен такой взгляд, то антропный принцип просто отражает тот факт, что наше существование возможно не в произвольном месте Вселенной, а именно там, где для этого есть подходящие условия. Как сформулировал в 1974 г. Брэндон Картер, "наше местоположение во Вселенной с необходимостью является привилегированным в том смысле, что оно совместимо с существованием нас как наблюдателей"¹¹. То, что константы, которые мы считаем фундаментальными, принимают далеко не самые естественные значения, может быть таким же эффектом селекции, как "неестественный", по отношению к характерным температурам во Вселенной, результат измерения температуры на Земле.

Трудность использования антропного принципа для получения конкретных результатов состоит в том, что *a priori* неизвестно, какие именно параметры являются фундаментальными в том смысле, что их значения определяются из антропных соображений, а какие — производными, т.е. вычисляемыми исходя из фундаментальных. В этом смысле антропный принцип нельзя опровергнуть¹².

¹¹ "Our location in the Universe is necessarily privileged to the extent of being compatible with our existence as observers". (Цитируется по книге [24].)

¹² Чисто умозрительная ситуация, в которой антропный принцип был бы опровергнут, состояла бы в построении некоторой "теории всего" и в вычислении без каких-либо неоднозначностей и из первых принципов *всех* безразмерных величин, включая константы связи, отношения масс частиц, отношения типа A_{DE}/M_{Pl} и т.д. Интересно, что сравнительно недавно такая возможность рассматривалась довольно серьезно в контексте теории суперструн.

В то же время антропный принцип *может* получить серьезную поддержку со стороны эксперимента, причем весьма скоро. А именно, как мы обсуждали в разделе 2, малость радиационных поправок к электрослабому масштабу энергий можно обеспечить либо путем чрезвычайно тонкой подстройки параметров, либо за счет существования новых частиц и новых взаимодействий на масштабе энергий, доступном для изучения на ЛНС. Тонкая подстройка параметров теории несовместима с традиционным взглядом на законы природы, но вполне допускается антропным принципом. Поэтому отсутствие "новой физики" при энергиях ЛНС или обнаружение новых частиц и взаимодействий, которые, однако, не способны обеспечить стабильность электрослабого масштаба относительно радиационных поправок, стало бы серьезным (а возможно, решающим) доводом в пользу того, что антропный принцип действительно играет роль на том уровне строения материи, который исследуется сегодня.

Не стоит и говорить, что такой оборот событий имел бы фундаментальные последствия для естествознания. Однако эти последствия были бы скорее негативными, поскольку они лишили бы предсказательной силы соображения, основанные на критерии естественности, а эти соображения в последнее время играют все большую роль¹³. Решающее слово, как всегда, остается за экспериментом, и это слово должны сказать эксперименты на ЛНС, которые начнутся уже через год.

Список литературы

1. Окунь Л Б *Лептоны и кварки* 2-е изд. (М.: Наука, 1990)
2. Красников Н В, Матвеев В А *УФН* **174** 697 (2004)
3. Иоффе Б Л *УФН* **176** 1103 (2006)
4. Высоцкий М И, Невзоров Р Б *УФН* **171** 939 (2001)
5. Горбунов Д С, Дубовский С Л, Троицкий С В *УФН* **169** 705 (1999)
6. Kazakov D I "Beyond the Standard Model", hep-ph/0411064; Gladyshev A V, Kazakov D I "Supersymmetry and LHC", hep-ph/0606288
7. Arkani-Hamed N, Dimopoulos S *J. High Energy Phys.* (JHEP06) 073 (2005); hep-th/0405159; Giudice G F, Romanino A *Nucl. Phys. B* **699** 65 (2004) "Erratum" **706** 65 (2005); hep-ph/0406088
8. Arkani-Hamed N, Dimopoulos S, Kachru S "Predictive landscapes and new physics at a TeV", hep-th/0501082
9. Giudice G F, Rattazzi R *Nucl. Phys. B* **757** 19 (2006) hep-ph/0606105
10. Schmaltz M, Tucker-Smith D *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **55** 229 (2005); hep-ph/0502182; Perelstein M *Prog. Part. Nucl. Phys.* **58** 247 (2007); hep-ph/0512128
11. Грожан К *УФН* **177** 3 (2007)
12. Gherghetta T "Warped models and holography", hep-ph/0601213
13. Bottino A, Fornengo N "Dark matter and its particle candidates", hep-ph/9904469; Olive K A "Dark matter", astro-ph/0301505
14. Enqvist K, Mazumdar A *Phys. Rep.* **380** 99 (2003); hep-ph/0209244

¹³ Если отвести в сторону все требования естественности, то минимальной моделью, способной описать все известные явления в физике частиц и космологии, является модель [27], в которой помимо полей Стандартной модели есть только инфлатон и три типа правых (стерильных) нейтрино. Инфлатон обеспечивает инфляцию; одно из стерильных нейтрино имеет массу около 10 кэВ и является частицей (теплой) темной материи; два других стерильных нейтрино с массами порядка нескольких гигаэлектронвольт очень сильно вырождены по массе, что позволяет обеспечить генерацию барионной асимметрии Вселенной. Осцилляции обычных нейтрино возникают благодаря взаимодействию со стерильными нейтрино и полем Хиггса по механизму качелей.

15. Sahni A, Starobinsky A *Int. J. Mod. Phys. D* **9** 373 (2000); astro-ph/9904398; Weinberg S "The cosmological constant problems", astro-ph/0005265; Padmanabhan T *Phys. Rep.* **380** 235 (2003); hep-th/0212290; Peebles P J E, Ratra B *Rev. Mod. Phys.* **75** 559 (2003); astro-ph/0207347
16. Dolgov A D, Zeldovich Ya B *Rev. Mod. Phys.* **53** 1 (1981)
17. Weinberg S *Rev. Mod. Phys.* **61** 1 (1989)
18. Rubakov V A *Phys. Rev. D* **61** 061501 (2000); hep-ph/9911305
19. Steinhardt P J, Turok N *Science* **312** 1180 (2006); astro-ph/0605173
20. Розенталь И Л *УФН* **167** 801 (1997)
21. Linde A "Inflation, quantum cosmology and the anthropic principle", in *Science and Ultimate Reality: Quantum Theory, Cosmology, and Complexity* (Eds J D Barrow, P C W Davies, C L Harper (Jr)) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2004); hep-th/0211048
22. Linde A D "Inflation and quantum cosmology", in *Three Hundred Years of Gravitation* (Eds S W Hawking, W Israel) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1987) p. 604
23. Tegmark M, Rees M J *Astrophys. J.* **499** 526 (1998); astro-ph/9709058
24. Barrow J D, Tipler F J *The Anthropic Cosmological Principle* (Oxford: Oxford Univ. Press, 1986)
25. Bousso R, Polchinski J J. *High Energy Phys.* (JHEP06) 006 (2000); hep-th/0004134; Kachru S et al. *Phys. Rev. D* **68** 046005 (2003); hep-th/0301240; Susskind L "The anthropic landscape of string theory", hep-th/0302219
26. Лаврелашвили Г В, Рубаков В А, Тиняков П Г *Письма в ЖЭТФ* **46** 134 (1987); Lavrelashvili G V, Rubakov V A, Tinyakov P G *Nucl. Phys. B* **299** 757 (1988); Giddings S B, Strominger A *Nucl. Phys. B* **306** 890 (1988); *Nucl. Phys. B* **307** 854 (1988); Coleman S *Nucl. Phys. B* **307** 867 (1988)
27. Asaka T, Blanchet S, Shaposhnikov M *Phys. Lett. B* **631** 151 (2005); hep-ph/0503065; Asaka T, Shaposhnikov M *Phys. Lett. B* **620** 17 (2005); hep-ph/0505013; Shaposhnikov M, Tkachev I *Phys. Lett. B* **639** 414 (2006); hep-ph/0604236

Hierarchies of fundamental constants

(on problems 16, 17, and 27 from the list of V L Ginzburg)

V.A. Rubakov

*Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences,
prosp. 60-letiya Oktyabrya 7a, 117312 Moscow, Russian Federation
Tel. (7-495) 135-7760
Fax (7-495) 135-2268
E-mail: rubakov@ms2.inr.ac.ru*

Current understanding of major unsolved problems in particle physics and cosmology suggests that physics is facing serious challenges and that the existing view of how nature works may possibly (though not necessarily) be substantially extended in the near future. From this standpoint, experiments at the proton collider LHC due to start shortly at CERN are going to make a crucial impact.

PACS numbers: **12.60. -i, 95.35. +d, 95.36. +x**

Bibliography — 27 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **177** (4) 407–414 (2007)

Received 22 January 2007

Physics – Uspekhi **50** (4) (2007)