

Физика элементарных частиц и космология: современный этап развития

В.А. Рубаков,

Институт ядерных исследований РАН.

Аннотация

Современное понимание нерешённых 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), произойдёт 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.

1 Введение

Естествознание сейчас находится в начале нового, необычайно интересного этапа своего развития. Он замечателен прежде всего тем, что наука о микромире — физика элементарных частиц — и наука о Вселенной — космология — становятся единой наукой о фундаментальных свойствах окружающего нас мира. Различными методами они отвечают на одни и те же вопросы: какой материей наполнена Вселенная сегодня? Какова была ее эволюция в прошлом? Какие процессы, происходившие между элементарными частицами в ранней Вселенной, привели в конечном итоге к ее современному состоянию? Если сравнительно недавно обсуждение такого рода вопросов останавливалось на уровне гипотез, то сегодня имеются многочисленные экспериментальные и наблюдательные данные, позволяющие получать количественные ответы на эти вопросы. Это еще одна особенность нынешнего этапа: космология за последние 10 – 15 лет стала точной наукой. Уже сегодня данные наблюдательной космологии имеют высокую точность; еще больше информации о современной и ранней Вселенной будет получено в ближайшие годы.

Полученные в последнее время космологические данные требуют кардинального дополнения современных представлений о структуре материи и о фундаментальных взаимодействиях элементарных частиц. Сегодня мы знаем все или

почти все о тех “кирпичиках”, из которых состоит обычное вещество — атомы, атомные ядра, входящие в состав ядер протоны и нейтроны, — и о том, как взаимодействуют между собой эти “кирпичики” на расстояниях вплоть до 10^{-16} см, т.е. 1/1000 размера атомного ядра, что соответствует энергиям и массам¹ порядка 100 ГэВ. Это знание получено в результате многолетних экспериментальных исследований, в основном на ускорителях, и теоретического осмысления этих экспериментов. Космологические же данные свидетельствуют о существовании новых типов частиц, еще не открытых в земных условиях и составляющих “темную материю” во Вселенной. Скорее всего речь идет о целом пласте новых явлений в физике микромира, и вполне возможно, что этот пласт явлений будет открыт в земных лабораториях в недалеком будущем.

Еще более удивительным результатом наблюдательной космологии стало указание на существование совершенно новой формы материи — “темной энергии”.

Каковы свойства темной материи и темной энергии? Какие космологические данные свидетельствуют об их существовании? Какова интерпретация этих результатов с точки зрения физики микромира? Каковы перспективы изучения темной материи и темной энергии в земных условиях? Обсуждение этих вопросов составит значительную часть этой статьи.

Кроме того, имеются проблемы и в самой физике элементарных частиц. Они связаны с существованием иерархий — различий на несколько, а нередко и много порядков величины — между фундаментальными константами, понимаемыми в широком смысле как безразмерные параметры теории. Надёжного, экспериментально проверенного объяснения этих иерархий до сих пор нет, а некоторые из них не поддаются объяснению даже с помощью сколько-нибудь правдоподобных гипотез. Мы рассмотрим и этот круг вопросов.

Основная наша задача — обсудить, к какого рода выводам подталкивают вопросы, накопившиеся в физике частиц и космологии, и насколько будущие эксперименты могут подтвердить эти выводы. В данном случае речь идёт в первую очередь об экспериментах на протон-протонном коллайдере LHC в ЦЕРНе с энергией сталкивающихся протонов 7×7 ТэВ, где будет доступна новая область энергий, характеризуемая масштабом 1 ТэВ и даже несколько выше. Запуск LHC намечен на 2008 год, так что ситуация должна проясниться в ближайшем будущем. Это — пожалуй, главная особенность современного этапа развития фундаментальной физики.

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

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 рисунке, а в качестве взаимодействий выступают электромагнитные (переносчик – фотон), слабые (переносчики – W - и Z -бозоны) и сильные (переносчики – глюоны).

три семейства частиц

$$\begin{array}{l} \text{лептоны} \\ \text{кварки} \end{array} \quad \begin{array}{ccc} \left(\begin{array}{c} e \\ \nu_e \end{array} \right), & \left(\begin{array}{c} \mu \\ \nu_\mu \end{array} \right), & \left(\begin{array}{c} \tau \\ \nu_\tau \end{array} \right) \\ \left(\begin{array}{c} u \\ d \end{array} \right), & \left(\begin{array}{c} c \\ s \end{array} \right), & \left(\begin{array}{c} t \\ b \end{array} \right) \end{array}$$

+ АНТИЧАСТИЦЫ e^+ : позитрон, ...
 $\bar{\nu}_e$: антинейтрино, ...
 \bar{u} : антикварки, ...

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

Известные элементарные частицы. Протоны и нейтроны, образующие атомные ядра, сами состоят из кварков, которые сегодня считаются элементарными. В природе существуют также электроны и их более тяжелые короткоживущие аналоги - мюоны (μ) и тау-лептоны (τ). Кроме этого, в природе имеются нейтрино трех типов, ν_e , ν_μ и ν_τ . Нейтрино не имеют электрического заряда и чрезвычайно слабо взаимодействуют с веществом; например, они пронизывают Землю или Солнце практически свободно.

Сильные взаимодействия между кварками и глюонами описываются квантовой хромодинамикой – калибровочной теорией, основанной на группе цвета $SU(3)_c$, электромагнитные и слабые 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 груп-

пы $SU(3)_c \times SU(2)_W \times U(1)_Y$ (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 ещё одно поле — скалярное поле Хиггса. Оно имеет отличное от нуля вакуумное среднее — хиггсовский конденсат, взаимодействие с которым и приводит к существованию масс у частиц. Ситуация здесь во многом аналогична возникновению эффекта Мейсснера (появлению “массы” у 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, стоящих перед экспериментами на ЛНС (см., например, [2]). Вакуумное среднее хиггсовского поля ϕ задаёт характерный для электрослабой теории масштаб энергий и масс,

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

Различия в массах кварков, заряженных лептонов, а также W - и Z -бозонов связаны с различиями между взаимодействиями соответствующих полей с полем Хиггса: массы частиц пропорциональны безразмерным константам связи с хиггсовским полем, которые для различных частиц различны. 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

$$\Lambda_{QCD} \simeq 200 \text{ МэВ} . \quad (2)$$

Именно этим масштабом в основном определяются массы частиц², состоящих из лёгких кварков, например, протона, нейтрона, ρ -мезона, см. [3]. Масштабы Λ_{EW} и Λ_{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

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

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

Видно, что масштабы энергий различны для разных взаимодействий. 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 Λ_{QCD} , Λ_{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 значение Λ_{QCD} по сравнению с M_{Pl} , – это гипотеза Большого объединения. Она предполагает, 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 взаимодействие (единая простая калибровочная группа нарушается до $SU(3)_c \times SU(2)_W \times U(1)_Y$). За такое расщепление может опять-таки отвечать механизм Хиггса, но уже с большой величиной вакуумного среднего хиггсовского поля $\langle \Phi \rangle \sim M_{GUT}$. Разумеется, это 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 выше M_{GUT} имеется единая калибровочная константа, так что

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

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

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

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

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

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

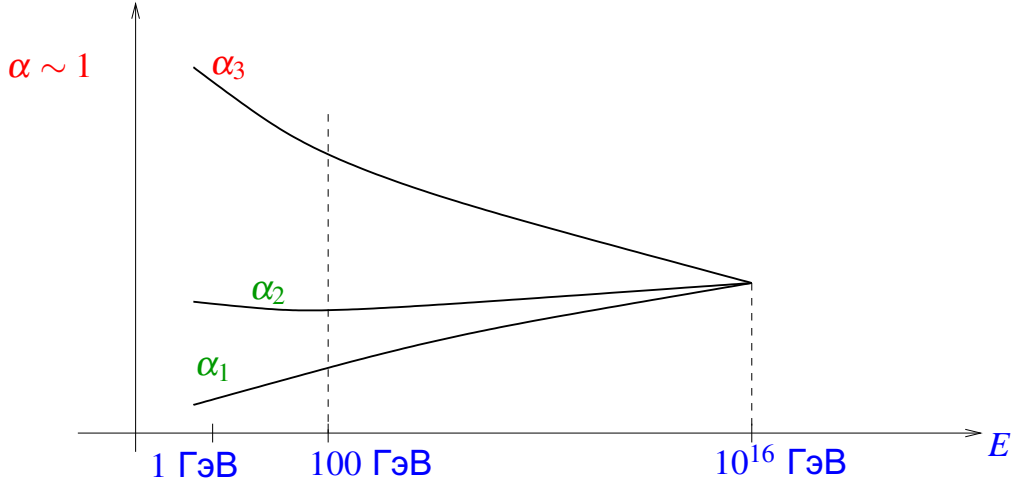


Рис. 1: Зависимость калибровочных констант от энергии в моделях Большого объединения.

всех взаимодействий) на масштабе M_{GUT} , которая оказывается довольно малой величиной, $\alpha_{GUT} \sim 1/20 - 1/40$ в зависимости от модели. Константа $\hat{\beta}$ положительна, так что $\alpha_3(E)$ растёт 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} ,

$$\alpha_3(\Lambda_{QCD}) \sim 1 \iff \Lambda_{QCD} = M_{GUT} \cdot e^{-\text{const}/\alpha_{GUT}} \quad (6)$$

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

Подобным образом можно решить и проблему иерархии между Λ_{EW} и M_{PL} .

В этом случае речь идёт 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 трёх 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, причём при достаточно низких энергиях. Наиболее популярными расширениями, обеспечивающими объединение калибровочных констант, являются модели с низкоэнергетической суперсимметрией (см., например, [2, 4, 5, 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 ещё одной проблемой Стандартной модели. Последняя 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:

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

где $F(g)$ – вполне определённая комбинация констант связи теории, а Λ_{UV} – параметр ультрафиолетового обрезания. Численно в Стандартной модели

$$\delta m_H^2 \approx 0.1 \cdot \Lambda_{UV}^2 \quad (8)$$

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 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 выше 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

$$\Lambda_{UV} \sim 300 \text{ ГэВ} - 1 \text{ ТэВ} \quad (9)$$

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

Низкоэнергетическая супрсимметрия как раз и является одним из возможных сценариев “новой физики”. В суперсимметричных теориях квадратичные расходимости типа (7) сокращаются вкладами новых частиц – суперпартнёров частиц Стандартной модели. На основании сказанного выше, массы этих частиц должны лежать в области сотен ГэВ – нескольких ТэВ, которая вполне доступна для экспериментов на LHC [2]. Нельзя не подчеркнуть, однако, что уже имеющиеся экспериментальные данные существенно ограничивают область разрешённых параметров моделей с низкоэнергетической суперсимметрией. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведена вся область теоретически допустимых безразмерных параметров вместе с разрешённой областью [9] в одной из простых моделей – так называемой модели mSUGRA, где дополнительными по сравнению со Стандартной моделью являются параметры размерности массы m_0 , $m_{1/2}$ и μ . При взгляде на этот рисунок становится ясно, что тот факт, что суперсимметрия до сих пор экспериментально не обнаружена, представляет сам по себе проблему для суперсимметричных теорий⁴. В связи с этим в последнее время интенсивно предпринимаются попытки решить проблему стабильности электрослабого масштаба относительно радиационных поправок с использованием идей, отличных от идеи низкоэнергетической суперсимметрии (см. обзоры [10, 11]); в большинстве из предложенных моделей одновременно решить проблему иерархии между Λ_{EW} и M_{Pl} , однако, не удаётся.

В заключение этого раздела упомянем ещё одну проблему иерархии, которая существует как в Стандартной модели, так и в её расширениях. Речь идёт о массах известных фермионов – кварков и заряженных лептонов. Масса наиболее тяжёлого из них – t-кварка – составляет около 172 ГэВ, а масса легчайшего –

⁴Эта проблема получила в литературе название малой проблемы иерархий.

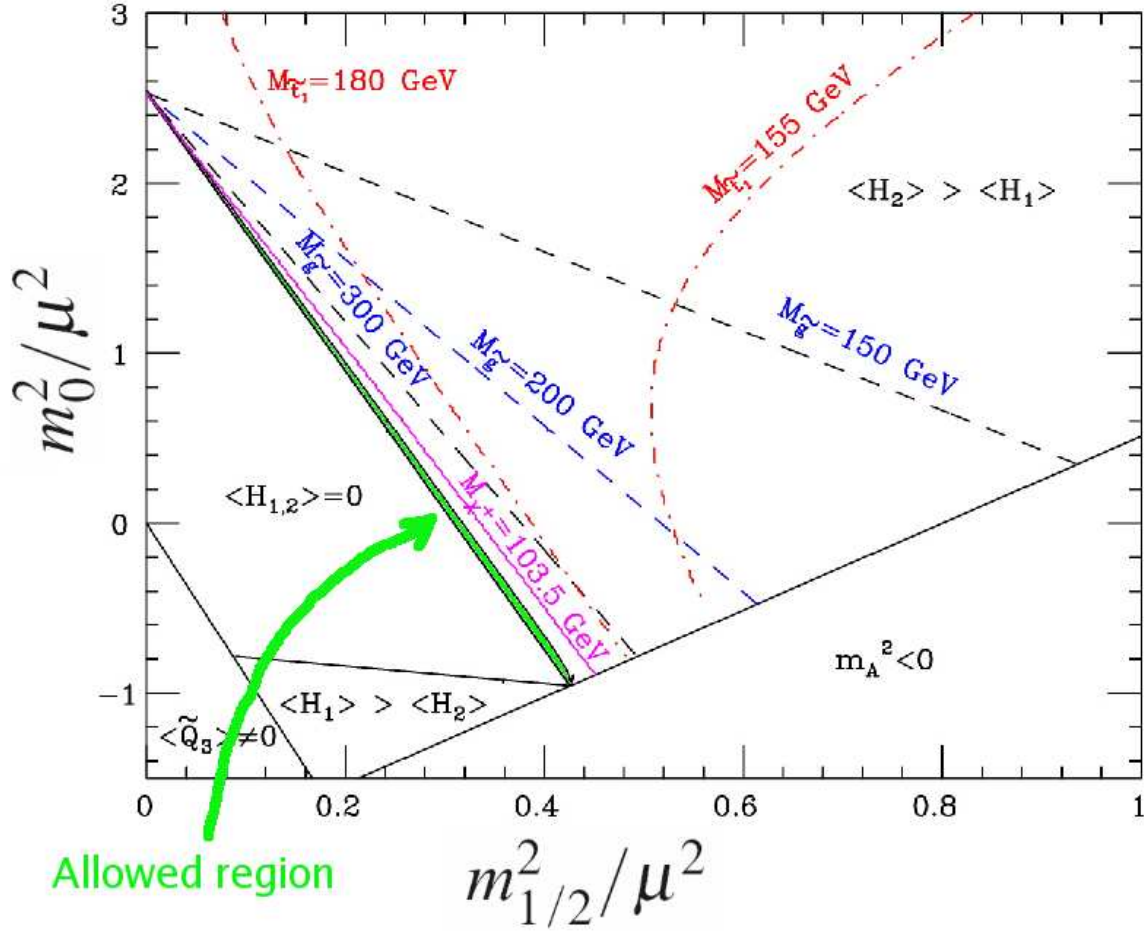


Рис. 2: Разрешённая область параметров [9] модели mSUGRA. Отмечены также экспериментальные ограничения, на основе которых та или иная область параметров экспериментально запрещена.

электрона — около 0.5 МэВ. Таким образом, мы имеем дело с иерархией⁵

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

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.

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

3 Успехи и загадки космологии

3.1 Расширяющаяся Вселенная

Имеется целый ряд фактов, говорящих о свойствах Вселенной сегодня и в относительно недалеком прошлом.

Вселенная в целом однородна: все области во Вселенной выглядят одинаково. Разумеется, это не относится к небольшим областям: есть области, где много звезд — это галактики; есть области большего размера, где много галактик — это скопления галактик; есть и области, где галактик мало — это гигантские пустоты. Но области размером 300 миллионов световых лет и больше выглядят все одинаково. Об этом однозначно свидетельствуют астрономические наблюдения, в результате которых составлена “карта” Вселенной до расстояний около 10 млрд. световых лет от нас⁶. Нужно сказать, что эта “карта” служит источником ценнейшей информации о современной Вселенной, поскольку она позволяет на количественном уровне определить, как именно распределено вещество во Вселенной.

На рис. 3 показана одна из наиболее полных карт Вселенной, а на рис. 4 фрагмент, показывающий относительно близкую к нам часть⁷. Видно, что во Вселенной имеются структуры довольно большого размера, но в целом галактики “разбросаны” в ней однородно.

Вселенная расширяется: галактики удаляются друг от друга. Пространство растягивается во все стороны, и чем дальше от нас находится та или иная галактика, тем быстрее она удаляется от нас. Сегодня темп этого расширения невелик: все расстояния увеличатся вдвое⁸ примерно за 15 млрд. лет, однако раньше темп расширения был гораздо больше. Плотность вещества во Вселенной убывает с течением времени, и в будущем Вселенная будет все более и более разреженной. Наоборот, раньше Вселенная была гораздо более плотной, чем сейчас. О расширении Вселенной прямо свидетельствует “покраснение” света, испущенного удаленными галактиками или яркими звездами: из-за общего растяжения пространства длина волны света увеличивается за то время, пока он летит к нам. Именно это явление было установлено Э.Хабблом в 1927 году и послужило наблюдательным доказательством расширения Вселенной, предсказанного за три

⁶О масштабности этой задачи свидетельствует такая цифра: обзор SDSS, продолжающийся в настоящее время, уже охватывает более 300 тыс. галактик, для которых измерено как направление, так и расстояние.

⁷Обзор Las Campanas, середина 90-х годов.

⁸Разумеется, это не относится к расстоянию от Земли до Солнца или расстоянию между звездами в Галактике: Земля удерживается вблизи Солнца силами гравитационного притяжения, и расстояние от нее до Солнца не изменяется из-за расширения Вселенной.

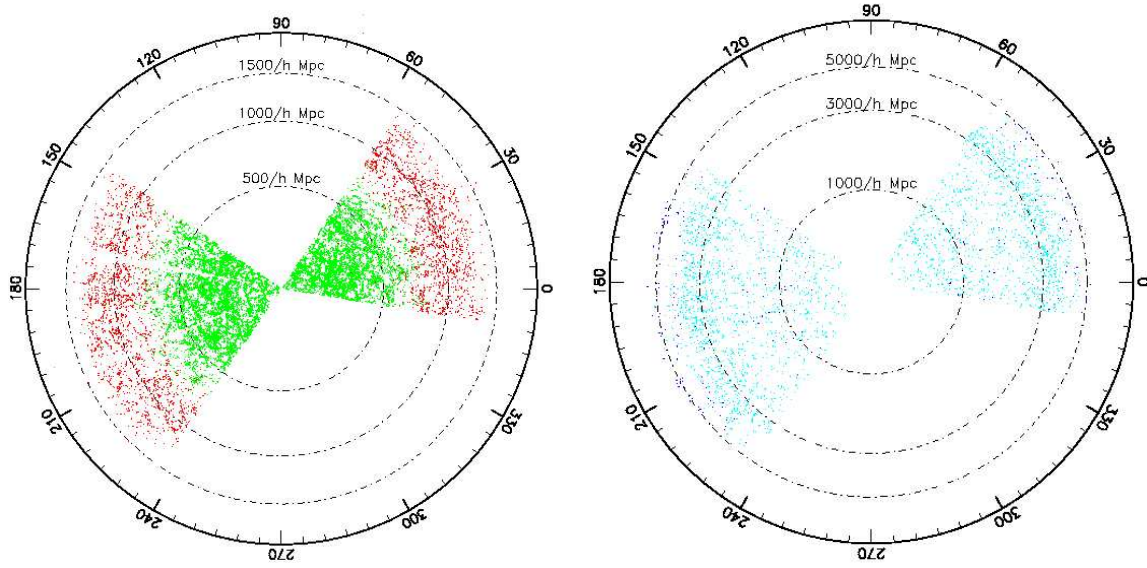


Рис. 3: Пространственное распределение галактик и квазаров по данным SDSS [12]. Зелёными точками отмечены все галактики (в данном телесном угле) с яркостью, превышающей некоторую. Красные точки указывают галактики наибольшей светимости из удалённых скоплений, образующие довольно однородную популяцию; в сопутствующей системе отсчёта их спектр смещён в красную область по сравнению с обычными галактиками. Голубые и синие точки показывают расположение обычных квазаров. Параметр h оценивается величиной $h = 0.7 \div 0.75$.

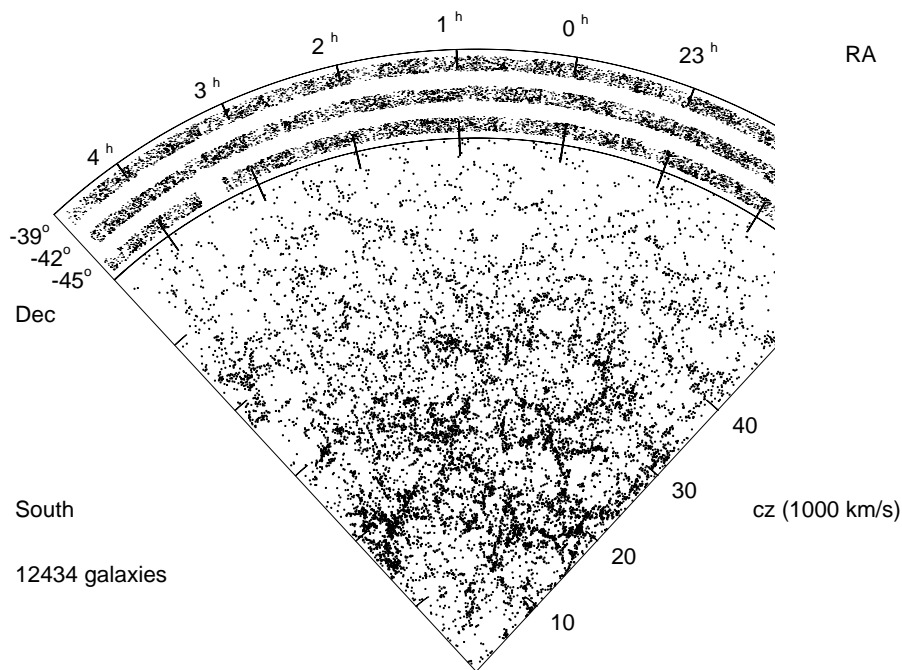


Рис. 4: Ближняя часть Вселенной

года до этого Александром Фридманом.

Замечательно, что современные наблюдательные данные позволяют измерить не только темп расширения Вселенной в настоящее время, но проследить за темпом ее расширения в прошлом. О результатах этих измерений и вытекающих из них далеко идущих выводах мы еще будем говорить. Здесь же скажем о следующем: сам факт расширения Вселенной, вместе с теорией гравитации — общей теорией относительности — свидетельствует о том, что в прошлом Вселенная бы-

ла чрезвычайно плотной и чрезвычайно быстро расширялась. Если проследить эволюцию Вселенной назад в прошлое, используя известные законы физики, то мы приходим к выводу, что эта эволюция началась с момента Большого Взрыва; в этот момент вещество во Вселенной было настолько плотным, а гравитационное взаимодействие настолько сильным, что известные законы физики были неприменимы. С тех пор прошло 14 млрд. лет, это возраст современной Вселенной.

Вселенная “теплая”: в ней имеется электромагнитное излучение, характеризующееся температурой $T = 2,725$ градусов Кельвина (реликтовые фотоны, сегодня представляющие собой радиоволны). Разумеется, эта температура сегодня невелика (ниже температуры жидкого гелия), однако это было далеко не так в прошлом. В процессе расширения Вселенная остывает, так что на ранних стадиях ее эволюции температура, как и плотность вещества, была гораздо выше, чем сегодня. В прошлом Вселенная была горячей, плотной и быстро расширяющейся.

3.2 Вселенная в прошлом

Обсудим два этапа эволюции Вселенной, о которых сегодня имеются надежные наблюдательные данные. Один из них, относительно недавний — это этап перехода вещества во Вселенной из состояния плазмы в газообразное состояние. Это произошло при температуре 3000 градусов, а возраст Вселенной к тому моменту составлял 300 тыс. лет (совсем немного по сравнению с современными 14 млрд. лет). До этого электроны и протоны двигались отдельно друг от друга, вещество представляло из себя плазму. При температуре 3000 градусов произошло объединение электронов и протонов в атомы водорода, и Вселенная оказалась заполненной этим газом. Важно, что плазма непрозрачна для электромагнитного излучения; фотоны все время излучаются, поглощаются, рассеиваются на электронах плазмы. Газ, наоборот, прозрачен. Значит, пришедшее к нам электромагнитное излучение с температурой 2,7 градуса свободно путешествовало во Вселенной с момента перехода плазма-газ, остыв (покраснев) с тех пор в 1100 раз из-за расширения Вселенной. Это реликтовое электромагнитное излучение сохранило в себе информацию о состоянии Вселенной в момент перехода плазма-газ; с его помощью мы имеем фотоснимок (буквально!) Вселенной в возрасте 300 тыс. лет, когда ее температура составляла 3000 градусов.

Измеряя температуру этого реликтового электромагнитного излучения, пришедшего к нам с разных направлений на небе, мы узнаем, какие области были теплее или холоднее (а значит, плотнее или разреженнее), чем в среднем по Вселенной, а главное — насколько они были теплее или холоднее. Результат этих измерений состоит в том, что Вселенная в возрасте 300 тыс. лет была гораздо более однородной, чем сегодня: вариации температуры и плотности составля-

ли тогда менее 10^{-4} (0,01%) от средних значений. Тем не менее, эти вариации существовали: с разных направлений электромагнитное излучение приходит с несколько различной температурой. Это показано на рис. 5, где изображено распределение температуры по небесной сфере (фотоснимок ранней Вселенной) за вычетом средней температуры 2.725 градусов Кельвина; более холодные области показаны синим, более теплые - красным цветом.

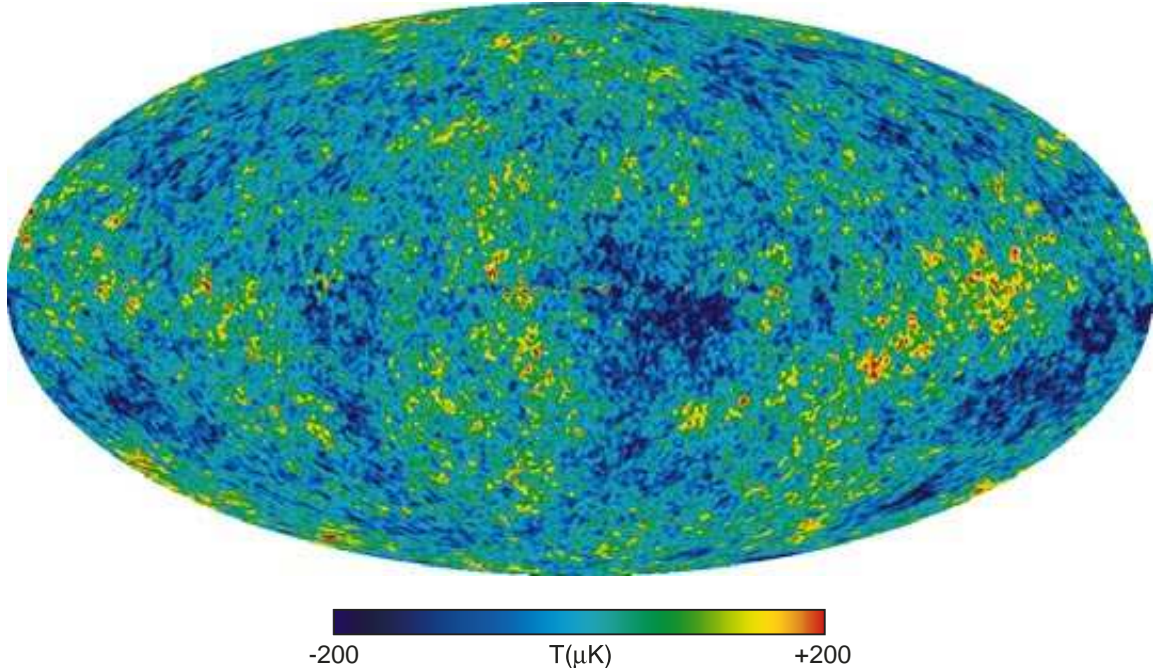


Рис. 5: Данные WMAP [13]: угловая анизотропия реликтового излучения, т.е. зависимость температуры фотонов от направления их прихода (показана цветом). Средняя температура фотонов и дипольная компонента (связанная с движением Земли относительно газа реликтовых фотонов) вычтены; изображённые вариации температуры находятся на уровне $\delta T \sim 100 \mu\text{K}$, т.е. $\delta T/T_0 \sim 10^{-4} \div 10^{-5}$.

Поскольку температура реликтового излучения T зависит от направления \vec{n} на небесной сфере, то для изучения этой зависимости удобно использовать разложение по сферическим функциям (гармоникам) $Y_{lm}(\mathbf{n})$, образующим полный набор базисных функций на сфере. Под флуктуацией температуры δT в направлении \vec{n} понимают разность

$$\delta T(\mathbf{n}) \equiv T(\mathbf{n}) - T_0 - \delta T_{\text{диполь}} = \sum_{l,m} a_{l,m} Y_{lm}(\mathbf{n}),$$

где для коэффициентов $a_{l,m}$ выполняется соотношение $a_{l,m}^* = (-1)^m a_{l,-m}$, являющееся необходимым следствием вещественности температуры. Угловые моменты

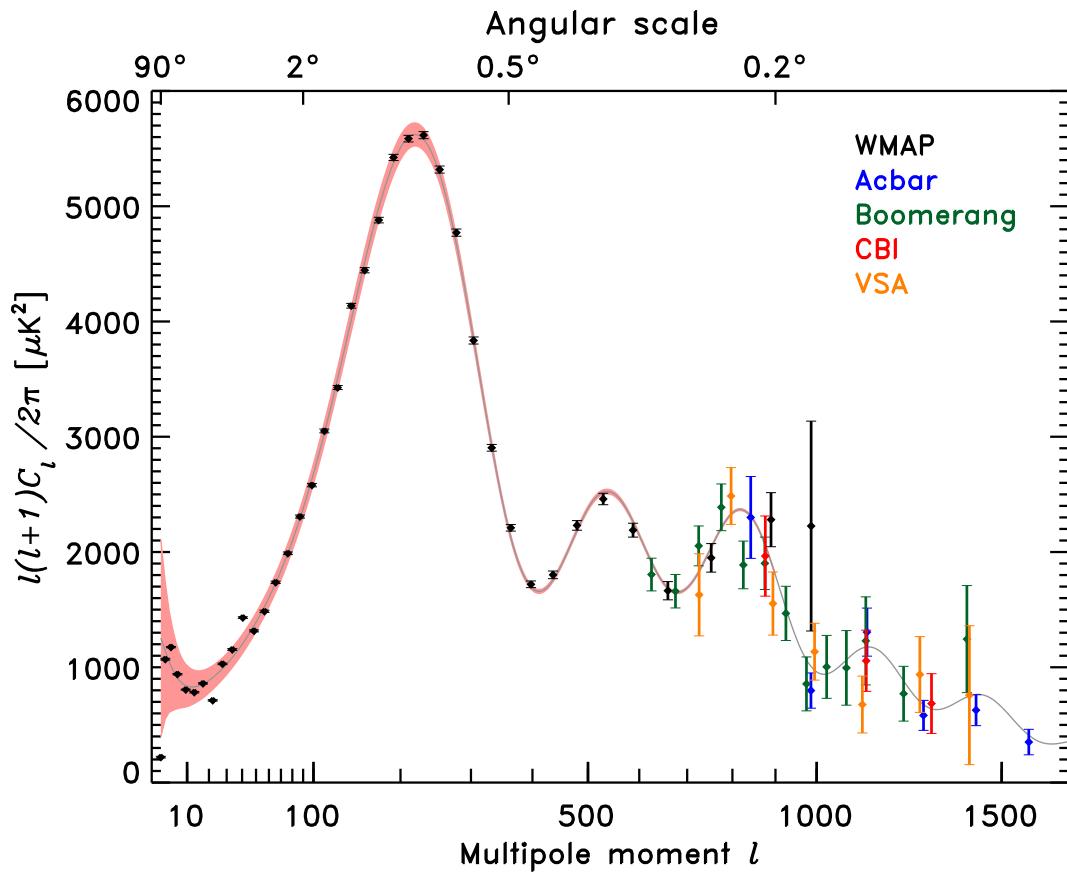


Рис. 6: Результаты измерений угловой анизотропии реликтового излучения различными экспериментами [13]. Теоретическая кривая получена в рамках модели с тёмной материей и тёмной энергией.

l соответствуют флуктуациям с типичным угловым масштабом π/l . Существующие наблюдения позволяют изучать различные угловые масштабы, от самых крупных до масштабов меньше 0.1° ($l \sim 1000$, см. рис. 6).

Фотоснимок, изображенный на рис. 5 и обработанный с помощью разложения по сферическим гармоникам, несёт, разумеется, много информации. Он привел к нескольким важным и неожиданным выводам. Во-первых, он позволил установить, что наше трехмерное пространство с хорошей степенью точности евклидово: сумма углов треугольника в нем равна 180 градусов даже для треугольников со сторонами, длины которых сравнимы с размером видимой части Вселенной, т.е. сравнимы с 14 млрд. световых лет. Вообще говоря, общая теория относительности допускает, что пространство может быть не евклидовым, а искривленным; наблюдательные же данные свидетельствуют, что это не так (по крайней мере для нашей области Вселенной). Способ измерения “суммы углов треугольника”

на космологических масштабах расстояний состоит в следующем. Можно надежно вычислить характерный пространственный размер областей, где температура наиболее заметно отличается от средней на момент перехода плазма-газ: этот размер определяется возрастом Вселенной, т.е. пропорционален 300 тыс. световых лет. Угол, под которым видна сегодня “линейка” такого размера, соответствует первому пику на рис. 6. Значение этого угла зависит от геометрии трехмерного пространства, что и дает возможность установить, что эта геометрия — евклидова.

В случае евклидовой геометрии трехмерного пространства общая теория относительности однозначно связывает темп расширения Вселенной с суммарной плотностью всех форм энергии, так же как в ньютоновской теории тяготения скорость обращения Земли вокруг Солнца определяется массой Солнца. Измеренный темп расширения соответствует полной плотности энергии в современной Вселенной

$$\varepsilon = 0.008 \frac{\text{эрг}}{\text{м}^3}.$$

В терминах плотности массы (поскольку энергия связана с массой соотношением $E = mc^2$) это число составляет

$$\frac{\varepsilon}{c^2} = 5 \frac{\text{масс протона}}{\text{м}^3}$$

Если бы энергия во Вселенной целиком определялась энергией покоя обычного вещества, то в среднем во Вселенной было бы 5 протонов в кубическом метре. Мы увидим, однако, что обычного вещества во Вселенной гораздо меньше.

Во-вторых, из фотоснимка рис. 5 можно установить, какова была величина (амплитуда) неоднородностей температуры и плотности в ранней Вселенной — она составляла $10^{-4} \div 10^{-5}$ от средних значений. Именно из этих неоднородностей плотности возникли галактики и скопления галактик: области с более высокой плотностью притягивали к себе окружающее вещество за счет гравитационных сил, становились еще более плотными и в конечном итоге образовывали галактики.

Поскольку начальные неоднородности плотности известны, процесс образования галактик можно рассчитать и результат сравнить с наблюдаемым распределением галактик во Вселенной. Этот расчет согласуется с наблюдениями, только если предположить, что помимо обычного вещества во Вселенной имеется другой тип вещества — темная материя, вклад которой в полную плотность энергии сегодня составляет около 20 - 25%.

Другой этап эволюции Вселенной соответствует еще более ранним временам, от 1 до 200 секунд (!) с момента Большого Взрыва, когда температура Вселенной

достигала миллиардов градусов. В это время во Вселенной происходили термоядерные реакции, аналогичные реакциям, протекающим в центре Солнца или в термоядерной бомбе. В результате этих реакций часть протонов связалась с нейтронами и образовала легкие ядра — ядра гелия, дейтерия и лития-7. Количество образовавшихся легких ядер можно рассчитать, при этом единственным неизвестным параметром является плотность числа протонов во Вселенной. Последнюю обычно соотносят с плотностью числа фотонов, определяя

$$\eta_B = \frac{n_B}{n_\gamma},$$

где n_B и n_γ — плотности числа барионов и фотонов, соответственно. Такое отношение не зависит от времени в расширяющейся Вселенной, хотя сами n_B и n_γ уменьшаются со временем.

Сравнение этого расчета с наблюдаемым количеством легких элементов во Вселенной приведено на рис. 7: линии представляют собой результаты теоретического расчета в зависимости от единственного параметра — плотности обычного вещества (барионов), а прямоугольники — наблюдательные данные. Замечательно, что имеется согласие для всех трех легких ядер (гелия-4, дейтерия и лития-7); согласие есть и с данными по реликтовому излучению (показаны вертикальной полосой на рис. 4, обозначенной СМВ — Cosmic Microwave Background). Это согласие свидетельствует о том, что общая теория относительности и известные законы ядерной физики правильно описывают Вселенную в возрасте 1 - 200 секунд, когда вещество в ней имело температуру миллиард градусов и выше. Для нас важно, что все эти данные приводят к выводу о том, что плотность массы обычного вещества в современной Вселенной составляет

$$\frac{\epsilon_B}{c^2} = 0.25 \frac{\text{масс протона}}{\text{м}^3}$$

т.е. обычное вещество вкладывает всего 5% в полную плотность энергии во Вселенной.

Итак, доля обычного вещества (протонов, атомных ядер, электронов) в суммарной энергии в современной Вселенной составляет⁹ всего 5%. Помимо обычного вещества во Вселенной имеются и реликтовые нейтрино (около 300 нейтрино всех типов в кубическом сантиметре). Их вклад в полную энергию (массу) во Вселенной невелик, поскольку массы нейтрино малы, и составляет заведомо не более 1%. Оставшиеся 90 – 95% полной энергии во Вселенной — “неизвестно что”.

Более того, это “неизвестно что” состоит из двух фракций — темной материи и темной энергии, как изображено на рис. 8.

⁹При этом вещества в звездах еще в 10 раз меньше; обычное вещество находится в основном в облаках газа.

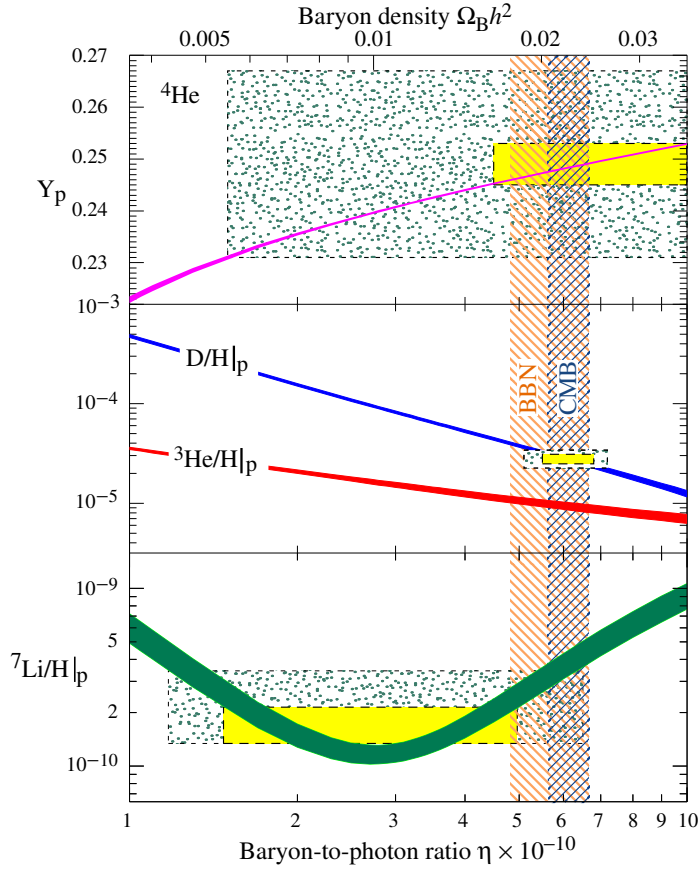


Рис. 7: Предсказания нуклеосинтеза для распространённостей первичных ^4He , D , ^3He , ^7Li вместе с результатами наблюдений [14] (2σ неопределённости: статистические — длинный пунктир, статистические и систематические — короткий пунктир; неопределённости в вычислении распространённостей соответствуют толщине линий). Вертикальная полоса “СМВ” — результат для η_B , следующий из анализа анизотропии реликтового излучения. По оси абсцисс отложено $\eta_{10} = \eta_B \cdot 10^{10}$, по оси ординат: $Y = \frac{n_{^4\text{He}} \cdot m_{^4\text{He}}}{n_p \cdot m_p}$ — массовая концентрация ^4He , n_D/n_p , $n_{^3\text{He}}/n_p$ и $n_{^7\text{Li}}/n_p$ — распространённости остальных элементов.

3.3 Темная материя

Темная материя сродни обычному веществу в том смысле, что она способна собираться в сгустки (размером, скажем, с галактику или скопление галактик) и участвует в гравитационных взаимодействиях так же, как обычное вещество. Скорее всего, она состоит из новых, не открытых еще в земных условиях частиц (см. обзоры [17]).

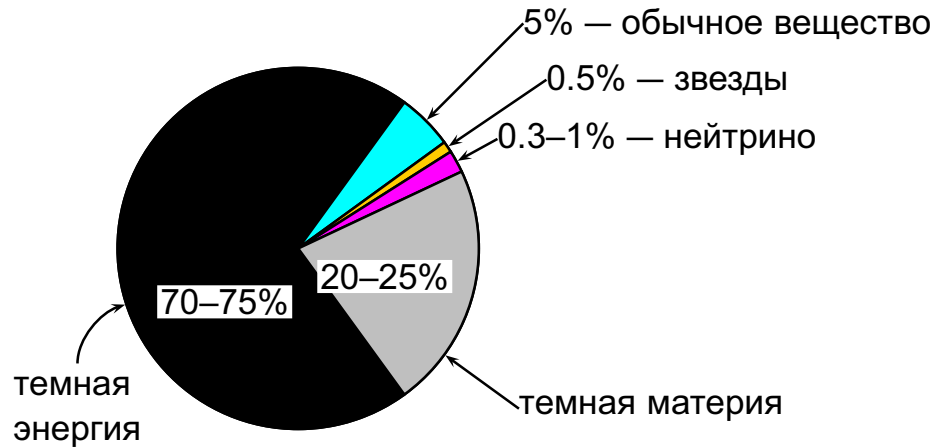


Рис. 8: Баланс энергий в современной Вселенной.

Помимо космологических данных, в пользу существования темной материи служат измерения гравитационного поля в скоплениях галактик и в галактиках. Имеется несколько способов измерения гравитационного поля в скоплениях галактик, один из которых — гравитационное линзирование, проиллюстрированное на рис. 9. Гравитационное поле скопления искривляет лучи света, испущенные галактикой, находящейся за скоплением, т.е. гравитационное поле действует как линза. При этом иногда появляются несколько образов этой удаленной галактики; на правой половине рис. 9 они имеют голубой цвет. Искривление света зависит от распределения массы в скоплении, независимо от того, какие частицы эту массу создают. Восстановленное таким образом распределение массы показано на левой половине рис. 9 голубым цветом; видно, что оно сильно отличается от распределения светящегося вещества. Измеренные подобным образом массы скоплений галактик согласуются с тем, что темная материя вкладывает около 25% в полную плотность энергии во Вселенной. Напомним, что это же число

получается из сравнения теории образования структур (галактик, скоплений) с наблюдениями.



Рис. 9: Скопление CL0024 + 1654 [15]: синий цвет на левом рисунке иллюстрирует распределение темной материи; серповидные объекты голубого цвета на правом рисунке — множественное изображение галактики, расположенной далеко за скоплением.

Темная материя имеется и в галактиках. Это опять-таки следует из измерений гравитационного поля, теперь уже в галактиках и их окрестностях. Чем сильнее гравитационное поле, тем быстрее вращаются вокруг галактики звезды и облака газа, так что измерения скоростей вращения в зависимости от расстояния до центра галактики позволяют восстановить распределение массы в ней. Это проиллюстрировано на рис. 10: по мере удаления от центра галактики скорости обращения не уменьшаются, что говорит о том, что в галактике, в том числе вдалеке от ее светящейся части, имеется несветящаяся, темная материя. В нашей Галактике в окрестности Солнца масса темной материи примерно равна массе обычного вещества.

Что представляют из себя частицы темной материи? Ясно, что эти частицы не должны распадаться на другие, более легкие частицы, иначе бы они распались за время существования Вселенной. Сам этот факт свидетельствует о том, что в природе действует новый, не открытый пока закон сохранения, запрещающий этим частицам распадаться. Аналогия здесь с законом сохранения электрического заряда: электрон — это легчайшая частица с электрическим зарядом, и именно поэтому он не распадается на более легкие частицы (например, нейтрино и

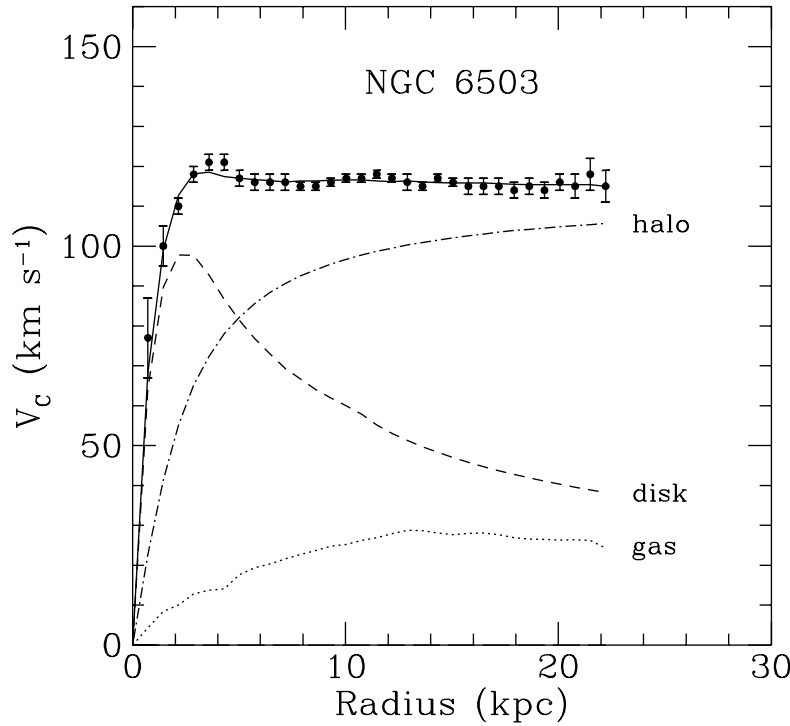


Рис. 10: Распределение скоростей облаков водорода в галактике NGC 6503 [16]. Разными линиями показаны вклады трёх основных компонент, формирующих гравитационный потенциал галактики.

фотоны). Далее, частицы темной материи чрезвычайно слабо взаимодействуют с нашим веществом, иначе они были бы уже обнаружены в земных экспериментах.

Дальше начинается область гипотез.

Наиболее простым, а потому и наиболее привлекательным механизмом генерации тёмной материи во Вселенной является следующий. При температурах в ранней Вселенной, сравнимых с массой частиц тёмной материи $^{10} m_{DM}$, интенсивно происходили процессы парного рождения и аннигиляции этих частиц, так что их концентрация была близка к равновесной и велика 11 . При пони-

¹⁰Здесь используется система единиц, в которой помимо \hbar и c положена единицей и константа Больцмана, $k_B = 1$. В обычных единицах речь идёт о температурах, для которых $k_B T \sim m_{DM} c^2$.

¹¹Предполагается, что других процессов, в которых могли бы рождаться и исчезать частицы тёмной материи, нет. Это предположение вполне согласуется с требованием стабильности этих частиц. Кроме того, если частицы тёмной материи отличаются от своих античастиц (т.е. не являются абсолютно нейтральными), то дополнительным предположением является отсутствие асимметрии в секторе тёмной материи, т.е. предполагается, что числа частиц и античастиц

жении температуры концентрация частиц тёмной материи падала за счёт процессов аннигиляции и за счёт расширения Вселенной. Вычисленная в рамках этого механизма современная плотность массы тёмной материи довольно слабо (логарифмически) зависит от m_{DM} и сильно (как $1/\sigma$) зависит от сечения аннигиляции. Требуемая плотность массы тёмной материи во Вселенной получается, если предположить, что масса частицы тёмной материи оценивается величиной $m_{DM} \sim 10 \text{ ГэВ} - 1 \text{ ТэВ}$, а интенсивность взаимодействий частиц тёмной материи между собой и с обычным веществом сравнима с интенсивностью слабых взаимодействий (сечение парной аннигиляции в обычные частицы составляет $10^{-35} - 10^{-36} \text{ см}^2$). Этот сценарий реализуется опять-таки во многих моделях с низкоэнергетической суперсимметрией, где среди суперпартнёров известных частиц действительно имеются стабильные нейтральные тяжёлые частицы (нейтралино). Разумеется, имеются и другие гипотетические кандидаты на роль частиц тёмной материи (аксионы, гравитино, сверхмассивные частицы и т.д.), однако в большинстве других сценариев требуемую плотность массы тёмной материи во Вселенной удаётся получить лишь ценой подгонки параметров модели. Подчеркнём, что в любом случае механизмы генерации тёмной 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 [18]), поэтому приближённое равенство (в пределах порядка величины) между плотностями массы обычного вещества и массы тёмной материи во Вселенной носит характер случайного совпадения. Это обстоятельство тем более замечательно, что безразмерные характеристики концентраций барионов (протонов и нейтронов) и тёмной материи весьма малы: для барионов такой характеристикой является отношение плотности числа барионов к плотности числа реликтовых фотонов, которое не зависит от времени (с точностью до фактора порядка единицы) и равно

$$\eta_B \equiv \frac{n_B}{n_\gamma} = 6 \cdot 10^{-10} \quad (11)$$

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

$$\frac{\eta_B}{\eta_{DM}} \simeq \frac{m_{DM}}{m_p} \quad (12)$$

где m_p – масса протона. Как мы только что отмечали, сколько-нибудь правдоподобного механизма, обеспечивающего выполнение этого равенства без тонкой подстройки параметров, пока неизвестно.

тёмной материи были и остаются в точности равными.

Можно ли ожидать открытия частиц темной материи в недалеком будущем в земных условиях? Поскольку мы сегодня не знаем природы этих частиц, ответить на этот вопрос вполне однозначно нельзя. Тем не менее, перспектива представляется весьма оптимистической.

Имеется несколько путей поиска частиц темной материи. Один из них связан с экспериментами на будущих ускорителях высокой энергии — коллайдерах. Если частицы темной материи действительно тяжелее протона в $100 \div 1000$ раз, то они будут рождаться в столкновениях обычных частиц, разогнанных на коллайдерах до высоких энергий (энергий, достигнутых на существующих коллайдерах, для этого не хватает). Ближайшие перспективы здесь вновь связаны с ЛНС, на котором будут получены встречные пучки протонов с энергией 7×7 ТэВ. Нужно сказать, что согласно популярным сегодня гипотезам (включая гипотезу о суперсимметрии) частицы темной материи — это лишь один представитель нового семейства элементарных частиц, так что наряду с открытием частиц темной материи можно надеяться на обнаружение на ускорителях целого класса новых частиц и новых взаимодействий. Космология подсказывает, что известными сегодня “кирпичиками” мир элементарных частиц далеко не исчерпывается!

Другой путь состоит в регистрации частиц темной материи, которые летают вокруг нас. Их отнюдь не мало: при массе, равной 1000 масс протона, этих частиц здесь и сейчас должно быть 1000 штук в кубическом метре. Проблема в том, что они крайне слабо взаимодействуют с обычными частицами, вещество для них прозрачно. Тем не менее, частицы темной материи изредка сталкиваются с атомными ядрами, и эти столкновения можно надеяться зарегистрировать. Поиск в этом направлении ведется с помощью целого ряда высокочувствительных детекторов, помещенных глубоко под землей, где резко снижен фон от космических лучей.

Наконец, еще один путь связан с регистрацией продуктов аннигиляции частиц темной материи между собой. Эти частицы должны скапливаться в центре Земли и в центре Солнца (вещество для них практически прозрачно, и они способны проваливаться внутрь Земли или Солнца). Там они аннигилируют друг с другом, и при этом образуются другие частицы, в том числе нейтрино. Эти нейтрино свободно проходят сквозь толщу Земли или Солнца, и могут быть зарегистрированы специальными установками — нейтринными телескопами. Один из таких нейтринных телескопов расположен в глубине озера Байкал (НТ-200, рис. 11, 12, 13), другой (AMANDA) — глубоко во льду на Южном полюсе.

Нейтрино, приходящее, например, из центра Солнца, может с малой вероятностью испытать взаимодействие в воде, в результате чего образуется заряженная частица (мюон), свет от которой и регистрируется. Поскольку взаимодействие

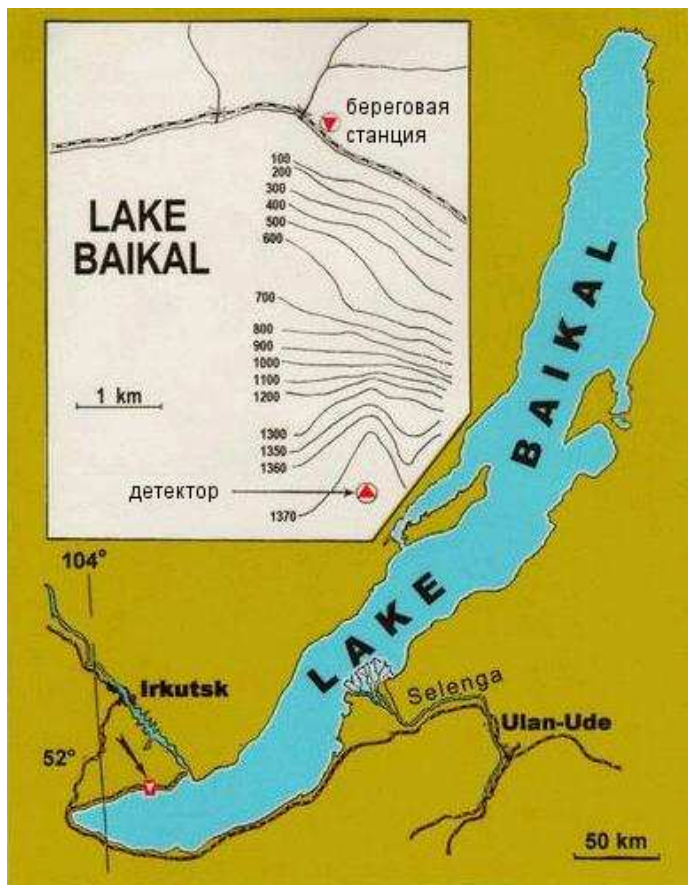


Рис. 11: Местоположение Байкальского нейтринного телескопа.

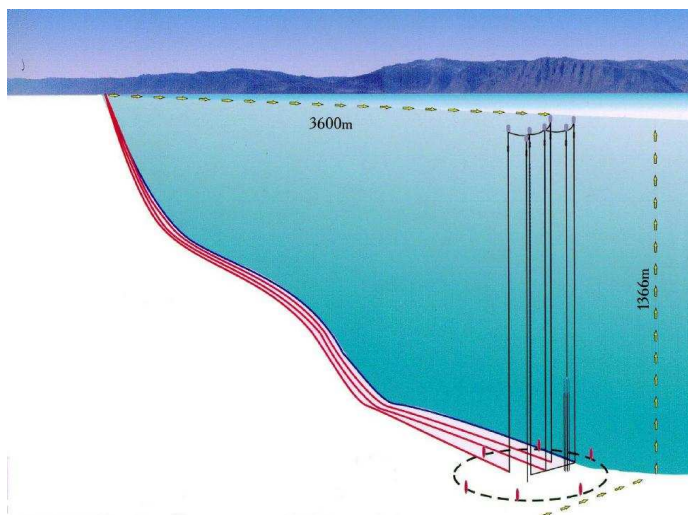


Рис. 12: Схематическое изображение телескопа

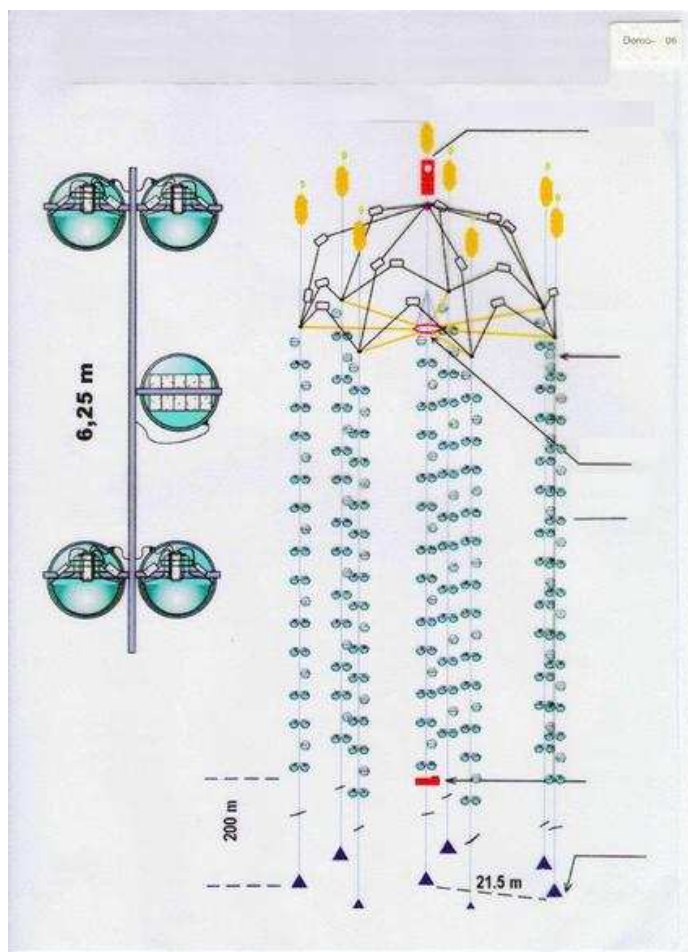


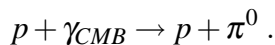
Рис. 13: Оптический модуль телескопа и сам телескоп.

нейтрино с веществом очень слабое, вероятность такого события мала, и требуются детекторы очень большого объема. Сейчас на Южном полюсе началось сооружение детектора объемом 1 кубический километр.

Имеются и другие подходы к поиску частиц темной материи, например, поиск продуктов их аннигиляции в центральной области нашей Галактики. Какой из всех этих путей первым приведет к успеху, покажет время, но в любом случае открытие этих новых частиц и изучение их свойств станет важнейшим научным достижением. Эти частицы расскажут нам о свойствах Вселенной через 10^{-9} с (одна миллиардная секунды!) после Большого Взрыва, когда температура Вселенной составляла 10^{15} градусов, и частицы темной материи интенсивно взаимодействовали с космической плазмой.

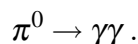
Нужно сказать и о еще одном направлении в физике, которое может оказаться тесно связанным с проблемой темной материи. Речь идет о физике космических

лучей высоких и сверхвысоких энергий. Во-первых, если первичные частицы космических лучей таких энергий — это обычные частицы (например, протоны), то для них должен иметь место эффект Грейзена–Зацепина–Кузьмина. При энергиях выше $5 \cdot 10^{19}$ эВ протоны теряют энергию при взаимодействии с реликтовым микроволновым излучением:



Сечение этой реакции становится настолько велико, что спектр космических лучей должен обрезаться, то есть космических лучей сверхвысоких энергий должно быть мало. То же самое можно сказать и о других известных частицах, таких как фотоны или атомные ядра. Отсутствие ГЗК-обрезания в спектре означало бы, что либо первичные частицы — это новые, неизвестные частицы, либо что источники космических лучей находятся недалеко от нашей Галактики. Космических ускорителей, способных ускорять протоны или ядра до столь высоких энергий, вблизи нашей Галактики нет, поэтому вторая возможность тоже требует “новой физики”; например, высокоэнергичные протоны и фотоны могли бы образовываться в результате распада новых сверхтяжелых частиц в гало нашей Галактики. В любом случае новые частицы должны иметь большое время жизни (в первом варианте для того, чтобы долететь до нас с космологических расстояний, во втором — чтобы не успеть распасться за время жизни Вселенной), что указывало бы на возможность их отождествления с частицами темной материи.

Отметим, что объяснение возможного отсутствия ГЗК-обрезания с помощью распадов сверхтяжелых частиц сталкивается со следующей трудностью. Даже если эти частицы распадаются только на кварки и глюоны, протонов среди продуктов их распада должно быть существенно меньше, чем фотонов, которые образуются в распадах



Поэтому указанный сценарий предсказывает, что первичными частицами космических лучей сверхвысоких энергий должны быть фотоны. Это, однако, противоречит экспериментальным данным, и режде всего данным Якутской установки.

Экспериментальная ситуация со спектром сейчас неясная, как это видно из рис. 14. Не исключено (но пока и не доказано), что обрезание в спектре действительно отсутствует. Вопрос должны прояснить измерения на детекторе Pierre Auger с площадью 3000 кв. км., вводимом в строй в Аргентине (для сравнения, площадь установки AGASA — 100 кв. км.; Якутская установка имеет несколько меньшую площадь).

Второй аспект проблемы физики космических лучей высоких и сверхвысоких энергий связан с направлениями их прихода. На всех трех установках получены

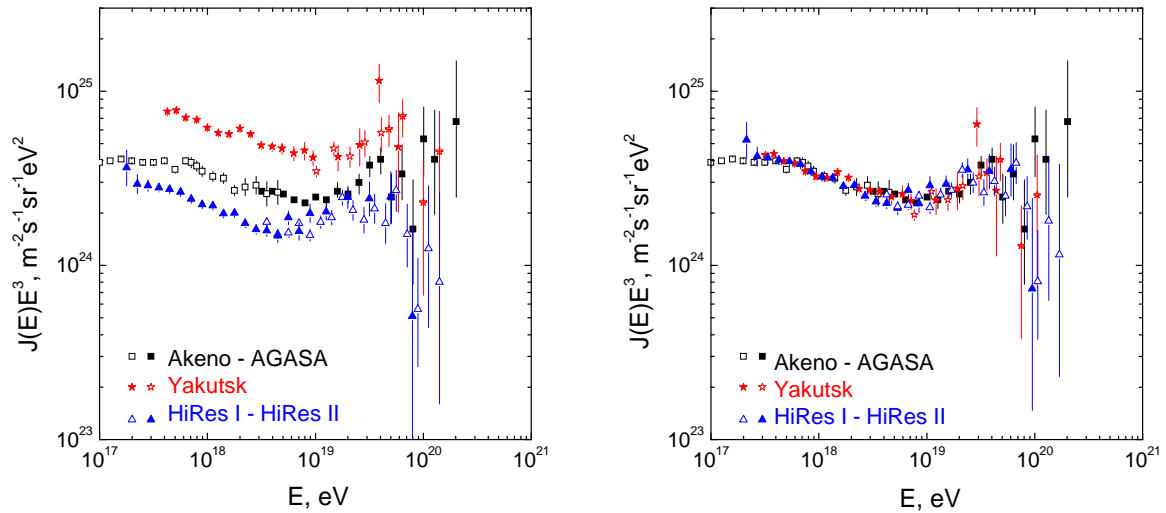


Рис. 14: Результаты измерения спектра космических лучей установками Акепо-AGASA (Япония), Якутской установкой для исследования широких атмосферных ливней и Hi-Res (США). Слева — опубликованные данные, справа — попытка совместить спектры с (довольно произвольным) изменением нормировки энергии в пределах заявленных систематических погрешностей.

указания на то, что начиная с энергий $4 \cdot 10^{19}$ эВ (AGASA), $2 \cdot 10^{19}$ эВ (Якутск) и даже ниже (Hi-Res) имеется корреляция направления прихода с активными ядрами галактик особой морфологии — лацертидами. Если это так, то среди первичных космических частиц должны быть электрически нейтральные частицы, не отклоняющиеся в магнитном поле Галактики. Таких частиц среди известных нет (фотоны не подходят, поскольку слишком быстро теряют свою энергию за счет неупругих взаимодействий с мягкими фотонами в космосе). Разумеется, проверка имеющихся указаний имеет огромный интерес.

3.4 Тёмная энергия

Гравитационные свойства тёмной энергии сильно отличаются от свойств других форм энергии (см. обзоры [19]). Тёмная энергия не собирается в сгустки, она равномерно “разлита” во Вселенной. Плотность тёмной энергии очень слабо меняется или вообще не меняется со временем, в то время как плотность любых частиц относительно быстро падает из-за расширения Вселенной. Наличие тёмной энергии приводит к ускоренному расширению Вселенной, так что можно условно сказать, что тёмная энергия испытывает антигравитацию. В рамках общей теории относительности это возможно, если эта субстанция имеет, поми-

мо положительной энергии, отрицательное давление. Отрицательность давления следует и из общего соотношения

$$dE = -pdV . \quad (13)$$

Действительно, если плотность энергии постоянна или почти постоянна во времени, то при расширении Вселенной энергия (в сопутствующем объёме) растёт как объём, так что давление должно быть отрицательным и равным или почти равным по абсолютной величине плотности энергии¹².

Возможные формы тёмной энергии и их проявления в космологических наблюдениях обсуждаются сейчас очень широко. Одна из возможностей состоит в том, что тёмная 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 отсчёта):

$$T_{\mu\nu}^{vac} = \epsilon^{vac} \cdot \eta_{\mu\nu} \quad (14)$$

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

Проблема тёмной энергии (её ещё 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 определяется характерными энергетическими масштабами этих взаимодействий. Так, вклад сильных взаимодействий можно было бы оценить из размерных соображений¹³ как

$$\epsilon_{QCD}^{vac} \sim \Lambda_{QCD}^4 \simeq (200 \text{ МэВ})^4 \quad (15)$$

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

$$\epsilon_{DE} = \Lambda_{DE}^4 \quad (16)$$

¹²Отметим, что в контексте общей теории соотношение (13) – это не что иное, как одно из условий ковариантного сохранения тензора энергии-импульса.

¹³В используемой системе единиц $c = \hbar = 1$ длина имеет размерность, обратную энергии, так что плотность энергии имеет размерность (энергия)⁴.

где

$$\Lambda_{DE} \simeq 2 \cdot 10^{-3} \text{ эВ} \quad (17)$$

Видно, что различие между размерной оценкой (15) и реальным значением составляет 44 порядка величины (!). Ситуация становится ещё хуже, если учесть вклады электрослабых и самих гравитационных взаимодействий, которые можно было бы оценить как Λ_{EW}^4 и M_{Pl}^4 , соответственно. В этом и состоит первый аспект проблемы: совершенно непонятно, почему реальное значение космологической постоянной столь малó 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 тёмной энергии, см. обзоры [20, 21]: он имелся бы и в отсутствие тёмной 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 [22, 23], реализоваться они могли 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 тёмной энергии состоит в том, что в физике частиц нет столь малого энергетического масштаба, как $\Lambda_{DE} \sim 10^{-3}$ эВ. В большинстве гипотез о носителе тёмной энергии этот масштаб приходится вводить “руками”; связать его с известными масштабами типа Λ_{EW} или M_{Pl} чрезвычайно трудно, если вообще возможно. Таким образом, этот аспект проблемы в определённом смысле аналогичен проблеме калибровочной иерархии, однако в отличие от последней сколько-нибудь элегантного решения здесь пока не предложено.

4 Что всё это значит?

Суммируя, можно сказать, что и в физике частиц, и в космологии многие фундаментальные факты выглядят сегодня как противоречащие критерию естественности. С одной стороны, однородные параметры теории элементарных частиц оказываются разнесёнными на много порядков величины: одним из примеров здесь служат энергетические масштабы, характеризующие различные взаимодействия и тёмную энергию; другой пример – безразмерные константы, определяющие массы кварков и заряженных лептонов. С другой стороны, разнородные характеристики Вселенной, например, плотность тёмной материи и плотность обычного вещества, оказываются одинаковыми по порядку величины, несмотря

на различные, по всей вероятности, механизмы их генерации в ранней Вселенной. Особняком стоит проблема космологической постоянной (энергии вакуума), которая остаётся нерешённой в течение нескольких десятков лет, несмотря на все усилия теоретиков.

Разумеется, наиболее привлекательной является возможность того, что каждый из этих фактов имеет своё динамическое объяснение. О некоторых гипотезах такого рода мы кратко упомянули в предыдущих разделах. Замечательно, что большинство из них требует расширения известных представлений о физике частиц, доступного экспериментальной проверке в недалёком 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 исключённым, 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 наше существование было вообще возможно (см. обзоры [24, 25]). 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 звёзды типа Солнца и планетные системы не могли бы образоваться¹⁴ [26, 21]

– Массы лёгких кварков и электромагнитная константа $\alpha = 1/137$ таковы, что нейтрон тяжелее протона (и поэтому в природе есть водород), но ненамного (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 Λ_{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 [27]

Список подобных “дружелюбных случайностей” можно продолжать, довольно подробное их перечисление имеется в книге [28], целиком посвящённой ан-

¹⁴В случае большой положительной космологической постоянной образованию галактик, звёзд и планет препятствует слишком быстрое расширение Вселенной; при большой отрицательной космологической постоянной до образования звёзд и планет расширение Вселенной прекращается и происходит коллапс обратно в космологическую сингулярность.

тропному принципу.

На первый взгляд антропный принцип противоречит естественнонаучному взгляду на законы природы. Однако это не так. Существует возможность того, что Вселенная на самом деле неизмеримо больше, чем её наблюдаемая часть, и что в разных областях Вселенной, опять-таки значительно бóльших наблюдаемой части, параметры, которые мы считаем фундаментальными, принимают разные значения (возможно, различны и сами физические законы в нынешнем понимании этого термина). На такую возможность указывают, например, модели “вечной” инфляции [25] или представление о “ландшафте” теории струн [29]. В первом варианте во Вселенной имеется огромное (возможно, бесконечное) число областей с разным эффективным возрастом, разной космологической историей и разным 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 разных областях они действительно принимают разные значения. Во втором случае речь идёт об огромном числе почти вырожденных вакуумов теории струн, которые могут реализовываться в разных областях Вселенной; разные вакуумы имеют не только различные значения фундаментальных параметров, но и разные калибровочные группы, разные наборы “элементарных” частиц и т.д. Можно упомянуть и о картине дочерних вселенных [30], в которой имеется бесконечное количество вселенных, опять-таки с различными значениями фундаментальных параметров.

Если верен такой взгляд, то антропный принцип просто отражает тот факт, что наше существование возможно не в произвольном месте во Вселенной, а именно там, где для этого есть подходящие условия. Как сформулировал в 1974 году Брэндон Картер, “наше местоположение во Вселенной с необходимостью является привилегированным в том смысле, что оно совместимо с существованием нас как наблюдателей”¹⁵. То, что константы, которые мы считаем фундаментальными, принимают далеко не наиболее естественные значения, может быть таким же эффектом селекции, как “неестественный”, с точки зрения характерных температур во Вселенной, результат измерения температуры на Земле.

Трудность использования антропного принципа для получения конкретных результатов состоит в том, что а priori неизвестно, какие именно параметры являются фундаментальными в том смысле, что их значения определяются из антропных соображений, а какие – производными, т.е. вычислимыми исходя из

¹⁵ “Our location in the Universe is necessarily privileged to the extent of being compatible with our existence as observers”. Цитируется по книге [28].

фундаментальных. В этом смысле антропный принцип нельзя опровергнуть¹⁶.

В то же время, антропный принцип может получить серьёзную поддержку со стороны эксперимента, причём весьма скоро. А именно, как мы обсуждали в разделе 2, малость радиационных поправок к электрослабому масштабу энергий можно обеспечить либо путём чрезвычайно тонкой подстройки параметров, либо за счёт 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 серьёзным (а, возможно, решающим) доводом в пользу того, что антропный принцип действительно 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 всё большую роль. Решающее слово, как всегда, остаётся за экспериментом, и это слово должны сказать эксперименты на ЛНС, которые начнутся уже через год.

Список литературы

- [1] Л.Б.Окунь, Лептоны и кварки, Москва, Наука, 1990.
- [2] Н.В.Красников, В.А.Матвеев, УФН, 174, 697 (2004)
- [3] Б.Л.Иоффе, УФН, 176, 1103 (2006)
- [4] М.И.Высоцкий, Р.Б.Невзоров, УФН 171, 939 (2001)
- [5] Д.С.Горбунов, С.Л.Дубовский, С.В.Троицкий, УФН 169, 705 (1999)
- [6] D. I. Kazakov, “Beyond the standard model,” arXiv:hep-ph/0411064;
A. V. Gladyshev and D. I. Kazakov, “Supersymmetry and LHC,” arXiv:hep-ph/0606288.

¹⁶Чисто 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 Λ_{DE}/M_{Pl} и т.д. Интересно, что относительно недавно такая возможность рассматривалась довольно серьёзно в контексте теории суперструн.

- [7] N. Arkani-Hamed and S. Dimopoulos, JHEP 0506, 073 (2005) [arXiv:hep-th/0405159];
G. F. Giudice and A. Romanino, Nucl. Phys. B 699, 65 (2004) [Erratum-ibid. B 706, 65 (2005)] [arXiv:hep-ph/0406088].
- [8] N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos and S. Kachru, “Predictive landscapes and new physics at a TeV,” arXiv:hep-th/0501082.
- [9] G. F. Giudice and R. Rattazzi, Nucl. Phys. B 757, 19 (2006) [arXiv:hep-ph/0606105].
- [10] M. Schmaltz and D. Tucker-Smith, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 55, 229 (2005) [arXiv:hep-ph/0502182];
M. Perelstein, Prog. Part. Nucl. Phys. 58, 247 (2007) [arXiv:hep-ph/0512128]
- [11] T. Gherghetta, “Warped models and holography,” arXiv:hep-ph/0601213.
- [12] D. P. Schneider et al. [SDSS Collaboration], Astron. J. 123, 567 (2002), <http://www.sdss.org/dr1/algorithms/edrpaper.html#fig-ZhistQso>
- [13] G. Hinshaw et al., “Three-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Temperature analysis,” arXiv:astro-ph/0603451; D. N. Spergel et al., “Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) three year results: Implications for cosmology,” arXiv:astro-ph/0603449.
- [14] W. M. Yao et al. [Particle Data Group], J. Phys. G 33 (2006) 1.
- [15] <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap980614.html> & [/ap030814.html](http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap030814.html);
J. P. Kneib et al., Astrophys. J. 598, 804 (2003).
- [16] K. G. Begeman, A. H. Broeils and R. H. Sanders, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 249 (1991) 523.
- [17] A. Bottino and N. Fornengo, “Dark matter and its particle candidates,” arXiv:hep-ph/9904469;
K. A. Olive, “Dark matter,” arXiv:astro-ph/0301505.
- [18] K. Enqvist and A. Mazumdar, Phys. Rept. 380 (2003) 99 [arXiv:hep-ph/0209244].
- [19] V. Sahni and A. A. Starobinsky, Int. J. Mod. Phys. D 9 (2000) 373 [arXiv:astro-ph/9904398];
S. Weinberg, “The cosmological constant problems,” arXiv:astro-ph/0005265;

- T. Padmanabhan, Phys. Rept. 380 (2003) 235 [arXiv:hep-th/0212290];
P. J. E. Peebles and B. Ratra, Rev. Mod. Phys. 75 (2003) 559 [arXiv:astro-ph/0207347].
- [20] A. D. Dolgov and Y. B. Zeldovich, Rev. Mod. Phys. 53 (1981) 1.
- [21] S. Weinberg, Rev. Mod. Phys. 61 (1989) 1.
- [22] V. A. Rubakov, Phys. Rev. D 61 (2000) 061501 [arXiv:hep-ph/9911305].
- [23] P. J. Steinhardt and N. Turok, Science 312 (2006) 1180 [arXiv:astro-ph/0605173].
- [24] И.Л.Розенталь, УФН 167, 801 (1997)
- [25] A.D.Linde, “Inflation, quantum cosmology and the anthropic principle,” arXiv:hep-th/0211048.
- [26] A. D. Linde, “Inflation And Quantum Cosmology,” In: Hawking, S.W. (ed.), Israel, W. (ed.): Three hundred years of gravitation, Cambridge University Press, 1987, pp. 604-630.
- [27] M. Tegmark and M. J. Rees, Astrophys. J. 499 (1998) 526 [arXiv:astro-ph/9709058].
- [28] J.D.Barrow, F.J.Tipler “The Anthropic Cosmological Principle”, Clarendon Press, Oxford, 1986.
- [29] R. Bousso and J. Polchinski, JHEP 0006 (2000) 006 [arXiv:hep-th/0004134];
S. Kachru, R. Kallosh, A. Linde and S. P. Trivedi, Phys. Rev. D 68 (2003) 046005 [arXiv:hep-th/0301240];
L. Susskind, “The anthropic landscape of string theory,” arXiv:hep-th/0302219.
- [30] Г.В.Лаврелашвили, В.А.Рубаков, П.Г.Тиняков, Письма в ЖЭТФ 46 (1987) 134; G. V. Lavrelashvili, V. A. Rubakov and P. G. Tinyakov, Nucl. Phys. B 299 (1988) 757;
S. B. Giddings and A. Strominger, Nucl. Phys. B 306 (1988) 890; Nucl. Phys. B 307 (1988) 854;
S. R. Coleman, Nucl. Phys. B 307 (1988) 867.