

**В. И. Тельнов**

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН  
пр. Акад. Лаврентьева, Новосибирск, 630090, Россия  
E-mail: telnov@inp.nsk.su

**ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И КОСМОЛОГИЯ:  
НА ПОРОГЕ ВЕЛИКИХ ОТКРЫТИЙ**

Настоящая статья редактора раздела «Физика высоких энергий, ускорителей и высокотемпературной плазмы» открывает публикации данного раздела журнала. В ней рассказывается о современных проблемах физики элементарных частиц и космологии, об удивительных открытиях, сделанных в последние годы, разгадка которых будет означать большой шаг в познании природы.

**Введение**

Наиболее глубокие знания о законах природы и в целом о нашей Вселенной дают исследования в области элементарных частиц и космологии. В последние годы были сделаны потрясающие открытия, разгадка которых станет настоящей революцией в науке. Может, это незаметно со стороны, но именно сейчас микро- и космофизика переживает один из самых захватывающих моментов за многие годы. Ответы на некоторые вопросы, возможно, будут даны уже в ближайшие годы.

На первый взгляд физика элементарных частиц (или физика высоких энергий) и космология изучают совершенно различные масштабы: первая – микромир (уже достигли  $10^{-17}$  см), вторая – эволюцию Вселенной (масштаб порядка  $10^{28}$  см). Однако на самом деле задача у них одна: познание природы окружающего нас мира на самом глубоком уровне. Вопросы можно сформулировать так: как возникла и эволюционировала Вселенная; из чего состоит Вселенная, какие есть виды материи; как устроена материя, какие есть виды взаимодействия, каковы законы движения; почему так устроен мир?

Долгое время астрономия была чисто созерцательной наукой, поскольку наблюдения велись только с помощью телескопов в узком оптическом диапазоне. Благодаря развитию техники сейчас есть возможность видеть, что происходит во Вселенной во всех диапазонах электромагнитных волн, а также регистрировать другие виды космических частиц: протоны, электроны, ядра, нейтрино и т. д. В результате открытия следуют одно за другим. При этом исследования ведутся на очень высоком уровне, позволяющем сравнивать полученные результаты с

предсказаниями различных моделей и делать соответствующие выводы. Например, исследование движения двойных звезд позволило установить, что изменение периода обращения соответствует излучению гравитационных волн (которые напрямую до сих пор еще не зарегистрированы). Это было получено уже более двадцати лет назад. То, что делается сейчас, вообще потрясает основы наших знаний. Кратко это можно сформулировать так:

- удалось получить информацию о первых мгновениях жизни Вселенной;
- появились основания утверждать, что все известные сейчас виды материи составляют всего лишь 4,5 % от полной плотности Вселенной. При этом есть невидимая материя, которой раз в 6 больше, чем обычной материи (т. е. 25 % от полной плотности), а больше всего (70 %) – мистической темной энергии (возможно «физический» вакуум), которая обладает антигравитационными свойствами;
- Вселенная расширяется, и скорость расширения увеличивается со временем (ожидалось замедление).

Нет сомнений, что точность данных будет со временем улучшаться. Возможно даже, что удастся напрямую зарегистрировать частицы темной материи и узнать некоторые ее свойства. Однако для того, чтобы *понять, что это такое*, требуются дополнительные эксперименты на ускорителях (если хватит энергии), где кроме нейтральных стабильных частиц самой темной материи могут рождаться любые частицы из этого семейства, заряженные и нейтральные, стабильные и нестабильные. Так, например, с помощью ускорителей было установлено, что протоны и нейтроны состоят из кварков, которые взаимодействуют между собой пу-

тем обмена глюонами, и, кроме двух типов кварков, составляющих протон (или нейтрон), открыли еще четыре типа кварков. На основании таких исследований была создана теория сильных взаимодействий, квантовая хромодинамика. Нечто аналогичное должно быть проделано с темной материей, которая, по-видимому, относится к новому классу частиц, которые до сих пор не рождались на ускорителях ввиду их большой массы.

Другой пример взаимосвязи космологии и физики элементарных частиц. Вселенная родилась примерно 15 млрд лет назад (Большой взрыв). Что было в самом начале, мы пока не знаем, однако благодаря экспериментам на ускорителях мы можем утверждать, что примерно понимаем, что происходило с Вселенной начиная с  $10^{-11}$  секунды ее жизни. Тогда у нее была температура порядка  $3 \times 10^{15}$  К (сейчас 3 К). Начиная с этого момента во Вселенной остались только частицы, которые уже достаточно хорошо изучены на ускорителях (кроме частиц темной материи).

Мы попытаемся рассказать об основных открытиях и проводимых исследованиях в области космологии и физики элементарных частиц, а также о том, что можно ожидать в последующие два-три десятилетия. Заметим, что данные исследования ведутся обычно международными коллаборациями, и при желании каждый может принять в них участие.

### Физика элементарных частиц

В краткой статье невозможно охватить все методы изучения свойств материи, поэтому остановимся только на главных направлениях.

*Ускорители, детекторы.* Основным методом изучения материи являются ускорители частиц. Ускоренные частицы затем сталкиваются с частицами неподвижной мишени или частицами, движущимися навстречу (встречные пучки, или коллайдеры, от «collide» – сталкиваться). Встречные пучки сделать сложнее, но они намного эффективнее, так как позволяют достичь существенно более высокой энергии в системе центра инерции (с. ц. и.). Институт ядерной физики СО РАН (Новосибирск) является пионером в этой области, здесь около 40 лет назад были построены и проведены эксперименты на первых  $e^-e^-$  и  $e^+e^-$  коллайдерах. В даль-

нейшем в мире были построены  $e^+e^-$ ,  $pp$ ,  $p\bar{p}$  ( $\bar{p}$  – антипротон),  $ep$  коллайдеры на различную энергию.

Для продвижения в изучении материи требуются все более высокие энергии. Это необходимо по двум причинам: 1) максимальная масса рождающихся частиц пропорциональна энергии сталкивающихся частиц в с. ц. м и для встречных пучков  $M_{max} = 2E/c^2$ ; 2) ускоритель является своеобразным микроскопом, в котором пространственное разрешение ограничено дебройлевской длиной волны частицы  $\lambda = \hbar/p \approx \hbar c/E$ . При достаточно большом числе событий можно разглядеть в частице детали порядка  $0,1\lambda \approx 2 \cdot 10^{-15}/E$  [ГэВ] см.

Достигнутая энергия  $e^+e^-$  коллайдеров  $2E \approx 215$  ГэВ (LEP-II, ЦЕРН, Женева) и  $p\bar{p}$  коллайдеров  $2E = 2$  ТэВ (Tevatron, США), таким образом, разрешение составляет порядка  $10^{-18} - 10^{-17}$  см. Нужно заметить, что электрон, участвует во взаимодействиях как точечная частица, несущая всю энергию, в то время как протон состоит из трех кварков и связывающих их глюонов, каждый из которых несет примерно 1/6 часть энергии протона. В столкновениях на малых расстояниях в реакциях участвуют именно точечные (пока) составляющие – кварки и глюоны. Это нужно учитывать при сравнении  $pp$  (или  $p\bar{p}$ ) и  $e^+e^-$  коллайдеров. В 2008 г. вступит в строй  $pp$  коллайдер LHC (ЦЕРН) с энергией  $2E = 14$  ТэВ. Периметр этого сверхпроводящего ускорителя составляет около 30 км (бывший тоннель  $e^+e^-$  коллайдера LEP). В дальнейшем планируется удвоить энергию LHC, заменив магниты на более сильные.

Максимальная энергия протонных коллайдеров ограничивается их размерами (кривизна траектории  $R \propto E/B$ ). По-видимому, энергия порядка 100 ТэВ является пределом. Для кольцевых  $e^+e^-$  коллайдеров основной проблемой является очень большая мощность синхротронного излучения, которая растет как  $E^4/R$  на один оборот. Ускоритель LEP-II был фактически близок к пределу. Дальнейшее продвижение по энергии возможно на линейных  $e^+e^-$  коллайдерах. Сейчас идет работа по проектированию  $e^+e^-$  линейного коллайдера ILC (International Linear Collider) на энергию

$2E = 1$  ТэВ. Его длина составит около 40 км. Окончательное решение о строительстве зависит от первых результатов LHC, когда станет известно, есть ли в области  $2E = 0,1 - 1$  ТэВ новая интересная физика. При благоприятных условиях ILC может вступить в строй к 2020 г. Так же разрабатывается линейный коллайдер CLIC на энергию до  $2E = 3 - 5$  ТэВ, фактически предельную для линейных коллайдеров. Ограничение связано с полной потребляемой мощностью. Разумный предел составляет порядка 0,5 ГВт.

На линейных коллайдерах пучки используются однократно, это делает возможным получение встречных фотон-фотонных пучков (фотонный коллайдер) с высокой энергией и светимостью. Фотоны высокой энергии предполагается получать путем рассеяния лазерных фотонов на высокоэнергичных электронах. Таким способом почти все электроны можно конвертировать в фотоны с почти такой же энергией.

Хотя  $e^+e^-$  коллайдеры имеют энергию меньше, чем  $pp$ , однако они взаимно дополняют друг друга. В  $e^+e^-$  хорошо определено начальное состояние (точечные частицы, почти монохроматические пучки) и низкий фон. Количество крупных открытий, сделанных на этих коллайдерах, примерно одинаково. Кроме того, даже если что-то вначале обнаруживают в  $pp$ , то последующие исследования на  $e^+e^-$  коллайдерах позволяют изучить данное явления со значительно более высокой точностью.

Есть еще одна идея – мюонный коллайдер. Мюоны, как и электроны, являются точечными частицами, но в 200 раз более массивные. При той же энергии они будут излучать в 40 000 раз меньше, чем электроны, поэтому пучки мюонов можно сталкивать в кольцевых ускорителях до более высоких энергий. Главная проблема в их создании заключается в том, что мюоны нестабильны ( $\tau = 2 \times 10^{-6}$  с), а их нужно родить, охладить, разогнать и столкнуть. Это сложно, но можно. За счет релятивистского увеличения времени жизни они могут совершить примерно 1 000 оборотов в коллайдере. Обсуждаются проекты мюонных коллайдеров на энергию несколько ТэВ (и даже до 100 ТэВ), но строиться они начнут еще не скоро, поскольку требуется детальная проработка проекта и экспериментальная проверка ключевых технологий.

Следует заметить, что, кроме энергии, ускоритель должен иметь достаточную для изучения физических процессов светимость  $L \approx N^2 f / S$ , где  $N$  – число частиц в пучке;  $S$  – сечение пучка;  $f$  – частота встреч. Число событий определенного процесса за единицу времени  $N = L\sigma$ . Сечения интересных процессов, таких как рождение пары заряженных частиц, падает с ростом энергии как  $\sigma \propto 1/E^2$ , так что светимость должна расти как  $E^2$ , чтобы за время эксперимента зарегистрировать достаточное количество событий нового процесса (хотя бы 1 000). Так что проблема состоит не только в ускорении частиц, но и получении очень плотных пучков с высокой частотой столкновений.

Сейчас во многих лабораториях ведутся работы по ускорению частиц сильными электрическими полями, создаваемыми в плазме короткими лазерными вспышками или пучками электронов. В таком плазменном ускорителе темп ускорения может составлять более 1 ГэВ/см (уже получено), что на три порядка превосходит возможности традиционных радиочастотных вакуумных линейных ускорителей. Тогда, казалось бы, вместо разрабатываемого сейчас ускорителя ILC на энергию 1 ТэВ с полной длиной 40 км можно сделать плазменный ускоритель длиной всего 10 м, а в будущем на длине 10 км получить 1 000 ТэВ! Разогнать частицы до такой энергии в принципе возможно, однако вряд ли удастся достигнуть необходимой для встречных пучков светимости. Даже если будут решены все проблемы с нестабильностью плазмы, останется ограничение на размеры пучков, связанные с рассеянием частиц в плазме, а также огромной мощностью, которую нужно вкачивать в плазму для получения требуемой светимости коллайдера. Тем не менее такие методы ускорения могут быть полезны для многих других задач.

Пока физики только начинают разрабатывать плазменные ускорители, природа их уже давно создала. При вспышках сверхновых звезд и других космических катаклизмах образуются мощные плазменные потоки, которые ускоряют некоторые частицы до очень высоких энергий. В настоящее время зарегистрированы космические частицы с максимальной энергией порядка  $10^{20}$  eV ( $10^8$  ТэВ). Это в  $10^7$  раз больше, чем будет на LHC, однако их поток составляет всего порядка одной частицы на  $100 \text{ км}^2$  в год. На LHC энергия летящих навстречу

протонов равна  $2E_0 = 14$  ТэВ. Чтобы космической частице произвести такой же эффект при столкновении с неподвижным протоном, ей необходима энергия  $E \sim 2E_0^2 / (m_p c^2) \sim 10^5$  ТэВ. Поток таких частиц составляет порядка 1 000 штук на  $1 \text{ км}^2$  в год. Энергия исходной космической частицы и тип (протон, ион, и др.) неизвестны, ввиду взаимодействия с атмосферой до Земли долетают только остатки адронных ливней, в основном мюоны.

Недавно в Аргентине заработал эксперимент (Pierre Auger observatory) по регистрации космических частиц сверхвысокой энергии. Покрываемая им площадь составляет  $3\,000 \text{ км}^2$ . Регистрируются как частицы на поверхности Земли (баки с водой, просматриваемые фотоумножителями), так и флюоресценция азота в атмосфере (с помощью специальных телескопов).

Еще более амбициозный эксперимент готовит европейская коллаборация EUSO (Extreme Universe Space Observatory). В этом эксперименте световые вспышки (флюоресценция и черенковское излучение) от каскада частиц, образованного в атмосфере высокоэнергичной космической частицей, будут регистрироваться специальным телескопом, установленным на орбитальной космической станции. Просматриваемая им площадь в каждый момент составляет  $20\,000 \text{ км}^2$ . Ожидается регистрация за год около 1 000 частиц с энергией более  $10^{20}$  эВ (16 Дж).

Исследования космических частиц имеют две цели: во-первых, нужно понять, как они образуются, какие космические ускорители разгоняют их до таких больших энергий; во-вторых, оказывается, во Вселенной есть неизвестные науке формы материи, их обнаружение и изучение сейчас выходит на первый план. Это еще будет обсуждаться далее. Если в класс космических частиц включить еще не обнаруженную темную материю, то актуальность изучения космических частиц несомненна, хотя они не могут конкурировать с ускорителями в систематическом и детальном изучении свойств материи.

Следует отметить, что многие базовые идеи упомянутых выше коллайдеров (а также реализация некоторых их них или концептуальная проработка) исходят из Института ядерной физики (ИЯФ СО РАН), созданного Г. И. Будкером. Что касается реали-

зации очередных проектов коллайдеров на высокую энергию, характерная стоимость которых составляет примерно 5–10 млрд долларов, так они могут быть построены только объединенными усилиями ведущих стран мира.

Эксперименты на ускорителях проводятся с помощью детекторов, которые регистрируют все конечные частицы и определяют их параметры. По сложности они сравнимы с самим ускорителем и даже в чем-то более продвинутое. Это касается, например, потоков информации и их обработки. Так, на ЛHC пучки будут сталкиваться 40 млн раз в секунду, за одно столкновение пучков будет происходить в среднем 25 *pp* столкновений, сопровождающихся развалом протонов и рождением других частиц, а в каждом таком процессе будет рождаться более сотни различных конечных частиц (т. е. несколько тысяч частиц за встречу). В результате быстрого анализа нужно выделить события, представляющие интерес, и затем записать их в память для дальнейшего анализа. Не случайно именно в ЦЕРНе возникла идея WWW, а сейчас ЦЕРН продвигает проект GRID, который обеспечит передачу информации между ведущими центрами на уровне ГБ/с.

В результате экспериментальных и теоретических исследований на сегодняшний день сложилась довольно стройная картина, описывающая мир элементарных частиц, которую называют *Стандартной моделью*. Это заведомо временная схема, содержащая более двух десятков параметров (массы частиц и константы взаимодействия), которые нельзя пока выразить через какие-то более фундаментальные величины. Однако эта модель позволяет рассчитывать с высокой точностью тысячи всевозможных реакций. Так или иначе эта теория есть результат титанического труда тысяч ученых, являющийся вершиной человеческих знаний о природе.

Стандартная модель имеет дело с тремя классами фундаментальных частиц: кварками, лептонами и калибровочными бозонами, являющимися переносчиками взаимодействий. Они взаимодействуют посредством давно известных, но весьма загадочных, четырех видов взаимодействий: сильного, слабого, электромагнитного и гравитационного, и движутся согласно законам квантовой механики и теории относительности.

*Кварки.* Существует 6 типов кварков (табл. 1). У каждого кварка есть антикварк с

противоположным электрическим зарядом и другими зарядами. Кварки участвуют во всех видах взаимодействий. Спин кварка равен  $1/2$  (фермион). Кроме электрического заряда, кварки обладают цветовым зарядом, всего есть 3 цвета. Цветовой заряд в сильном взаимодействии является аналогом электрического заряда в электромагнитном взаимодействии. Аромат кварка – это некое квантовое число, присущее кварку, сохраняющееся в сильных и электромагнитных взаимодействиях, но нарушающееся в слабых. Сохранение аромата запрещает, например, распад  $s \rightarrow d + \gamma$ . Кварки имеют также барионный заряд, сохраняющийся во всех взаимодействиях. Из кварков складываются барионы ( $q_i q_j q_k$ ) и мезоны ( $q\bar{q}$ ), которые бесцветны (смесь трех цветов или цвета-антицвета). Например, протон – это  $uud$ . Взаимодействие между кварками осуществляется путем обмена глюонами, которые имеют 8 цветов ( $3 \times 3 - 1$  (бесцветный) = 8). Кварки и глюоны ведут себя как точечные частицы с размерами  $< 10^{-17}$  см.

В отличие от фотона глюоны имеют заряды (цвета) и поэтому взаимодействуют друг с другом. В результате сильное взаимодействие имеет почти кулоновский вид на достаточно малых расстояниях, но при больших расстояниях сила перестает падать из-за множественного рождения промежуточных глюонов, образующих своеобразные сети, поэтому в природе свободных цветных кварков с дробными зарядами нет. Если энергии достаточно, то кварк вырывает из вакуума дополнительные кварк-антикварковые пары, они слипаются в бесцветные адроны и мезоны и в виде струй обычных бесцветных частиц вылетают из области рождения в направлении исходного кварка. Все это наблюдается в экспериментах и хорошо согласуется со Стандартной моделью.

Возможно, есть 4- и даже 5-кварковые состояния, но их существование пока под вопросом. Почему у кварков такие массы, пока никто не знает. И вообще, все, что лежит в основании Стандартной модели, не имеет объяснения (не сводится к более фундаментальным понятиям).

Таблица 1

## Кварки

Тип	Масса, МэВ	Эл. заряд	Бар. заряд	Аромат
u	2–3	+2/3,	1/3	–
d	4–6	–1/3	1/3	–
s	100	–1/3	1/3	strange
c	1 300	+2/3	1/3	charm
b	4 200	–1/3	1/3	beauty
t	175 000	+2/3	1/3	truth

**Лептоны.** Существует 6 типов лептонов (табл. 2). У каждого лептона есть античастица с противоположными зарядами. Лептоны участвуют во всех видах взаимодействий, кроме сильного. Спин лептонов равен  $1/2$  (фермионы). Лептоны ведут себя как точечные частицы с размерами менее  $10^{-17}$  см. Есть три относительно тяжелых

заряженных лептона и три очень легких нейтральных нейтрино. Хотя массы нейтрино еще напрямую не измерены, однако из нейтринных осцилляций (см. далее) известно, что они отличны от нуля. В реакциях с участием лептонов сохраняется лептонное число, но оно нарушается в нейтринных осцилляциях.

Таблица 2

## Лептоны

Тип	Масса, МэВ	Эл. заряд	Лепт. число
$e$	0,51	1	$L_e = 1$
$\mu$	105,6	1	$L_\mu = 1$
$\tau$	1 777	1	$L_\tau = 1$
$\nu_e$	$< 10^{-6}$	0	$L_e = 1$
$\nu_\mu$	$< 0,19$	0	$L_\mu = 1$
$\nu_\tau$	$< 18$	0	$L_\tau = 1$

Таблица 3

## Калибровочные бозоны

	Масса, МэВ	Эл. заряд	Спин	Перен. взаимодействия
$\gamma$	0	0	1	электромагнитное
8 цв. глюон	0	0	1	сильное
$W^\pm$	80 000	$\pm 1$	1	слабое
$Z$	91 000	0	1	слабое
Гравитон	0	0	2	гравитационное

*Калибровочные бозоны.* Кроме кварков и лептонов существуют частицы, которые осуществляют взаимодействие между фермионами (кварками и лептонами). Это частицы с целым спином – калибровочные бозоны (табл. 3).

*Взаимодействия, Хиггсовский бозон, общие замечания по СМ.* В 1970–1980-х гг. было установлено, что электромагнитное и слабое взаимодействия являются одинаковыми по константе связи, разница только в том, что переносчики слабого взаимодействия  $W$  и  $Z$  бозоны имеют большую массу. Так возникла теория электрослабого взаимодействия. В основе лежит идея локальной (или калибровочной) симметрии. Требование такой симметрии приводит к появлению четырех безмассовых калибровочных бозонов. Их можно было бы ассоциировать с  $\gamma$ ,  $W^\pm$ ,  $Z$ , однако три последних – массивные. Для выхода из положения английский физик Хиггс предложил механизм спонтанного нарушения симметрии. Для этого пришлось ввести некое скалярное поле, заполняющее все пространство. Массы калибровочных бозонов и всех фермионов возникают за счет взаимодействия с этим полем, масса частицы пропорциональна ее константе взаимодействия с Хиггсовским полем. Аналогичный подход был использован для построения теории сильных взаимодействий, которая носит название квантовой хромодинамики (от греч. *chrōma* – цвет).

Несмотря на некоторую искусственность построения, Стандартная модель, основанная на идее калибровочных полей и включающая электрослабую теорию и хромодинамику, замечательно выполняется на практике. Однако гипотеза о Хиггсовском поле еще не доказана. Для ее проверки необходимо зарегистрировать Хиггсовский бозон ( $H$ ), являющийся возбужденным состоянием Хиггсовского поля. Его масса не предсказывается явно, однако есть теоретические соображения (нестабильность вакуума, сильное самовзаимодействие Хиггсовских бозо-

нов), из которых следует, что  $M_H$  должна быть в районе 120–200 ГэВ. Из прецизионных экспериментов на LEP и Tevatron (поправки за счет виртуальных Хиггсов к другим процессам) также есть указания, что их масса лежит в области 115–190 ГэВ. Сейчас ведутся попытки найти  $H$ -бозон на Тэватроне, однако его светимости может не хватить для обнаружения Хиггсовского бозона. На ЛНС и линейном коллайдере Хиггсовские бозоны будут рождаться в изобилии.

Для проверки того, что найденная частица действительно является Хиггсовским бозоном, отвечающим за возникновение масс частиц, нужно будет убедиться, что вероятности распада  $H$  на пару лептонов пропорциональны квадрату их масс. Такая проверка может быть сделана на ЛНС уже через несколько лет. Однако полной уверенности, что поиск идет в правильном направлении, все же нет. Эксперимент подскажет. Этим и интересна наука!

Сколько же констант в Стандартной модели? Задача науки – найти общие закономерности и описать все явления природы минимальным количеством законов, т. е. аксиом. Хорошо было бы все выразить через константы  $\hbar$ ,  $c$ ,  $G$ . Они задают масштабы длины  $l_p = (\hbar G/c^3)^{1/2} = 1,6 \times 10^{-33}$  см, времени  $t_p = (\hbar G/c^5)^{1/2} = 5,4 \times 10^{-44}$  с и массы  $m_p = (\hbar c/G)^{1/2} = 2,18 \times 10^{-5}$  г  $\sim 10^{19}$  ГэВ/с<sup>2</sup>, которые называют соответственно планковской длиной, временем и массой. Часто теоретики в расчетах полагают  $\hbar$ ,  $c$ ,  $G$  равными единице.

Массы реальных элементарных частиц намного меньше планковской, поэтому возникает вопрос, можно ли когда-нибудь будет выразить их массы через планковскую длину. Есть удивительный факт, который говорит, что такое возможно. Три вида взаимодействия, о которых мы говорили: сильное, электромагнитное и слабое, имеют константы взаимодействия, которые зависят

от расстояния за счет виртуальных заряженных частиц (электрон-позитронные, кварковые пары и др.), рождающихся из вакуума, или иначе – поляризации вакуума. Расстояния часто выражают в энергетических величинах в соответствии с соотношением неопределенности Гейзенберга ( $Q \sim \hbar c / r$ ). При этом оказывается, что при  $Q \sim 10^{16}$  ГэВ все константы сравниваются, что может свидетельствовать о возможном объединении этих взаимодействий в некое единое взаимодействие. Эту теорию (гипотезу) называют Великим объединением. Одним из предсказаний этой теории является нестабильность протона (с нарушением барионного числа). Распад протона много лет пытаются обнаружить, просматривая фотоумножителями большие баки с водой (до 50 000 т, SuperKamiokande, см. ниже). Установлен предел на время жизни  $\tau_p > 10^{34}$  лет. Эксперименты будут продолжены с большим (на порядок) объемом воды.

Однако вернемся к вопросу, а сколько же сейчас фундаментальных констант в физике? Много, даже сосчитать не просто.

Начнем с масс фундаментальных частиц: 6 кварков, 6 лептонов, 2 массивных калибровочных бозона, Хиггсовский бозон – всего 15.

Добавим константы сильного и электромагнитного взаимодействия (константа слабого взаимодействия выражается через заряд электрона и массы калибровочных бозонов) – всего 2.

Превращение кварков из одного в другой при взаимодействии с  $W$ -бозоном описывается матрицей ( $3 \times 3$ ) Кабибо-Кабаяши-Маскава, в которой 4 независимых параметра: три угла смешивания и фаза, связанная с нарушением CP-симметрии. Для лептонов (включая массивные нейтрино) есть аналогичная матрица Маки-Накагава-Саката ( $3 \times 3$ ) с 4 независимыми параметрами. Всего 8.

Итак, кроме трех констант  $\hbar$ ,  $c$ ,  $G$ , задающих размерности длины, времени и массы, мы насчитали еще 25 констант! И это еще без космологии, где тоже есть космологическая константа и неведомая темная материя. Явный «перебор», но это то, что сейчас имеется. Однако сведение бесконечного количества явлений природы к такому небольшому количеству констант (законов природы) – это тоже большое достижение.

*Нерешенные проблемы. Дальнейшее развитие теории.* Нерешенных проблем не счастье. Еще очень далеко до разгадки

строения материи. Это следует из того, что мы не умеем вычислять вышеупомянутые константы, и их количество продолжает расти (хотя и не раз сокращалось). Мы не понимаем даже, почему наша Вселенная состоит в основном из материи, куда делась антиматерия? Уже найдены процессы на уровне элементарных частиц, в которых наблюдается такая асимметрия (в распадах  $K$ - и  $B$ -мезонов), однако этого не достаточно для объяснения наблюдаемой асимметрии во Вселенной.

Обычно новые явления сначала пытаются объяснить на основе уже существующих знаний, но что делать, если явление выходит за рамки Стандартной модели? Теоретики часто предлагают совершенно фантастические идеи типа пространства с большим количеством измерений; суперструны, которые, по их мнению, должны объяснить все, но на данный момент не дают ни одного конкретного предсказания, и т. д. Идеи не запретишь, однако каждому исследователю хорошо бы иногда вспоминать знаменитую фразу Леонардо да Винчи: «Знания, не рожденные опытом, бесплодны и полны ошибок».

Однако есть и очень интересные теории, в которые хочется верить. Здесь мы упомянем только одну – суперсимметрия (SUSY). В существующих теориях возникают расходимости при вычислении петлевых поправок, которые автоматически устраняются, если предположить, что у каждого фермиона (бозона) со спином  $1/2$  (1) есть партнер со спином  $0$  ( $1/2$ ). Из того, что их пока не обнаружили, следует, что они достаточно тяжелые. Большинство вариантов теории суперсимметрии предсказывают массы таких частиц в районе нескольких сотен ГэВ, т. е. как раз в области, покрываемой коллайдерами LHC и ILC. Такие частицы являются основными кандидатами на роль темной материи во Вселенной (см. ниже). Это может быть самая легкая стабильная суперсимметричная частица, очень слабо взаимодействующая с веществом.

Если повезет, то вскоре может быть открыт новый класс частиц, которых во Вселенной даже больше, чем обычной материи. Об этом мы скоро узнаем.

*Загадочные нейтрино.* Все, конечно, слышали про нейтрино, они очень легкие и трудноуловимые. Всего их три типа: электронное  $\nu_e$ , мюонное  $\nu_\mu$  и тау  $\nu_\tau$ . Они являются партнерами заряженных лептонов  $e$ ,  $\mu$ ,  $\tau$  (см. табл. 2). Про них уже достаточно много

известно, их умеют рожать и регистрировать. Многие их свойства хорошо описываются Стандартной моделью. Однако недавно в области нейтрино сделаны открытия, выходящие за рамки Стандартной модели, точнее требующие ее переделки со старой Стандартной модели в новую Стандартную модель.

Проблема с солнечными нейтрино была замечена более 30-ти лет назад. Как известно, на Солнце происходят термоядерные реакции, при которых рождается много нейтрино. Их поток на Землю составляет более  $10^{11}$  шт./см<sup>2</sup>/с. Солнечные нейтрино регистрировали несколькими методами (хлор-аргонный, водно-черенковкий, галлиевый) с различными порогами по энергии, однако каждый раз их было меньше ожидаемого потока в два-три раза. Сначала дефицит списывали на неточность Солнечной модели, но после регистрации солнечных нейтрино с помощью специально прокалиброванного галлиевого детектора с низким порогом, захватывающим все основные реакции на Солнце, проблема стала очень серьезной.

Тем временем в Японии на подземном детекторе Super-Kamiokande, представляющем собой бак с 50 000 м<sup>3</sup> воды, в котором черенковское излучение частиц регистрировалось 13 000 фотоумножителями полуметрового диаметра, в конце прошлого века заметили интересный и неожиданный эффект (точнее сначала заметили на его меньшем предшественнике – Kamiokande). В атмосфере рождаются мюонные и электронные нейтрино в результате каскадных распадов пионов и мюонов, образованных космическими частицами (в основном протонами). При этом ожидаемое число мюонных нейтрино должно быть вдвое больше, чем электронных. Фактически же оказалось, что для нейтрино, летящих сверху, это отношение – действительно, двойка, а для летящих снизу через Землю их примерно поровну. Вероятность потеряться при этом за счет взаимодействия с Землей очень маленькая. Так были открыты нейтринные осцилляции, которые обсуждались, но предсказать их конкретное проявление было невозможно из-за незнания масс нейтрино и углов смешивания.

Суть явления заключается в следующем. Нейтрино  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ , которые рождаются в различных реакциях, – это состояния, как говорят, с определенным ароматом (в данном случае лептонным числом). Каждая из

этих частиц может быть квантово-механической суперпозицией трех нейтрино с определенными массами (связанные осцилляторы). При движении в вакууме такого пакета каждое такое нейтрино осциллирует со своей частотой, зависящей от ее массы. В результате состав частиц в пакете меняется, и если вначале было только мюонное нейтрино, то затем это будет смесь всех типов нейтрино. Характерная длина таких осцилляций  $\lambda = 4\pi\hbar E / (m_j^2 - m_i^2)c^3$ . В эксперименте с атмосферными нейтрино частицы, летящие сверху, долетали до детектора без изменений, а прошедшие через Землю имели достаточный путь, чтобы проосциллировать в другой тип нейтрино. В данном случае часть мюонных нейтрино превратилось в тау-нейтрино, которые в эксперименте не регистрировались.

Загадка солнечных нейтрино разрешилась в 2002 г. До этого детекторы солнечных нейтрино были рассчитаны на регистрацию электронных нейтрино, других на Солнце и не образуется (водно-черенковские детекторы регистрировали и другие типы нейтрино, но с малой эффективностью). Новый детектор, SNO (Sudbury Neutrino Observatory), состоящий из 1 000 т тяжелой воды (D<sub>2</sub>O) (дали на время из стратегического запаса Канады), имел возможность регистрировать нейтрино всех типов. Принцип состоял в следующем. Ядро дейтерия состоит из протона и нейтрона. Возможны два типа реакций нейтрино на дейтроне: а) *электронное* нейтрино путем испускания *W*-бозона превращает нейтрон в протон, а само переходит в электрон, который регистрируется по черенковскому свету; б) нейтрино *любого* типа путем обмена *Z*-бозоном расщепляет дейтрон на протон и нейтрон (оставаясь нейтрино), где нейтрон затем регистрируется путем регистрации гамма-квантов, испускаемых при его захвате ядром дейтерия, или специально добавленной для усиления эффекта поваренной соли (NaCl). Результат оказался следующим: число событий реакции *a*, чувствительной только к электронным нейтрино, оказалось равным примерно 35 % от ожидаемого потока солнечных нейтрино, в то время как число событий реакции *b*, чувствительной ко всем типам нейтрино, с хорошей точностью совпало с ожидаемым потоком. Таким образом, Солнце производит ожидаемое количество электронных нейтрино, но по пути



к Земле 2/3 из них превращаются в другие типы нейтрино!

Эксперименты с детекторами Super-Kamiokande и SNO открыли новую страницу в физике нейтрино. Вскоре результаты по осцилляциям мюонных нейтрино были подтверждены и уточнены на ускорителях в Японии и США, где стреляли пучками мюонных нейтрино по большим подземным детекторам, находящимся за сотни километров. Исчезновение по дороге электронных нейтрино было проверено в Японии на реакторных нейтрино. Сейчас разворачивается широкая программа по изучению свойств нейтрино, получаемых на ускорителях. Точное измерение всех особенностей по взаимопревращению нейтрино (массы, углы смешивания и др.) так же важно, как и все, что было открыто и изучено с кварками. Тут нас ждет еще много неожиданностей.

Как было отмечено ранее, реальные нейтрино – это суперпозиция трех нейтрино с определенными массами  $m_1, m_2, m_3$ . На данный момент изучение длин осцилляций дает следующие значения разницы квадратов масс:  $m_2^2 - m_1^2 = (8,0 \pm 0,5)10^{-5} \text{ эВ}^2$ ;  $m_3^2 - m_2^2 = (2 - 3)10^{-3} \text{ эВ}^2$ . Сами значения масс нейтрино пока не известны, но видно, что они лежат в районе сотых долей электрон-вольты, т. е. нейтрино в сотни миллионов раз легче электрона.

### Вселенная

Из всего многообразия интересных явлений, наблюдаемых в космосе, мы прокомментируем только главные открытия последних лет, которые стали в физике проблемой номер один. Эти открытия можно кратко сформулировать так.

Измерена средняя плотность Вселенной, при этом оказалось, что все известные формы материи (о которых шла речь выше) составляют только около 5%! Еще 25% – это некие неизвестные частицы (темная материя), которые, как и обычная материя, собираются в скоплениях, и остальные 70% от всей плотности составляет какая-то субстанция (темная энергия, может, физический вакуум), которая обладает антигравитационными свойствами и ускоряет расширение Вселенной.

Потрясает воображение, не так ли! Вся наука до сих пор была сосредоточена на изучении только 5% состава Вселенной.

Можно считать, что нам всем повезло, можем принять участие в разгадке природы темной энергии и материи.

Для понимания сути открытия нам понадобятся некоторые сведения о Вселенной и ее эволюции.

*Общие представления об эволюции Вселенной, стандартная космология.* Наше местоположение во Вселенной ничем не выделено, она выглядит одинаковой во всех направлениях. Отсюда следует, что Вселенная безгранична, в среднем изотропна, однородна и одинакова во всех точках. Наблюдения показывают также, что Вселенная расширяется. Анализ всех данных говорит о том, что Вселенная образовалась из некоей сингулярности около 15 млрд лет назад, этот момент называют Большим взрывом. Однако он отличается от обычного взрыва тем, что нет выделенной точки в пространстве, и вообще само пространство создается при расширении Вселенной. Такая необычная геометрия возникает за счет гравитации. В каждой точке пространства имеется выделенная система отсчета, которая покоится относительно реликтового излучения (см. далее). В качестве реперных точек приближенно можно выбрать галактики. Можно задать единое для всех наблюдателей время ( $t=0$  можно синхронизовать по локальной плотности).

Вселенная расширяется: любые две реперные точки удаляются со скоростью  $V = Hr$  (при  $V \ll c$ ) – закон Хаббла. В настоящее время  $H \approx 70$  км/с/Мпк. Размер Вселенной обычно характеризуют масштабным фактором  $a(t)$  и, в общем случае, закон Хаббла записывается как

$$\dot{a}(t) = H(t)a(t). \quad (1)$$

*Космологическое красное смещение.* Если некоторая удаленная галактика испускает свет с длиной волны  $\lambda_0$  в момент  $t_0$ , и мы принимаем этот сигнал в момент  $t$ , то можно показать, что длина волны увеличится пропорционально размеру Вселенной

$$1 + z \equiv \frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{a(t)}{a(t_0)}. \quad (2)$$

Это называется космологическим красным смещением.

Замечание: распространенное утверждение, что космологическое красное смещение объясняется эффектом Доплера (скоростью удаления) не совсем верно. В расширяю-

шейся Вселенной нельзя ввести единую инерциальную систему отсчета. Красное смещение переходит в Доплеровский эффект только при  $z \ll 1$ .

Чтобы легче понимать различные эффекты, удобно вообразить Вселенную как раздувающийся шар, по которому можно передвигаться только вдоль поверхности. Это будет искривленное двухмерное пространство с положительной кривизной. Наше трехмерное пространство вообразить искривленным сложнее, но для понимания сути двухмерной поверхности достаточно. Представим расширяющийся шар. Свет может передвигаться относительно поверхности шара со скоростью  $c$ . Ограничений же на скорость увеличения радиуса шара нет никаких (как мы увидим, скорость изменения размера Вселенной определяется гравитационными силами и ее составом). Если удаленный источник испустил свет в нашем направлении, то он может до нас никогда не дойти, ввиду растяжения поверхности шара. Легко понять также, что если источник расположен близко, то относительная скорость за счет растяжения много меньше  $c$  и свет дойдет до нас. В противном случае – не дойдет. Граничное положение источника, при котором свет, испущенный в самом начале существования Вселенной, только что дошел до нас, называется горизонтом событий. Вселенная может быть большой, но дальше горизонта мы не видим. Интересно, что расширение может происходить так, что объекты, которые были видны, со временем скроются за горизонтом.

*Динамика Вселенной. Уравнения Фридмана.* В 1922 г. А. Фридман, решив уравнения Общей теории относительности Эйнштейна для однородной Вселенной, получил два независимых уравнения для  $a(t)$ :

$$\left(\frac{da}{dt}\right)^2 = \frac{8}{3}\pi G\rho a^2 - kc^2, \quad (3)$$

$$\frac{d(\rho c^2 a^3)}{dt} + p\frac{d(a^3)}{dt} = 0. \quad (4)$$

Здесь  $\rho c^2$  – плотность всех видов энергии;  $p$  – давление;  $k$  – параметр, характеризующий кривизну пространства, равный  $-1$  для пространства с отрицательной кривизной,  $0$  для плоского и  $1$  для пространства с положительной кривизной (сфера). Из (3), (4) получается уравнение для ускорения:

$$\frac{d^2 a}{dt^2} = -\frac{4}{3}\pi G a(\rho + 3p/c^2). \quad (5)$$

Очень важно, что динамика расширения зависит не только от плотности энергии, но и давления! Уравнение (5) (но без давления) легко получить в ньютоновской механике. Это есть ни что иное, как притяжение пробной частицы к выделенному в пространстве шару. Гравитация за счет давления – чисто релятивистско-гравитационный эффект (содержит скорость света). Для пылевидной Вселенной  $p = 0$ , для радиационно-доминантной  $p = (1/3)\rho c^2$ , для вакуума  $p = -\rho c^2$ .

Последнее утверждение требует пояснения, поскольку мы привыкли считать вакуум пустым. В принципе, вакуум – это низшее энергетическое состояние, которое может иметь произвольную плотность, однако при этом обязательно должно быть отрицательное давление  $p = -\rho c^2$ . Происхождение этого соотношения можно пояснить следующим образом. Рассмотрим сосуд с поршнем, заполненный газом. При адиабатическом расширении (без подвода тепла) изменение внутренней энергии равно работе, совершенной газом:

$$dE + pdV = 0. \quad (6)$$

Если газ является вакуумом, то при расширении вакуум должен, по определению, оставаться неизменным, т. е. плотность должна оставаться постоянной. В этом случае  $dE = (\rho_v c^2)dV$ . Подставляя в (6), получаем  $p_v = -\rho_v c^2$ .

Если плотность материи в пылевидной Вселенной  $\rho_m$ , то с учетом плотности и давления вакуума, из (5) получаем

$$\ddot{a} \propto -(\rho_m - 2\rho_v). \quad (7)$$

Отсюда следует, что при  $\rho_v < (1/2)\rho_m$  скорость расширения Вселенной уменьшается со временем (так все ожидали), а при  $\rho_v > (1/2)\rho_m$  – увеличивается. Эффект ускоренного расширения был давно известен и рассматривался для ранней Вселенной (инфляционная теория), но никто не ожидал такого поведения в настоящее время.

Приведем еще одно соотношение. Из уравнений Фридмана следует, что

$$\frac{kc^2}{a^2} = \frac{8}{3}\pi G\rho - H^2. \quad (8)$$

Вселенная является плоской,  $k=0$ , при критической плотности

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}. \quad (9)$$

Из измерений постоянной Хаббла следует, что в настоящий момент  $\rho_c \sim 10^{-29}$  г/см<sup>3</sup>. Если  $\rho < \rho_c$ , то  $k=-1$ , Вселенная открыта и бесконечна, если  $\rho > \rho_c$ , то  $k=+1$ , Вселенная замкнута, безгранична, но имеет конечный объем. Плотность различных видов веществ выражают обычно в единицах критической плотности  $\Omega_i = \rho_i/\rho_c$ . Вообще говоря, близость полной и критической плотностей (в пределах точности измерений) еще не означает, что  $k=0$ . Как следует из (8), это может быть случай произвольного значения  $k$  с очень большим радиусом кривизны.

Скорость расширения зависит от того, чем заполнена Вселенная. Это может быть пыль, фотоны, вакуум или некая субстанция с  $p = w\rho c^2$ , где  $-1 < w < 1/3$  – некий коэффициент. И наоборот, зная закон расширения Вселенной, можно найти, из чего она состоит. Эта задача сводится к определению постоянной Хаббла  $H(z)$ , зависящей от состава Вселенной:

$$H^2(z) = H(0)^2 \left[ (1 - \Omega_{0,tot})(1+z^2) + \Omega_{0,m}(1+z)^3 + \sum_i \Omega_{0,w_i}(1+z)^{3(1+w_i)} \right] \quad (10)$$

где  $\Omega_{0,tot}$  – полная плотность; индекс  $m$  относится к пылевидной материи; индекс  $w_i$  – к другим составляющим с  $p = w\rho c^2$ . Практически это делается так. Во Вселенной есть объекты (цефеиды, сверхновые, галактики) с определенной яркостью – «стандартные свечи». Цефеиды калибруют на малых расстояниях методом триангуляции, затем по ним калибруют сверхновые звезды и галактики, которые затем можно использовать для определения больших расстояний. Измеряют количество приходящего на Землю света и красное смещение, из которых однозначно находится  $H(z)$ .

Вопрос о том, какова сейчас реальная плотность, долгое время оставался неясным. Подсчет количества материи в Звездах да-

вал плотность не более одного процента от критической. В то время как из теоретических соображений очень хотелось иметь плотность, равную критической.

*Открытие ускоренного расширения Вселенной.* В конце 1998 г. две группы астрономов [1; 2; 3], измеряющих постоянную Хаббла с помощью Сверхновых класса Ia, практически одновременно опубликовали удивительное открытие: Вселенная расширяется с ускорением! Сверхновые звезды этого типа являются белыми карликами в системе двойных звезд. Они перетягивают массу с соседней звезды и при  $M \approx 1,4 M_c$  (предел Чандрасекара) давление квантового электронного газа уже не может сдерживать гравитационные силы, звезда начинает сжиматься и происходит термоядерная вспышка, видимая с большого расстояния. Частота таких вспышек в нашей Галактике 1/300 лет, однако во всей видимой Вселенной – порядка одной в секунду.

Исходно, в экспериментах было найдено, что далекие Сверхновые (при  $z < 0,5-1$ ) примерно на 20 % более тусклые, чем ожидалось. Это могло быть из-за космической пыли или немного другого состава ранних звезд. Такие гипотезы тщательно проверялись, но ошибки не нашли. В последующие годы такие эксперименты активно продолжались этими же и другими группами. На рис. 1 приведена зависимость звездной величины Сверхновых от параметра красного смещения  $z$ , полученная после одного года работы группой Supernova Legacy Survey (SNLS) [4], ведущей сейчас систематические исследования в данном направлении с помощью больших наземных телескопов. Из анализа данного эксперимента в предположении, что Вселенная заполнена материей и вакуумом (см. теорию выше), следует, что

$$\Omega_m = 0,263 \pm 0,052 \quad \Omega_v \sim 0,74, \quad (11)$$

т. е. плотность вакуума примерно в 2,5 раза больше плотности всех видов материи, а общая плотность вакуума и материи близка к критической.

Другие эксперименты дают примерно такие же результаты. Так, на рис. 2 приведены результаты подгонки космологических параметров в аналогичном эксперименте, проводимом коллаборацией Supernova Search Team Collaboration, SSTC (одна из групп, открывшая ускоренное расширение) [5]. Они получили  $\Omega_m = 0,29 \pm 0,04$ . В этом эксперименте

был задействован также космический телескоп Хаббл, что позволило найти Сверхновые до  $z \sim 1,8$ . Из полученных данных было найдено, что замедление расширения сменилось на ускорение при  $z = 0,46 \pm 0,13$ , т. е. когда Вселенная была в полтора раза меньше, чем сейчас.

Вскоре это открытие подтвердили независимым способом: по анизотропии реликтового микроволнового излучения и корреляциям в распределении галактик во Вселенной (см. ниже). Для детального изучения динамики Вселенной по Сверхновым готовится специальный спутниковый эксперимент JDEM (Joint Dark Energy Mission), который позволит намного повысить статистику и точность.

*Микроволновое реликтовое излучение* (РИ), предсказанное в 1946 г. Г. Гамовым, было открыто в 1965 г. Пензиас и Вильсоном. Около 400 тыс. лет ( $z \sim 100$ ) после Большого взрыва температура Вселенной упала до нескольких тысяч градусов, электроны и протоны рекомбинировали, и Вселенная стала прозрачной для тепловых фотонов. При дальнейшем расширении температура фотонов упала до  $T = 2,7$  К. Современная плотность реликтовых фотонов  $n_\gamma \sim 410/\text{см}^3$ . Скорость Земли относительно РИ около 370 км/с. Кроме того, что реликтовое излучение является одним из важнейших подтверждений теории Большого взрыва, оно дает уникальные данные о са-

мой ранней истории Вселенной, геометрии и составе Вселенной. Основной источник информации – это пространственная анизотропия реликтового излучения открытая в 1992 г. [6] (возникающую за счет движения Земли дипольную температурную анизотропию вычитают), относительная величина которой составляет всего  $\Delta T/T \sim 10^{-5}$ . Некоторые космологи назвали открытие анизотропии РИ крупнейшим событием в астрофизике за несколько последних десятилетий. В 2006 г. это открытие было удостоено Нобелевской премии по физике.

Наиболее точная температурная карта неба получена на космическом аппарате WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) [7; 8]. Результаты измерения анизотропии представляют в виде разложения температурной карты неба по угловым гармоникам, которые отражают распределение температурных пятен по угловым размерам. Результаты трех лет работы WMAP приведены на рис. 3. В распределении имеется четкий пик на угле около 1 углового градуса. Более того, наблюдаются также несколько дополнительных пиков на меньших масштабах. Температурные флуктуации связывают с квантовыми флуктуациями на ранней стадии Вселенной, которые дошли до стадии рекомбинации как плазменные акустические волны. Колебания есть результат двух противоборствующих сил: гравитационного притяжения и давления фотонного

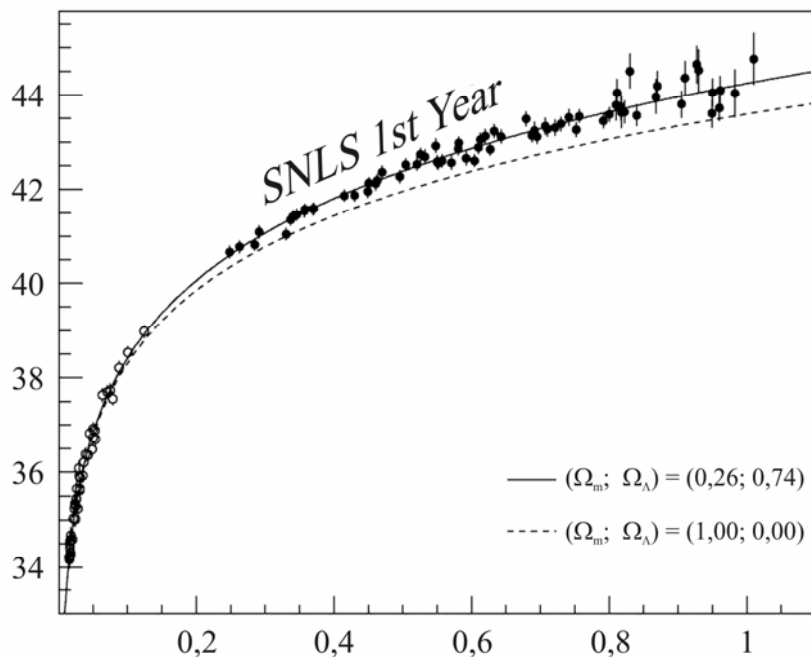


Рис. 1. Зависимость яркости Сверхновых (в звездных величинах) от параметра красного смещения  $z$  в эксперименте SNLS

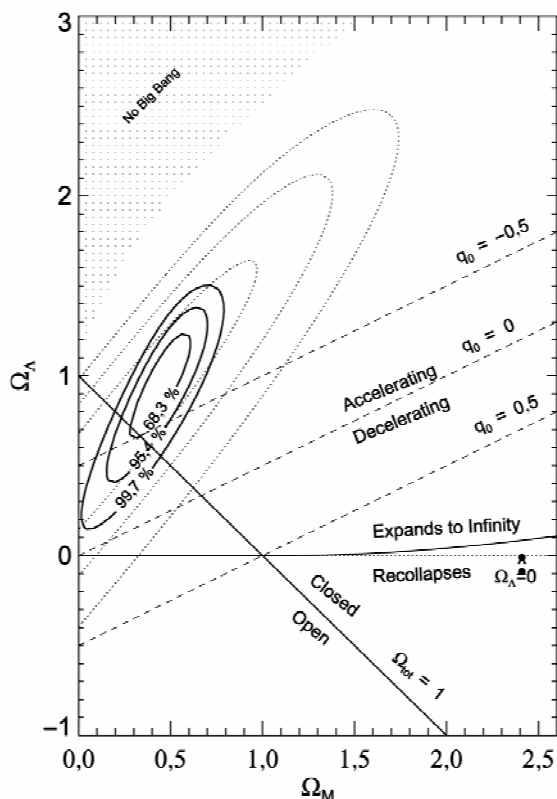


Рис. 2. Результат определения плотностей материи и вакуума по Сверхновым в эксперименте SSNC

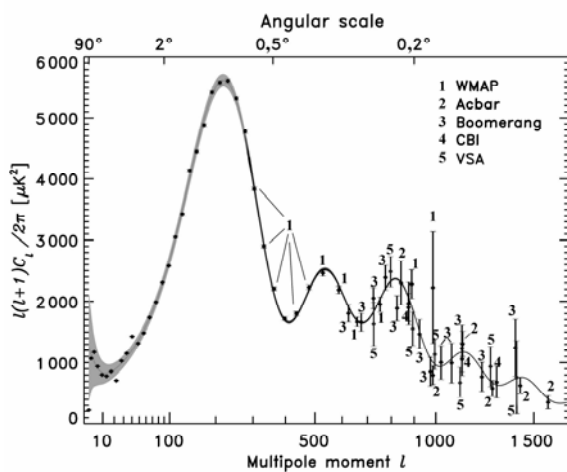


Рис. 3. Угловые корреляции в анизотропии реликтового излучения, полученные в эксперименте WMAP

газа. Изменение температуры связано как с повышенной плотностью, так и с движением вдоль линии наблюдения (эффект Доплера). Положение первого пика оказывается однозначно связано с геометрией Вселенной. Данные свидетельствуют, что Вселенная плоская, т. е. имеет плотность, очень близкую к критической:

$$\Omega_{tot} = 1 \pm 0,015. \quad (12)$$

Это очень важный результат, поэтому интересно качественно понять его происхождение.

Положение первого пика соответствует отношению современного размера области, которая была причинно-связанной на момент рекомбинации (пятно с примерно одинаковой температурой) к расстоянию от нас до места образования этих фотонов в настоящее время. Опуская множители порядка единицы, размер такого пятна в момент испускания фотонов был равен  $ct_r$  ( $t_r = 400 \times 10^3$  лет) и с тех пор увеличился пропорционально размеру Вселенной (см. (2)), т. е. в  $z + 1 \approx 1100$  раз. Расстояние от этого пятна до нас примерно равно расстоянию до горизонта событий  $\sim ct_0$  ( $t_0 \sim 15 \cdot 10^9$  лет – возраст Вселенной). Отсюда получаем угловой размер  $\theta \sim (z + 1) t_r / t_0 \sim 0,03 \sim 1$  град. Данная оценка соответствует случаю плоской Вселенной (лучи идут по прямой). При  $\Omega_{tot} > 1$  (положительная кривизна) угол был бы больше, а для  $\Omega_{tot} < 1$  (отрицательная кривизна) – меньше.

Оказывается также, что высота основного пика и более высоких гармоник очень чувствительна к составу материи, поскольку обычная материя (плазма) хорошо взаимодействует с фотонами и испытывает их давление, а темная материя для них прозрачна. Происхождение серии пиков можно понять как резонансные гармоники в трубе. Исходно возникли волны разных частот, но при наступлении рекомбинации волны дальше распространяться не могли, и максимальная амплитуда оказалась у волн, для которых в объеме укладывается целое число полуволи. Из данных по РИ было найдено, что с точностью 10% полная плотность материи  $\Omega_m \approx 0,27$ , а плотность обычной (барионной) материи  $\Omega_m \approx 0,045$ .

Еще одно интересное явление. После рекомбинации протонов и электронов при температуре около 3000 К Вселенная была заполнена в основном нейтральными атомами водорода и других легких элементов. Кроме этого, было реликтовое излучение, охлаждающееся за счет расширения. Со временем его спектр сместился в невидимую область спектра. Не было ни звезд, ни галактик – полная темнота! Это время так и называют «темной эпохой». Затем материя сгруппировалась на флуктуациях плотности, и зажглись первые Звезды. Их излучение вновь ионизовало Вселенную. Изучение особенностей микроволнового излучения (поляризация, диффузное рассеяние) позволило установить, что повторная ионизация произошла при  $z \sim 10$ , и оптическая

толщина для комптоновского рассеяния реликтовых фотонов на свободных электронах составила около 10 %.

*Крупномасштабная структура, акустический барионный пик.* Из реликтового излучения мы знаем, что в эпоху рекомбинации Вселенная была очень однородна:  $\sigma_p / \rho \sim 10^{-5}$ . Сейчас же имеются звезды, галактики, скопления галактик, суперскопления, крупномасштабные структуры, так что  $\sigma_p / \rho \sim 1$ . На специальных телескопах были проведены измерения 3-мерного пространственного распределения звезд и галактик. В продольном направлении координата определялась по красному смещению. Получаемые распределения плотности материи по различным масштабам (размерам флуктуаций) очень чувствительны к параметрам Вселенной и ее составу. Наблюдения сравнивают с моделированием на суперкомпьютерах и таким образом находят параметры Вселенной.

Простой вопрос: что было раньше, звезды или галактики, или, может, крупномасштабные структуры? Ответ совсем не очевиден. Оказывается, сначала образовались звезды, и это так только благодаря большому количеству темной материи, которая начала группироваться еще в радиационно-доминантную эпоху, задолго до рекомбинации. После рекомбинации давление фотонов упало, и барионная материя стала группироваться на уже сформировавшихся сгустках темной материи.

Наиболее детальное 3-мерное распределение галактик получено на телескопе SDSS (Sloan Digital Sky Survey) [9]. Недавно эта группа обнаружила характерный пик в распределении галактик по взаимному расстоянию (рис. 4). Пик соответствует расстоянию примерно 500 млн световых лет. Он имеет фундаментальное происхождение, это акустический барионный пик.

Происхождение его следующее. Представим, что в некоей точке на ранней стадии Вселенной была флуктуация плотности, темной и обычной материи. Флуктуация плотности обычной материи стала распространяться в плазме во все стороны в виде сферической акустической волны. Темная же материя осталась стоять на месте, поскольку она с фотонами не взаимодействует, и потому акустических волн не создает. В последствии на месте оставшейся флуктуации темной материи и на барионной волне (после рекомбинации) стала концентрироваться материя, возникли звезды, галактики. Положение пика соответствует

расстоянию, на которое успела убежать акустическая волна до момента рекомбинации, а затем увеличенное за счет последующего расширения Вселенной. Естественно, во Вселенной была не одна такая исходная флуктуация, но для любой из них расстояние между барионной волной и оставшейся на месте темной материей одно и то же. Из этой физики ясно, что положение пика несет важную информацию о динамике Вселенной и очень чувствительно к ее составу.

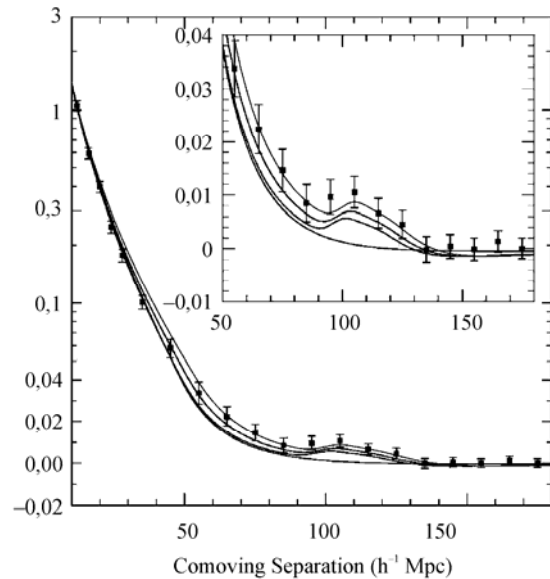


Рис. 4. Пространственные корреляции на больших расстояниях в распределении галактик во Вселенной, полученные на телескопе SDSS

На рис. 5 показана подгонка космологических параметров  $\Omega_m$  (плотность материи) и  $\Omega_\Lambda$  (плотность вакуума) по результатам эксперимента SNLS [4] по Сверхновым (см. рис. 1) и эксперимента SDSS [9] по измерению положения акустического барионного пика. Как видно, они пересекаются как раз на прямой соответствующей плоской Вселенной, т. е. в полном согласии с измерениями анизотропии реликтового излучения. Все это подтверждает достоверность открытия ускоренного расширения Вселенной и ее необычного состава.

*Космологический нуклеосинтез.* Количество барионной материи во Вселенной можно также определить по относительной доле легких элементов. Этот метод давно известен и был использован раньше других. Когда температура упала настолько, что нейтроны перестали рождаться, их количество стало уменьшаться из-за распадов свободных нейтронов. Не распались только те, которые успели со-

единиться с протонами и образовать атомные ядра. Количество образованных легких элементов зависит от плотности и скорости падения плотности в ту эпоху. Наиболее чувствительным к этим эффектам оказался дейтерий, концентрация которого была найдена по поглощению света в газовых облаках при больших  $z$ . Найденная таким образом плотность барионов составила около 4% от критической плотности. Результат, полученный с помощью РИ (см. выше), хорошо согласуется с этой цифрой.

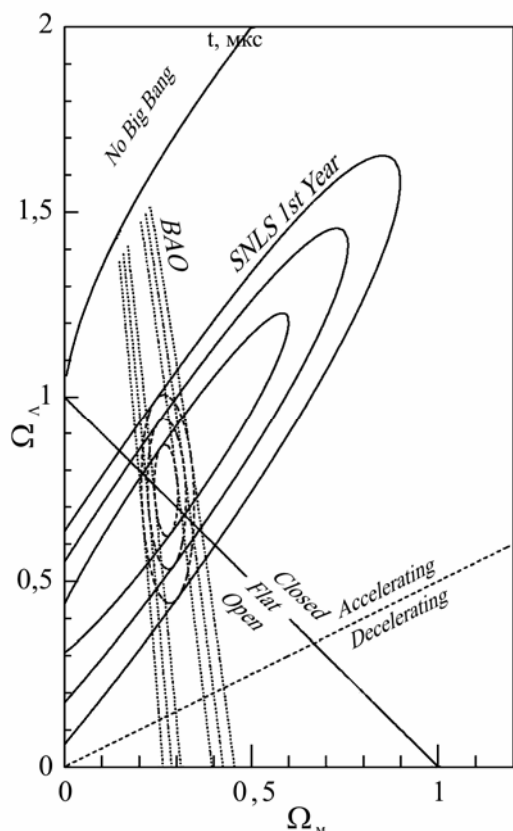


Рис. 5. Результаты измерения параметров  $\Omega_m$  и  $\Omega_\Lambda$  в экспериментах SNLS (Сверхновые) и SDSS (по барионному акустическому пику, BAO)

**Гравитационное линзирование.** Если объект не светится, то его не видно. Однако его можно увидеть по гравитационному отклонению света от источника, находящегося на линии наблюдения позади темного тела. Этот эффект предсказал еще Эйнштейн. В результате гравитации появляются дополнительные изображения источника – кольца, дуги или просто временное увеличение яркости. Этот метод сейчас взят на вооружение и дает уникальную информацию.

Один пример: определение плотности темной материи по кластерам галактик. Изучая характеристики кластеров галактик, удается определить их полную массу и мас-

су барионной материи. Барионная масса следует из наблюдаемого рентгеновского излучения горячей плазмы. Полная масса хорошо определяется по гравитационному линзированию. Для 50 проверенных кластеров отношение полной и барионной масс  $M_m / M_b \sim 8$ . Считая, это отношение в кластерах и Вселенной равными и используя плотность барионной материи из нуклеосинтеза, получаем  $\Omega_m \sim 0,3$ , что находится в согласии с аналогичными результатами, полученными по вспышкам сверхновых и анизотропии реликтового излучения.

**Темная материя.** Мы уже несколько раз упомянули темную материю. Что же это такое, и откуда возникает уверенность в ее существовании?

Еще в 1937 г. астрономы обратили внимание, что звезды в спиральных галактиках движутся не так, как положено по законам гравитации для наблюдаемого распределения светящейся материи. Если верить в закон Ньютона, то нужно добавить еще в несколько раз большую массу с определенным распределением плотности. Существенный недостаток массы наблюдается и в нашей Галактике. Сейчас можно твердо сказать, что это не барионная материя. В районе Земли ожидаемая плотность таких частиц около  $0,3 \text{ ГэВ/см}^3$ . Если их масса равна  $50 \text{ ГэВ}/c^2$  (около 50 масс протона – существующий нижний предел), то получается примерно одна такая частица на чашку кофе. Скорость их движения соответствует характерным скоростям в Галактике, т. е. несколько сот км/с.

Данные по расширению Вселенной, микроволновому излучению, кластерам и др. также подтверждают, что темной материи раз в 6–8 больше, чем обычной материи. То, что темная материя концентрируется в галактиках и других структурах, говорит о том, что это какие-то нерелятивистские частицы. Реликтовые нейтрино для этого явно не подходят. Наиболее популярной является гипотеза, что темная материя – это слабо взаимодействующие с обычной материей тяжелые суперсимметричные частицы, образовавшиеся, когда температура во Вселенной была достаточной для их рождения.

Сейчас предпринимаются попытки зарегистрировать такие частицы специальными детекторами. Наиболее чувствительный из них – полупроводниковый детектор при криогенных температурах, регистрирует как иони-

зацию, так и звуковые фононы (по разрыву Куперовских пар). Это позволяет подавить фононы от фотонов и заряженных частиц. Получено, что сечение взаимодействия меньше, чем  $10^{-43}$  см<sup>2</sup>. Планируется увеличить массу детектора и понизить предел в 1 000 раз. Ведутся также эксперименты с детекторами других типов.

В результате рассеяния (очень редкого) на обычной материи частицы темной материи скапливаются в центре Земли, Солнца, Галактики. Там за счет высокой плотности они могут сталкиваться друг с другом, аннигилировать и рождать высокоэнергичные нейтрино, которые можно зарегистрировать. Такие эксперименты уже ведутся. Готовится также спутниковый эксперимент по регистрации монохроматических аннигиляционных фотонов, образованных вблизи поверхности Солнца.

Есть высокие шансы, что частицы темной материи будут зарегистрированы в ближайшие 5–10 лет. Сюрпризы не исключены. Однако в любом случае, для того чтобы понять их природу, будет необходимо изучить эти частицы (все семейство) на ускорителях.

*Состав Вселенной.* Итак, установлено, что плотность Вселенной с высокой точностью равна критической (плоская Вселенная), ее состав приведен в табл. 4. Что за темные субстанции составляют 95 % плотности Вселенной, мы не знаем. Природа бросила дерзкий вызов физикам!

Таблица 4

Состав Вселенной в единицах критической плотности	
Вид	Доля
Темная энергия	0,7
Темная материя	0,25
Свободный Н и Не	0,04
Звезды	0,005
Нейтрино	< 0,015

#### Заключительные замечания

Наиболее правдоподобной теорией Большого взрыва сейчас является инфляционная модель. Вселенная, вероятно, уже проходила фазу вакуумно-подобного состояния ( $P = -\rho c^2$ ) при  $t \approx 10^{-43} - 10^{-30}$  с, и ее размер экспоненциально возрастал как

$a(t) \sim l_p \cdot \exp(Ht)$ , где  $Ht > 70$ . Это объясняет однородность видимой Вселенной, плотность, равную критической, спектр флуктуаций, анизотропию реликтового излучения. Одинаковая температура всего неба в рамках инфляционной модели объясняется следующим образом. Даже если вначале температуры в разных точках Вселенной были различные (ввиду их причинной несвязанности), то в результате инфляции пространство растянулось так быстро, что внутри горизонта событий осталась только область, все точки которой ранее находились в тепловом контакте. Плоскостность же следует из того, что если даже мы живем на замкнутой сфере, то в результате инфляции видим только маленькую область, которая с большой точностью плоская.

Откуда возникает в настоящее время плотность вакуума? Из физики мы знаем о нулевых колебаниях электромагнитного поля. Однако легко проверить, что насчитываемая таким образом плотность энергии превышает наблюдаемую плотность в  $10^{120}$  раз! Привлечение SUSY уменьшает расхождение до  $10^{55}$  раз (бозоны и фермионы дают в энергию вакуума противоположные вклады). Тоже не проходит. Пока разумных объяснений нет.

Другая загадка: почему плотность вакуума ненулевая и примерно равна плотности материи в настоящее время? За время эволюции плотность материи во Вселенной уменьшилась более чем на 100 порядков, и такое случайное совпадение кажется очень подозрительным. Возможно, оно имеет простое объяснение.

Мы попытались рассказать о ситуации в физике элементарных частиц и космологии. Эти две области науки объединились для решения главного вопроса: как возникла и устроена Вселенная. Совсем недавно в космологии были сделаны великие открытия: доминирование во Вселенной темной энергии и материи. Пока они являются скорее великими загадками, но тем и интересней будет найти ответы! Эксперименты идут широким фронтом – в космосе, на Земле и под землей. С большой надеждой ожидается начало экспериментов на  $pp$  коллайдере LHC в 2008 г. Ждите новых сенсаций!

#### Список литературы

1. *Riess A. G., Filippenko A. V., Challis P. et al.* Observational Evidence from Supernovae



for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant // *Astron. J.* 1998. Vol. 116. P. 1009–1038. Eprint: astro-ph/9805201.

2. *Perlmutter S., Aldering G., Goldhaber G. G. et al.* Measurements of Omega and Lambda from 42 High-Redshift Supernovae // *Astrophys. J.* 1999. Vol. 517. P. 565–586. Eprint: astro-ph/9812133.

3. *Perlmutter S.* Supernovae, Dark Energy, and the Accelerating Universe // *Physics Today*. April 2003. P. 53–60.

4. *Astier P., Guy J., Regnault N. et al.* The Supernova Legacy Survey: Measurement of Omega<sub>M</sub>, Omega<sub>Lambda</sub> and w from the First Year Data Set // *Astron. Astrophys.* 2006. Vol. 447. P. 31–48. Eprint: astro-ph/0510447.

5. *Riess A. G., Stogler L. G., Tonry J. et al.* Type Ia Supernova Discoveries at  $z > 1$  From the Hubble Space Telescope: Evidence for Past Deceleration and Constraints on Dark Energy Evolution // *Astrophys. J.* 2004. Vol. 607. P. 665–687. Eprint: astro-ph/0402512.

6. *Smoot G. F., Bennet C. L., Kogut A. et al.* Structure in the COBE differential microwave radiometer first year maps / *Astrophys. J.* 1992. Vol. 396. P. L1–L5.

7. *Spergel D. N., Verde L., Peiris V. H. et al.* First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters // *Astrophys. J. Suppl.* 2003. Vol. 148. P. 175–194. Eprint: astro-ph/0302209.

8. *Hinshaw G., Nolte M. R., Bennett C. L. et al.* Three-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Temperature analysis // Submitted to *Astrophys. J.* Eprint: astro-ph/0603451.

9. *Eisenstein D. J., Zehavi I., Hogg D. W. et al.* Detection of the Baryon Acoustic Peak in the Large-Scale Correlation Function of SDSS Luminous Red Galaxies // *Astrophys. J.* 2005. Vol. 633. P. 560–574. Eprint: astro-ph/0501171.

*Материал поступил в редколлегию 31.10.2006*