



Новое
в жизни,
науке,
технике

М.Ю. Хлопов

Подписная
научно -
популярная
серия

АСТРОЯДЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ АСТРОБЕЛИКС

7'90



ФИЗИКА

ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

ФИЗИКА

7/1990

Издается ежемесячно с 1967 г.

М. Ю. Хлопов

АСТРОЯДЕРНЫЙ
ЭКСПЕРИМЕНТ
АСТРОБЕЛИКС

*Э. Ю. Хлопову
Александрову
в знак памяти
о Сахареве свет
инженеры
от автора*

М. Ю. Хлопов



Издательство «Знание» Москва 1990

ББК 22.38
X 58

Автор: ХЛОПОВ Максим Юрьевич — доктор физико-математических наук, специалист в области теории элементарных частиц, астрофизики и космологии, содиректор Международного проекта АСТРОБЕЛИКС.

Редактор: К. А. КУТУЗОВА

СОДЕРЖАНИЕ

Античастицы во Вселенной	3
Аннигиляция антипротонов во Вселенной	37
Проект АСТРОБЕЛИКС	52
Литература	64

Хлопов М. Ю.

X 58 Астроядерный эксперимент АСТРОБЕЛИКС. — М.: Знание, 1990. — 64 с. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Физика»; № 7).

ISBN 5-07-001393-9

15 к.

Экзотический на первый взгляд вопрос об аннигиляции антивещества в ранней Вселенной, оказывается, связан с вопросом о космологических проявлениях физики сверхвысоких энергий. Прослеживая логическую цепочку, связывающую такие проявления с наблюдательными данными об обилии легких элементов во Вселенной, можно получить представление о методах изучения явлений, недоступных прямым лабораторным исследованиям. Соединение усилий физиков-экспериментаторов и астрономов-наблюдателей восполняет недостающие звенья этой логической цепочки в едином астроядерном эксперименте АСТРОБЕЛИКС.

1604080000

ББК 22.38

ISBN 5-07-001393-9

© Хлопов М. Ю., 1990 г.

АНТИЧАСТИЦЫ ВО ВСЕЛЕННОЙ

Загадка антимира. Она возникла сразу же, как только были обнаружены «лишние» решения уравнения Дирака, описывающие состояние частицы-«двойника» электрона—позитрона. Позитрон должен был обладать той же массой, той же величиной спина, что и электрон, но иметь противоположный знак электрического заряда. В паре с электроном позитрон мог вступать в реакцию аннигиляции, превращающей пару электрон—позитрон в фотоны (рис. 1, а). В электромагнитных процессах при энергиях, превышающих энергетический порог рождения электрон-позитронной пары, может происходить и обратный процесс рождения такой пары, например, фотоном в кулоновском поле ядра (рис. 1, б).

Выяснилось, что существование античастиц является фундаментальным свойством релятивистской теории элементарных частиц. Так что все заряженные частицы должны иметь своих «двойников» с противоположным знаком соответствующих зарядов. При этом речь идет не только о частицах, обладающих электрическим зарядом. Понятие заряда обобщается, включая барионное и лептонное числа, странность и другие внутренние квантовые характеристики частиц. У частицы и антича-

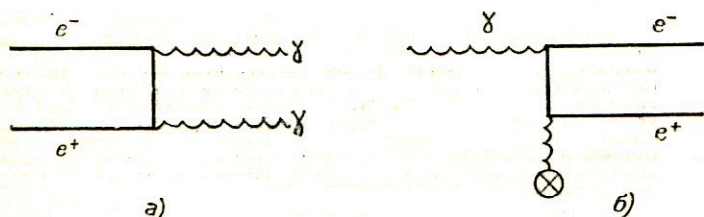


Рис. 1. а — Аннигиляция электрона (e^-) и позитрона (e^+) в два фотона (γ), б — Рождение пары электрон—позитрон фотоном в кулоновском поле ядра

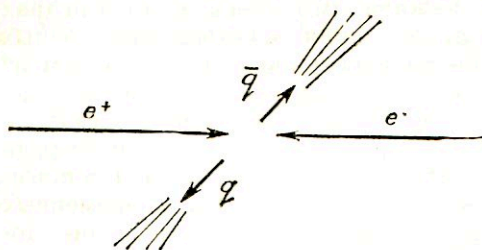


Рис. 2. Электрон-позитронная аннигиляция в адроны происходит в два этапа: на первом образуется пара кварк (q) — антикварк (\bar{q}), которые затем превращаются в струи адронов

стицы все эти характеристики равны по величине и отличаются знаком. Если частица и античастица сталкиваются, то возможно их превращение (аннигиляция), в другие частицы.

Результат аннигиляции определяется законом взаимодействия частицы и античастицы. Так, электрон и позитрон обладают электромагнитным взаимодействием. Поэтому в результате их аннигиляции при низких энергиях образуются кванты этого взаимодействия — фотоны. С ростом энергии сталкивающихся электрона и позитрона открываются другие каналы аннигиляции. Если полная энергия электрона и позитрона превышает удвоенную энергию покоя пары тяжелых частицы и античастицы, то в результате аннигиляции может образоваться такая пара. На встречных электрон-позитронных пучках электрон и позитрон разгоняют навстречу друг другу до энергий в несколько десятков ГэВ. При этом наблюдается процесс электрон-позитронной аннигиляции в адроны, который происходит в два этапа (рис. 2). На первом этапе образуется пара кварк — антикварк, которые затем превращаются в адроны. Изучение этого процесса предоставило подтверждение существования кварков. Хотя они и не наблюдаются в свободном состоянии, их появление на первом этапе аннигиляции приводит к тому, что адроны, в которые превращаются кварк и антикварк, сохраняют направление их движения. Так что наблюдаются две струи адронов.

Электрон и позитрон обладают также слабым взаимодействием. За счет этого взаимодействия они могут аннигилировать в пару нейтрино—антинейтрино. При низких энергиях сечение слабого взаимодействия на много порядков величины меньше, чем сечение электромагнитного. Но даже при низких энергиях слабая анни-

гиляция может быть важной. Это имеет место в недрах горячих звезд. Там аннигиляция электрон-позитронных пар в пары нейтрино—антинейтрино является одним из важных механизмов образования нейтринного излучения, определяющего скорость потери энергии звездой и темп ее эволюции на поздних стадиях. С ростом энергии отношение сечений слабой и электромагнитной аннигиляции электрона и позитрона растет. На современных электрон-позитронных коллайдерах это отношение достигает величины порядка единицы.

Протон и антипротон обладают сильным взаимодействием, и в результате их аннигиляции образуются адроны, главным образом пионы.

Время жизни частицы и античастицы в вакууме строго одинаково. В частности, стабильным частицам соответствуют и стабильные античастицы. Например, в вакууме позитрон стабилен. Однако при наличии вещества время жизни позитрона $\tau_{ан}$ конечно. Оно определяется скоростью его аннигиляции с электронами вещества

$$\frac{1}{\tau_{ан}} = n_e (\sigma v)_{ан}, \quad (1)$$

где n_e — плотность электронов, а $(\sigma v)_{ан}$ — скорость аннигиляции. Неизбежность аннигиляции делает невозможным длительное сосуществование частиц и античастиц в равновесии при температурах $T \ll mc^2$, где m — их масса. При $T \sim mc^2$ частицы и античастицы массы m , находясь в равновесии со средой, обладают равновесной концентрацией, определяемой термодинамическим равновесием.

Сильное и электромагнитное взаимодействия симметричны относительно замены частицы на античастицу. Следствием этой симметрии является наличие антиядер и антиатомов, составляющих антивещество. Смесь вещества и антивещества нестабильна относительно аннигиляции. На границе областей вещества и антивещества также должна происходить аннигиляция.

Аннигиляция вещества и антивещества является источником частиц — продуктов аннигиляции. Аннигиляция электронов и позитронов при тепловых энергиях, характерных для вещества в космических условиях, приводит к излучению аннигиляционной γ -линии с энергией 0,511 МэВ. Аннигиляция протона и антипротона при тех же энергиях приводит к образованию нескольких (5—6)

пионов. Из них в среднем два являются π^0 -мезонами и распадаются на два γ -кванта. Таким образом, область аннигиляции вещества и антивещества должна быть мощным источником γ -излучения. Сравнивая ожидаемую интенсивность такого γ -излучения с данными γ -астрономии, можно сделать вывод о том, что в современной Вселенной вещество и антивещество должны быть изолированы друг от друга, занимая области не меньшие, чем сверхскопления галактик. Из этих данных делается вывод о барионной асимметрии Вселенной, об отсутствии в ней антивещества, по крайней мере в окружающей нас части Вселенной.

Таким образом, загадка антимира заключается в его отсутствии. Хотя частицы и античастицы являются решениями одних и тех же уравнений теории, в макроскопических масштабах мы имеем дело только с решениями одного типа — частицами. В окружающей нас части Вселенной частицы антивещества могут быть только продуктами взаимодействия с веществом энергичных частиц, разогнанных на земных ускорителях или в естественных космических источниках частиц высоких энергий — источниках космических лучей. Что же делает решения одного типа жизнеспособными? Что лишает решения другого типа права на полнокровное существование?

Барионная асимметрия Вселенной. Отсутствие антивещества, наблюдаемое в современной Вселенной, входит в число важнейших представлений современной космологии, отражая барионную асимметрию Вселенной. Отношение средней космологической плотности числа барионов n_b к плотности числа реликтовых фотонов n_γ при адиабатическом расширении Вселенной не меняется. Это отношение является количественной характеристикой барионной асимметрии Вселенной

$$r_b = n_b/n_\gamma \approx 10^{-9}. \quad (2)$$

Значение r_b должно установиться на очень ранних стадиях эволюции горячей Вселенной. Именно это значение определяет барионную плотность современной Вселенной. Казалось бы, здесь налицо замкнутый круг: мы определили барионную асимметрию, зная современную космологическую плотность барионов, а затем ее же и получили из этой асимметрии. Но в рамках теории горячей Вселенной этот круг разрывается.

Обращаясь в далекое прошлое Вселенной, мы приходим к таким стадиям космологической эволюции, на которых температура должна была быть больше энергии покоя частиц вещества. Тогда в термодинамическом равновесии с веществом и излучением должны были находиться пары частиц и античастиц. Строго говоря, по современным представлениям о кварковой структуре нуклонов, при температурах, превышающих несколько сот МэВ, барионное вещество должно было находиться в состоянии кварк-глюонной плазмы. Но это обстоятельство практически означает лишь то, что при таких температурах в равновесии надо рассматривать не пары нуклон—antinуклон, а пары кварк—антикварк. И на этих ранних стадиях барионная асимметрия современной Вселенной оборачивается весьма нетривиальным вопросом о происхождении избыточного барионного числа.

На триста миллионов кварк-антикварковых пар должен приходиться один непарный кварк. Но именно это малое неравенство концентраций и определяет остаточное количество барионов, сохраняющееся во Вселенной после аннигиляции всех пар.

Закаленная концентрация антибарионов. Если бы такого избытка барионов не было, то Вселенная была бы барион-симметричной. При высоких температурах в ней было бы равное количество барионов и антибарионов, находившихся в равновесии с излучением. Но потом при понижении температуры до энергии покоя частиц пары должны были проаннигилировать. Поскольку аннигиляция происходила в нестационарных условиях — в условиях расширяющейся Вселенной, то, начиная с некоторого момента t , аннигиляция практически прекращалась, поскольку скорость аннигиляции $n(\sigma v)_{ан}$ становилась меньше, чем скорость расширения $\sim 1/t$. Условие

$$n(\sigma v)_{ан} = vt \quad (3)$$

определяет так называемый момент закалки концентрации частиц. Для численных оценок удобно пользоваться системой единиц $k = \hbar = c = 1$, в которой скорость безразмерна, а температура, энергия, импульс, масса, частота и величина, обратная расстоянию, имеют одну и ту же размерность, m . В этой системе единиц плотность релятивистских частиц $n_ч \sim T^3$, сечение аннигиляции про-

тона и антипротона $\sigma_{\text{ан}} \propto m_{\pi}^{-2}$, где m_{π} — масса пиона, а скорость расширения Вселенной на стадии доминантности в ней релятивистских частиц $1/t = T^2/m_{\text{Pl}}$, где $m_{\text{Pl}} = 10^{19}$ ГэВ — масса Планка. Тогда из соотношения (3) получаем, что в барион-симметричной Вселенной закаленная относительная концентрация барионов (и антибарионов) при $T_{\text{зак}} \sim m_{\text{в}}$, $t_{\text{зак}} \sim m_{\text{р}}/T_{\text{зак}}^2$ имеет порядок величины

$$r_{\text{в}} = \frac{n_{\text{в}}}{n_{\text{ч}}} = \frac{n_{\text{в}}^-}{n_{\text{ч}}} = \frac{m_{\text{в}}^2}{m_{\text{в}}^3 (\sigma v)_{\text{ав}} \cdot m_{\text{Pl}}} \sim \frac{m_{\pi}^2}{m_{\text{в}} \cdot m_{\text{Pl}}} \sim \sim 10^{-21}. \quad (4)$$

Поскольку $n_{\text{ч}} \sim n_{\text{р}}$, то, сравнивая эту оценку с наблюдаемой относительной концентрацией (2) барионов во Вселенной, видим, что в барион-симметричной Вселенной должно было бы остаться в триллион раз меньше барионов, чем наблюдается.

Немного поразмышляем о свойствах такой барион-дефицитной Вселенной. В ней барионы составляли бы столь малый довесок к излучению и их плотность была бы столь мала, что ни образование нейтральных атомов, ни образование неоднородностей вещества были бы невозможны. Невозможно было бы, следовательно, и наше существование. Вот почему наличие избытка барионов оказывается в космологии буквально жизненно необходимым.

При наличии начального избытка барионов $\Delta n_{\text{в}}/n_{\text{ч}}$ закаленная концентрация барионов определяется его величиной

$$r_{\text{в}} = \frac{\Delta n_{\text{в}}}{n_{\text{ч}}}.$$

Закаленная же концентрация антибарионов оказывается экспоненциально малой.

Тем самым барионная асимметрия Вселенной (величина $\Delta n_{\text{в}}/n_{\text{ч}}$) не только определяет требуемую для нашего существования концентрацию вещества, но и создает гарантии его аннигиляционной безопасности, экспоненциально подавляя количество антивещества. Отсутствие антипротонов с момента их замены в очень ранней Вселенной и до включения естественных источников антипротонов космических лучей в период образования галактик является поэтому одним из устойчивых предсказаний стандартной барион-асимметричной космо-

логии. Эта космология основывается на наблюдаемом отсутствии антивещества. Предмет ее анализа — логически замкнутая картина эволюции во Вселенной: одних лишь наблюдаемых форм материи — вещества и излучения. Поэтому, когда развитие теорий элементарных частиц привело к созданию моделей Большого Объединения, в которых барионное число не сохраняется и может рождаться избыток барионов, барион-асимметричная космология обретала, казалось, окончательный логически замкнутый вид. Она избавлялась от своей последней неопределенности — загадочной величины начального избытка барионов.

Бариосинтез. Первый толчок к созданию теории образования избытка барионов в очень ранней Вселенной был дан открытием несохранения комбинированной (CP) четности. Сохранение CP-четности означает, что любому процессу взаимодействия частиц соответствует отраженный в зеркале процесс взаимодействия соответствующих античастиц. В частности, должны быть равны вероятности любого процесса с участием частиц и соответствующего процесса с участием соответствующих античастиц. Равенство полных вероятностей распада частицы и античастицы гарантируется CPT-теоремой, лежащей в самом основании квантовой теории поля. Но если у частицы есть несколько каналов распада, то из сохранения CP-четности следует, что относительные вероятности распада частицы и античастицы по соответствующим каналам совпадают. Несохранение CP-четности, в частности, проявляется в различии относительных вероятностей соответствующих каналов распада частицы и античастицы (при равенстве их времен жизни). Величина и знак такого различия определяются величиной и знаком параметра нарушения CP — фазы нарушения CP, φ .

В 1967 г. А. Д. Сахаров, затем в 1970 г. В. А. Кузьмин связали образование избытка барионов с эффектами несохранения CP в гипотетических неравновесных процессах, не сохраняющих барионное число в очень ранней Вселенной. В своей сути идею генерации избытка барионов можно проиллюстрировать следующим образом. Пусть в зарядово-симметричной Вселенной имеется равное по концентрации количество гипотетических частиц — X и их античастиц \bar{X} . В распадах этих частиц барионное число не сохраняется. При этом они могут

распадаться, например, по двум каналам: 1) $X \rightarrow ql$ и 2) $X \rightarrow qq$. Тогда имеются соответствующие каналы распада: 1) $\bar{X} \rightarrow \bar{q}\bar{l}$ и 2) $\bar{X} \rightarrow \bar{q}\bar{q}$.

Относительную вероятность канала распада X (1) обозначим b , так что относительная вероятность второго канала (2) составляет $1-b$. Обозначим относительные вероятности соответствующих каналов распада \bar{X} как \bar{b} и $1-\bar{b}$. Вследствие несохранения CP четности $b \neq \bar{b}$ и в распадах X и \bar{X} образуется избыток барионов

$$\frac{\Delta n_b}{n_q} = \frac{n_X}{n_{\bar{X}}} (b - \bar{b}), \quad (5)$$

Эта идея до развития моделей Большого Объединения выглядела необоснованной. Экспериментальные нижние пределы времени жизни протона были столь велики ($\sim 10^{29}$ лет), что трудно было усомниться в его абсолютной стабильности. Эти пределы рассматривались как проявление строгого сохранения барионного числа, которое должно, в частности, проявляться в абсолютной стабильности самого легкого бариона—протона.

Для введения частиц X , казалось, не было никаких оснований. Но простейшая из моделей Большого Объединения, основанная на группе калибровочных преобразований SU (5), предоставляла единую основу описания сильного, слабого и электромагнитного взаимодействия и предсказывала существование несохраняющего барионное число взаимодействия. При наличии такого взаимодействия протон оказывался нестабильным относительно распада, например, по каналу $\pi^0 e^+$. Предсказываемое время жизни оказывалось несколько большим, но все же близким к экспериментальному нижнему пределу. Это вселяло надежды на его скорое обнаружение. При наличии такого взаимодействия идея бариосинтеза обретала фундаментальную основу. Ее стали рассматривать как косвенное космологическое подтверждение моделей Большого Объединения. В этом контексте несохранение CP четности, являющееся важнейшим элементом механизма бариосинтеза, обрело наконец заслуженное признание, принеся долго (шестнадцать лет!)жданную Нобелевскую премию экспериментаторам, открывшим это явление еще в 1964 г.

По мере дальнейшего развития моделей Большого Объединения развивались и модели бариосинтеза. Менялись наборы полей, вызывающих несохранение бари-

одного числа. Менялись наборы частиц, в распадах которых образуется избыток барионов. Менялся и сам характер процессов, обеспечивающих появление этого избытка. Но по большому счету все модели бариосинтеза нельзя считать полностью удовлетворительными. Они лишь переводят проблему избытка барионов с одного уровня на другой.

Не привлекая моделей бариосинтеза, космология должна была задавать величину избытка барионного числа как начальный параметр космологической модели. В моделях бариосинтеза этот параметр однозначно определяется параметрами физической модели, лежащей в основе механизма синтеза. Но параметры эти (в рассмотренном выше простейшем примере — относительная концентрация X -частиц n_x/n_γ и зарядовая асимметрия относительных вероятностей $B-b$) относятся к физике сверхвысоких энергий. Выбрав конкретную модель Большого Объединения, можно провести расчеты этих параметров и получить их выражения через функциональные параметры модели, устранив произвол в их выборе практически полностью.

Но даже в этом случае один фундаментальный параметр заведомо останется неопределенным. Он должен быть задан изначально, но теперь уже не в космологии, а в модели Большого Объединения. Этот параметр — величина и знак фазы нарушения CP -четности. Но именно знак этого параметра как раз и определяет знак избытка барионного числа. Выбор знака этого параметра предопределяет вывод, что во Вселенной образуется избыток барионов, а не антибарионов. Тем самым, устраняя случайность и произвол в выборе величины и знака избытка барионов в космологии, мы связываем этот выбор с выбором параметра физической теории, с выбором фазы нарушения CP . Но тогда вопрос о величине и знаке избытка барионов в очень ранней Вселенной в рамках теории бариосинтеза становится вопросом о величине и знаке фазы нарушения CP и о механизме нарушения CP в физической теории.

Спонтанное нарушение CP -четности. Таким образом, выбор модели барион-асимметричной Вселенной в теории бариосинтеза связан с определенным выбором знака фазы нарушения CP . Нельзя сказать, что такой ответ на вопрос «почему во Вселенной нет антивещества?» является очень убедительным. До моделей барно-

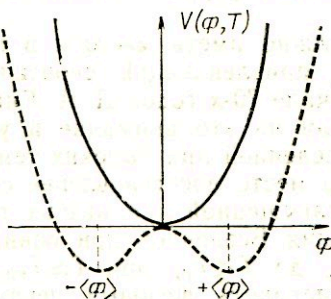
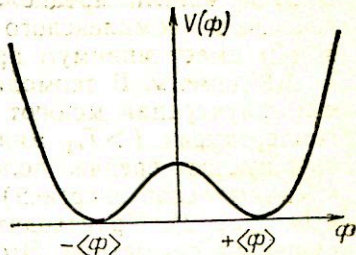
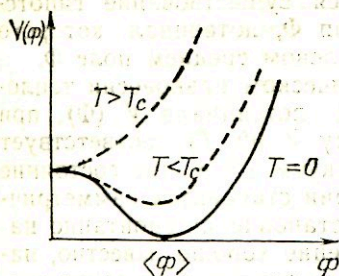


Рис. 3. Потенциал поля имеет минимум при $\Phi = \langle \Phi \rangle$ при низких температурах. С повышением температуры вид потенциала меняется, и при $T > T_c$ потенциал имеет минимум при $\Phi = 0$.

Рис. 4. Потенциал имеет два эквивалентных минимума при $\Phi = \pm \langle \Phi \rangle$.

Рис. 5. Потенциал имеет минимумы $\pm \langle \Phi \rangle \neq 0$ лишь в ограниченном интервале температур $T_2 < T < T_1$.

синтеза ответ на этот вопрос звучал так: потому, что таково начальное условие расширения Вселенной. На основе моделей бариосинтеза ответ сводится к тому, что такова фаза нарушения CP. На смену произвола в выборе космологического параметра приходит произвол в выборе параметра физической теории. Параметра, ни теорией, ни экспериментом, строго говоря, не фиксированного.

Лишь в простейших вариантах моделей Большого Объединения удается связать этот параметр с наблюдаемыми эффектами несохранения CP в распадах нейтральных K-мезонов. В общем случае установить такую связь трудно. Сверхмассивные частицы, имеющие отношение к механизмам бариосинтеза, как правило, практически не связаны в теории с эффектами нарушения CP в процессах с известными частицами. Поэтому вполне естественным было желание если не рассчитать величину этой фазы, то хотя бы найти теоретический механизм ее появления. Такой механизм был предложен Т. Д. Ли в его модели спонтанного нарушения CP-четности.

В этой модели предполагается существование гипотетического комплексного поля Φ , потенциал которого $V(\Phi)$ имеет минимум при нулевом среднем поле Φ .

CP-домены. В термодинамическом равновесии тепловые флуктуации меняют вид потенциала $V(\Phi)$, при температурах $T > T_{кр}$ минимуму $V(\Phi, T)$ соответствует уже нулевое среднее поле. Вакуум (основное состояние с минимальной энергией) теории становится симметричным (рис. 3). Происходит восстановление спонтанно нарушенной симметрии. Это явление хорошо известно, например, у ферромагнетиков. При температуре выше точки Кюри—Вейса у них исчезают ферромагнитные свойства.

Аналогичное явление должно иметь место и в теориях элементарных частиц, привлекающих спонтанное нарушение симметрии. В начале 70-х годов Д. А. Киржниц и А. Д. Линде обратили на это внимание и указали, что в очень ранней Вселенной при высоких температурах должно было иметь место восстановление симметрии теории, спонтанно нарушенной при низких температурах. В ходе расширения Вселенной при понижении температуры от $T > T_{кр}$ до $T < T_{кр}$ при $T \simeq T_{кр}$ во Вселенной должен был происходить фазовый переход, при котором физический вакуум перестраивался от фазы с ненарушенной к фазе с нарушенной симметрией.

Применительно к модели спонтанного нарушения CP-четности это свойство спонтанного нарушения симметрии приводило к серьезной проблеме. Потенциал $V(\Phi)$ содержит только четные степени Φ . Его минимум достигается как при $+\langle\Phi\rangle$, так и при $-\langle\Phi\rangle$ (рис. 4). Поэтому модель спонтанного нарушения CP не может, строго говоря, предсказать знак нарушения CP. Мы можем только выбрать из нее нужное решение. Обращаясь к ранней Вселенной, мы приходим к выводу, что при высоких температурах нарушение CP отсутствовало. При понижении температуры во Вселенной должен был происходить фазовый переход, при котором могли осуществиться оба решения (см. рис. 4). Разные области Вселенной должны были бы характеризоваться разным знаком нарушения CP. Вселенная должна была бы разбиться на домены с $+\langle\Phi\rangle$ и $-\langle\Phi\rangle$. На границе доменов значение Φ должно непрерывно меняться от $-\langle\Phi\rangle$ до $+\langle\Phi\rangle$.

Характер изменения Φ на границе CP-доменов оп-

ределяется минимумом потенциала $V(\Phi)$ с учетом неоднородностей поля вблизи границы домена. При этом область вблизи границы характеризуется сильным отклонением значения Φ от среднего, при котором $V(\Phi)$ имеет минимум.

Границы CP-доменов оказываются двумерными образованиями с высокой плотностью энергии. Во Вселенной должны были бы появиться массивные стенки. Как показали Я. Б. Зельдович, И. Ю. Кобзарев и Л. Б. Окунь, эволюция таких стенок привела бы к катастрофическим изменениям в эволюции Вселенной. Современная Вселенная была бы заполненной стенками с пренебрежимо малым довеском видимого вещества.

Домены антивещества. При экспоненциальном законе расширения Вселенной в период фазового перехода начальное расстояние между формирующимися стенками становится экспоненциально большим. Тогда в окружающей нас части Вселенной стенки отсутствуют. По-видимому, это единственная возможность устранить явное противоречие с наблюдениями механизма спонтанного нарушения CP в распадах нейтральных K-мезонов. Ведь если это наблюдаемое проявление нарушения CP обусловлено спонтанным нарушением симметрии, то в очень ранней Вселенной в ходе фазового перехода неизбежно появлялись домены противоположного знака фазы нарушения CP. Наше существование в одном из таких доменов требует, чтобы массивные доменные стенки были отодвинуты от нас как можно дальше. А это могла сделать только стадия экспоненциального раздувания Вселенной — инфляция.

В моделях Большого Объединения наряду с описанием наблюдаемых эффектов нарушения CP содержатся также предсказания эффектов нарушения CP в процессах взаимодействия гипотетических сверхмассивных полей и частиц. Существование таких гипотетических эффектов открывает новые возможные космологические проявления спонтанного нарушения CP.

В. А. Кузьмин, М. И. Ткачев и М. Е. Шапошников показали, что спонтанное нарушение CP-четности в очень ранней Вселенной может и не приводить к перепроизводству доменных стенок. Суть их идеи можно проиллюстрировать следующим образом (рис. 5). Потенциал комплексного поля Φ , вызывающего несохранение CP и взаимодействующее с другими полями, неиз-

бежно включает эффекты такого взаимодействия. При высоких температурах очень ранней Вселенной тепловые эффекты обеспечивают минимум потенциала $V(\Phi)$ при $\Phi=0$. Но в ходе расширения при некоторой температуре T_1 взаимодействие с дополнительными полями вызывает спонтанное нарушение CP-четности. Минимуму $V(\Phi, T)$ отвечает среднее поле $\langle\Phi\rangle\neq 0$. Дальнейшее понижение температуры до T_2 вновь приводит к изменению формы потенциала $V(\Phi, T)$ за счет взаимодействия с полями и тепловых эффектов. Минимуму потенциала вновь отвечает нулевое среднее поле Φ , и CP-четность восстанавливается. Спонтанное нарушение CP имеет место в этой модели лишь в ограниченный период расширения Вселенной при температурах $T_2 < T < T_1$. Тем самым образование стенок и связанные с ними проблемы возникают лишь в этот ограниченный период эволюции очень ранней Вселенной. При восстановлении спонтанно нарушенной CP-четности при $T \leq T_2$ стенки рассасываются. Они распадаются на частицы и на последующие процессы во Вселенной прямого влияния не оказывают. Ясно, что при низких температурах, характерных для современной Вселенной, в этой модели предсказывается сохранение CP-четности. Она не может иметь отношения к несохранению CP в современной Вселенной. Следовательно, такая модель может рассматриваться лишь как отдельный элемент полной теории, в которой должны быть найдены объяснение и наблюдаемые эффекты несохранения CP. Но для механизмов бариосинтеза, предназначенных для объяснения избытка вещества, модель предсказывает домены антивещества. Если бариосинтез происходит в период $T_2 < T < T_1$, то в доменах противоположного знака нарушающей CP-фазы генерируются избытки барионов противоположного знака.

Суперсимметричные частицы. Другая возможность расширения модели Большого Объединения связана с расширением ее симметрии. Такое расширение, по-видимому, неизбежно должно включать суперсимметрию — симметрию частиц с целым и полуцелым спином. В моделях Большого Объединения суперсимметрия несет не только эстетическую, но и весьма важную конструктивную нагрузку. С ее помощью можно решить присущую моделям Большого Объединения проблему иерархии масштабов нарушения симметрии. Симметрия Большого

Объединения нарушается при энергиях $\sim 10^{15}$ ГэВ, а симметрия электрослабого взаимодействия — при ~ 100 ГэВ. Энергетические масштабы нарушения этих симметрий отличаются друг от друга на 13 порядков величины, что требует специального теоретического объяснения.

Энергетический масштаб нарушения симметрии определяет порядок величины массы бозонов, осуществляющих взаимодействие, связанное в рамках калибровочной теории с этой симметрией. Так, масштаб Большого Объединения определяет массу X -бозонов, осуществляющих взаимодействие, не сохраняющее барионное число. Масштаб электрослабого взаимодействия — массы W , Z -бозонов слабого взаимодействия.

В квантовой теории масса частиц определяется суммарным вкладом всех квантовых поправок с участием виртуальных частиц. Вклад таких поправок пропорционален произведению констант взаимодействия с виртуальными частицами g^2 , которая оказывается в теории $\sim 10^{-2}$. Тогда если в теории есть тяжелые частицы с массой M , то для легких частиц с массой $m \ll M$ необходимо обеспечить компенсацию вкладов всех таких поправок с точностью m/M . Поэтому сосуществование в модели Большого Объединения бозонов с массой 10^2 и 10^{15} ГэВ требует, чтобы все поправки от тяжелых частиц в массу W , Z -бозонов компенсировались с точностью 10^{-13} . Такая компенсация должна быть обеспечена для всех квантовых процессов вплоть до 7-го порядка теории возмущений по константе g . И это не может быть случайностью, наводя на мысль о наличии какой-то дополнительной симметрии, обеспечивающей такую компенсацию.

Суперсимметрия предполагает, что каждой известной частице с полуцелым спином (фермиону) соответствует частица с точно такими же зарядами, но с целочисленным значением спина (бозон). Так, у электрона (частицы со спином $1/2$) предсказывается партнер с нулевым спином, но с теми же электрическим зарядом и лептонным числом. Кваркам также сопоставляются скалярные кварки — кварки со спином 0. Частицам со спином 1 — квантам взаимодействий — фотону, глюонам, W , Z -бозонам сопоставляющие частицы со спином $1/2$, — фотино, глюино, вино, зино.

Строгой суперсимметрии отвечало бы строгое равен-

ство масс суперсимметричных партнеров. Отсутствие суперсимметричных частиц в природе и в опытах на ускорителях можно объяснить лишь тем, что суперсимметрия нарушена. Предполагается, что суперсимметричные партнеры являются нестабильными и более массивными, чем соответствующие им обычные. Поэтому мы наблюдаем только адроны, состоящие из кварков со спином $1/2$, а не со спином 0, а электронные оболочки заполняются в соответствии с принципом исключения Паули, отвечающим статистике фермионов, а не бозонов.

Наличие суперсимметричных партнеров обеспечивает сокращение вкладов виртуальных частиц. Из-за различия в статистических свойствах виртуальные бозоны и фермионы дают поправки противоположного знака, компенсирующие друг друга с точностью до нарушения суперсимметрии. Такая компенсация должна быть обеспечена с точностью m/M . Поэтому энергетический масштаб нарушения суперсимметрии m_{susy} должен быть (по крайней мере при простейшей реализации суперсимметричных моделей) порядка величины масштаба электро-слабой симметрии (~ 100 ГэВ). Того же порядка величины должны быть и массы суперсимметричных частиц. Это обстоятельство стимулирует поиск этих частиц на тэватронах.

Барийонный конденсат. Предсказание суперсимметричных теорий о наличии бозонов, обладающих барионным числом, — кварков с нулевым спином — дало основание для разработки моделей бариосинтеза, связанных с существованием барионного конденсата. Кварки — фермионы и подчиняются принципу исключения Паули. Два фермиона не могут занимать одно и то же квантовое состояние. Но их суперсимметричные партнеры — кваркино — бозоны и, подчиняясь статистике Бозе—Эйнштейна, могут в любом количестве находиться в одном и том же квантовом состоянии. Поэтому в очень ранней Вселенной возможно образование барионного конденсата скалярных кварков, находящихся в основном квантовом состоянии. Потенциальная энергия такого конденсата оказывается независимой от числа частиц в конденсате. Поэтому величина и знак барионного заряда могут быть произвольными.

Скалярные кварки нестабильны. После их распада образуется избыток кварков (или антикварков), вели-

чина и знак которого определяются начальным барионным зарядом конденсата. В этом механизме величина и знак барионной асимметрии Вселенной зависят от барионного заряда конденсата и могут быть различными в различных областях. Поэтому суперсимметричный механизм образования барионной асимметрии допускает образование доменов антивещества. Проблема доменных стенок в этом случае не возникает.

Параметры доменов. Итак, в поисках ответа на вопрос о происхождении избытка барионов в очень ранней Вселенной космология обращается к моделям теории элементарных частиц и использует предсказания этих моделей в области сверхвысоких энергий. При этом оказывается возможным целый ряд механизмов образования избытка барионов. Но каждый такой механизм при более детальном его анализе оказывается в то же время механизмом образования избытка антибарионов. Все отличие в знаке избыточного барионного заряда связано либо со случайными значениями свободных параметров модели, либо с фиксацией этих значений в рамках модели, но и в последнем случае выбор знака барионной асимметрии неоднозначен. Мы можем констатировать связь механизмов барионсинтеза с возможной неоднородностью распределения барионного избытка во Вселенной и, в частности, с наличием областей, в которых этот избыток меняет знак и оказывается избытком антибарионов.

Для проверки этого утверждения мы должны сосредоточиться на дальнейшей эволюции доменов антивещества. Мы должны проследить, в какой мере их присутствие на различных стадиях космологической эволюции влияет на физические процессы, происходящие на этих стадиях. Анализ такого влияния позволяет выявить эффекты, наиболее чувствительные к наличию доменов, и проверить соответствие этих эффектов той информации, которую мы извлекаем из данных астрономических наблюдений. Такова общая схема проверки предсказаний физики сверхвысоких энергий в астрономических наблюдениях.

Наиболее ярким следствием наличия доменов антивещества является сохранение в них антибарионов и после того, как произошла локальная аннигиляция барион-антибарионных пар. Как мы обсуждали выше, при такой аннигиляции в барион-асимметричной Вселенной

сохраняется лишь избыток барионов $r_b = \Delta n_b / n_q$. Если величина и знак избытка барионов различны в различных областях, то соответственно меняется и остаточная концентрация барионов. После того как все барион-антибарионные пары, находившиеся в равновесии с излучением и другими релятивистскими частицами, проаннигилируют, в доменах антивещества сохранятся лишь антибарионы, концентрация которых определяется локальной величиной избытка антибарионов $\Delta n_{\bar{b}}(x) / n_b$.

Анализ эволюции доменов антивещества связывает, как правило, их возможные проявления с некоторыми средними по Вселенной характеристиками. Поэтому для грубой оценки чувствительности этих характеристик к наличию доменов можно пользоваться средней по Вселенной величиной отношения антибарионов, сохранившихся в доменах антивещества, и барионах $\bar{r} = n_{\bar{b}} / n_b$, где $n_{\bar{b}}$ и n_b — соответственно средние плотности антибарионов и барионов, получаемые при равномерном «размазывании» вещества доменов по всей Вселенной.

Другим важным параметром доменов антивещества является их размер. Ведь на границе доменов вещества и антивещества происходит аннигиляция, которая существенно влияет на процессы во Вселенной. Но в отличие от аннигиляции во всем объеме Вселенной в случае равномерно перемешанного вещества и антивещества аннигиляция доменов охватывает лишь узкую приграничную область. Поэтому оценка влияния аннигиляции доменов на физические процессы во Вселенной определяется отношением размера области, охваченной аннигиляцией, λ , к размеру домена l . Ясно, что аннигиляция доменов размера l наиболее ярко проявляется при $\lambda \simeq l$.

Каждой модели образования доменов антивещества отвечают специфические для нее предсказания пространственного распределения избытка барионов. При этом локальная величина избытка (и его знак) определяются конкретным механизмом бариосинтеза. Они могут зависеть от модели нарушения CP или выбора суперсимметричной модели, определяющей плотность барионного конденсата. Размеры доменов зависят от характерных расстояний, на которых проявляется неоднородность распределения избытка барионов. В горячей расширяющейся Вселенной такие расстояния не могут превышать размеров космологического горизонта

~ ct на период бариосинтеза (размера области, охватываемой световым сигналом). Однако учет инфляции дает возможность рассматривать практически любые характерные длины, на которых происходит пространственное изменение избытка барионов. Тем самым предсказания доменной структуры распределения антивещества во Вселенной оказываются тесно связанными с реализациями двух основополагающих идей космологии очень ранней Вселенной — инфляции и бариосинтеза. Поиск возможных проявлений доменов антивещества предоставляет нетривиальную возможность проверки предсказаний физических теорий, привлекаемых космологией для реализации этих идей.

Реликтовые частицы. Домены антивещества обеспечивают непосредственное сохранение античастиц во Вселенной в эпохи, когда температура вещества и излучения понижается в ходе расширения Вселенной до значений, много меньших их энергии покоя. В частности, в достаточно больших доменах антивещество может пережить не только период локальной аннигиляции равновесных пар частиц и античастиц, но и более поздние эпохи. В таких доменах антипротоны могут пережить и эпоху ядерных реакций, в которых образуется первичный химический состав, и рекомбинацию электронов и ядер в нейтральные атомы и в принципе даже дожить до современной эпохи. При этом на границе доменов должна происходить аннигиляция вещества и антивещества. Так что наличие доменов является источником процессов аннигиляции во Вселенной.

Но аннигиляция должна происходить в случае наличия любого источника античастиц во Вселенной. Поэтому, обращаясь к возможным источникам аннигиляции, мы должны обратиться ко всем возможным реликтам очень ранней Вселенной, наличие которых на более поздних стадиях космологической эволюции приводит к появлению античастиц на этих стадиях. Простейшим примером подобного реликта могут служить метастабильные частицы. Такие частицы, рожденные в очень ранней Вселенной, должны сохраняться в ней в некотором количестве и на более поздних стадиях космологической эволюции. Если масса этих частиц превышает 2 ГэВ, то в числе продуктов их распада должны присутствовать и пары протон—антипротон. Распады метастабильных частиц, масса которых превышает 2 ГэВ,

могут являться поэтому источником антипротонов во Вселенной в периоды, для которых наличие антипротонов исключается в рамках стандартной картины эволюции барион-асимметричной Вселенной. Каковы же физические основания существования метастабильных частиц во Вселенной? Насколько обоснованы гипотезы об их существовании с точки зрения теории элементарных частиц?

«Скрытый сектор» теории микромира. Отвечая на эти вопросы, можно сделать вывод, что существование гипотетических метастабильных частиц оказывается весьма устойчивым предсказанием теории практически в любом ее подходе к единому описанию фундаментальных сил природы. Дело в том, что такое описание предполагает наличие симметрии между разными типами частиц. Полагая наличие такой симметрии между известными частицами, теория вынуждена привлекать дополнительные наборы квантовых состояний, которым известные частицы не отвечают, но которые необходимы теории для того, чтобы симметрия была полной. Так, в моделях Большого Объединения наряду с квантами полей сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий возникают X -бозоны, вызывающие распад протона. В суперсимметричных моделях наличие суперсимметрии требует существования суперсимметричных партнеров известных частиц.

При этом более полное описание свойств известных частиц требует и более широкой симметрии. При таком описании увеличивается число «пустых клеток» — гипотетических частиц — в фундаментальном наборе ее элементарных составляющих. В полной теории открываются возможности любых взаимопревращений частиц и появляются новые законы сохранения в таких превращениях. С частицами связываются новые квантовые числа, сохраняющиеся в этих превращениях. Например, в суперсимметричных моделях появляется новый закон сохранения так называемой R -четности, вследствие которого в любых превращениях число суперсимметричных частиц должно сохраняться. Другая сторона существования сохраняющегося числа — стабильность самой легкой частицы, обладающей этим числом. Так, должна быть стабильной самая легкая из суперсимметричных частиц.

Обратный переход от полной симметрии, полагае-

мой в основу теории, к реальности наблюдаемой асимметрии частиц и их взаимодействий требует, как правило, нескольких этапов нарушения исходной симметрии. При этом сохраняющиеся квантовые числа, отвечающие полной симметрии, при нарушении симметрии оказываются во многих случаях сохраняющимися лишь приближенно. И тогда самые легкие частицы, обладающие таким квантовым числом, оказываются метастабильными.

При нарушении полной симметрии наборы «пустых клеток» — гипотетических частиц и известные частицы, свободно превращавшиеся друг в друга, теряют свободу взаимопревращения. Если симметрия нарушена при очень высоких энергиях $\sim \Lambda$, то это означает, что бозоны, осуществляющие взаимопревращения гипотетических и известных частиц, приобретают массу того же порядка величины, и вероятность взаимопревращения при низких энергиях $E \ll \Lambda$ оказывается сильно подавленной. Гипотетические частицы могут быть при этом очень легкими, так что энергетический порог не препятствует их рождению на ускорителях. Однако сечение такого рождения $\sim E^2/\Lambda^2$ оказывается столь малым, что изучать эти частицы на ускорителях практически невозможно. Такие легкие гипотетические частицы, сверхслабо взаимодействующие с известными частицами, вместе с гипотетическими сверхмассовыми частицами составляют «скрытый сектор» теории. Являясь неотъемлемым элементом любых вариантов современных моделей единой теории фундаментальных взаимодействий, «скрытый сектор» теории поставляет космологии большое число кандидатов на роль «скрытой массы» Вселенной. Разнообразие их гипотетических свойств обеспечивает широкий выбор возможностей поиска их ожидаемых проявлений в совокупности данных астрономических наблюдений.

С другой стороны, наука о строении и эволюции Вселенной, находившая свой наблюдательный базис в астрономических данных о свойствах видимого (барионного) вещества и электромагнитного излучения, а свои теоретические основания — в самосогласованной картине эволюции известных форм материи, обратившись к теории элементарных частиц за физическим обоснованием начальных условий малой эволюции, обретает скрытый от ее непосредственных наблюдательных воз-

возможностей мир частиц и взаимодействий, сосуществующий во Вселенной с миром известных частиц и весьма причудливым образом проявляющийся в космологической эволюции известных форм материи. Здесь мы обратимся лишь к одному из возможных проявлений «скрытого сектора» теории — его возможной связи с источниками антипротонов во Вселенной.

Гравитино. Эти частицы являются ярким примером легких гипотетических частиц, недоступных поискам на ускорителях вследствие их сверхслабого взаимодействия с веществом. Существование гравитино — жесткое предсказание моделей супергравитации, на основе которых суперсимметричные модели Большого Объединения сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий объединяются с теорией тяготения, приводя к Великому Объединению всех четырех известных фундаментальных взаимодействий.

В моделях супергравитации кванту гравитационного поля — гравитону (частице со спином 2) сопоставляется гравитино — частица со спином $3/2$. Гравитон — частица безмассовая. Если бы суперсимметрия была строгой, то гравитино также должно было бы быть безмассовой частицей. Нарушение суперсимметрии приводит к тому, что гравитино оказывается массивной частицей. В простейших моделях супергравитации масса гравитино предсказывается порядка величины $m \sim 100$ ГэВ. Как и гравитон, гравитино должно участвовать только в гравитационном взаимодействии. Поэтому взаимодействие гравитино с остальными частицами оказывается сверхслабым.

Предсказываются распады гравитино на более легкие суперсимметричные частицы по каналам глюон + глюино и фотон + фотино. Из-за сверхслабого взаимодействия гравитино вероятность таких распадов предсказывается очень малой, $\omega \sim m^3/m_{\text{Pl}}^2$, где $m_{\text{Pl}} = 10^{19}$ ГэВ — масса Планка. Ожидаемое время жизни гравитации τ должно составлять:

$$\tau = 10^8 \left(\frac{100 \text{ ГэВ}}{m} \right)^3 \cdot \text{с.}$$

В инфляционных космологических моделях гравитино, как и все остальные частицы, могут образовываться лишь по окончании стадии экспоненциального раздувания Вселенной, когда скалярное поле, вызвавшее ин-

фляцию, распадается на элементарные частицы и происходит разогрев очень ранней Вселенной. Гравитино могут рождаться и непосредственно в распадах частиц скалярного поля, и в столкновениях суперсимметричных частиц, рождаемых при разогреве Вселенной. Основная часть гравитино должна была бы образоваться в самом начале эволюции разогретой Вселенной, и их относительная концентрация $n/n_{\text{ч}}$ предсказывается пропорциональной температуре разогрева Вселенной после инфляции. Затем гравитино должны были бы сохраниться во Вселенной до периода их распада при $t \simeq \tau$. Распады гравитино по каналу глюон + глюино с последующей фрагментацией глюонов в адроны являются источником пар нуклон—антинуклон во Вселенной при $t \simeq \tau$.

Космионы. Одним из интересных приложений предсказаний «скрытого сектора» теории микромира к нуждам астрофизики явилось привлечение гипотетических слабо взаимодействующих частиц — «космионов» — для решения проблемы солнечных нейтрино. Гипотеза космионов позволяет объяснить расхождения в 2—3 раза между потоком нейтрино от Солнца, регистрируемых подземными нейтринными детекторами, ожидаемым потоком таких нейтрино, предсказываемым теорией строения Солнца.

В действующих детекторах нейтрино регистрируются хлораргонным методом по реакции $\nu_e + \text{Cl} \rightarrow \text{Ag} + e$ с последующим выделением образующегося аргона. Порог подземными нейтринными детекторами, ожидаемыми поток солнечных нейтрино, образуемых в основной реакции водородного цикла $p + p \rightarrow D + e^+ + \nu_e$, поскольку энергия этих нейтрино не превышает 0,5 МэВ. Поэтому хлораргонные детекторы ориентированы на поиск более энергичных нейтрино. Эти нейтрино образуются в боковой цепочке ядерных реакций ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$, ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^7\text{B} + e^+ + \nu_e$.

Концентрация ядер, образуемых в этой цепочке, и соответственно ожидаемый поток нейтрино, доступных регистрации хлораргонным методом, существенно зависят от температуры в центральной части Солнца. Если бы эта температура была ниже, чем предсказывается весьма детально разработанной моделью внутреннего строения Солнца, то ожидаемый поток борных нейтрино был бы ниже. Тогда данные нейтринной астрономии пришли бы в соответствие с теорией. Именно такое изменение

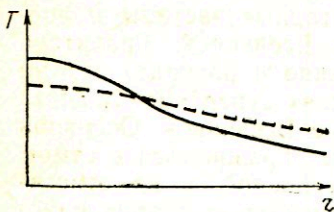


Рис. 6. При наличии космонов распределение температуры в центральной части Солнца сглаживается (штриховая линия) и температура в центре Солнца оказывается ниже, чем в стандартной модели Солнца

центральной температуры Солнца могли бы обеспечить гипотетические космоны — частицы с массой в несколько ГэВ и эффективным сечением $\sim 10^{-36}$ см².

Намек на космическое происхождение этих частиц, заключенный в их названии, связан с некоторой весьма привлекательной самосогласованностью гипотезы космонов. Предполагается, что эти частицы составляют массивное невидимое гало нашей Галактики. Проходя сквозь Галактику и попадая в Солнце, космоны застревают в нем. Длина свободного пробега космонов в веществе Солнца намного превышает длину свободного пробега фотонов. Поэтому даже небольшая примесь космонов (а всего их должно набраться в Солнце не более чем 10^{-10} от полной массы Солнца) обеспечивает эффективный отток тепла от центральной части. Это делает распределение температуры в центре Солнца более пологим и тем самым понижает центральную температуру Солнца (рис. 6).

Космоны должны быть стабильными, электрически нейтральными частицами. Обращаясь к ранним горячим стадиям эволюции Вселенной, можно, предположив зарядовую симметрию космонов, т. е. равенство концентрации частиц и античастиц, посчитать закаленную остаточную концентрацию космонов, как мы это делали выше для закалки барионов в барион-симметричной Вселенной. Количественная разница в сечении аннигиляции антибарионов и космонов приводит к значительно большей остаточной концентрации космонов (обратно пропорциональной $(\sigma)_{ан}$), чем антибарионов, в барион-симметричной Вселенной (4). Поэтому при массе в несколько ГэВ космоны действительно могли бы обеспечить скрытую массу невидимого гало Галактики, которая должна примерно на порядок величины превышать массу видимого вещества Галактики.

Закалка космонов в ранней Вселенной происходит

тогда, когда скорость их аннигиляции оказывается меньше, чем скорость расширения Вселенной, т. е. когда для космоионов становится справедливым условие (3). При значениях параметров космоионов, привлекаемых для решения проблемы солнечных нейтрино, закалка космоионов должна была происходить при температурах T_* в несколько сот МэВ. После этого относительная концентрация космоионов n/n_T практически не менялась. Однако малая $\sim T/T_*$ доля космоионов, аннигилированных и после закалки при $T < T_*$, являлась источником частиц — продуктов такой аннигиляции.

Поскольку масса космоионов составляет несколько ГэВ, в числе продуктов их аннигиляции должны присутствовать и пары нуклон—антинуклон. Тем самым аннигиляция космоионов также оказывается источником антинуклонов в ранней Вселенной. При этом поиск эффектов аннигиляции антинуклонов в ранней Вселенной оказывается способом независимой проверки гипотезы космоионов, а также основанных на этой гипотезе решений проблемы солнечных нейтринов и проблемы физической природы скрытой массы Галактики.

Первичные черные дыры. Для выявления связи гипотетических источников нуклон-антинуклонных пар в ранней Вселенной с предсказаниями «скрытого сектора» теории элементарных частиц представляет особый интерес анализ образования первичных черных дыр в очень ранней Вселенной и эффектов их последующего ускорения. В соответствии с гипотезой С. Хоукинга черная дыра массы M может испаряться. Она является источником частиц, энергия которых характеризуется температурой испаряющейся черной дыры

$$T = \left(\frac{m_{p1}}{M} \right) m_{p1} = 10^{13} \text{ ГэВ} \cdot M^{-1}. \quad (6)$$

При этом время жизни черной дыры относительно испарения должно составлять

$$t_{\text{исп}} = \left(\frac{M}{m_{p1}} \right)^3 m_{p1}^{-1} = 10^{-27} \text{ с} \cdot M^3 \quad (7)$$

Здесь в численных оценках масса выражена в граммах. Поэтому, если масса черной дыры не превышает 10^{15} г, ее время жизни относительно испарения оказывается меньше, чем возраст Вселенной — время от начала ее расширения.

В черную дыру может превратиться любое тело, сжатое до размеров его гравитационного радиуса $r_g = 2GM/c^2$. Основная проблема образования черной дыры связана с реализацией условий такого сжатия. В естественных условиях современной Вселенной образование черных дыр связывают с заключительными стадиями эволюции массивных звезд и, возможно, процессами сжатия в плотных центральных областях Галактик. Сжатие до размеров своего гравитационного радиуса объемов с массой меньшей, чем характерная масса звезд (масса Солнца равна $2 \cdot 10^{33}$ г), в условиях современной Вселенной реализовать практически невозможно. Но в очень ранней Вселенной могло иметь место образование черных дыр любой массы, так называемых первичных черных дыр.

В самом деле, как впервые заметили Я. Б. Зельдович и И. Д. Новиков, область, заключенная внутри космологического горизонта*, практически представляет собой массу, сжатую до размеров своего гравитационного радиуса. Поэтому если бы расширение в этой области остановилось, то она представляла бы собой готовую черную дыру с массой, равной массе вещества, заключенного в ней. Проблема лишь в том, чтобы остановить расширение.

В однородной и изотропной Вселенной появление области, застывшей на фоне общего расширения, невозможно, поскольку это означало бы сильную неоднородность расширения Вселенной. В действительности малые отклонения от строго однородной картины расширения должны иметь место. Именно с такими малыми начальными неоднородностями теория образования крупномасштабной структуры связывает ее зародыши. Но и с учетом малых начальных неоднородностей вероятность прямого осуществления черной дыры в расширяющейся Вселенной оказывается экспоненциально малой.

Вот почему, если в очень ранней Вселенной реализуются условия для роста малых начальных неоднородностей, то вероятность образования первичных черных дыр может значительно увеличиться, делая их чувствительным индикатором наличия таких условий. Сравни-

* Космологический горизонт области размером ct , которую может охватить причинно-следственной связью световой сигнал за время t от начала расширения,

вая ожидаемые проявления таких первичных черных дыр с данными астрономических наблюдений, можно сделать вполне определенные заключения и о допустимых условиях расширения в очень ранней Вселенной, и о допустимых параметрах теории элементарных частиц, определяющих эти условия.

Связь массы черной дыры и температуры ее испарения (7) показывает, что при массе M , меньшей 10^{13} г, температура черной дыры превышает 1 ГэВ. Тогда среди продуктов ее испарения могут присутствовать антипротоны. Более того, по мере испарения черных дыр большей массы их масса уменьшается, и, потеряв большую часть своей массы, испаряющаяся черная дыра также может стать источником антипротонов.

Время испарения черных дыр с массой $M > 10^9$ г превышает 1 с, так что такие черные дыры оказываются источниками антипротонов в период, когда стандартная космологическая эволюция барион-асимметричной Вселенной исключает их наличие. Как же связаны условия роста неоднородности в очень ранней Вселенной с предсказаниями «скрытого сектора» элементарных частиц?

Ранние пылевые стадии. Такие условия, естественно, возникают, если в очень ранней Вселенной реализуются стадии доминантности нерелятивистского вещества. Тогда развитие гравитационной неустойчивости приводит к росту малых начальных возмущений и образованию неоднородностей аналогично тому, как это происходило в относительно недавнюю эпоху и привело к образованию наблюдаемой крупномасштабной структуры Вселенной. Поэтому одна из возможностей усиления неоднородности очень ранней Вселенной может быть связана с доминантностью в ней нерелятивистских форм материи. Само по себе образование неоднородностей еще не означает образования первичных черных дыр. Однако независимо от природы нерелятивистского вещества, определяющего плотность Вселенной, можно оценить минимальную вероятность образования первичных черных дыр на стадии его доминантности.

Идея такой оценки состоит в подсчете вероятности того, что образующаяся неоднородность является настолько однородной и изотропной, что, обособившись от общего космологического расширения, рассматриваемая конфигурация под действием самогравитации сжимает-

ся до размеров своего гравитационного радиуса. Тем самым такая конфигурация как бы возвращается в то состояние, в котором она находилась в момент выхода из-под космологического горизонта, т. е. когда размер космологического горизонта сравнивается с размером конфигурации. Для того чтобы это могло произойти, конфигурация должна сжиматься с одинаковой скоростью вдоль всех трех главных осей. Кроме того, она должна быть достаточно однородной, чтобы сжатие ее внешних слоев не отставало от сжатия центральной части. Тогда конфигурация не успевает перестроить свою структуру и не может избежать попадания под свой гравитационный радиус.

Оба фактора могут реализоваться лишь для очень малого числа конфигураций. Однако вероятность появления таких конфигураций хоть и мала, но отлична от нуля. Главное достоинство такой оценки состоит в ее универсальности. Вероятность образования первичных черных дыр, определяемая в такой оценке, не зависит от природы образующего их нерелятивистского вещества.

В частности, такая оценка справедлива для нерелятивистской стадии колебаний скалярного поля, присутствующей широко распространенным моделям хаотической инфляции. Идея этих моделей связана со свойством скалярного поля, масса квантов которого равна m , при $t < \hbar/mc^2$ реализовывать экспоненциальный закон расширения, т. е. инфляционную стадию. При $t > \hbar/mc^2$ скалярное поле «скатывается» к положению минимума его потенциала (рис. 7) и испытывает колебания вокруг этого положения с периодом $T = \hbar/mc^2$. Причем стадия колебаний скалярного поля оказывается эквивалентной стадии доминантности нерелятивистского вещества.

Рост возмущений приводит на этой стадии к образованию неоднородностей и с малой, но отличной от нуля вероятностью — к образованию черных дыр при samozамыкании специально однородных и изотропных конфигураций скалярного поля. Процесс такого образования черных дыр из все более массивных неоднородностей скалярного поля продолжается до тех пор, пока стадия доминантности колебаний скалярного поля не заканчивается вследствие распада частиц скалярного поля и разогрева Вселенной.

С другой стороны, сама амплитуда и спектр началь-

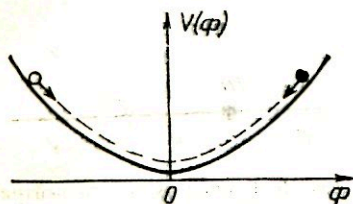


Рис. 7. При малых временах $t < \hbar/mc^2$ скалярное поле имеет уравнение состояния $\rho = -\epsilon$, а затем его колебания в окрестности минимума приводят к усредненному по периоду колебаний уравнению состояния $\rho = 0$

ных возмущений, определяющие вероятность описанного «прямого» образования черных дыр, задаются в инфляционной космологии параметрами скалярного поля. Параметры этого поля определяют также время жизни скалярных частиц и тем самым длительность пылевой стадии их доминантности. Поэтому минимальная оценка вероятности первичных дыр в зависимости от их массы оказывается в рамках моделей хаотической инфляции полностью логически замкнутой.

Эта оценка определяется важнейшим элементом «скрытого сектора» теории микромира, лежащим в основании космологии, — параметрами скалярного поля, вызывающего инфляцию. Используя спектр начальных возмущений, задаваемый в рамках инфляционной модели, можно получить вероятность «прямого» образования первичных черных дыр на последующих стадиях доминантности других метастабильных частиц «скрытого сектора», предсказываемых теорией. Эту минимальную оценку можно значительно усилить, если рассмотреть для каждого конкретного типа сверхмассивных частиц эволюцию образуемых ими гравитационно связанных систем. В этом случае речь идет не о ничтожно малой доле частиц, попадающей в специально однородные и изотропные конфигурации, а об эволюции основной доли вещества, вошедшего в неоднородности. Рассмотрим, какие фундаментальные физические соображения требуют наличия таких сверхмассивных метастабильных частиц.

Масса нейтрино. Теория элементарных частиц связывает массу частицы с наличием квантовых переходов между ее право- и левополяризованными состояниями. Если у нейтрино есть масса, то наряду с обычными (левополяризованными) нейтрино, участвующими в процессах слабого взаимодействия и регистрируемыми в нейтринных процессах, должны существовать правополяризованные нейтрино. Такие частицы не наблюдались

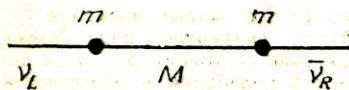


Рис. 8. Масса нейтрино как квантовый переход левого нейтрино в правое антинейтрино, обусловленный наличием тяжелого нейтрино массы M в виртуальном состоянии

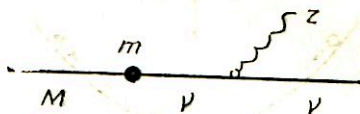


Рис. 9. Распад тяжелого нейтрино по каналу $\nu + Z$ происходит за счет виртуального перехода тяжелого нейтрино в легкое с последующим испусканием Z бозона

пока в нейтринных процессах, зато антинейтрино, регистрируемое в процессах слабого взаимодействия, всегда является правополяризованным. Поэтому весьма распространено отождествление правополяризованных состояний нейтрино с антинейтрино. В этом случае нейтрино и антинейтрино являются одной и той же частицей, которую называют майорановским нейтрино в честь итальянского физика Э. Майорана, впервые рассмотревшего такую возможность для нейтрино.

Масса нейтрино должна быть значительно меньше, чем масса остальных известных частиц — лептонов и кварков. Это наводит на мысль о наличии связи массы нейтрино с какими-то новыми физическими явлениями. И теория связывает механизм появления массы у нейтрино с наличием тяжелого нейтрино с очень большой массой M . Существование этой частицы в виртуальном состоянии обеспечивает квантовый переход левого нейтрино в правое антинейтрино (рис. 8). При этом масса нейтрино пропорциональна квадрату величины m , определяющей переход обычного нейтрино в тяжелое и по порядку величины равной массе соответствующих кварков и лептонов, и обратно пропорциональна большой массе M .

Тяжелое нейтрино оказывается при этом метастабильным. Вероятность его распада, например, по каналу $Z + \nu$ (рис. 9) определяется вероятностью его перехода в обычное нейтрино и составляет величину порядка αm , где $\alpha \sim 10^{-2}$ — безразмерная константа слабого взаимодействия. Тем самым время жизни правого нейтрино оказывается тем больше, чем меньше его масса, а последняя оказывается тем меньше, чем больше масса тяжелого нейтрино. Это позволяет получить ограни-

чения на массу нейтрино, анализируя космологические проявления тяжелого метастабильного нейтрино.

При закаленной относительной концентрации $r = n/n_{\nu}$ тяжелые нейтрино массы M начинают доминировать в космологической плотности при $T < rm$, когда их плотность начинает превышать плотность релятивистских частиц. Рост возмущений плотности тяжелых нейтрино на стадии их доминантности приводит к образованию гравитационно связанных систем тяжелых нейтрино. Дальнейшая эволюция таких систем зависит от скорости потери энергии, определяющей темп их дальнейшего сжатия.

Основным механизмом потери энергии такими системами является испускание ими «горячих» частиц, приобретающих за счет эффектов коллективного взаимодействия скорости, превышающие параболические. При большой массе частиц и соответственно большом времени их жизни эволюция систем успевает закончиться образованием черных дыр до того, как частицы распадутся. При этом черные дыры составят значительную долю общей космологической плотности очень ранней Вселенной. Последующая эволюция Вселенной, заполненной черными дырами, привела бы к тому, что современная Вселенная стала Вселенной черных дыр с пренебрежимо малым довеском обычного (барионного) вещества. При таком ходе развития Вселенной наше существование было бы невозможно. Это заведомо неверная картина космологической эволюции исключается, если время жизни тяжелых нейтрино меньше времени эволюции их неоднородностей. Тогда основная масса этих неоднородностей не успевает закончить свою эволюцию образованием первичных черных дыр. Отсюда следует ограничение сверху времени жизни тяжелых нейтрино и тем самым — ограничение снизу массы нейтрино.

При разумных значениях параметров (относительной концентрации нейтрино, амплитуды начальной неоднородности) нижняя оценка массы нейтрино составляет 10^{-2} — 10^{-1} эВ. При большей массе нейтрино катастрофического перепроизводства первичных черных дыр не происходит, но их ожидаемое количество и характерная масса определяются массой нейтрино, что в принципе позволяет проводить независимое изучение физической

природы массы нейтрино в поисках космологических проявлений первичных черных дыр.

Квазизвездные объекты. При доминантности в очень ранней Вселенной слабо взаимодействующих частиц типа тяжелых нейтрино развитие гравитационной неустойчивости приводит к образованию гравитационно-связанных систем бесстолкновительных частиц. Такие системы подобны современным галактикам, в которых характерное время столкновения звезд намного превышает время их обращения в Галактике. Поэтому время эволюции таких квазигалактических систем и определяется очень медленным процессом их охлаждения за счет испарения горячих частиц.

Если нерелятивистские частицы обладают достаточно сильным взаимодействием с релятивистскими частицами и излучением, то ситуация меняется. Образуемые такими нерелятивистскими частицами гравитационно-связанные системы можно назвать квазизвездными, поскольку, как и в звездах, темп эволюции этих систем определяется скоростью потерь энергии за счет испускания релятивистских частиц и излучения, как это имеет место в обычных звездах. Темп эволюции таких систем оказывается на много порядков величины более быстрым, чем темп медленной эволюции квазигалактических систем. Практически превращение таких систем в черные дыры может происходить за время, сравнимое с временем, за которое происходит образование этих систем из малых начальных неоднородностей.

В этом случае чувствительность данных о возможных проявлениях черных дыр к наличию в очень ранней Вселенной частиц, формирующих на стадии своей доминантности черные дыры, оказывается намного более высокой, чем в случаях, рассмотренных выше. Это делает поиск допустимых проявлений первичных черных дыр эффективным способом проверки некоторых моделей, предсказывающих существование метастабильных сверхмассивных кварков или глюино. Сильное взаимодействие этих гипотетических частиц с плазмой релятивистских частиц обеспечивает квазизвездный характер гравитационно-связанных объектов, образуемых на стадии их доминантности в очень ранней Вселенной.

Фазовые переходы. В самом общем случае образование черных дыр отражает наличие сильных неоднородностей, не обязательно связанных ростом малых воз-

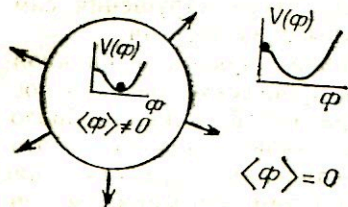


Рис. 10. Рождение пузыря истинного вакуума и его расширение в область «ложного» вакуума

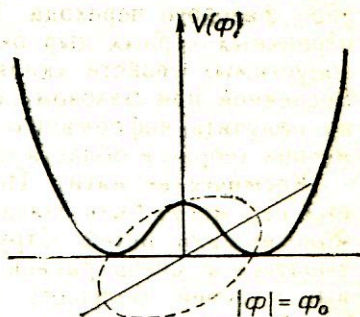


Рис. 11. Минимум потенциала $V(\Phi)$ комплексного поля Φ достигается в любой точке окружности $|\Phi| = \Phi_0$

мушений на пылевых стадиях. Пример появления во Вселенной таких неоднородностей дают предсказываемые теорией фазовые переходы.

При некоторых условиях фазовый переход, отвечающий спонтанному нарушению симметрии теории, может носить черты фазового перехода I рода. Тогда Вселенная как бы вскипает, в ней возникают пузырьки фазы истинного вакуума (основного состояния с нарушенной симметрией, отвечающего минимуму энергии), расширяющиеся в область ложного вакуума, в которой хиггсово поле находится в энергетически выгодном состоянии с ненарушенной симметрией (рис. 10). Внутри пузырька истинного вакуума отсутствуют частицы.

Основная часть энергии, выделяемой на границах пузырька при переходе от ложного вакуума к истинному, вносит вклад в кинетическую энергию движения стенок расширяющегося пузыря. Лишь после столкновения стенок соседних пузырей эта кинетическая энергия переходит в энергию частиц, рождаемых при столкновениях, и после их термализации — в энергию разрыва Вселенной. При столкновении стенок пузырей заключенная в них энергия может локализоваться в области, размер которой совпадает с гравитационным радиусом для массы, эквивалентной энергии стенок. Тогда в столкновении стенок должны образовываться черные дыры.

Количество и масса образующихся черных дыр зависят от соотношения скоростей образования пузырь-

ков истинного вакуума и расширения Вселенной в период фазового перехода. Тем самым поиск проявлений первичных черных дыр оказывается способом изучения допустимых свойств «кипящей» стадии очень ранней Вселенной при фазовом переходе. Таким образом можно получить информацию о структуре нарушения симметрии теории в области сверхвысоких энергий.

Космические нити. Источники нуклон-антинуклонных пар могут быть связаны с процессами распада космологических нитей. Структура нитей должна образовываться в очень ранней Вселенной в рамках некоторых моделей Большого Объединения. Существование нитей связано в таких моделях с тем, что минимуму потенциала хиггсового поля соответствует бесконечное число вакуумных состояний, отличающихся друг от друга значением фазы поля. Именно, если амплитуда Φ_0 комплексного поля $\Phi = \Phi_0 \exp(i\chi)$ приобретает среднее значение $\langle \Phi_0 \rangle \neq 0$, отвечающее минимальной энергии этого поля, то после фазового перехода к фазе с ненулевым средним полем любое значение фазы χ отвечает состоянию истинного вакуума (рис. 11). Поэтому в результате фазового перехода каждой области Вселенной будет соответствовать свое значение фазы χ .

Вследствие того что пространственное изменение поля Φ вносит вклад в энергию поля, пропорциональный $(\Delta\Phi)^2$, резкое изменение фазы χ энергетически невыгодно. Фаза χ должна медленно меняться от области к области. Следуя за изменением фазы вдоль замкнутого контура, можно убедиться в том, что вдоль этого контура фаза меняется на 2π . Мысленно стягивая такой контур, мы получаем точку, в которой фаза оказывается неопределенной, что из условия непрерывности поля Φ требует, чтобы в этой особой точке среднее значение поля $\langle \Phi_0 \rangle$ было равно нулю.

Окрестность такой особой точки, в которой энергия поля сильно отличается от минимальной, характеризуется высокой плотностью энергии. Геометрическое место этих особых точек представляет собой линию. Вдоль этой линии в ходе фазового перехода образуется протяженный линейный объект — космическая нить с высокой линейной плотностью. В ходе последующей эволюции система космических нитей стремится уменьшить свои размеры за счет спрямления длинных нитей, размеры которых превышают размеры области, заключенной

внутрикосмологического горизонта, и стягивания замкнутых петель нити.

Поскольку начальная форма нити имеет случайный («броуновский») вид, в ходе ее дальнейшей эволюции при стягивании и спрямлении могут происходить ее самопересечения и дробление петель замкнутых нитей до размеров, сравнимых с толщиной нити. Петельки, раздробленные до столь малых размеров, могут уже распадаться на элементарные частицы. Тем самым наличие во Вселенной структуры космических нитей может являться постоянно действующим источником частиц высоких энергий, вызывающих каскад процессов взаимодействия с веществом. Вследствие высокой энергии частиц можно уверенно ожидать наличия нуклон-антинуклонных пар в числе продуктов такого взаимодействия.

* * *

Таким образом, экзотический на первый взгляд вопрос о возможности появления и аннигиляции антипротонов в барион-асимметричной Вселенной по мере углубления в физические основания космологии оказывается все более тесно связанным с вопросом о космологических проявлениях практически всех важнейших моделей теории микромира. Каждому типу таких моделей может соответствовать свой тип источников аннигиляции антипротонов во Вселенной после первой миллисекунды ее эволюции.

Как мы убедились, вопрос о допустимых параметрах таких источников важен для выбора физических оснований космологических теорий инфляции, бариосинтеза, образования неоднородностей, для проверки представлений о возможности фазовых переходов в очень ранней Вселенной, о физической природе скрытой массы современной Вселенной, о существовании космических нитей, для проверки современных моделей Большого Объединения, супергравитации, Великого Объединения, для выяснения возможной физической природы массы нейтрино. И это только набор примеров, число которых может оказаться намного большим при проникновении в высшие этажи современной единой теории фундаментальных сил природы и детальном анализе ее космологических следствий.

Все эти вопросы прямо или косвенно сводятся к во-

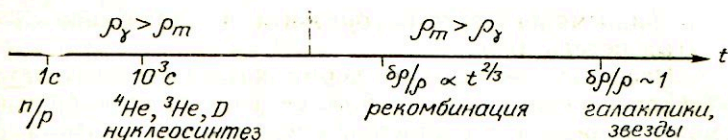


Рис. 12. Схема эволюции ранней Вселенной

просу о допустимых параметрах источников аннигиляции антипротонов, ответить на который можно, лишь проанализировав влияние такой аннигиляции на физические процессы во Вселенной после первой миллисекунды ее существования.

АННИГИЛЯЦИЯ АНТИПРОТОНОВ ВО ВСЕЛЕННОЙ

Ранняя Вселенная. В отличие от, вообще говоря, весьма неопределенной картины эволюции очень ранней Вселенной, обусловленной выбором конкретной реализации представлений о физике сверхвысоких энергий, современные представления об эволюции Вселенной после первой миллисекунды хотя и допускают возможность модификации, в своей общей канве не могут сильно отклоняться от предсказаний теории горячей барионсимметричной Вселенной. Эта общая канва представлена на рис. 12 и включает представления об эволюции вещества и излучения, вытекающие из экстраполяции в прошлое наблюдаемых условий расширения Вселенной и применения надежно установленных законов термодинамики, атомной и ядерной физики.

Так, обращаясь в прошлое, изменение соотношения плотностей вещества и излучения в более ранние эпохи приводит нас к неизбежному выводу о доминантности излучения в космологической плотности ранней Вселенной. Анализируя процессы взаимодействия вещества и излучения на этой радиационно-доминированной стадии эволюции Вселенной, легко прийти к выводу о термодинамическом равновесии вещества и излучения в этот период и о законе изменения их температуры T [МэВ], со временем t [e]

$$T = t^{-1/2}.$$

В соответствии с этим законом можно установить, что к первой секунде расширения скорость β -процессов превращения протонов в нейтроны становится меньше, чем скорость расширения Вселенной, так что происходит закалка относительной концентрации протонов и нейтронов. К первым трем минутам расширения практически все нейтроны должны были соединиться в термоядерных реакциях с протонами, образуя первичный химический состав: в весовом соотношении $\sim 75\%$ ядер водорода, $\sim 25\%$ ядер гелия с небольшим ($\sim 10^{-5} - 10^{-4}$) довеском ядер дейтерия и гелия-3.

Затем с понижением температуры относительный вклад излучения в космологическую плотность уменьшался и радиационно-доминированная стадия заканчивалась, переходя в стадию доминантности нерелятивистского вещества. Изменение частоты реликтовых фотонов в ходе расширения характеризует ее красное смещение Z . Оно же определяет отношение температуры излучения в ранней и современной Вселенной и используется для характеристики этапа расширения. При температуре $T \sim 3 \cdot 10^3$ К ($Z \sim 10^3$) происходила рекомбинация электронов и ядер в нейтральные атомы.

С этого момента, не испытывая более противодействия излучения, вещество могло начать участвовать в процессе образования неоднородностей, завершившемся к настоящему времени образованием крупномасштабной структуры Вселенной, звезд, звездных скоплений, галактик, скоплений и сверхскоплений галактик.

В этой картине нет места аннигиляции антипротонов, поэтому их наличие во Вселенной после первой миллисекунды должно оказать влияние на описанные физические процессы. Рассмотрим, какие эффекты наиболее чувствительны к аннигиляции антипротонов в различные периоды эволюции ранней Вселенной.

Индикаторы аннигиляции. Наличие доменов антивещества и источников нуклон-антинуклонных пар должно привести к аннигиляции нуклонов вещества и антинуклонов, в результате которой может меняться состав вещества. Легко видеть, что влияние другого фактора — выделения энергии при аннигиляции — оказывается на радиационно-доминирующей стадии значительно менее ярким в сравнении с влиянием аннигиляции на состав барионного вещества.

Дело в том, что на этой стадии плотность энергии

Вселенной сосредоточена в излучении, а вещество составляет лишь малый довесок к общей космологической плотности. Поэтому заметный вклад в общую плотность энергии Вселенной в этот период может быть достигнут лишь за счет аннигиляции частиц и античастиц, плотность энергии которых сравнима по величине с полной космологической плотностью. Значительно меньшее количество антинуклонов требуется для того, чтобы заметным образом повлиять на состав вещества в результате аннигиляции.

Тем самым до окончания радиационно-доминирующей стадии влияние аннигиляции на состав барионного вещества остается более чувствительным индикатором наличия источников аннигиляции в ранней Вселенной. По окончании же этой стадии плотность энергии излучения становится все меньше в сравнении с плотностью нерелятивистского вещества, так что влияние аннигиляции на тепловой и нетепловой электромагнитный фон Вселенной становится все более заметным по мере приближения к современной эпохе.

Общим правилом при поиске наиболее чувствительного индикатора аннигиляции антинуклонов во Вселенной является обращение к эффектам такой аннигиляции в тех формах материи, плотность которых минимальна.

Нейтроны. В период после закалки отношения концентраций нейтронов и протонов в первые три минуты расширения Вселенной наиболее чувствительна к эффектам аннигиляции концентрация нейтронов. Аннигиляция нуклонов и антинуклонов может повлиять на отношение концентрации нейтронов и протонов, приводя к изменению концентрации первичного гелия. При этом оказывается, что такое влияние различно для аннигиляции доменов антивещества и антинуклонов, образуемых в источниках пар нуклон—антинуклон.

В первом случае аннигиляция нейтронов и протонов на границе доменов вещества и антивещества приводит к одинаковому в первом приближении уменьшению их концентраций. Так что после аннигиляции величина отношения n/p уменьшается. В источниках нуклон-антинуклонных пар можно ожидать образования равного количества пар протон—антипротон и нейтрон—антинейтрон. По окончании аннигиляции антинуклонов из таких пар к остающимся во Вселенной нейтронам и протонам добавляются поровну нейтроны и протоны из ис-

точника пар. Отношение n/p при этом увеличивается.

Таким образом, ограничение на допустимое количество антинуклонов, сохранившихся в доменах антивещества и аннигилирующих в первые три минуты расширения Вселенной, можно получить из нижней оценки отношения n/p , следующей из нижней оценки концентрации первичного гелия. Допустимое количество нуклон-антинуклонных пар и соответственно параметры их источников ограничиваются сверху верхними оценками концентрации первичного гелия. В обоих случаях заметный эффект аннигиляции имеет место лишь, если она охватывает не менее 10% нуклонов.

Первичный химический состав. Образуемый в первые три минуты первичный химический состав может служить значительно более чувствительным индикатором аннигиляции антинуклонов. Наиболее важную роль играет здесь анализ цепочки ядерных реакций, вызываемых взаимодействием антинуклонов с ядрами гелия, образуемыми в первые три минуты расширения Вселенной в процессах космологического нуклеосинтеза. Разрушение гелия антипротонами приводит к появлению ядер-осколков — дейтерия, трития и гелия-3. Уже само появление этих ядер, наблюдаемая концентрация которых на 3—4 порядка величины меньше, чем концентрация гелия-4, позволяет продвинуться на 2—3 порядка величины в чувствительности к наличию антинуклонов, аннигилирующих во Вселенной после первых трех минут, по сравнению с анализом влияния аннигиляции на концентрацию гелия-4.

Однако чувствительность данных о первичном химическом составе к эффектам аннигиляции в ранней Вселенной может быть усилена еще больше. Для этого нужно проследить за дальнейшей судьбой ядер-осколков. Вступая в реакции с гелием, эти ядра могут позволить синтезировать литий, бериллий и бор, наблюдаемая концентрация которых составляет 10^{-10} — 10^{-11} . Вот почему детальный анализ влияния аннигиляции антинуклонов на обилие легких элементов представляется столь многообещающим. Но прежде чем перейти к такому анализу, завершим наше рассмотрение возможных индикаторов аннигиляции антинуклонов в ранней Вселенной.

Спектр реликтового излучения. В термодинамическом равновесии спектр электромагнитного излучения описы-

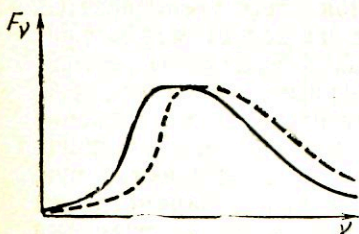


Рис. 13. Искажение планковской формы спектра реликтового излучения

вается равновесным законом распределения Планка. Однако, если во Вселенной при красных смещениях $Z < 10^7$ имеются неравновесные источники, выделяющие электромагнитную энергию, планковская форма спектра будет искажаться.

Дело в том, что плазма во Вселенной оказывается в этот период очень разреженной, так что скорость процесса «размножения» фотонов оказывается меньше, чем скорость расширения Вселенной. В результате энерговыделения равновесие между плазмой и излучением устанавливается уже при фиксированном числе фотонов, что соответствует не планковскому распределению, а распределению Бозе—Эйнштейна (рис. 13). Если выделение энергии происходит в еще более поздний период, характеризуемый красным смещением ($Z < 10^5$), то низко- и высокоэнергетическая части реликтового излучения вообще не успевают установить распределение с единой температурой. В этом случае выделение энергии приводит к повышению температуры высокоэнергетической части при практически неизменной температуре в низкоэнергетической части. Эффект таких спектральных искажений оказывается слабее эффектов изменения распространенности легких элементов за счет аннигиляции, но может быть очень важен для проверки такого изменения.

γ -фон. Если аннигиляция происходит в относительно близкую к нам эпоху (при $Z < 100$), то Вселенная в этот период оказывается прозрачной для γ -излучения и эффекты аннигиляции становятся доступными прямому наблюдательному поиску средствами γ -астрономии. Именно данные о космическом γ -излучении позволили наложить весьма жесткие ограничения на допустимую аннигиляцию в современную эпоху и стали одним из важнейших наблюдательных свидетельств в пользу барион-асимметричной Вселенной. Таким образом, данные об

обилие легких элементов являются наиболее чувствительным индикатором аннигиляции антинуклонов во Вселенной в первые десять миллионов лет ее эволюции, лишь в более позднюю эпоху уступая средствам γ -астрономии. Обратимся теперь к анализу влияния различных источников аннигиляции антинуклонов на обилие легких элементов.

Аннигиляция доменов антивещества. Скорость выгорания доменов антивещества определяется темпом диффузии вещества и антивещества к границе домена. При этом картина аннигиляции домена антивещества сходна с картиной испарения капельки воды, попавшей на раскаленную сковородку. Оценка эффективности диффузии приводит к выводу, что к концу радиационно-доминирующей стадии полностью выгорают домены антивещества, содержащие до $\sim 10^{68}$ антибарионов. При этом следует иметь в виду, что в первые три минуты антинуклоны в доменах антивещества вступают в термоядерные реакции, образуя ядра антигелия и антидейтерия. Для проверки эффектов аннигиляции доменов представляет интерес возникающая в результате их аннигиляции мелкомасштабная неоднородность распределения легких элементов, образуемых в цепочке реакций, вызванных аннигиляцией.

Полный анализ эффектов аннигиляции доменов антивещества, планируемый при осуществлении проекта АСТРОБЕЛИКС, предполагает изучение связи параметров теорий элементарных частиц с распределением доменов антивещества, предсказываемых на их основе, исследование эволюции такого распределения доменов и расчет влияния их аннигиляции на обилие легких элементов на основе решений диффузионного уравнения аннигиляции доменов с учетом ядерных реакций в области аннигиляции. Полный анализ должен учитывать и влияние частиц — продуктов аннигиляции на обилие легких элементов.

Поскольку аннигиляция доменов происходит при тепловых энергиях, основной эффект влияния других неравновесных частиц можно ожидать от электромагнитных каскадов, развиваемых γ -квантами от распадов π^0 -мезонов, и электронами и позитронами, возникающими в каскадах распадов заряженных π -мезонов ($\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm}$). По-видимому, роль всех этих частиц — продуктов аннигиляции — несущественно изменит резуль-

таты расчетов образования легких элементов в цепочке ядерных процессов, вызываемых ядрами антивещества и сопровождающих аннигиляцию доменов. В случае источников нуклон-антинуклонных пар относительное влияние на концентрацию легких элементов антинуклонов и других неравновесных частиц, как минимум, соизмеримо.

Источники $\bar{N}N$ -пар. Метастабильные частицы, испаряющиеся первичные дыры, аннигилирующие закаленные частицы и распадающиеся космические нити являются источниками потоков неравновесных энергичных частиц, среди которых должны содержаться и нуклон-антинуклонные пары. Для определения связи параметров таких источников с ожидаемым от них потоком антинуклонов следует более детально проследить механизм их образования.

Практически во всех указанных источниках первоначально образуются глюоны или пары кварк—антикварк, которые затем превращаются в $\bar{N}N$ -пары наряду с другими адронами. Фрагментация кварк-антикварковых пар и глюонов в $\bar{N}N$ -пары может быть достаточно надежно рассчитана в рамках квантовой хромодинамики на основе экспериментальных данных, получаемых на ускорителях. Некоторая неопределенность возникает в случае распадов нитей, являющихся источниками частиц сверхвысоких энергий, для которых экспериментальные данные отсутствуют. В этом случае приходится использовать не проверенные экспериментально предсказания квантовой хромодинамики в области сверхвысоких энергий. Соотношение концентраций и спектры антинуклонов и других неравновесных частиц зависят от конкретного типа источника.

Однако этой информации еще недостаточно для анализа влияния этих источников на химический состав вещества. Спектр частиц, образуемых непосредственно в источнике, модифицируется в результате взаимодействия этих частиц с плазмой и излучением. При этом от электронов, позитронов и γ -квантов развивается электромагнитный каскад, обусловленный их взаимодействием с излучением и плазмой, а нуклоны и антинуклоны, взаимодействуя с ядрами, вызывают каскад протонов-отдачи и ядер-осколков.

В период после первых трех минут расширения плотность ядер вещества ($\sim 10^{22} (t/1c)^{-3/2} \text{ см}^{-3}$) являет-

ся столь низкой, что пионы и более тяжелые мезоны, а также гипероны распадаются быстрее, чем успевают провзаимодействовать с ядрами. Поэтому анализ влияния $N\bar{N}$ -источников на первичный химический состав должен включать в своей полной постановке изучение модификации начального спектра частиц в источнике за счет их взаимодействия со средой, анализ взаимосвязанного развития нуклонного и электромагнитного каскадов и учитывать ядерные реакции с неравновесными частицами и ядрами.

Такая полная постановка задачи заведомо необходима в случае, когда имеются веские теоретические аргументы в пользу привлекаемой физической модели, т. е. когда существование гипотетического источника $N\bar{N}$ -пар является весьма вероятным и качественно разумным следствием теории, предсказывающей вполне определенные параметры этого источника. Если же предсказания теории не являются столь определенными, так что допустим весьма широкий интервал возможных параметров $N\bar{N}$ -источника, то правомерна и более узкая постановка задачи, при которой анализируется влияние на химический состав вещества лишь одного выделенного проявления источника (например, аннигиляции \bar{N} или электромагнитного каскада).

Если такой анализ приводит к предсказанию обилия легких элементов, которое противоречит оценкам первичного химического состава, получаемым на основе наблюдений, а оценка роли других возможных проявлений $N\bar{N}$ -источника показывает, что их учет может привести лишь к усилению противоречия, то даже такой ограниченный анализ вполне достаточен для выделения значений параметров $N\bar{N}$ -источника, заведомо исключенных наблюдательными данными.

Именно так, на основе одних только оценок образования ${}^3\text{He}$ в $(p+{}^4\text{He})$ -аннигиляции, было выявлено противоречие между предсказываемым в рамках теории супергравитации обилием реликтовых гравитино и наблюдаемой концентрацией ${}^3\text{He}$. Анализ влияния нуклонов отдачи, нуклонов, образующихся в паре $N\bar{N}$ при распаде гравитино, электромагнитного каскада, образуемого γ -квантами от распада гравитино по каналу фотон—фотино, приводили лишь к усилению выявленного

противоречия, требовавшего серьезной модификации модели супергравитации.

Таким образом, анализ влияния $N \bar{N}$ -источников на первичный химический состав предусматривает в рамках проекта АСТРОБЕЛИКС как частичный анализ влияния аннигиляции антинуклонов на первичный химический состав (сочетаемый с грубой оценкой такого влияния от остальных неравновесных частиц) с целью исключения параметров $N \bar{N}$ -источников, заведомо не соответствующих наблюдательным данным, так и полный анализ влияния источника на первичный химический состав при наличии качественного согласия его эффектов с наблюдениями. В последнем случае предсказание существования такого источника оказывается физическим обоснованием неравновесного космологического нуклеосинтеза в ранней Вселенной.

Неравновесный космологический нуклеосинтез. В теории горячей Вселенной образование легких элементов в реакциях космологического нуклеосинтеза происходит в условиях теплового равновесия при заданной барионной асимметрии B/γ и фиксированном закаленном отношении концентраций нейтронов и протонов. В этих условиях ядерные реакции с заряженными частицами осуществляются вследствие квантового туннельного эффекта сквозь потенциальный кулоновский барьер (рис. 14). Скорость реакций при их усреднении по максвелловскому распределению ядер по скоростям определяется произведением вероятности туннелирования (пропорциональной $\exp\{-A/v\}$, $A = \text{const}$) и вероятности для ядер иметь при данной температуре T данную относительную скорость (пропорциональный $\exp(-mv^2/2kT)$).

Произведение этих двух экспонент имеет резкий максимум в случае, когда достигается минимум выражения $A/v + cv^2/T$. Этот минимум соответствует скорости $v \propto T^{1/3}$, поэтому скорости ядерных реакций очень сильно (экспоненциально) зависят от температуры и в значительно меньшей степени — от сечений этой ядерной реакции. Это обстоятельство делает результаты нуклеосинтеза в горячей Вселенной очень сильно связанными с термодинамическими условиями в среде и весьма слабо чувствительными к характеристикам конкретных ядерных процессов.

При наличии источников неравновесных частиц в ранней Вселенной ситуация меняется. Неравновесность

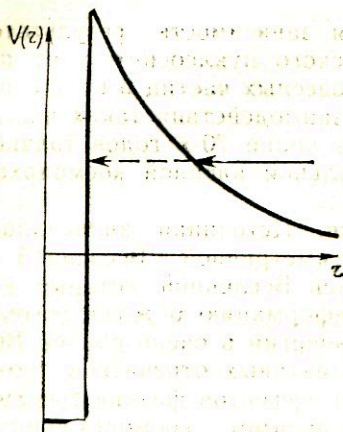


Рис. 14. При тепловых энергиях ядерные реакции происходят за счет туннельного эффекта сквозь кулоновский барьер

частиц предполагает: а) что во Вселенной появляются такие частицы, которые не могут в заметном количестве находиться в термодинамическом равновесии с излучением и веществом при температуре T ; б) что характерная энергия частиц значительно отличается от средней тепловой энергии и их распределение по энергиям существенно отличается от равновесного.

В доменах антивещества имеет место, казалось бы, чистый случай а); но даже в этом случае при аннигиляции доменов распады заряженных и нейтральных пионов являются источниками электромагнитных каскадов, в которых электроны и фотоны имеют энергии порядка величины десятков МэВ. Температура Вселенной при этом меньше десятка кэВ.

Источники $N\bar{N}$ -пар с самого начала являются источниками неравновесных частиц обоих типов. Неравновесные частицы вступают во взаимодействие с ядрами при энергиях выше кулоновского барьера (если таковой имеется для данного ядерного процесса при низких энергиях) и результаты такого взаимодействия определяются непосредственно ядерно-физическими характеристиками процесса.

Поэтому разработка теории неравновесного космологического нуклеосинтеза явным образом предполагает обращение к ядерно-физическим данным, а при их отсутствии требует проведения экспериментальных исследований взаимодействия частиц с ядрами. Именно

это обстоятельство — явная зависимость результатов неравновесного космологического нуклеосинтеза от параметров источников неравновесных частиц и от ядерно-физических характеристик взаимодействия таких частиц с ядрами — и послужило в конце 70-х годов толчком к зарождению экспериментальной ядерной космоархеологии.

Ядерная космоархеология. Источники аннигиляции антинуклонов в барион-асимметричной Вселенной — пример реликтов очень ранней Вселенной, которые, как застывшие следы, хранят информацию о жизнедеятельности частиц сверхвысоких энергий в очень ранней Вселенной. Поиск и анализ реликтовых отпечатков проявлений в эволюции Вселенной эффектов физики сверхвысоких энергий составляет предмет космоархеологии. Ядерная космоархеология выделяет в таком поиске проявления гипотетических явлений в ядерной составляющей барионного вещества Вселенной. Она концентрируется на изучении ядерно-физических процессов, связанных с такими проявлениями.

В русле ядерной космоархеологии задачи теории неравновесного космологического нуклеосинтеза соединяются с проблемами происхождения источников неравновесных частиц в ранней Вселенной с изучением физики сверхвысоких энергий, эффекты которой в очень ранней Вселенной могли бы привести к существованию таких источников.

Выше мы проследили возможные причины и физическое обоснование появления в ранней Вселенной испаряющихся первичных черных дыр, доаннигилирующих закаленных космонов, распадающихся космических нитей и реликтовых метастабильных частиц, доменов антивещества. Эти гипотетические объекты являются источниками неравновесных частиц в ранней Вселенной.

Наиболее чувствительным тестом на возможность наличия таких источников в ранней Вселенной является сравнение результатов неравновесного космологического нуклеосинтеза, обусловленного действием этих источников, с наблюдательными данными о допустимом первичном химическом составе вещества во Вселенной.

Проведение такого теста может затрудняться отсутствием ядерно-физических данных, необходимых для связи параметров источников неравновесных частиц и получаемых при решении уравнений неравновесного

космологического нуклеосинтеза предсказаний концентрации легких элементов.

Другая трудность может возникнуть при сравнении предсказываемой концентрации легких элементов с данными астрономических наблюдений, недостаточными для определенных выводов о допустимом первичном обилии элементов. Для преодоления первого затруднения необходимы целенаправленные ядерно-физические эксперименты, восполняющие недостающие данные. Чтобы преодолеть вторую трудность, становятся необходимыми специальные программы астрономических наблюдений.

Так, эти две отдаленные друг от друга области научной деятельности — экспериментальная ядерная физика и наблюдательная астрономия — оказываются связанными друг с другом в контексте задач ядерной космоархеологии, становятся взаимодополняющими элементами единого астроядерного эксперимента. В таком комплексном эксперименте ни ядерно-физический эксперимент, ни наблюдательная астрономическая программа не дадут и в принципе не могут дать сами по себе какого-либо определенного ответа на вопросы ядерной космоархеологии. Результаты и того и другого, взятые по отдельности, вообще на первый взгляд имеют мало общего с проблемами этой науки. Но взятые во всем комплексе астроядерного эксперимента, эти результаты восполняют недостающие звенья логической космоархеологической цепочки и в этом контексте обретают значение критических экспериментов.

Логическая цепочка космоархеологии протягивается от анализа допустимых параметров источников неравновесных частиц к выводам о допустимых сценариях эволюции очень ранней Вселенной, физических процессах в ней, подобно тому как археологические исследования ведут к воссозданию истории и происходивших в ней социальных процессов.

Проследим эту цепочку для одного конкретного источника $\bar{N}N$ -пар распадающихся гравитино. Модель супергравитации, предсказывающая зависимость массы гравитино от энергетической шкалы нарушения суперсимметрии и задающая каналы распада массивных гравитино, является первым звеном этой цепочки, спрятанным в «скрытом секторе» теории микромира. Второе звено представляет собой сценарий эволюции очень ран-

ней Вселенной, определяющий те физические условия, в которых может происходить образование гравитино. Сцепляя эти два звена, мы приходим к третьему — расчету концентрации гравитино, образующихся в рамках заданного сценария космологической эволюции в соответствии с выбранной суперсимметричной моделью элементарных частиц.

Следующее звено цепочки — анализ последующей эволюции гравитино во Вселенной, определяющий в соответствии с выбранным космологическим сценарием и моделью элементарных частиц возможное изменение относительной концентрации гравитино и отдельных частиц. Пятое звено цепочки — процессы распада гравитино по каналам глюон + глюино и фотон + фотино. Необходимый элемент этого звена — информация о том, как происходит фрагментация глюона в адроны и каковы спектры адронов, образующихся в струях, вызываемых глюоном и глюино от распада гравитации.

Привлекая эту информацию для анализа электромагнитных и нуклонных каскадов неравновесных частиц, развивающихся во взаимодействии с плазмой и излучением, мы приходим к следующему звену цепочки — реакциям неравновесного космологического нуклеосинтеза. Расчеты концентрации легких элементов, образуемых в этих реакциях, требуют привлечения информации о полных и дифференциальных сечениях взаимодействия частиц с легкими ядрами. Отсутствие некоторых данных, определяющих в контексте теории неравновесного космологического нуклеосинтеза его результаты, может приводить к разрыву в этом звене рассматриваемой логической цепочки. Поэтому восполнение этого звена требует целенаправленного экспериментального исследования тех реакций, информация о которых отсутствует.

Следующее звено цепочки составляет дальнейшая химическая эволюция вещества, анализ возможности его изменения в ядерных процессах в звездах, образуемых на стадии образования неоднородностей вещества. Непосредственно наблюдаемое современной астрономией вещество во Вселенной было подвергнуто существенной переработке в термоядерных точках звездных недр, что делает необходимым проведение таких астрономических исследований химического состава вещества, анализ которых позволит максимально приблизиться к оценке пер-

вичного догалактического обилия химических элементов.

Так, проследив всю логическую цепочку ядерной космоархеологии на относительно простом примере $NN\bar{}$ -источника, мы видим, насколько многофакторной оказывается задача. В случае, когда беглый взгляд на все звенья этой логической цепочки не усматривает ее явного несоответствия данным о современной Вселенной, мы с необходимостью подходим к полнокровному и всестороннему анализу взаимосвязи популяции элементарных частиц и полей со средой их обитания — физическими условиями их существования на различных этапах эволюции Вселенной. Такой анализ подводит нас в самом точном значении слова к экологии микромира.

Экология микромира. Полная взаимосвязь теорий элементарных частиц, включающей объяснение всех известных фактов физики микромира и содержащей широкий набор предсказаний новых физических явлений в своем «скрытом секторе», и эволюции Вселенной, физические процессы в которой определяются физическими законами, вытекающими из предсказаний данной теории, оказывается настолько многообразной, что в каждом конкретном случае требует весьма детального и всестороннего изучения.

Пытаясь свести воедино все известные факты о свойствах элементарных частиц и их взаимодействиях и действуя в соответствии с правилами игры, принятыми в современной теоретической физике, мы получаем весьма громоздкие теоретические конструкции с причудливым и разветвленным «скрытым сектором». Так, даже простейший шаг в теоретическом осмыслении наблюдаемого существования трех поколений кварков и лептонов, сходных в своих сильных, слабых и электромагнитных взаимодействиях и различных по массам, приводит на основе идеи нарушенной симметрии поколений к громоздкому механизму ее нарушения.

«Скрытый сектор» такой модели содержит и набор сверхмассивных партнеров кварков и лептонов, и механизм образования спектра масс нейтрино, и предсказание существования аксиона. Первый шаг в построении динамической квантовой теории нарушенной симметрии «ароматов» кварков и лептонов еще не включает

ни идей Великого Объединения, ни суперсимметрии. Но даже этот простейший класс моделей в своей конкретной реализации содержит взаимосвязанный набор предсказаний наличия и сверхмассивных метастабильных частиц (тяжелых нейтрино) и аксионов, и спектра масс нейтрино с распадами более тяжелых нейтрино на более легкие и аксион.

Такой набор предсказаний приводит к весьма специфическому сценарию космологической эволюции, содержащему и периоды доминантности тяжелых нейтрино в очень ранней Вселенной, на которых возможно образование первичных черных дыр, и эффекты пространственного изменения амплитуды и знака аксионного поля в очень ранней Вселенной, влияющего на величину и знак избытка барионов во Вселенной, и скрытую массу современной Вселенной в форме аксионов и массивных нейтрино. Если уж простейшая реалистическая модель микромира содержит столь разветвленный набор космологических проявлений, то можно только гадать о многообразии возможных космологических явлений, вытекающих из дальнейшего развития реалистических моделей теории элементарных частиц. Каждый вариант такой модели содержит лишь ему присущий комплекс космологических эффектов, составляющих экологию данной модели микромира.

Термин «экология» здесь отнюдь не дань моде, но реальное, сущностное отражение взаимосвязи набора фундаментальных полей и частиц со средой их обитания — физическими процессами в расширяющейся Вселенной. Слово «экология» происходит от греческого «экос» — дом, жилище, место пребывания и «логос» — знание и по своему смыслу означает взаимосвязь данной популяции со средой ее обитания. Поскольку космологические проявления физики элементарных частиц должны оказывать существенное влияние и на физические процессы, происходящие во Вселенной, и на сам характер космологической эволюции, взаимосвязь физики микромира и космологии действительно оказывается экологической.

Но для того чтобы подойти к исследованию экологии микромира в ее полном объеме, необходимо разработать методы, сочетающие разнородные исследования в единой логической цепочке космоархеологии. Проект АСТРОБЕЛИКС, к конкретным задачам которого мы

наконец непосредственно обращаемся, и является простейшим реальным примером разработки таких комплексных методов исследования.

ПРОЕКТ АСТРОБЕЛИКС

Структура проекта. Предшествующее обсуждение дает весьма веские основания рассматривать аннигиляцию антинуклонов во Вселенной как одну из характерных черт широкого класса современных единых теорий фундаментальных сил природы. Поэтому проект АСТРОБЕЛИКС прежде всего предусматривает количественный анализ связи параметров таких теорий и источников аннигиляции антинуклонов в ранней Вселенной. Выделение этой связи предусматривает расчет закаленной концентрации метастабильных частиц, анализ образования первичных черных дыр на стадии доминантности сверхмассивных частиц и полей и выявление зависимости спектра масс черных дыр от параметров частиц и полей, их формирующих, выделение классов физических моделей, приводящих к неоднородности пространственного распределения избытка барионов, образующихся в процессах бариосинтеза, и образованию доменов антивещества и анализ распределения таких доменов по их размерам, расчет закаленной концентрации реликтовых космонов.

Предстоит также исследовать условия возникновения и эволюцию космических нитей в соответствии с реалистическими моделями теории элементарных частиц, предсказывающими их существование. Весьма перспективным представляется поиск новых типов метастабильных решений нелинейных уравнений теории, существование которых не следует ни из анализа приближений теории возмущений, ни из анализа топологической структуры теории. Такой поиск открывает новый уровень соотношения глубинных предсказаний теории с ее экологией и может привести к новым поискам гипотетических источников аннигиляции антинуклонов в ранней Вселенной.

Дальнейший анализ эволюции источников аннигиляции существенно зависит от достигнутого уровня детального изучения экологии физической модели, на основе которой предсказывается существование таких ис-

точников. Чем полнее представление о всей совокупности космологических проявлений модели микромира, тем более точные соотношения параметров физической теории и источников аннигиляции могут быть установлены. В худшем случае, когда космологические проявления физической модели не доходят до уровня детального количественного описания, остается возможность грубой оценки связи параметров модели с ожидаемыми свойствами источника.

Подойдя к количественному анализу влияния аннигиляции антинуклонов на концентрацию легких элементов, проект АСТРОБЕЛИКС предусматривает выявление зависимости результатов процессов неравновесного космологического нуклеосинтеза от типа источника аннигиляции антинуклонов и в особенности роли взаимодействия антинуклонов с ядрами, прежде всего с гелием-4, в этих процессах. Это позволяет сформулировать в деталях задачи экспериментального изучения взаимодействия антипротонов с гелием, планируемого в рамках эксперимента ОБЕЛИКС, выделить приоритет этих задач с точки зрения проблем ядерной космоархеологии.

Наконец, полученный для каждого конкретного типа источников аннигиляции антинуклонов химический состав вещества, возникающий в процессах неравновесного космологического нуклеосинтеза, должен быть сопоставлен с данными астрономических наблюдений. И здесь становится важным проведение таких наблюдений, в которых может быть сделан вывод о первичном, догалактическом обилии легких элементов во Вселенной.

Так, проект АСТРОБЕЛИКС соединяет все основные составляющие науки об изучении фундаментальной взаимосвязи строения микромира и Вселенной — космо-микрофизики. В нем присутствует и анализ взаимосвязи теории элементарных частиц и ее космологических проявлений, относящийся к задачам теоретической космо-микрофизики. На место обычного экспериментального изучения предсказаний теории в проекте АСТРОБЕЛИКС встает вычислительный эксперимент. Он заменяет в этом проекте непосредственное создание источника, в роли которого выступают процессы закалки метастабильных частиц, образование первичных черных дыр и доменов антивещества в очень ранней Вселенной, и экс-

периментальное изучение процессов, вызываемых таким источником. На смену последнему приходит вычислительный эксперимент в задачах неравновесного космологического нуклеосинтеза. Эти аспекты характерны для приложений методов математического моделирования в задачах вычислительной космомикрoфизики.

Физический эксперимент в традиционном смысле — исследование взаимодействия антипротонов с ядрами в эксперименте ОБЕЛИКС — играет в проекте АСТРОБЕЛИКС нетривиальную роль. Он восполняет недостающее звено в логической цепочке ядерной космоархеологии. Эта новая неожиданная функция экспериментальных ядерных исследований может быть выявлена лишь в контексте задач космоархеологии и является характерной чертой целого класса задач лабораторной космомикрoфизики. А наблюдательные программы измерения космологического обилия легких элементов и определения догалактического химического состава вещества во Вселенной в проекте АСТРОБЕЛИКС выступают как способ извлечения информации о результатах эксперимента по созданию и аннигиляции антипротонов, проведенного в далеком прошлом Вселенной. Эта сторона астрономии как уникального способа получения информации о допустимых формах существования во Вселенной и возможных свойствах гипотетических частиц и полей, предсказываемых современной теорией элементарных частиц, раскрывается в контексте задач наблюдательной космомикрoфизики.

Выше мы уже обсудили достаточно подробно основные проблемы теоретической космомикрoфизики. Обратимся теперь к краткому обсуждению других аспектов проекта АСТРОБЕЛИКС.

Математическое моделирование. В осуществлении многослойного комплекса исследований, предусматриваемых проектом АСТРОБЕЛИКС, роль теоретических исследований оказывается по необходимости двойкой. С одной стороны, в этих исследованиях сохраняется мыслительный авангард теоретического освоения познания, опережающий эксперимент прорыв в осмыслении проблемы и предсказаний новых явлений, поиск которых позволяет сделать вывод о правильности выбора направления развития теории.

Но в ситуации, когда предметом исследования являются космологические проявления физики сверхвысо-

ких энергий и проявления эти специфичны для очень ранних стадий эволюции Вселенной, о которых прямая наблюдательная информация практически отсутствует, теоретические соображения с необходимостью восполняют недостающие звенья логической связи теоретических предсказаний с физическим экспериментом и астрономическими наблюдениями.

Для проверки своих оснований космомикрoфизика должна прежде всего провести мысленный эксперимент, проверяя, соответствует ли на простом качественном уровне экология данной модели микромира той картине мира, которую мы наблюдаем. При наличии такого соответствия можно перейти к вычислительному эксперименту, позволяющему дать определенное количественное заключение о мере такого соответствия.

В проекте АСТРОБЕЛИКС вычислительный эксперимент «склеивает» слой теоретических предсказаний возможных проявлений физики микромира в очень ранней Вселенной со слоями физического эксперимента и астрономических наблюдений, пропуская через себя и анализ образования источников антипротонов, и изучение влияния аннигиляции на химический состав вещества. Фактически методы математического моделирования составляют тело проекта, связывая теоретические предсказания с физическим экспериментом и астрономическими наблюдениями (рис. 15).

Роль методов математического моделирования в проекте АСТРОБЕЛИКС не сводится к количественному уточнению грубых качественных оценок. В ряде случаев в зависимости от результатов вычислительного эксперимента получают и качественно различные выводы. Это имеет место, например, при анализе вероятности образования первичных черных дыр в очень ранней Вселенной на стадии доминантности сверхмассивных частиц и их античастиц, обладающих достаточно сильным взаимодействием с излучением и образующих гравитационно-связанные квазизвездные системы на этой стадии.

Дальнейшая судьба таких систем определяется тонкой игрой двух противоположных тенденций: тенденции к коллапсу за счет их самогравитации и тенденции к полному разлету за счет аннигиляции частиц и античастиц, содержащихся в гравитационно-связанной системе. Лишь самосогласованный гидродинамический расчет эволюции такой системы, включающий все факторы

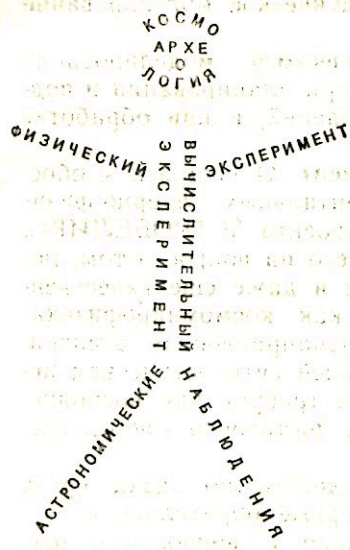


Рис. 15. Структура проекта АСТРОБЕЛИКС

ее эволюции, позволяет сделать выбор между двумя указанными тенденциями и получить определенное заключение о вероятности образования черных дыр на такой стадии.

Другим примером приложения математического моделирования, приводящего к качественно важным следствиям, является исследование методами математического моделирования нелинейных уравнений, положенных в основу модели микромира с целью поиска новых метастабильных решений, отвечающих новым типам источников антипротонов во Вселенной.

Целый комплекс вопросов математического моделирования в проекте АСТРОБЕЛИКС связан с анализом процессов неравновесного космологического нуклеосинтеза, вызываемых в ранней Вселенной источниками антипротонов. В своем полном объеме такой анализ предполагает решение полной системы кинетических уравнений, описывающих изменение концентрации ядер под действием потоков неравновесных частиц, вызываемых во Вселенной источниками антипротонов. Для выделения отдельных цепочек процессов, приводящих к наиболее заметному влиянию на химический состав веществ-

ва, можно использовать математическое моделирование методом Монте-Карло.

Наконец, методы математического моделирования необходимы и непосредственно при планировании и подготовке экспериментов и наблюдений, и при обработке их результатов.

Ядерно-физический эксперимент. Обращаясь к обоснованию программы экспериментальных ядерно-физических исследований в рамках проекта АСТРОБЕЛИКС, необходимо ответить прежде всего на вопрос о том, почему в столь малоопределенной и даже еще качественно не устоявшейся области, как космомикрoфизика, возникает необходимость в целенаправленном эксперименте? Почему оценочная по своей сути логическая цепочка ядерной космоархеологии требует для восполнения своего недостающего звена достаточно точных экспериментальных измерений?

Эти вопросы возникли еще десять лет назад, сразу же, как только космология впервые обратилась к экспериментальной ядерной физике с вопросом о том, сколько и каких ядер-осколков образуется при взаимодействии антипротонов с ядрами гелия-4. И ответ на них состоял в том, что экспериментальных данных о выходе ядер-осколков при взаимодействии антипротонов с гелием не имелось, а неопределенность теоретических оценок выхода (например, дейтерия) составляла два порядка величины.

Казалось бы, такая неопределенность вряд ли может сильно превышать неопределенность в оценке, скажем, концентрации образующихся при испарении первичных черных дыр нуклон-антинуклонных пар. Ведь, перемножая все неопределенности в оценке вклада каждого звена логической цепочки, от механизмов образования первичных черных дыр до процессов аннигиляции антипротонов с гелием, мы наверняка должны будем прийти к меньшей неопределенности. Но одно дело — количественная неопределенность в оценке эффекта, а другое — неопределенность в качественной оценке его результата. И здесь неопределенность в оценке выхода (например, дейтерия) оказывалась принципиальной.

Если при аннигиляции антипротона с гелием в 10% процессов аннигиляции образуется дейтерий, то его количество, при наличии достаточно мощного источника антипротонов, может оказаться большим, чем ограниче-

ния сверху на допустимую концентрацию дейтерия (10^{-3} от концентрации ${}^4\text{He}$) и такой источник может быть исключен из данных наблюдений. Если же в силу отмеченной неопределенности во взаимодействии антипротонов с гелием дейтерий образуется менее чем в 10^{-3} доле всех событий, то независимо от мощности источника антипротонов относительная концентрация образующегося дейтерия будет соответствовать наблюдательным ограничениям на нее и чувствительность данных о космологическом обилии дейтерия к эффектам аннигиляции антипротонов теряется.

Так неопределенность более чем в один порядок величины в оценке выхода дейтерия оказывается принципиальной для качественного вывода о том, насколько правомерен выбор обилия дейтерия в качестве индикатора процессов аннигиляции антипротонов в ранней Вселенной.

Сразу же была указана и другая сторона проблемы — при определенной интенсивности источника антипротонов аннигиляция антипротонов с гелием могла бы объяснить все наблюдаемое обилие дейтерия, разрывая связь его наблюдаемой концентрации с результатами стандартной теории космологического нуклеосинтеза. В этой теории предсказываемое обилие дейтерия зависело от плотности барионов: чем больше плотность барионов, тем эффективнее дейтерий должен был перерабатываться в термоядерных реакциях в гелий. При барионной плотности, равной критической, концентрация дейтерия, остающегося во Вселенной, предсказывалась на несколько порядков величины меньше, чем наблюдаемая, и лишь при плотности барионов меньшей, чем $1/10$ от критической, предсказываемое обилие дейтерия оказывается достаточным для объяснения его наблюдаемой распространенности.

Этот вывод стандартной теории нуклеосинтеза рассматривался как веский аргумент в пользу небарионной природы скрытой массы, космологическая плотность которой должна быть порядка критической плотности. Поэтому возможность проверки аннигиляционного механизма образования дейтерия, существенно определяемого выходом дейтерия в реакции взаимодействия антипротонов с гелием, представляла самостоятельный интерес.

Ранняя экспериментальная ядерная космоархеология.

На первом этапе выяснения и разработки космоархеологических аспектов взаимодействия антипротонов с гелием основное внимание концентрировалось на принципиальной качественной стороне дела. На этом уровне было достаточно лишь убедиться в том, что действительно имеются такие модели элементарных частиц, космологические следствия которых могут приводить к появлению антипротонов в ранней Вселенной, и что аннигиляция антипротонов с гелием действительно может привести к заметному изменению концентрации легких элементов во Вселенной.

Качественный анализ привел к выводу о возможности появления во Вселенной испаряющихся черных дыр, распадающихся метастабильных частиц и доменов антивещества, являющихся источниками аннигиляции антипротонов во Вселенной после первых трех минут ее существования.

Не рассматривая в деталях конкретный вид спектров антипротонов от этих источников, на первом этапе можно было ограничиться одной их характеристикой — средней относительной концентрацией аннигилирующих антипротонов. Эта величина определяла концентрацию образующихся во взаимодействии антипротонов с гелием легких элементов с неизвестным коэффициентом пропорциональности — долей процессов $\bar{p} \text{ } ^4\text{He}$ взаимодействия, в которых образуется данное ядро-осколок — дейтерий, тритий или гелий-3.

С целью определения этого неизвестного коэффициента на антипротонном накопителе LEAR (Low Energy Antiproton Ring) в ЦЭРНе советско-итальянская группа физиков-экспериментаторов провела эксперимент RS179 по измерению выходов легких элементов в $\bar{p} \text{ } ^4\text{He}$ взаимодействии. Чувствительность применявшихся в экспериментах детекторов заряженных частиц не позволяла в этом эксперименте достоверно отделять друг от друга в конечном состоянии однократно заряженные частицы — протоны, ядра дейтерия и трития.

Поэтому и после этого эксперимента оставался открытым вопрос о выходе дейтерия в $\bar{p} \text{ } ^4\text{He}$ взаимодействии и соответственно о возможности реализации «аннигиляционного» механизма образования дейтерия в ранней Вселенной. Но выход гелия-3 в этом эксперименте был измерен и составил более 10%: более чем в

$1/10$ случаев взаимодействия антипротонов с ${}^4\text{He}$ образовались ядра ${}^3\text{He}$.

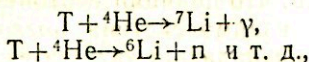
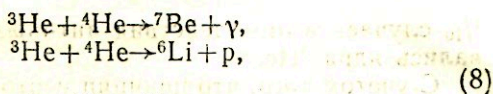
С учетом того, что принцип изотопической инвариантности ядерного взаимодействия позволял оценить, что выход трития, распадающегося затем на ${}^3\text{He}$, должен быть того же порядка, можно было заключить, что при наличии источников антипротонов в ранней Вселенной более чем в 20% случаев аннигиляции антипротонов с гелием должны были бы образовываться ядра ${}^3\text{He}$.

Основываясь на этом результате, можно было сравнивать предсказываемую интенсивность конкретных источников антипротонов в ранней Вселенной и обилие ${}^3\text{He}$, получаемое при аннигиляции антипротонов от этих источников, с наблюдательными ограничениями на догалактическую концентрацию ${}^3\text{He}$. Такое сравнение, например, в случае распада гравитино приводило к противоречиям с данными наблюдений, стимулируя развитие моделей супергравитации.

Независимо от природы источника антипротонов результаты эксперимента RS179 позволяли установить универсальное ограничение на относительную концентрацию антипротонов, аннигилирующих в ранней Вселенной. Средняя концентрация таких антипротонов не должна была превышать 0,3% от концентрации барьонов, чтобы не возникла проблема перепроизводства ${}^3\text{He}$ в ранней Вселенной. Этот результат был высоко оценен научной общественностью, включившей его в десятку важнейших результатов, полученных в экспериментах LEAP.

«Аннигиляционный» нуклеосинтез. Несмотря на несомненный успех и всеобщее признание, на первом этапе своего развития экспериментальная ядерная космоархеология не смогла ответить ни на вопрос о возможности «аннигиляционного» механизма образования дейтерия, ни на вопрос о том, каково распределение по импульсам наиболее энергичных ядер-осколков, образуемых в $p\text{-}{}^4\text{He}$ взаимодействии. А этот последний вопрос имеет прямое отношение к вопросу о возможности «аннигиляционного» механизма образования лития, бериллия и бора.

Энергии трития, гелия-3 и дейтерия, образуемых в $p\text{-}{}^4\text{He}$ взаимодействии, существенно превышают кулоновский барьер для цепочки последующих реакций



приводящих к образованию элементов, наблюдаемые концентрации которых на 5—6 порядков величины меньше, чем концентрация ${}^3\text{He}$ и дейтерия. Поэтому на первый взгляд на те же 5—6 порядков величины должна возрасти чувствительность концентрации легких элементов к наличию источников антипротонов, если использовать данные о распространенности этих элементов. Однако относительная вероятность участия ядра ${}^3\text{He}$, T или D в этих процессах определяется отношением скоростей этих реакций к полной скорости всех возможных процессов с участием этого ядра, а в последней для нерелятивистских ядер определяющую роль играет эффективное сечение кулоновского торможения ядра в плазме, обратно пропорциональное четвертой степени скорости ядра.

Проведенные в эксперименте RS179 грубые оценки распределения по импульсам ядер ${}^3\text{He}$, образующихся в \bar{p} ${}^4\text{He}$ взаимодействии, показали, что для наиболее энергичных ядер-осколков теоретические оценки таких распределений недооценивают эффект образования высокоэнергичных осколков не менее чем в 2—3 раза. Из-за сильной зависимости эффекта кулоновского торможения от скорости даже такая недооценка эффекта приводит к занижению не менее чем на два порядка величины относительной вероятности осуществления цепочки реакций (8), что может быть критично для вывода о возможности использования концентраций лития, бериллия и бора в качестве индикаторов аннигиляции в ранней Вселенной.

Эксперимент ОБЕЛИКС как раз и призван решить эти проблемы «аннигиляционного» нуклеосинтеза. В этом эксперименте, осуществляемом в LEAP еще более представительным, чем RS179, международным коллективом физиков-экспериментаторов, ядром которого остается советско-итальянская группа, проводившая эксперимент RS179, планируется до конца 1992 г. получить определенный ответ и о величине относительных вероятностей образования дейтерия, трития и гелия-3 в \bar{p} ${}^4\text{He}$ взаимо-

действии, и о распределении по импульсам этих ядер-осколков.

В рамках проекта АСТРОБЕЛИКС экспериментальное изучение взаимодействия антипротонов с ядрами гелия становится критическим для замыкания логической цепочки, связывающей космологически проявления физики сверхвысоких энергий с наблюдениями космологического обилия легких элементов.

Другой космоархеологический аспект эксперимента ОБЕЛИКС — возможность экспериментальной проверки эффективности «аннигиляционного» механизма образования дейтерия. Сравнивая относительный выход дейтерия и других элементов (третия и гелия-3), образуемых в $\bar{p}^4\text{He}$ взаимодействии, можно проверить, не приводит ли гипотеза об «аннигиляционной» природе дейтерия к одновременному перепроизводству других элементов. Имеющиеся данные о фоторасщеплении ^4He показывают, что взаимодействие γ -квантов с ^4He приводит к образованию дейтерия в более чем на порядок меньшем количестве, чем гелия-3. Поэтому с учетом эффектов электромагнитного каскада, возникающего при наличии любого источника антипротонов в ранней Вселенной, при относительной вероятности образования дейтерия в $\bar{p}^4\text{He}$ взаимодействии более чем в 5 раз меньшей, чем гелия-3, можно будет исключить «аннигиляционную» природу наблюдаемого дейтерия в силу неизбежного перепроизводства ^3He .

В более общем подходе данные, которые будут получены в эксперименте ОБЕЛИКС, позволят определить результаты неравновесного космологического нуклеосинтеза в зависимости от параметров источников антипротонов. Выявление такой зависимости в вычислительном эксперименте позволит более четко сформулировать задачи экспериментального изучения $\bar{p}^4\text{He}$ взаимодействия, наиболее адекватные проверке наличия того или иного типа источников антипротонов в ранней Вселенной.

«АСТРО» значит «астрономия». В названии проекта АСТРОБЕЛИКС упоминание астрономических наблюдений недаром поставлено на первое место. Ведь именно из этих наблюдений мы получаем информацию об обилии легких элементов, которая в логической цепочке космоархеологии является замыкающим звеном. При

этом особое внимание уделяется наблюдательным программам, планируемым на 6-метровом телескопе БТА в САО АН СССР, из которых можно будет выделить информацию о среднем по Вселенной догалактическом обилии легких элементов. Именно эта информация имеет космоархеологический смысл в рамках проекта АСТРОБЕЛИКС.

Для выделения этой информации из данных о наблюдаемых концентрациях легких элементов, по-видимому, потребуется независимая наблюдательная проверка эффектов химической эволюции вещества в галактиках, необходимая для более надежной экстраполяции результатов измерений распространенности элементов к величине их догалактического обилия. Вот почему наряду с надежными методами измерения химического состава вещества методами оптической астрономии, проект АСТРОБЕЛИКС обращается к интересной, хотя и непроверенной еще, идее прямого измерения догалактического обилия легких элементов в радиоастрономических поисках узкополосных искажений спектра реликтового излучения.

Искажения реликта. Наличие искажений в спектре реликтового излучения означает, что энергосвечение во Вселенной происходило столь поздно, что между низко- и высокоэнергетической частями спектра реликтового излучения не могло установиться равновесие. Однако как еще в 1977 г. показал В. К. Дубрович, наличие таких искажений должно проявиться в атомных или молекулярных переходах в отдельных спектральных линиях. Вследствие большого сечения поглощения и вероятности испускания квантов в линиях устанавливается равновесие так, что в низкоэнергетической части спектра должны появиться соответствующие этим линиям узкополосные искажения, амплитуда которых пропорциональна величине искажения высокоэнергетической части спектра.

Из-за большой величины сечения взаимодействия фотонов указанный эффект должен иметь место в линиях при концентрациях атомов и молекул, превышающих $\sim 10^{-13}$ от концентрации водорода. Тем самым радиоастрономический поиск искажений, отвечающих линиям тех или иных элементов, позволит измерить концентрацию этих элементов в эпоху рекомбинации при красных смещениях $Z \sim 10^3$.

Но для того чтобы использовать этот метод измерения догалактической концентрации легких элементов, необходимо, чтобы в виновской области спектра действительно имели место искажения.

В последние годы появились наблюдательные указания на наличие таких искажений, однако эти указания, по-видимому, не подтверждаются в измерениях на спутнике COBE. Поэтому вопрос о наличии искажений остается пока открытым.

Имеется оценка снизу ожидаемых искажений, обусловленных в стандартной теории горячей Вселенной энерговыделением при рекомбинации водорода. Эта оценка дает величину искажений $\sim 10^6$, при которой необходима разработка специальной методики регистрации узкополосных искажений столь малой величины.

Интересно, что более вдохновляющими могут оказаться оценки величины искажений спектра реликтового излучения, обусловленных энерговыделением, сопровождающим действие в ранней Вселенной источников антипротонов. В этом случае поиск узкополосных искажений был бы и методом электромагнитной калориметрии источника антипротонов, и способом проведения вызываемых таким источником изменений распространенности легких элементов.

ЛИТЕРАТУРА

Хлопов М. Ю. Вселенная — гигантский ускоритель. — М.: Знание, 1987.

Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Стрoение и эволюция Вселенной. — М.: Наука, 1975.

Окунь Л. Б. Лептоны и кварки. — М.: Наука, 1981.

Комар А. А. Кварки — новые субъединицы материи. — М.: Знание, 1982.

Линде А. Д. Инфляционные космологические модели // Успехи физических наук. — 1984. — Т. 144. — С. 177.

Максим Юрьевич Хлопов

АСТРОЯДЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ АСТРОБЕЛИКС

Гл. отраслевой редактор Л. А. Ерлыкин. Редактор К. А. Кутузов. Мл. редактор Н. А. Сергеева. Обложка художника А. А. Смирнова. Худож. редактор П. Л. Христов. Техн. редактор О. А. Найденова. Корректор Л. В. Иванова.

ИБ № 10986

Сдано в набор 30.03.90. Подписано к печати 28.06.90. Т 00243. Формат бумаги 84×108^{1/2}. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,57. Уч.-изд. л. 4,00. Тираж 26 778 экз. Заказ 618. Цена 15 коп. Издательство «Знание», 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 904007.

Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

Дорогой читатель!

Брошюры этой серии в розничную продажу не поступают, поэтому своевременно оформляйте подписку.

Подписка на брошюры издательства «Знание» ежеквартальная, принимается в любом отделении «Союзпечати».

Напоминаем Вам, что сведения о подписке Вы можете найти в «Каталоге советских газет и журналов» в разделе «Центральные журналы», рубрика «Брошюры издательства «Знание»

Цена подписки на год 1 руб. 80 коп.



*Наш адрес:
СССР,
Москва,
Центр,
проезд Серова, 4*