

Объединенный
институт
ядерных
исследований
Дубна

4102/83

15/8-83

1-83-338

Ф.Балестра¹, Г.Пираджино¹, Д.Б.Понтекорво,
М.Г.Сапожников, И.В.Фаломкин, М.Ю.Хлопов²

АННИГИЛЯЦИЯ \bar{p} ^4He ПРИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ
И ЕЕ СВЯЗЬ
С ПРОБЛЕМАМИ СОВРЕМЕННОЙ КОСМОЛОГИИ
И МОДЕЛЯМИ ВЕЛИКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ

Направлено в журнал "Ядерная физика"

¹ Институт физики, Турин, Италия.

² Институт прикладной математики АН СССР, Москва.

1983

1. ВВЕДЕНИЕ

Недавно было предложено ^{1,2/} использовать процесс $\bar{p}^4\text{He}$ -аннигиляции при низких энергиях $/E_{\bar{p}} \leq 100 \text{ МэВ}/$ для установления ограничений на параметры некоторых теорий великого объединения /ТВО/. Поскольку эффекты ТВО становятся заметными только при очень высоких энергиях $/\sim 10^{14} - 10^{15} \text{ ГэВ}/$, было бы удивительно наблюдать их в \bar{p} -аннигиляции при таких низких энергиях. Конечно, ТВО не влияют непосредственно на физику $\bar{p}^4\text{He}$ -аннигиляции. Сущность дела заключается в том, что различные теории великого объединения приводят к различным космологическим следствиям, а именно, предсказывают различные значения для определенных астрофизических параметров. В то же время оказалось, что изучение $\bar{p}^4\text{He}$ -аннигиляции может дать ограничения на значения этих астрофизических параметров, что, в принципе, позволяет сделать выбор между различными моделями великого объединения.

Существуют такие модели великого объединения ^{3-5/}, которые предсказывают существование источников антивещества в ранней Вселенной в интервале времени $t \leq 10^{13} \text{ с}$ после начала расширения. Это предсказание довольно интересно, поскольку согласно существовавшим до сих пор общепринятым представлениям во Вселенной не осталось антивещества после момента времени $t \sim 10^{-3} \text{ с}$. В очень ранней Вселенной $/t \leq 10^{-3} \text{ с}/$ существовало примерно равное количество вещества и антивещества, однако практически все антивещество должно было аннигилировать /т.е. в настоящее время $n^-/n^+ \leq \exp(-87)/$. Данные наблюдений также свидетельствуют о том, что в настоящее время не существует макроскопических количеств антивещества во Вселенной, по крайней мере в нашем скоплении галактик. Таким образом, возникает вопрос, как проверить предсказание теории великого объединения относительно существования источников антивещества на стадии радиационной доминантности /РД-стадии/ космологической эволюции при $t \leq 10^{13} \text{ с}$. В рамках барионно-асимметричной космологии существование таких источников тесно связано с неоднородностями Вселенной. Неоднородности, связанные с флуктуациями метрики, могут вести к образованию первичных черных дыр. Среди продуктов испарения первичных черных дыр имеются антипротоны. Неоднородность в распределении барионного заряда может иметь следствием появление областей с избытком барионов, то есть доменов антивещества. Наиболее вероятно, что к настоящему времени такие источники уже проаннигилировали, и нам остается только наблюдать продукты их аннигиляции. С этой точки зрения наиболее обещающим является изучение аннигиляции

антипротонов в ${}^4\text{He}$, поскольку гелий является наиболее распространенным /не считая водорода/ элементом во Вселенной /см. таблицу/.

Таблица

Распространенность по массе легких элементов во Вселенной

| Элемент | X |
|-----------------|------------------------------|
| H | 0,75 |
| ${}^2\text{H}$ | $/2,5_{+1,5}/ \cdot 10^{-5}$ |
| ${}^3\text{He}$ | $/4,2_{+2,8}/ \cdot 10^{-5}$ |
| ${}^4\text{He}$ | $0,23_{+0,02}$ |

Ошибки соответствуют средним значениям для различных наблюдений. Ошибки отдельных измерений, приводимые авторами, существенно меньше. Представленные здесь результаты взяты из работы /10/.

Величины, представленные в таблице, показывают, что аннигиляция даже малой части $/\sim 10^{-3} \div 10^{-4}/$ гелия-4 могла привести к образованию всего наблюдаемого количества ${}^3\text{He}$ и дейтерия. Обозначая через $\Delta n_{{}^3\text{He}}$ и Δn_{D} количества ${}^3\text{He}$ и D, созданных при аннигиляции, легко получаем следующие соотношения:

$$\Delta n_{{}^3\text{He}} = n_{\text{He}} f_{{}^3\text{He}}^{\text{эфф}} R, \quad /1.1/$$

$$\Delta n_{\text{D}} = n_{\text{He}} f_{\text{D}}^{\text{эфф}} R, \quad /1.2/$$

где n_{He} - концентрация ${}^4\text{He}$; $f_{{}^3\text{He}}^{\text{эфф}}$ и $f_{\text{D}}^{\text{эфф}}$ означают эффективные выходы ${}^3\text{He}$ и D в $\bar{p}{}^4\text{He}$ -аннигиляции, а R - относительное количество антивещества $n_{\bar{p}}/n_p$.

Полагая, что количества ${}^3\text{He}$ и D, созданных при аннигиляции, не могут превышать их наблюдаемых концентраций, можно ввести следующие ограничения на величину R:

$$R \leq \frac{4}{3} \frac{x_{{}^3\text{He}}}{x_{{}^4\text{He}} f_{{}^3\text{He}}^{\text{эфф}}}, \quad /1.3/$$

$$R \leq \frac{2x_{\text{D}}}{x_{{}^4\text{He}} f_{\text{D}}^{\text{эфф}}}, \quad /1.4/$$

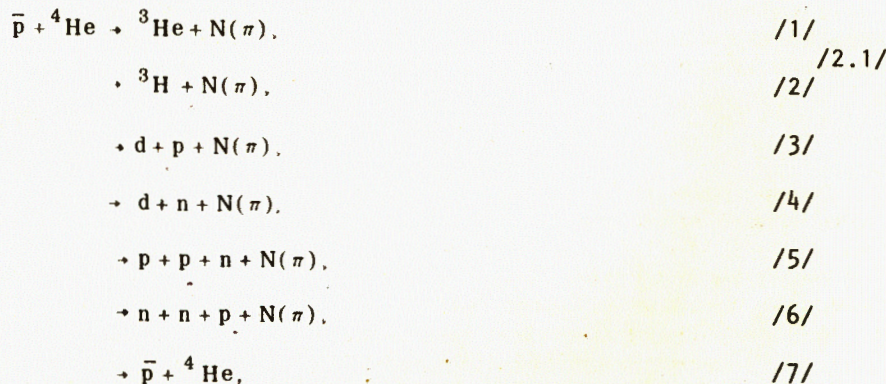
где $x_{{}^3\text{He}}$, x_{D} и $x_{{}^4\text{He}}$ - наблюдаемые концентрации по массе ${}^3\text{He}$, D и ${}^4\text{He}$ соответственно.

Знание величины R позволяет наложить ограничения на некоторые параметры теорий великого объединения, на относительное число первичных черных дыр, на возможность существования сверхтяжелых фермионов, предсказываемых некоторыми ТВО, а также на ряд других астрофизических параметров.

Мы используем данный подход к анализу космологических следствий из суперсимметричных моделей великого объединения /6-9/ и покажем, как получить ограничения на концентрацию гравитино в ранней Вселенной, основываясь на верхних пределах для величины R. Покажем также, что информация, которая будет получена при изучении $\bar{p}{}^4\text{He}$ -аннигиляции, может быть использована для выяснения вопроса о том, могла ли такая реакция вообще иметь место в ранней Вселенной. Кроме того, вкратце обсудим возможность экспериментального изучения $\bar{p}{}^4\text{He}$ -аннигиляции.

2. $\bar{p}{}^4\text{He}$ -АННИГИЛЯЦИЯ И ОТНОСИТЕЛЬНОЕ КОЛИЧЕСТВО АНТИВЕЩЕСТВА ВО ВСЕЛЕННОЙ

При $\bar{p}{}^4\text{He}$ -аннигиляции возможны следующие реакции:



где $\text{N}(\pi)$ означает число пионов, возникающих в соответствующем канале аннигиляции /для простоты мы не будем учитывать реакцию развала ядра ${}^4\text{He}$ антипротонами/.

Эффективный выход отдельного элемента в реакциях /2.1/ будет

$$f_{\text{эфф}} = \frac{\sum_i \alpha_i \sigma_i}{\sigma_{\text{полн}}}, \quad /2.2/$$

где σ_i - соответствующее сечение i -го канала / $i \leq 6$ /, a_i - множественность возникновения рассматриваемого элемента в данном канале реакции $\sigma_{\text{полн}} = \alpha_{\text{упр.}} + \sum_{i=1}^6 \sigma_i$.

Для того чтобы получить ограничения на долю антивещества в ранней Вселенной R , необходимо измерить эффективные выходы дейтерия и ${}^3\text{He}$ /см. соотношения /1.3/-/1.4//. Поскольку тритий, созданный в $\bar{p}{}^4\text{He}$ -аннигиляции во Вселенной, мог распасться в ${}^3\text{He}$, повышая таким образом концентрацию ${}^3\text{He}$, эффективный выход ${}^3\text{He}$ будет, следовательно, таков:

$$f_{3\text{He}}^{\text{эфф.}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{\sigma_{\text{полн.}}} \quad /2.3/$$

где σ_1 и σ_2 - сечения реакций /1/ и /2/ соответственно.

Что касается эффективного выхода дейтерия, то он зависит от конкретного момента времени в развитии Вселенной, при котором имеет место $\bar{p}{}^4\text{He}$ -аннигиляция. Плотность относительно ранней Вселенной /при $10^3 \leq t \leq t_d$, где $t_d \sim 10^6 \text{ с}^*$ / была достаточно велика для того, чтобы нейтроны, возникшие в $\bar{p}{}^4\text{He}$ -аннигиляции, успели образовать дейтерий в реакции $n + p \rightarrow d + \gamma$. По этой причине эффективный выход дейтерия, соответствующий этому интервалу времени, определяется следующим образом:

$$f_d^{\text{эфф.}} = \frac{\sigma_3 + 2\sigma_4 + \sigma_5 + 2\sigma_6}{\sigma_{\text{полн.}}} \quad \text{при } 10^3 \leq t \leq 10^6 \text{ с.} \quad /2.4/$$

В моменты времени $t > 10^6 \text{ с}$ большинство нейтронов, созданных при аннигиляции, распадается и практически не дает вклада в увеличение концентрации дейтерия. Следовательно, имеем

$$f_d^{\text{эфф.}} = \frac{\sigma_3 + \sigma_4}{\sigma_{\text{полн.}}} \quad \text{при } 10^6 \leq t \leq 10^{13} \text{ с.} \quad /2.5/$$

Знание эффективных выходов $f_d^{\text{эфф.}}$ и $f_{3\text{He}}^{\text{эфф.}}$ позволяет легко получить ограничения на долю антивещества R при использовании соотношений /1.3/-/1.4/. Необходимо подчеркнуть, что для решения проблемы антивещества важны не только абсолютные значения этих выходов, но также их отношение. Соотношение между различными эффективными выходами может дать информацию о том, могла ли поздняя аннигиляция /при $10^3 \leq t \leq 10^{13} \text{ с}$ / вообще иметь место в ранней Вселенной. С этой целью предположим, что количество дейтерия $x_d^{\text{анн}}$, образовавшееся при $\bar{p}{}^4\text{He}$ -аннигиляции, примерно равно наблюдаемой распространенности дейтерия $x_d^{\text{набл.}}$:

$$x_d^{\text{анн}} = x_d^{\text{набл.}} \quad /2.6/$$

*Более детальное определение величины t_d можно найти в /1.2/.

Такую возможность нельзя исключить, если принять во внимание неопределенность измеренного значения $x_d^{\text{набл.}}$, приведенного в таблице. Тогда, если окажется, что выход ${}^3\text{He}$ при $\bar{p}{}^4\text{He}$ -аннигиляции намного больше /скажем, на множитель ~ 100 /, чем $f_d^{\text{эфф.}}$, то возможность аннигиляции в ранней Вселенной должна быть определенно исключена. Дело в том, что если $f_{3\text{He}}^{\text{эфф.}} \gg f_d^{\text{эфф.}}$, то $\bar{p}{}^4\text{He}$ -аннигиляция привела бы к появлению слишком большого количества ${}^3\text{He}$, а это противоречит результатам астрономических наблюдений. Из приведенных в таблице данных можно получить следующее соотношение, характеризующее возможную, с точки зрения аннигиляции в ранней Вселенной, область значений отношения $f_d^{\text{эфф.}}$ к $f_{3\text{He}}^{\text{эфф.}}$:

$$0,89 \leq \frac{f_d^{\text{эфф.}}}{f_{3\text{He}}^{\text{эфф.}}} \leq \infty \quad /2.7/$$

Верхний предел в соотношении /2.7/ соответствует очень маленькому выходу ${}^3\text{He}$ в $\bar{p}{}^4\text{He}$ -аннигиляции:

$$f_{3\text{He}}^{\text{эфф.}} = 0.$$

В этом случае $\bar{p}{}^4\text{He}$ -аннигиляция не могла бы заметно повлиять на концентрацию ${}^3\text{He}$ и, таким образом, она не может быть исключена. Если же $f_d^{\text{эфф.}} / f_{3\text{He}}^{\text{эфф.}} < 0,89$, то либо в ранней Вселенной вообще не существовало антивещества, либо /что более точно/ предположение /2.6/ является неправильным и количество дейтерия, созданного при $\bar{p}{}^4\text{He}$ -аннигиляции, было меньше, чем его наблюдаемая распространенность. Последнее обстоятельство делает возможным получить, используя соотношение /1.4/, еще более сильное ограничение на относительное количество антивещества R в ранней Вселенной, поскольку в этом случае наблюдаемая распространенность $x_d^{\text{набл.}}$ в соотношении /1.4/ будет заменена на величину $x_d^{\text{анн}} \ll x_d^{\text{набл.}}$.

3. ИЗВЛЕЧЕНИЕ НУЖНОЙ ИНФОРМАЦИИ ИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ О $\bar{p}{}^4\text{He}$ -АННИГИЛЯЦИИ

Получение информации о сечениях всех каналов $\bar{p}{}^4\text{He}$ -аннигиляции /2.1/ представляет собой довольно сложную проблему. Однако можно попытаться изучить те ключевые реакции /2.1/, которые относительно легко идентифицировать и которые в то же время могут дать информацию, достаточную для того, чтобы сделать определенные выводы о возможности существования антивещества в ранней Вселенной. Такая программа может быть выполнена в рамках эксперимента PS-179 в ЦЕРНе на новом ускорительном комплексе LEAR /1.1/ в этом эксперименте используется гелиевая стримерная камера в магнитном поле. Для наших целей важно только то, чтобы в подготавливаемой экспериментальной установке можно было детектировать все заряженные частицы в конечном состоянии реакции.

Рассмотрим снова случай, когда желательнее измерить эффективный выход ${}^3\text{He}$. В соответствии с соотношением /2.3/ при этом необходимо в первую очередь выделить реакции /1/ и /2/ из всех остальных реакций. Однако в первом приближении можно предположить, что сечения σ_1 и σ_2 относятся одно к другому так же, как сечения взаимодействий на свободных нуклонах $\bar{p}n$ и $\bar{p}p$ соответственно, то есть

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \approx \frac{\sigma_{\bar{p}n}}{\sigma_{\bar{p}p}} = r. \quad /3.1/$$

В этом случае для получения величины $f_{3\text{He}}^{\text{эфф}}$ достаточно исследовать только реакцию /1/. Легко показать, что эта реакция будет зарегистрирована в стримерной камере как событие с четным числом лучей, тогда как все остальные реакции будут выглядеть как звезды с нечетным числом лучей /не считая, разумеется, упругого рассеяния антипротонов на гелии/.

Таким образом, измеряя полное сечение $\bar{p}{}^4\text{He}$ -аннигиляции /включая упругое рассеяние/ и идентифицируя реакцию /1/, можно определить выход ${}^3\text{He}$:

$$f_{3\text{He}} = \frac{\sigma_1 \left(1 + \frac{1}{r}\right)}{\sigma_{\text{полн.}}} \quad /3.2/$$

Подставляя эту величину в /1.3/, можно получить ограничение на относительное количество антивещества R в ранней Вселенной.

Ответ на другой астрофизический вопрос, касающийся самой возможности аннигиляции в ранней Вселенной, можно получить, как отмечалось в предыдущем разделе, определяя отношение выходов дейтерия и ${}^3\text{He}$ в $\bar{p}{}^4\text{He}$ -аннигиляции.

Из соотношений /2.4/ и /2.5/ следует, что для определения $f_d^{\text{эфф}}$ необходимо идентифицировать либо реакции /3/-/4/, либо реакции /3/-/6/. Однако при низких энергиях / $T_p^- < 28$ МэВ/, когда процессы безаннигиляционного развала ядра ${}^4\text{He}$ /такие как, например, $\bar{p}{}^4\text{He} \rightarrow \bar{p}{}^3\text{He}n$ / не происходят, для оценки $f_d^{\text{эфф}}$ может быть выполнена следующая процедура. Вместо выражения $(\sigma_3 + \sigma_4 + \sigma_5 + 2\sigma_6)$, которое стоит в числителе /2.4/, мы используем просто сумму $(\sigma_3 + \sigma_4 + \sigma_5 + \sigma_6) = \sigma_{3-6}$, которая фактически равна следующему:

$$\sigma_{3-6} = \sigma_{\text{полн.}} - \sigma_{\text{упр.}} - \sigma_1 \left(1 + \frac{1}{r}\right). \quad /3.3/$$

Таким образом, для $f_d^{\text{эфф}}$ можно получить нижний предел:

$$f_d^{\text{нижн.}} = \frac{\sigma_{3-6}}{\sigma_{\text{полн.}}} \quad /3.4/$$

Следовательно, из всех возможных процессов $\bar{p}{}^4\text{He}$ -аннигиляции в первом приближении достаточно измерить только реакцию /1/.

Итак, измерив $\sigma_{\text{полн.}}$, $\sigma_{\text{упр.}}$ и сечение только одного аннигиляционного канала σ_1 , можно оценить выход дейтерия и ${}^3\text{He}$. Уже эти результаты позволяют сделать ряд важных выводов о ранней Вселенной. Кроме того, они проясняют вопрос о необходимости дальнейшего детального изучения каналов /1/-/6/ $\bar{p}{}^4\text{He}$ -аннигиляции.

Грубую оценку величины отношения $f_d^{\text{эфф}}/f_{3\text{He}}^{\text{эфф}}$ можно получить, если предположить, что после $\bar{p}{}^4\text{He}$ -аннигиляции три оставшихся нуклона находятся в связанном состоянии, образуя ядра ${}^3\text{He}$ или ${}^3\text{H}$, а последующий развал этой трехнуклонной системы происходит только через $\pi{}^3\text{He}$ -или $\pi{}^3\text{H}$ -неупругое взаимодействие. Среднее число пионов $n_{\pi}^{\text{анн}}$, взаимодействующих с ядром-остатком, в случае $\bar{p}{}^4\text{He}$ -аннигиляции на тяжелых ядрах составляет $\sim 1,3-1,7^{12}$. Предположим, что в $\bar{p}{}^4\text{He}$ -аннигиляции $n_{\pi}^{\text{анн}} = 1$. Тогда, зная, что при средней энергии аннигиляционных пионов $E_{\text{ср.}} = 220$ МэВ отношение $\sigma_{\text{неуп.}}/\sigma_{\text{полн.}}$ в случае $\pi{}^3\text{He}$ -рассеяния составляет $\sim 0,7^{13}$, и используя соотношения /3.2/-/3.4/, можно получить следующее:

$$f_d^{\text{эфф}}/f_{3\text{He}}^{\text{эфф}} \sim 2,5.$$

Если же $n_{\pi}^{\text{анн}} = 0,5$, то $f_d^{\text{эфф}}/f_{3\text{He}}^{\text{эфф}} \sim 0,76$. Эти оценки, вообще говоря, дают некоторый нижний предел, и эффективный выход ${}^3\text{He}$ может оказаться только меньше. Видно, что он существенно зависит от величины $n_{\pi}^{\text{анн}}$.

Интересно отметить, что отношение выходов D и ${}^3\text{He}$ того же порядка величины наблюдалось при развале ядра ${}^4\text{He}$ пионами при энергии 120 МэВ / 14 / В работе / 14 / реакции с дейтерием в конечном состоянии не были обнаружены, и авторы представили аргументы, показывающие, что прямой выход дейтерия должен быть подавлен, то есть $f_d^{\text{эфф}}/f_{3\text{He}}^{\text{эфф}} \sim 0$. В случае "косвенного" образования дейтерия /см. выражение /2.4// это отношение оказывается равным

$$f_d^{\text{косв.}}/f_{3\text{He}} \sim 0,92.$$

Если такие отношения были бы получены в $\bar{p}{}^4\text{He}$ -аннигиляции, это означало бы /если справедливо предположение /2.6//, что на более поздней стадии развития Вселенной / $10^6 \leq t \leq 10^{13}$ с/ аннигиляции практически не было, тогда как в интервале $10^3 \leq t \leq 10^6$ с она могла происходить.

4. $\bar{p}{}^4\text{He}$ -АННИГИЛЯЦИЯ И ОГРАНИЧЕНИЯ НА КОНЦЕНТРАЦИЮ ГРАВИТИНО

Новые возможные источники антипротонов /по сравнению с рассмотренными в /1.2/ / на РД-стадии развития Вселенной появляются как космологические следствия суперсимметричных моделей великого

объединения. В таких моделях /см., например, /6/ спонтанное нарушение симметрии приводит к существованию нового фермиона, слабо взаимодействующего с веществом, - гравитино. Масса гравитино определяется масштабом нарушения суперсимметрии d /измеряется в ГэВ $\frac{2}{16-8}$ /:

$$m = d / m_{Pl}, \quad /4.1/$$

где $m_{Pl} = 10^{19}$ ГэВ - масса Планка. Согласно /8/ время жизни гравитино определяется величиной /в единицах $\hbar = c = 1$ /

$$\tau = k m_{Pl}^2 / m^3, \quad /4.2/$$

где k - число независимых сортов частиц, $k \sim 100$.

В классе суперсимметричных моделей великого объединения /8/ с большой величиной d /предсказывающих существование более чем одного гравитино/ масса гравитино велика, и в эволюции ранней Вселенной возможны стадии доминантности гравитино. На таких стадиях в соответствии с /4/ возможно образование первичных черных дыр /ПЧД/, которые могут испаряться на РД-стадии. Такое испарение является источником антипротонов, разрушающих ${}^4\text{He}$, поэтому все наше обсуждение и ограничения /1.3/ и /1.4/ применимы и в этом случае. Следовательно, можно получить ограничения на массу и концентрацию гравитино. Как показано в /4/, эти ограничения сильно зависят от амплитуды δ неоднородностей в ранней Вселенной

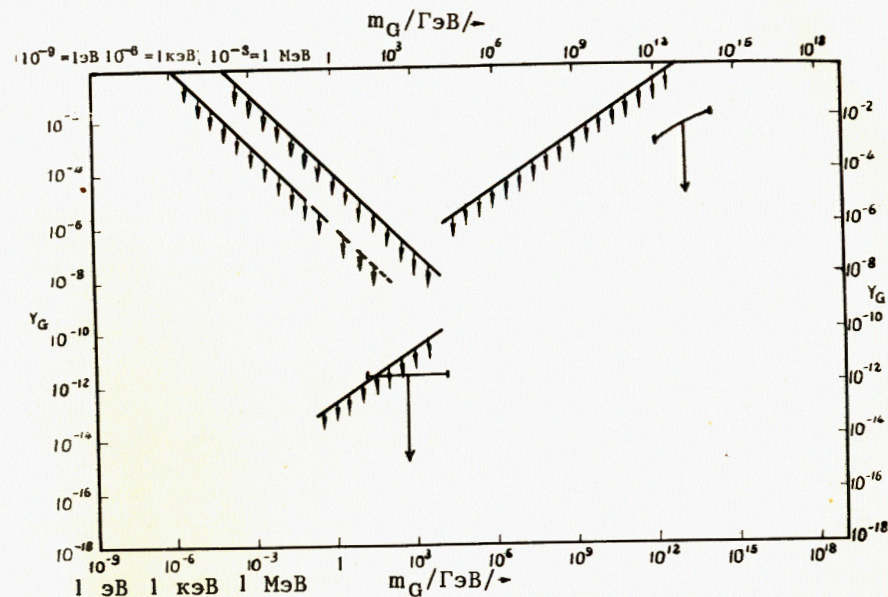
$$Y_g < 0,1 \delta^{-3/4} (m / m_{Pl})^{1/2}, \quad /4.3/$$

где Y_g - концентрация гравитино в ранней Вселенной. В /1,2/ показано, что ограничение на величину δ зависит от значения R /см. /1.1/-/1.2// следующим образом:

$$R = 10^{11} \delta^{13/2} (10^{-15} / \tau)^{1/2}.$$

Следовательно, если $\delta > (10^{-11} R)^{2/13} (\tau / 10^{-15})^{1/13}$, то ограничения на величину Y_g в интервале $10^{12} \leq m \leq 10^{14}$ ГэВ, следующие из данных по $\bar{p}^4\text{He}$ -аннигиляции, являются уникальными, их нельзя получить, используя какие-либо другие астрофизические аргументы /см. рисунок/.

В широко обсуждавшихся в последнее время суперсимметричных моделях великого объединения /см., например, /9/ / с геометрической иерархией масштабов нарушения калибровочной симметрии предсказываются намного меньшие массы гравитино /типичное значение массы составляет $m \sim 10^2 - 10^4$ ГэВ/. Из соотношения /4.2/ следует, что такие гравитино должны распадаться как раз во время РД-стадии при $t \leq 10^{13}$ с. Для того чтобы устранить слишком большую генерацию энтропии, возникающую при распаде таких гравитино,



Ограничения на концентрацию гравитино Y_g . Космологические ограничения на распространенность гравитино из работы /9/ показаны линиями с маленькими стрелками. Для двух интервалов массы гравитино - $10 \leq m_g \leq 10^4$ ГэВ и $10^{12} \leq m \leq 10^{14}$ ГэВ показаны пределы, которые можно получить при изучении $\bar{p}^4\text{He}$ -аннигиляции /линии с большими стрелками/. Предполагалось, что $f_d^{\text{эфф}} = 0,1$.

в работе /9/ был предложен механизм подавления их появления на де-ситтеровских стадиях в ранней Вселенной. Чтобы оценить величину такого подавления, надо получить ограничения на концентрацию гравитино. Оценим пределы концентрации соответствующих "легких" гравитино / $m_g \sim 10-10^4$ ГэВ/. Пусть величина

$$Y_g = n_g / n_\gamma \quad /4.4/$$

будет относительной концентрацией гравитино, где n_g - концентрация гравитино, а n_γ - плотность числа фотонов. Распады гравитино /например, на глюон и глюино/ являются источниками антипротонов:

$$g \rightarrow \bar{p} + p + \text{все остальное}. \quad /4.5/$$

Относительный выход антипротонов на один распад гравитино можно оценить, используя аналогию между процессом /4.5/ и процессом

$$e^+ + e^- \rightarrow \bar{p} + p + \text{все остальное}. \quad /4.6/$$

Экспериментальные и теоретические данные /15-17/ дают

$$\frac{\Gamma_{e^+e^-}}{\Gamma} = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \bar{p}p + \text{все остальное})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{все, что может быть})} \left\{ \begin{array}{l} 0,3-0,4 / 16/ \\ 0,6 / 15/ \end{array} \right. \quad /4.7/$$

Используя аналогию между /4.5/ и /4.6/, можно принять, что величина

$$\frac{\Gamma_{\bar{p}}}{\Gamma} = \frac{\Gamma(g \rightarrow \bar{p}p + \text{все остальное})}{\Gamma(g \rightarrow \text{все, что может быть})} \quad /4.8/$$

будет того же порядка, что и $\frac{\Gamma_{e^+e^-}}{\Gamma}$. Плотность числа антипротонов, которые образовались в ранней Вселенной от распадов гравитино, будет

$$n_{\bar{p}} = \frac{\Gamma_{\bar{p}}}{\Gamma} Y_g n_\gamma \quad /4.9/$$

Вводя $\Gamma_b = n_b / n_\gamma$, где n_b - плотность числа барионов, получаем

$$Y_g = R \Gamma_b / \Gamma_{\bar{p}} \quad /4.10/$$

где $R = n_{\bar{p}} / n_b$ - доля антивещества.

Ограничения /1.3/, /1.4/ дают в соответствии с /4.10/ пределы для величины Y_g , зависящие от $f_d^{\text{эфф}}$, $f_{\text{He}}^{\text{эфф}}$. На рисунке показаны ограничения на концентрацию гравитино при $f_d^{\text{эфф}} = 0.1$. Видно, что изучение $\bar{p}^4\text{He}$ -аннигиляции может привести к существенным ограничениям на концентрацию гравитино.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отметим, что грубая оценка относительного количества антивещества в ранней Вселенной R на основе результатов, которые могут быть получены при изучении $\bar{p}^4\text{He}$ -аннигиляции, дает

$$R \lesssim 10^{-3}$$

/предполагается, что все каналы аннигиляции имеют одинаковые сечения и $\sigma_{\text{упр}} = 0,5 \sigma_{\text{полн}}/$.

Единственными конкурирующими процессами, которые могут дать информацию об относительном количестве антивещества R в ранней Вселенной при $10^3 \leq t \leq 10^{13}$ с, являются те, которые приводят к искажению спектра реликтового излучения из-за аннигиляции в ранней Вселенной. Соответствующее ограничение, полученное на основе анализа спектра реликтового излучения, таково: $R \sim 1$.

Следовательно, исследование $\bar{p}^4\text{He}$ -аннигиляции позволит нам улучшить ограничения на возможное количество антивещества в ранней Вселенной $/10^3 \leq t \leq 10^{13}$ с/ на три порядка величины. В свою очередь, это позволит установить: определенные ограничения на параметры тех моделей великого объединения, которые предсказывают существование источников антивещества в ранней Вселенной. Исследование относительных выходов дейтерия или ^3He в $\bar{p}^4\text{He}$ -аннигиляции даст нам модельно независимую проверку возможности существования антивещества в ранней Вселенной и позволит установить строгие ограничения на концентрацию гравитино в ранней Вселенной.

Авторы выражают глубокую благодарность С.А.Бунятову, Я.Б.Зельдовичу, А.Д.Линде и Б.М.Понтекорво за интерес к этой работе и плодотворные дискуссии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chechetkin V.M. et al. JINR, E2-82-386, Dubna, 1982.
2. Chechetkin V.M. et al. Phys.Lett., 1982, 118B, p.329.
3. Stecker F. Tenth Texas Symp. on Relativistic Astrophysics. Texas, 1981, p.32.
4. Khlopov M.Yu., Polnarev A.G. Phys.Lett., 1980, B97, p.383; Khlopov M.Yu., Polnarev A.G. In: Very Early Universe. (Eds. G.Gibbons, S.W.Hawking, S.Siklos). Cambridge, 1982.
5. Kuzmin V.A., Shaposhnikov M.E., Tkachev I.I. Phys.Lett., 1981, 105B, p.167.
6. Deser S., Zumino B. Phys.Rev.Lett., 1977, 38, p.1433.
7. Weinberg S. Phys.Rev.Lett., 1982, 48, p.1303.
8. Ellis J. et al. Phys.Lett., 1982, 113B, p.283.
9. Ellis J., Linde A.D., Nanopoulos D. Preprint CERN-TH-3356, Geneva, 1982.
10. Austin S.M. Progr.in Part.Nucl., 1981, 7, p.1.
11. Balestra F. et al. Proposal CERN/PSCC/80-78, Geneva, 1980.
12. Barkas W.H. et al. Phys.Rev., 1957, 105, p.1037.
13. Falomkin I.V. et al. Nuovo Cim., 1980, 57A, p.111.
14. Balestra F. et al. Nucl.Phys., 1980, A340, p.372.
15. Goldhaber G., Weiss Y. Proc.Conf."Particles and Fields-1981". Santa-Cruz, N.Y., 1982.
16. Wu S.L. Proc.Conf. "Particles and Fields-1981". Santa-Cruz, N.Y., 1982.
17. Азимов Я.А., Докшицер Ю.Л., Хозэ В.А. ЯФ, 1983, 37, с.703.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 мая 1983 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

| | | |
|---------------|---|------------|
| D3-11787 | Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978. | 3 р. 00 к. |
| D13-11807 | Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978. | 6 р. 00 к. |
| | Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/ | 7 р. 40 к. |
| D1,2-12036 | Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978 | 5 р. 00 к. |
| D1,2-12450 | Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978. | 3 р. 00 к. |
| | Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/ | 8 р. 00 к. |
| D11-80-13 | Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979 | 3 р. 50 к. |
| D4-80-271 | Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979. | 3 р. 00 к. |
| D4-80-385 | Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980. | 5 р. 00 к. |
| D2-81-543 | Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981 | 2 р. 50 к. |
| D10,11-81-622 | Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980 | 2 р. 50 к. |
| D1,2-81-728 | Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981. | 3 р. 60 к. |
| D17-81-758 | Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981. | 5 р. 40 к. |
| D1,2-82-27 | Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981. | 3 р. 20 к. |
| P18-82-117 | Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981. | 3 р. 80 к. |
| D2-82-568 | Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982. | 1 р. 75 к. |
| D9-82-664 | Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982. | 3 р. 30 к. |
| D3,4-82-704 | Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982. | 5 р. 00 к. |

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Балестра Ф. и др. 1-83-338
Аннигиляция $\bar{p}^4\text{He}$ при низких энергиях
и ее связь с проблемами современной космологии
и моделями великого объединения

Показано, что изучение $\bar{p}^4\text{He}$ -аннигиляции может привести к ограничениям на возможное количество антивещества в ранней Вселенной и на другие важные космологические параметры. Обсуждается, какие каналы $\bar{p}^4\text{He}$ -аннигиляции должны быть измерены и какие ограничения на параметры теории великого объединения и суперсимметричных моделей могут быть получены исходя из эффективных выходов различных элементов в процессе $\bar{p}^4\text{He}$ -аннигиляции.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Balestra F. et al. 1-83-338
Low Energy $\bar{p}^4\text{He}$ Annihilation
and Problems of the Modern Cosmology,
GUT and SUSY Models

It has been shown that information on $\bar{p}^4\text{He}$ annihilation may impose limits on the possible amount of antimatter in the early Universe and other important cosmological parameters. We discuss which channels of $\bar{p}^4\text{He}$ annihilation must be measured and what restrictions on the parameters of GUT and SUSY models may be obtained from knowledge of the effective yields of different elements in $\bar{p}^4\text{He}$ annihilation.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод авторов.