

ОГРАНИЧЕНИЕ НА КОЛИЧЕСТВО АНТИВЕЩЕСТВА
В РАННЕЙ ВСЕЛЕННОЙ ИЗ ДАННЫХ
ПО ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ АНТИПРОТОНОВ С ${}^4\text{He}$

Ю.А.Батусов, С.А.Бунятов, Ф.Никитиу, Д.Б.Понтекорво,
М.Г.Сапожников, И.В.Фаломкин
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Ф.Балестра, М.П.Бусса, Л.Буссо, Л.Ферреро, Дж.Джервино,
Д.Панзиери, Г.Пираджино, Ф.Тоселло
Институт общей физики Туринского университета, Италия

Дж.Бендишоли, В.Филиппини, Э.Лоди Риццини, А.Ротонди,
А.Зеноне
Факультет ядерной физики и теории, Университет, Павия,
Италия

К.Гуаральдо, А.Маджиора
Национальная лаборатория, Фраскати, Италия

М.Васкон, Дж.Занелла
Физический факультет университета, Падуя, Италия

М.Ю.Хлопов
Институт прикладной математики АН СССР, Москва

На ускорителе LEAR в ЦЕРНе измерено сечение выхода ${}^3\text{He}$ во взаимодействии антипротонов с ${}^4\text{He}$ при энергиях 20, 50 и 180 МэВ. Анализ экспериментальных данных позволил получить ограничение на количество антивещества в ранней Вселенной $10^3 \leq t \leq 10^{13} \text{c}$ / $R = \frac{n_{\bar{p}}}{n_p} \leq 10^{-8}$.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Restriction on the Antimatter Amount in the Early Universe Based on Data on the Interaction of Antiprotons with ${}^4\text{He}$

Yu.A.Batusov et al.

The cross section for ${}^3\text{He}$ production in antiproton interaction with ${}^4\text{He}$ has been measured at the LEAR facility of CERN at antiproton energies of 20, 50 and 180 MeV. An analysis of the obtained experimental results permits to impose the following rest-

restriction on the amount of antimatter in the early Universe $10^3 \leq t \leq 10^{13} \text{ s}$ / $R = n_{\bar{p}}/n_p \leq 0.7-1.1 / 10^{-8}$.

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

Стандартная барион-асимметричная модель Вселенной исключает возможность существования во Вселенной значительных количеств антивещества начиная с момента времени $t > 10^{-8} \text{ с}$ от начала расширения Вселенной /см., напр., /1,2//. С другой стороны, современная астрофизика, а также теории великого объединения взаимодействий элементарных частиц предсказывают возможность существования в ранней Вселенной некоторых источников антивещества. Ими могут быть распады сверхтяжелых метастабильных частиц /типа гравитино/, испарение первичных черных дыр, а также домены антивещества - области с избытком отрицательного барионного заряда, существование которых предсказывается некоторыми моделями великого объединения /обзор свойств возможных источников антивещества в ранней Вселенной дан в /3//. К настоящему времени такие источники антивещества могли полностью исчезнуть, проаннигилировав с обычным веществом, однако последствия такой аннигиляции могут быть довольно значительны и, в принципе, могут поддаваться обнаружению.

Так, например, хорошо известно, что вторым по распространенности элементом во Вселенной является ${}^4\text{He}$ /относительная концентрация ${}^4\text{He}$ по массе $X_{4\text{He}}$ составляет величину $X_{4\text{He}} = 0,23 \pm 0,02$ /5//. В работе /4/ обращено внимание на то, что антипротоны от источников антивещества могли бы аннигилировать с ${}^4\text{He}$ с образованием дейтерия и ${}^3\text{He}$. Так как концентрации дейтерия и ${}^3\text{He}$ во Вселенной на 4 порядка меньше, чем ${}^4\text{He}$, то достаточно небольшой доле ${}^4\text{He}$ / $\sim 10^{-4}$ / испытать развал в результате аннигиляции с антипротонами, чтобы образовать все наблюдаемое сегодня обилие дейтерия и ${}^3\text{He}$ во Вселенной.

В первом приближении количество ${}^3\text{He}$ $\Delta n_{3\text{He}}$, образуемое в результате $\bar{p} - {}^4\text{He}$ -взаимодействия в ранней Вселенной

/ $t > 10^3 \text{ с}$ /, должно быть

$$\Delta n_{3\text{He}} = n_{4\text{He}} \cdot R \cdot f_{3\text{He}}^{\text{eff}}, \quad //1/$$

где n_{He}^4 - концентрация ${}^4\text{He}$, $R = n_{\bar{p}}/n_p$ - доля антивещества в ранней Вселенной, а $f_{\text{He}}^{\text{eff}}$ - эффективный выход ${}^3\text{He}$ в \bar{p} - ${}^4\text{He}$ -взаимодействии.

Предполагая, что в результате \bar{p} - ${}^4\text{He}$ -взаимодействия не может образоваться больше ${}^3\text{He}$, чем его количество, наблюдаемое в настоящее время во Вселенной

$$X_{\text{He}}^3 \geq \Delta n_{\text{He}}^3 \cdot m_{\text{He}}^3 \quad /2/$$

/где $X_{\text{He}}^3 = /4,2+2,8/ \cdot 10^{-5} /5/$ - наблюдаемая концентрация ${}^3\text{He}$ по массе/, можно получить из /1/ следующее ограничение на долю антивещества R в ранней Вселенной:

$$R < \frac{4}{3} \frac{X_{\text{He}}^3}{X_{\text{He}}^4 \cdot f_{\text{He}}^{\text{eff}}} \quad /3/$$

Единственной неизвестной величиной в соотношении /3/ является эффективный выход ${}^3\text{He}$ $f_{\text{He}}^{\text{eff}}$ в \bar{p} - ${}^4\text{He}$ -взаимодействии.

Мы выполнили измерения величины $f_{\text{He}}^{\text{eff}}$ на антипротонном пучке кольца LEAR в ЦЕРНе при трех значениях импульса налетающих антипротонов: 200, 300 и 600 МэВ/с.

Подробное описание экспериментальной аппаратуры приведено в /6/, поэтому здесь мы напомним только основные характеристики экспериментальной установки.

Мишенью и одновременно детектором \bar{p} - ${}^4\text{He}$ -взаимодействия являлась стримерная камера, работающая в самошунтирующем режиме и наполненная гелием до давления 1 атм. Чувствительный объем камеры составлял $70 \times 90 \times 18$ см³. Камера была помещена в магнитное поле $B = 0,415$ Т и 0,63 Т. Прозрачность мишени составляла 15 мг/см². Запуск камеры осуществлялся от сигнала триггерной системы, которая состояла из сцинтилляционных счетчиков, расположенных перед камерой, и счетчика антисовпадений, стоящего позади нее. Если антипротон вошел в камеру и отклонился в результате любого взаимодействия с веществом камеры на угол, больший 5° от направления пучка, то такое событие регистрировалось.

Радиус антипротонного пучка, входящего в камеру, составлял 1 см. Характерной особенностью антипротонного пучка LEAR является полное отсутствие в нем примесей мезонов. С учетом потери энергии в тонких стенках камеры и сцинтилляционных счетчиках пучка значения кинетической энергии антипротонов, при которых производились измерения, были следующими: 179,6; 48,7 и 19,6 МэВ, что соответствует таким импульсам антипротона в лабораторной системе: 607,7; 306,2 и 192,8 МэВ/с.

Для измерений были отобраны только события, которые произошли в центральной части камеры длиной 55 см. Для определения выхода ${}^3\text{He}$ использовалось следующее важное обстоятельство: реакции с ${}^3\text{He}$ в конечном состоянии являются единственными процессами $\bar{p}{}^4\text{He}$ -аннигиляции, дающими четное число треков заряженных частиц. Все остальные реакции $\bar{p}{}^4\text{He}$ -аннигиляции выглядят в стримерной камере как события с нечетным числом треков в конечном состоянии. Поэтому сечение образования ${}^3\text{He}$ можно определить путем простого подсчета числа событий с четным числом треков. Эффективность нахождения события $\bar{p}{}^4\text{He}$ -взаимодействия при просмотре составляла 99,5%. Систематическая ошибка за счет неопределенностей в знании точной толщины мишени, мониторе пучка и эффективности определения числа треков у события взаимодействия составляет по нашим оценкам 2,5%.

Подчеркнем, что экспериментальные условия для правильного определения числа лучей были достаточно хорошими. Короткое время памяти стримерной камеры позволило иметь на одном кадре только одно событие взаимодействия. В камере эффективно регистрировались низкоэнергетические частицы. Для примера скажем, что трек α -частицы с энергией 0,31 МэВ или протона с энергией 0,17 МэВ имеет в камере длину 1 см и хорошо виден.

В таблице дана сводка полученных экспериментальных результатов. Надо отметить, что в выражение /3/ для оценки доли антивещества R входит значение эффективного выхода ${}^3\text{He}$

$$f_{3\text{He}}^{\text{eff}} = f_{3\text{He}} + f_{3\text{H}}, \quad /4/$$

где

$$f_{3\text{He}({}^3\text{H})} = \frac{\sigma(\bar{p} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^3\text{He}({}^3\text{H}) + X)}{\sigma_{\text{tot}}}. \quad /5/$$

Необходимость учитывать образование трития $f_{3\text{H}}$ вызвана тем, что в результате $\bar{p}{}^4\text{He}$ -аннигиляции во Вселенной должен образовываться не только ${}^3\text{He}$, но и тритий, который впоследствии распадается в ${}^3\text{He}$, тем самым увеличивая концентрацию ${}^3\text{He}$ во Вселенной.

Величина полного сечения σ_{tot} $\bar{p}{}^4\text{He}$ -взаимодействия была определена из расчетов по стандартной модели Глаубера, применимость которой для случая антипротон-ядерного рассеяния подробно проанализирована в /7/. Глауберовский расчет удовлетворительно описывает величину полного сечения неупругих реакций $\sigma_R = \sigma_{\text{tot}} - \sigma_{\text{el}}$, разность между экспери-

Таблица

Сечения выхода ${}^3\text{He}$ в $\bar{p}{}^{-4}\text{He}$ -взаимодействии. Ограничения на количество антивещества $R = n_{\bar{p}}/n_p$ в ранней Вселенной

Кинетическая энергия антипротона	Сечение выхода ${}^3\text{He}$	Относительный выход ${}^3\text{He}$	Относительный выход ${}^3\text{H}$	$\sigma_{\bar{p}n}^{\text{tot}}/\sigma_{\bar{p}p}^{\text{tot}}$	Эффективный выход ${}^3\text{He}$	Ограничение на количество антивещества $R = \frac{n_{\bar{p}}}{n_p}$
$T_{\bar{p}}$	$\sigma_{{}^3\text{He}}$	$f_{{}^3\text{He}}$	$f_{{}^3\text{H}}$	$\Gamma = \frac{\sigma_{\bar{p}n}^{\text{tot}}}{\sigma_{\bar{p}p}^{\text{tot}}}$	$f_{{}^3\text{He}}^{\text{eff}} = f_{{}^3\text{He}} + f_{{}^3\text{H}}$	$R = \frac{n_{\bar{p}}}{n_p}$
/МэВ/	/мб/					
19,6	93,2 \pm 7,9	0,136 \pm 0,012	0,190 \pm 0,016	0,716	0,326 \pm 0,020	7,47 10
48,7	58,6 \pm 4,0	0,118 \pm 0,008	0,152 \pm 0,010	0,776	0,270 \pm 0,013	9,02 10
179,6	35,7 \pm 2,8	0,101 \pm 0,008	0,118 \pm 0,009	0,857	0,219 \pm 0,012	1,11 10

ментальным значением и теоретической величиной составляет 8-14%.

Выход трития $f_{{}^3\text{H}}$ был рассчитан в предположении о том, что отношение между выходами ${}^3\text{He}$ и ${}^3\text{H}$ такое же, как в элементарном акте $\bar{p}p$ - и $\bar{p}n$ -взаимодействия

$$\Gamma = \frac{\sigma_{\bar{p}n}^{\text{tot}}}{\sigma_{\bar{p}p}^{\text{tot}}} \sim \frac{\sigma_{{}^3\text{He}}}{\sigma_{{}^3\text{H}}} \quad /6/$$

Полные сечения $\bar{p}p$ -взаимодействия брались из результатов недавнего эксперимента ^{/8/}, а величины $\sigma_{\bar{p}n}^{\text{tot}}$ мы определяли из результатов измерений $\bar{p}d$ полного сечения ^{/9/}, используя глауберовское значение для поправки на экранирование нейтрона в дейтроне.

Окончательное значение допустимой доли антипротонов в ранней Вселенной, рассчитанное по формуле /3/, приведено в последней колонке таблицы. Объединяя результаты, полученные при трех энергиях, можно заключить, что

$$R = n_{\bar{p}}/n_p < (0,7 - 1,1) \cdot 10^{-8} \quad /7/$$

Если бы в ранней Вселенной отношение $R = n_{\bar{p}}/n_p$ было бы больше чем 10^{-8} , то это привело бы к "пере \bar{p} роизводству" ${}^3\text{He}$, его концентрация была бы больше, чем наблюдаемая.

Полученное ограничение является верхним пределом для величины R . В настоящей работе мы рассматриваем развал ${}^4\text{He}$ только под действием антипротонов. В принципе, существуют такие источники антивещества, которые генерируют пары протон-антипротон, причем энергия протона достаточно большая, чтобы развалить ядро ${}^4\text{He}$. Однако ясно, что учет таких процессов будет приводить к увеличению вели-

чины эффективного выхода $f_{\text{He}}^{\text{eff}}$ и, следовательно, /см. соотношение /3//, величина R может только уменьшиться.

Подчеркнем, что полученная нами оценка на величину R является единственным экспериментальным ограничением на количество антивещества в ранней Вселенной в период $10^9 \leq t \leq 10^{13}$ с от начала расширения. Имевшиеся ранее оценки на возможную величину R , которые были сделаны из анализа данных по планковскому характеру спектра реликтового излучения, позволяли заключить лишь, что $R < 1/10,3/$.

Знание верхнего предела для R позволяет наложить сильные ограничения на плотность в ранней Вселенной первичных черных дыр, на концентрацию сверхтяжелых метастабильных частиц /например, на концентрацию гравитино с массой $\sim 10^2$ ГэВ/, а также на целый ряд других параметров источников антивещества в ранней Вселенной.

Авторы выражают большую благодарность Я.Б.Зельдовичу, Б.М.Понтекорво, которые инициировали проведение этого эксперимента, а также В.П.Джелепову за помощь и поддержку данного направления исследований. Авторы благодарят Л.А.Кондратюка за помощь в расчетах сечений $\bar{p}^4\text{He}$ -взаимодействия.

Литература

1. Steigman G. Ann.Rev.Astron.Astroph., 1976, 14, p.339.
2. Зельдович Я.Б., Новиков И.Д. Строеение и эволюция Вселенной. "Наука", М., 1975.
3. Chechetkin V.M., Khlopov M.Yu., Sapozhnikov M.G. Riv.Nuov.Cim., 1982, 5, No.10, p.1.
4. Chechetkin V.M. et al. Phys.Lett., 1982, 118B, p.329.
5. Austin S.M. Prog.Part. and Nucl.Phys., 1981, 7, p.1.
6. Akimov Yu.K. et al. Report LNF, No.84/20(P), Frascati, 1984.
7. Кондратюк Л.А., Шматиков М.Ж. ЯФ, 1983, 38, с.361.
8. Beard C.I. et al. CERN preprint, EP/84-140, Geneva, 1984.
9. Hamilton R. et al. Phys.Rev.Lett., 1980, 44, p.1182.
10. Sunyaev R.A., Zeldovich Ya.B. Astr.Space Sci., 1970, 7, p.20.

Рукопись поступила 1 февраля 1985 года.

ПОПРАВКА

к статье Ю.А.Батусова и др. "Ограничение на количество анти-вещества в ранней Вселенной из данных по взаимодействию антипротонов с ${}^4\text{He}$ ". (Краткие сообщения ОИЯИ, №6-85, 1984, с.11). В последней колонке таблицы (с.15) следует читать:

$$7,47 \cdot 10^{-4}$$

$$9,02 \cdot 10^{-4}$$

$$1,11 \cdot 10^{-3}$$