Письма в ЖЭТФ, том 93, вып. 11, с. 704 – 708

Верхний предел на поток антигелия в первичных космических лучах

А. Г. Майоров[1)1], *А. М. Гальпер*[1], *О. Адриани*[2], *Г. А. Базилевская*[3], *Дж. Барбарино*[4], *Р. Белотти*[5], *М. Боецио*[6], *Э. А. Богомолов*[7], *В. Бонвичини*[6], *М. Бонджи*[2], *Л. Бонеки*[2], *С. В. Борисов*[1,8], *С. Боттаи*[2], *А. Бруно*[5], *С. Вакки*[6], *Е. Вануччини*[2], *Г. И. Васильев*[7], *С. А. Воронов*[1], *Ю. Ву*[9], *И. А. Данильченко*[1], *В. Джиллард*[9], *Дж. Джерси*[8], *Дж. Зампа*[6], *Н. Зампа*[6], *В. Г. Зверев*[1], *М. Казолино*[8], *Д. Кампана*[4], *Р. Карбоне*[4], *А. В. Карелин*[1], *П. Карлсон*[9], *Дж. Кастеллини*[10], *Ф. Кафанья*[5], *А. Н. Квашнин*[3], *С. В. Колдашов*[1], *С. А. Колдобский*[1], *С. Ю. Крутков*[7], *А. А. Леонов*[1], *В. В. Малахов*[1], *В. Мальвецци*[8], *Л. Марчелли*[8], *В. Менн*[11], *В. В. Михайлов*[1], *Э. Мокьютти*[6], *Н. Мори*[2], *Н. В. Никонов*[8,6], *Дж. Остерия*[4], *С. Пизолотто*[6], *П. Папини*[2], *М. П. Де Паскале*[8], *П. Пикоцца*[8], *М. Пирс*[9], *М. Риччи*[12], *С. Риччиарини*[2], *М. Ф. Рунцо*[1], *М. Симон*[11], *Н. Де Симоне*[8], *Р. Спарволи*[8], *П. Спилантини*[2], *Ю. И. Стожков*[3], *В. Ди Феличе*[8], *Ю. Т. Юркин*[1]

[1]*Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 115409 Москва, Россия*

[2]*INFN, Structure of Florence and Physics Department of University of Florence, 50019 Florence, Italy*

[3]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия*

[4]*INFN, Structure of Naples and Physics Department of University of Naples Federico II", 80126 Naples, Italy*

[5]*INFN, Structure of Bari and Physics Department of University of Bari, 70126 Bari, Italy*

[6]*INFN, Structure of Trieste, 34012 Trieste, Italy*

[7]*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 С.-Петербург, Россия*

[8]*INFN, Structure of Rome Tor Vergata" and Physics Department of University of Rome Tor Vergata", 00133 Rome, Italy*

[9]*KTH, Department of Physics, 10691 Stockholm, Sweden*

[10]*IFAC, Sesto Fiorentino, 50019 Florence, Italy*

[11]*Physics Department of Universitat Siegen, 57068 Siegen, Germany*

[12]*INFN, Laboratori Nazionali di Frascati, Via Enrico Fermi 40, 00044 Frascati, Italy*

Поступила в редакцию 25 апреля 2011 г.

Одним из важнейших вопросов космологии является объяснение наблюдаемой барионной асимметрии, т.е. практически полного отсутствия антивещества в видимой части Вселенной. Ее реальное значение можно установить прямыми измерениями потоков антиядер с зарядом $|Z| \geq 2$ в первичных космических лучах в окрестностях Земли. Настоящая работа посвящена поиску антигелия по данным, полученным при проведении космического эксперимента ПАМЕЛА с июня 2006 г. по декабрь 2009 г. энергетическом диапазоне от 0.6 до 600 ГВ не обнаружено событий с зарядом -2. Приводится верхний предел отношения потоков антигелия и гелия $\overline{\mathrm{He}}/\mathrm{He}$ в зависимости от энергии. Интегральный верхний предел, равный $4.7 \cdot 10^{-7}$, является наиболее низким при энергиях больше 14 ГВ.

Возможное объяснение наблюдаемой барионной асимметрии во Вселенной было дано А.Д. Сахаровым, сформулировавшим три необходимых условия ее образования [1]: отсутствие закона сохранения барионного заряда; отличие частиц от античастиц, проявляющееся в нарушении CP-инвариантности; нестационарные условия при отсутствии локального термодинамического равновесия. Величину асимметрии принято определять как $\Delta_B = (n_B - n_{\overline{B}})/s$, где n_B, $n_{\overline{B}}$ – плотности чисел барионов и антибарионов, s – энтропия Вселенной. Ее оценка получена из измерений барион-фотонного отношения η_B ($\Delta_B \simeq 0.14\eta_B$), извлеченного из распространенности первичных элементов во Вселенной и из измерений анизотропии реликтового излучения. Другой способ заключается в прямых измерениях потоков антиядер в первичных космических лучах.

1)e-mail: mayorov.andr@gmail.com

Наиболее распространенными антиядрами являются антипротоны. Однако они могут быть относительно легко рождены в процессе взаимодействия космических лучей высоких энергий с межзвездным газом и, следовательно, иметь вторичное происхождение [2, 3].

В 1970 г. на ускорителе ИФВЭ впервые был обнаружен антигелий-3 [4], а в 2011 г. на Брукхейвенском ускорителе – антигелий-4 [5]. Очевидно, что они также могут образовываться в результате взаимодействий космических лучей, но их количество столь мало, что его отношение к ядрам гелия не превышает 10^{-12}–10^{-14} [6–8] (для сравнения, отношение $\overline{p}/p \sim 10^{-5}$).

Обнаружение количеств антигелия выше этого значения будет свидетельствовать о существовании доменов антиматерии в форме, например, двойных звезд, шаровых скоплений антизвезд [9], антигалактик и др. Их образование не исключается в моделях Великого Объединения и требует небольших модификаций условий Сахарова [10, 11].

С июня 2006 г. по настоящее время на борту ИСЗ "Ресурс-ДК1 № 1" проводится эксперимент ПАМЕЛА [12], основной задачей которого является изучение потоков галактических космических лучей с акцентом на античастицы, в том числе поиск антиядер гелия. Схема прибора, в основе которого лежит магнитный спектрометр, показана на рис. 1. Она включает следующие детекторные системы:

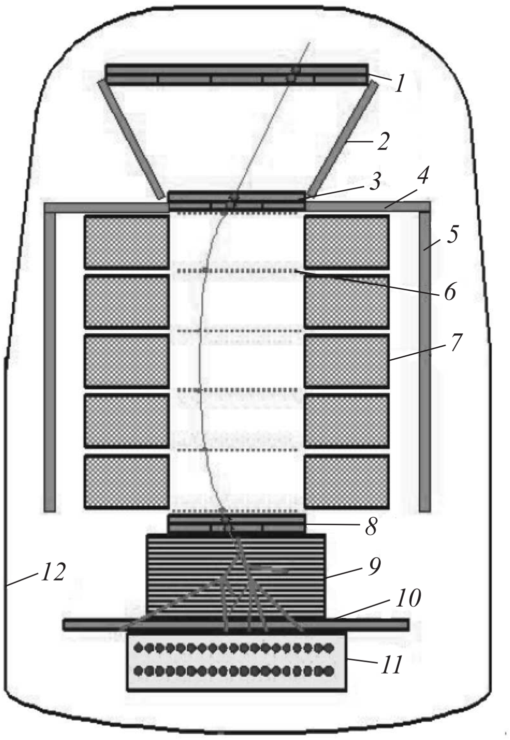

Рис. 1. Научная аппаратура ПАМЕЛА. *1*, *3*, *8* – времяпролетная система; *2*, *4*, *5* – система антисовпадений; *6* – координатная трековая система (трекер); *7* – постоянный магнит; *9* – координатно-чувствительный калориметр; *10* – сцинтилляционный ливневый детектор; *11* – нейтронный детектор; *12* – гермоконтейнер

- *времяпролетная система* (ВПС) состоит из шести слоев сцинтилляционных счетчиков, разделенных на полосы и сгруппированных попарно в три плоскости так, что полосы в каждой паре расположены взаимно перпендикулярно. Времяпролетная система позволяет определять направление прилета и измерять скорость частицы β, а также служит триггером для начала получения информации со всех детекторных систем;

- *координатная трековая система (трекер)* состоит из 6 двусторонних (проекции X и Y) плоскостей кремниевых координатно-чувствительных стриповых детекторов, расположенных между секциями постоянного магнита, создающего поле напряженностью 0.43 Т. Трекер позволяет измерять координаты траектории частицы в двух проекциях и по ним определять жесткость R проходящей частицы (отношение импульса к заряду);

- *координатно-чувствительный калориметр* состоит из вольфрамовых пластин с размещенными между ними координатными стриповыми детекторами. Он позволяет измерять энергию взаимодействующих в нем частиц, а также одновременно служит для их идентификации;

- *система антисовпадений* предназначена для исключения из анализа событий, пришедших вне апертуры прибора;

- *нижний сцинтилляционный ливневый детектор* используется для выработки триггера при взаимодействии в калориметре высокоэнергетичных частиц;

- *нейтронный детектор* служит для регистрации нейтронов, возникающих во взаимодействиях в калориметре, и, как следствие, для разделения лептонов и адронов.

Все детекторы, кроме нейтронного, позволяют измерять ионизационные потери. Такого набора детекторов достаточно для определения знака и величины заряда, скорости, массы и энергии частиц.

Первичные космические лучи выделяются условием $R > 1.05R_{\mathrm{C}}$, где R_{C} – локальная жесткость (отношение импульса к заряду в системе единиц $\hbar = c = 1$) геомагнитного обрезания в месте регистрации события.

При выделении событий, прошедших в апертуре прибора, для которых можно измерить жесткость и скорость, используются следующие критерии отбора: в магнитном спектрометре восстановлена только одна траектория, не касающаяся магнита, имеется не более одной сработавшей полосы в верхних счетчиках ВПС и отсутствует сигнал в верхних счетчиках системы антисовпадений.

Эти критерии не зависят от знака заряда частиц.

Для отбора событий с зарядом $|Z| = 2$ использовались распределения средних ионизационных потерь частиц вдоль трека в детекторах трекера в зависимости от измеренной жесткости (рис. 2). Область,

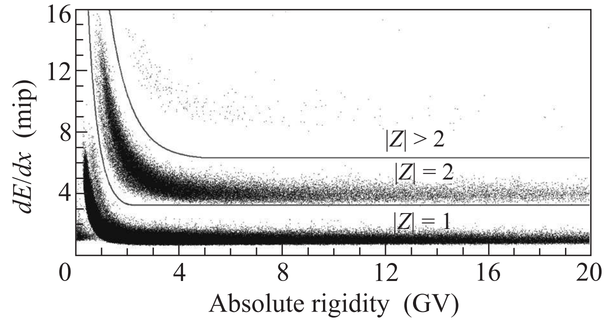

Рис. 2. Выделение ядер гелия среди всех событий по зависимости средних ионизационных потерь в трекере от измеренной жесткости

ограниченная линиями, содержит 99% полезных событий. При этом позитроны, протоны, дейтоны, тритоны или ядра с $Z > 2$ не могут имитировать ядра гелия с вероятностью больше чем 10^{-6} во всем диапазоне энергий. Электроны или антипротоны, поток которых в сотни раз меньше потока протонов, тем более не могут имитировать частицы с зарядом -2.

Для выделения антигелия отобраны частицы с отрицательным знаком кривизны траектории. Для проверки правильности его определения были применены следующие дополнительные условия выбора событий.

1. *Определение направления движения частиц.* Использование ВПС позволяет выделять события, попадающие в прибор из зенитного направления ξ. На рис. 3 приведено экспериментальное распределение по величине ξ/β, построенное для протонов и ядер ге-

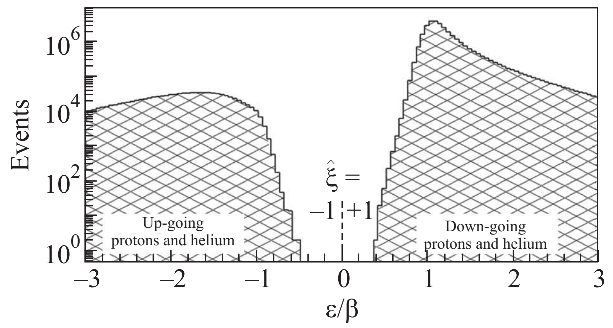

Рис. 3. Распределение ξ/β для протонов и ядер гелия

лия. Отсутствие перемешивания между частицами, летящими в прямом ($\xi = +1$) и обратном ($\xi = -1$) направлениях, означает, что оно измеряется с ошибкой меньше 10^{-9}.

2. *Рассеяния в трекере.* Для исключения событий с неправильно измеренными жесткостью и, возможно, знаком заряда из-за рассеяния в одной из внутренних плоскостей трекера применен следующий отбор:

(а) траектория, восстановленная по трекеру, проходит через стрип первой плоскости калориметра с ненулевым энерговыделением;

(б) коэффициенты асимметрии в измерении жесткости с использованием различных частей траектории внутри магнита: $A = (R_1 - R_2)/(R_1 + R_2)$, где R_1 – жесткость частицы, измеренная по первым точкам вдоль траектории (последняя точка исключена), R_2 – жесткость, измеренная по последним точкам (исключена первая точка), и $C = (R_1' - R_2')/(R_1' + R_2')$, где R_1' и R_2' – жесткости, вычисленные по первым трем и последним трем точкам вдоль траектории, близки к 0;

(в) ограничение на размер кластера (состоит из сработавших при прохождении частицы стрипов) в каждой плоскости трекера. Чем меньше размер кластера, тем точнее определяется импульс;

(г) ограничение на количество сигналов, не используемых при выделении единственного трека. Они могут инициироваться δ-частицами, возникшими при взаимодействии влетевшей частицы с веществом трекера, или быть шумами. В любом случае это влияет на неоднозначность проведения траектории;

(д) отбор событий со значением импульса, меньшим максимально допустимой измеряемой жесткости в 2 раза. Она определена как верхний предел на способность спектрометра измерять жесткость. При этом ошибка ее измерения (из-за ограниченного пространственного разрешения трековой системы и конечной напряженности магнитного поля) равна 100%.

Энергетический диапазон работы спектрометра разделен на эквидистантные интервалы в логарифмическом масштабе, в каждом из которых проведен анализ событий с отрицательной жесткостью.

В интервале жесткостей от 0.6 до 600 ГВ отобрано около 6.330.000 событий с зарядом $|Z| = 2$ и ни одного события с отрицательной жесткостью не обнаружено. В этом случае можно только оценить верхний предел на отношение $\overline{\mathrm{He}}/\mathrm{He}$, который с 95-процентной доверительной вероятностью дается выражением:

$$\frac{N_{\overline{\mathrm{He}}}(R_i;R_f)}{N_{\mathrm{He}}(R_i;R_f)} < \frac{3}{\int\limits_{R_i}^{R_f} F(R)dR} =$$

$$= \frac{3}{\int\limits_{R_i}^{R_f} \frac{dN'_{\mathrm{He}}(R)}{dR}dR} \frac{\epsilon_{\mathrm{He}}(R_i;R_f)}{\epsilon_{\overline{\mathrm{He}}}(R_i;R_f)},$$

где $N_{\mathrm{He}}(R_i;R_f)$ и $N_{\overline{\mathrm{He}}}(R_i;R_f)$ – реальное число ядер гелия и антигелия в потоках космического излучения в диапазоне жесткостей $(R_i;R_f)$; $N'_{\mathrm{He}}(R_i;R_f)$ – число оставшихся в результате анализа ядер гелия, $F(R) = (dN'_{He}(R))/dR \cdot (\epsilon_{\overline{\mathrm{He}}}(R)/\epsilon_{\mathrm{He}}(R))$ – энергетическое распределение отобранных частиц с поправкой на различные эффективности регистрации гелия и антигелия из-за дополнительной возможности античастицы аннигилировать в магнитном спектрометре. Поправка получена из эмпирической модели [13]. Обратная к $F(R)$ функция показана на рис. 4. Она может быть интерпретирована как дифференциальный верхний предел.

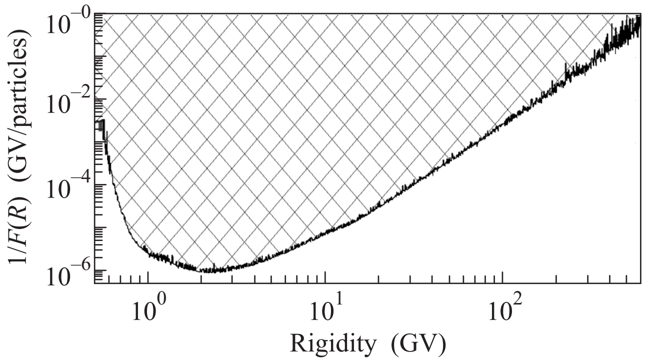

Рис. 4. Дифференциальный верхний предел отношения $\overline{\mathrm{He}}/\mathrm{He}$

В предположении одинаковой формы спектров гелия и антигелия верхний предел на отношение $\overline{He}/He$ в диапазоне жесткостей 0.6–600 ГВ равен $4.7 \cdot 10^{-7}$. Он показан на рис. 5 в сравнении с результатами других экспериментов [14–21]. При высоких энергиях верхний предел, полученный в эксперименте ПАМЕЛА, является наиболее низким.

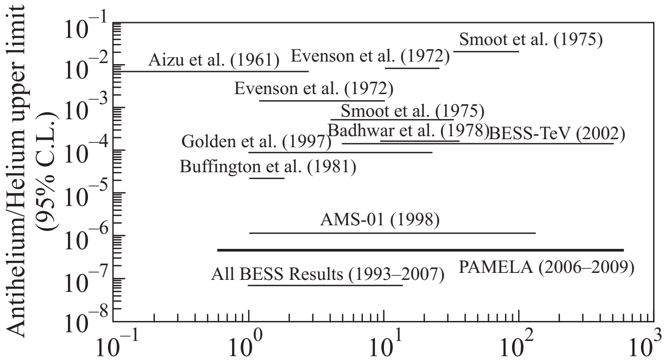

Рис. 5. Верхний предел отношения $\overline{\mathrm{He}}/\mathrm{He}$ (95-процентная ДВ): сравнение с другими экспериментами

Отметим, что это важный энергетический диапазон для поиска антигелия, т.к. поток антиядер не подвергается ослаблению в Галактике и Солнечной системе из-за малой длины свободного пробега и большого сечения аннигиляции [22].

Полученный результат уже может представлять интерес, например, для модели существования шарового скопления антизвезд в гало Галактики [23, 24].

Авторы выражают благодарность Совету по космосу РАН, Федеральному космическому агентству "Роскосмос", ФГУП ГНПРКЦ "ЦСКБ-Прогресс", Научному центру оперативного мониторинга Земли, Итальянскому космическому агентству, Немецкому аэрокосмическому центру, Шведскому национальному космическому совету, Шведскому исследовательскому совету.

1. А. Д. Сахаров, Письма в ЖЭТФ **5**, 24 (1967).
2. В. Л. Гинзбург, *Астрофизика космических лучей*, М.: Наука, 1990.
3. A. W. Strong, I. V. Moskalenko, and V. S. Ptuskin, Annual Review of Nuclear and Particle Systems **57**, 285 (2009).
4. Ю. М. Антипов, П. К. Вишневский, Ю. П.Горин и др., ЯФ В **31**, 235 (1971).
5. H. Agakishiev and M. M. Aggarwal, arXiv.org, nucl-ex, arXiv:1103.3312.
6. O. C. Allkofer and D. P. Brockhausen, Astroparticles and Space Science **109**, 145 (1985).
7. P. Evenson, ApJ **176**, 797 (1972).
8. R. Duperray, B. Baret, D. Maurin et al., arXiv.org, astro-ph, astro-ph/0503544v1.
9. М. Ю. Хлопов, *Фундаментальная космофизика*, М.: УРСС, 2004.
10. А. Г. Дорошкевич, М. Ю. Хлопов, ЯФ **39**, 869 (1984).

11. J. R. Primak and M. Roncadelli, Preprint SLAC-PUB-3304, 1984.
12. P. Picozza, A. M. Galper, O. Adriani et al., Astroparticle Physics **27**, 296 (2007).
13. A. A. Moiseev and J. F Ormes, APh **6**, 379 (1997).
14. H. Aizu, Y. Fujimoto, S. Hasegawa et al., Phys. Rev. **121**, 1206 (1961).
15. G. F. Smoot, A. Buffington, and C. D. Orth, Phys. Rev. Lett. **35**, 258 (1975).
16. G. D. Badhwar and R. L. Golden, Nature **274**, 137 (1978).
17. A. Buffington, S. M. Schindler, and C. R. Pennypacker, Astrophys. J. **248**, 1179 (1981).
18. R. L. Golden, S. J. Stochaj, S. A. Stephens et al., Astrophys. J. **479**, 992 (1997).
19. M. Sasaki, S. Haino, K. Abe et al., Adv. Space Res. **42**, 450 (2008).
20. http://people.roma2.infn.it/sparvoli/cospar10/presentation/Poster-E18-0048-10.pdf.
21. J. Alcaraz, D. Alvisi, B. Alpat et al., Phys. Lett. B. **461**, 387 (1999).
22. A. Codino and M. Lanfranchi, ApJ **487**, 218 (1997).
23. K. M. Belotsky, Yu. A. Golubkov, and M. Yu. Khlopov, INS MSU Preprint 98-31/532 (1998); astro-ph/9807027.
24. http://ecrs2010.utu.fi/done/presentations/EDU1/1P_PA1_Tuesday/2_Mayorov.pdf.