

Поиск антиматерии в космических лучах

© Э.А. Богомолов, Г.И. Васильев, С.Ю. Крутьков, В.А. Романов, С.В. Степанов, М.С. Шулакова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 14 января 1999 г.)

Поиск антиматерии во Вселенной является одной из страниц истории ФТИ РАН. Эксперименты на космических аппаратах и высотных аэростатах, начатые в 60-е годы, позволяли получить информацию о существовании или отсутствии звезд или галактик из антиматерии за счет взрывных процессов в этих объектах. Обнаружение в конце 70-х годов антипротонов с энергией 2–5 GeV в галактических космических лучах явилось результатом баллонных экспериментов лаборатории космической спектрометрии ФТИ. Исследования были выполнены с использованием магнитного спектрометра на высотах с остаточным давлением 10 g/cm² при пороговой геомагнитной жесткости 3 GV. В высокоширотных экспериментах 80-х годов также впервые измерен поток галактических антипротонов с энергией 0.2–2 GeV, указывающий на механизм их генерации. Измеренные отношения потоков антипротонов и протонов в космических лучах равны $2.4_{-1.3}^{+2.4} \cdot 10^{-4}$ и $6_{-5}^{+14} \cdot 10^{-5}$ в энергетических диапазонах 2–5 и 0.2–2 GeV соответственно. В последующих баллонных экспериментах, выполненных группами из США и Японии с помощью магнитных спектрометров, результаты ФТИ РАН получили подтверждение.

Представлены обзор экспериментальных и теоретических работ по поиску античастиц в космических лучах и астрофизические следствия этих исследований. Экспериментальные данные по регистрации античастиц в галактических космических лучах указывают на отсутствие объектов из антиматерии в местной группе галактик.

Введение

Поиск антиматерии во Вселенной, являющийся одной из интереснейших задач астрофизики, был начат в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе в начале 60-х годов по инициативе Б.П. Константинова. Данные физики элементарных частиц давали основания для предположения о барионной симметрии Вселенной и возможности существования во Вселенной объектов из антиматерии в виде антивозвезд, антигалактик или их скоплений. Взрывные процессы в этих гипотетических объектах должны были приводить в выбросу антиматерии в космическое пространство в виде античастиц, пыли или комет, поэтому основными направлениями экспериментальных исследований по проблеме антиматерии в ФТИ были выбраны поиск антиядер и антипротонов в космических лучах и регистрации возможного вторжения антиметеоров в атмосферу Земли. Эксперименты проводились с использованием высотных аэростатов и космических аппаратов. Поиск античастиц в космических лучах на баллонах был также начат в начале 60-х годов группами из США, Японии, Индии.

Использование космических аппаратов обеспечивало большую экспозицию по сравнению с баллонными исследованиями. В результате поиска антиядер на космических аппаратах "Зонд-5,7" и спутниках серии "Космос" и "Союз" с помощью эмульсионных камер в середине 70-х годов в ФТИ был получен лучший верхний предел для отношения антиядер к ядрам с зарядом больше 3 на уровне $2.7 \cdot 10^{-4}$ в энергетической области меньше 1.2 GeV/nucleon. [1]. Эти работы заложили также основу дальнейших космических исследований

в ФТИ взаимодействий ядро–ядро в области высоких энергий.

Эксперименты по регистрации вторжения микрометеоров в атмосферу Земли, выполненные в начале 60-х годов в период метеорных потоков на самолетах на высотах 13–18 km, отметили повышение интенсивности жесткого гамма-излучения и нейтронов, коррелирующее с образованием метеорного следа на высоте около 100 km, фиксируемого радиолокационным методом. Эффект составлял примерно 2% над фоном и в 6 раз превосходил статистические ошибки [2]. Из 20 вторжений метеорных потоков за период 1961–1964 гг. положительный эффект наблюдался в 18 потоках.

Эксперименты по наблюдению вторжения метеорных потоков в атмосферу Земли, проведенные в 1966–1967 гг. в орбитальном полете сцинтилляционного гамма-спектрометра на спутнике "Космос-135", зафиксировали ~ 50%-ное возрастание интенсивности аннигиляционной линии 511 keV (на уровне 7.5 стандартных ошибок) в период действия двух из трех исследованных потоков [3]. Эксперименты на спутнике и самолетах имели высокую статистическую достоверность, но до настоящего времени не нашли объяснения. Орбитальные эксперименты по регистрации гамма-излучения при вторжении микрометеоров заложили основы будущих успешных космических работ ФТИ в области рентгеновской и гамма-астрономии и исследований по проблемам пылевой компоненты.

Баллонные эксперименты по поиску антипротонов в галактических космических лучах, начатые в конце 60-х годов, в конце 70-х годов зафиксировали впервые регистрацию антипротонов с энергией 2–5 GeV.

Антипротоны в космических лучах

Для поиска галактических антипротонов был использован баллонный магнитный спектрометр, первый полет которого состоялся осенью 1969 г. Это был второй спектрометр, поднятый в стратосферу после спектрометра, созданного в США для измерения спектра позитронов. Измерения в первом полете позволили получить верхний предел для отношения потоков антипротонов и протонов в космических лучах на уровне 10^{-2} [4].

Магнитный спектрометр состоял из управляющего телескопа из сцинтилляционных детекторов, задающего телесный угол прибора при регистрации частиц и позволяющего по амплитуде сигналов в сцинтилляторах выделять однозарядные частицы; системы искровых камер для определения траекторий пролета частиц через прибор; постоянного магнита, отклоняющего заряженные частицы и позволяющего с использованием траекторных измерений измерять жесткостной спектр частиц и разделять частицы по знаку заряда; порогового газового черенковского детектора, позволяющего проводить селекцию частиц по скорости и с использованием данных по жесткости регистрируемых частиц, разделять однозарядные частицы по массе; направленного твердотельного черенковского детектора, используемого для защиты от частиц альbedo (впоследствии эта задача решалась с помощью времяпролетного анализа). Принципиальная схема магнитного спектрометра представлена на рис. 1. Калибровка прибора проводилась с использованием естественного фона атмосферных мюонов, позволявшего измерять и контролировать необходимые параметры прибора.

Баллонные эксперименты проводились на высотах с остаточным давлением атмосферы $10\text{--}11\text{ г/см}^2$ в районе с жесткостью геомагнитного обрезания 3.2 GV . В полетах регистрировался спектр отклонений однозарядных частиц в магнитном поле спектрометра, где отклонение — величина, обратная жесткости. Пороговый лоренц-фактор газового черенковского детектора, включенного в режим антисовпадений, был выбран равным 6.1 , что соответствовало пороговым жесткостям регистрации частиц равным 5.6 , 0.8 , 0.6 и 0.003 GV для протонов, пионов, мюонов и электронов. Таким образом, в области отклонений частиц с положительным знаком заряда регистрировались первичные протоны в диапазоне жесткостей $3.2\text{--}5.6\text{ GV}$, вторичные протоны из остаточной атмосферы в диапазоне $0.1\text{--}5.6\text{ GV}$, положительные атмосферные мюоны в диапазоне $0.1\text{--}0.6\text{ GV}$, положительные пионы из ядерных взаимодействий в приборе в диапазоне $0.1\text{--}0.8\text{ GV}$. В области отклонений частиц с отрицательным знаком заряда регистрировались мюоны и пионы в диапазоне $0.1\text{--}0.8\text{ GV}$. Диапазон жесткостей $3.2\text{--}5.6\text{ GV}$ соответствовал ожидаемой области регистрации галактических антипротонов, в диапазоне $0.8\text{--}5.6\text{ GV}$ могли быть зарегистрированы антипротоны их остаточной атмосферы.

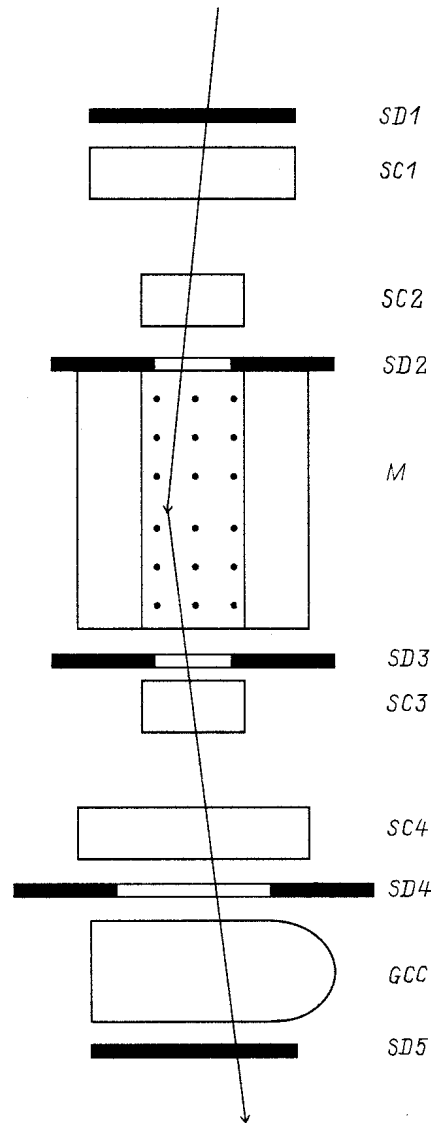


Рис. 1. Баллонный магнитный спектрометр ФТИ РАН: SD1–SD5 — сцинтилляционные детекторы, GCC — газовый черенковский счетчик, SC1–SC4 — искровые камеры, M — магнит.

В результате баллонных экспериментов, выполненных в 1972, 1974 и 1977 гг., были зарегистрированы события, удовлетворяющие всем критериям отбора первичных антипротонов. Измеренное отношение потоков антипротонов и протонов в энергетической области $2\text{--}5\text{ GeV}$ было оценено на уровне $6 \pm 4 \cdot 10^{-4}$ [5]. Близкий результат был получен в результате баллонного эксперимента с магнитным спектрометром, выполненного в США группой НАСА и университета Нью-Мексико в июне 1979 г. Измеренное в энергетической области $4.7\text{--}11.6\text{ GeV}$ отношение потоков антипротонов и протонов равнялось $5.2 \pm 1.5 \cdot 10^{-4}$ [6]. Результаты этих первых экспериментов превышали примерно в 5 раз потоки антипротонов, ожидаемых за счет ядерных вза-

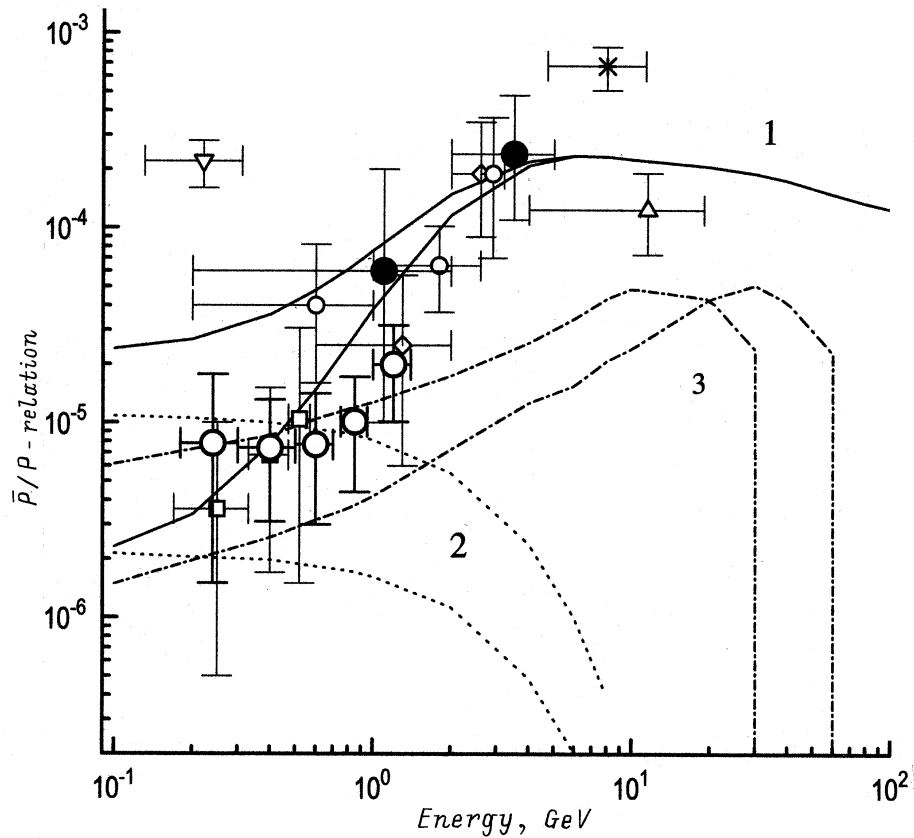


Рис. 2. Экспериментальные и расчетные значения отношения потоков антипротонов и протонов в галактических космических лучах. Эксперименты: ∇ — Buffington [7], \bullet — Bogomolov [8,12], $*$ — Golden [14], \square — BESS'93, 94 [10], \circ — IMAX [9], \diamond — CAPRICE [11], \triangle — MASS2 [13], \bigcirc — BESS'95 [15]. Расчеты: 1 — взаимодействия космических лучей с межзвездной материей (период солнечного максимума и минимума) [16]; 2 — испарения первичных черных дыр, $0.2-1 \cdot 10^{-2} pc^{-3} \cdot yr^{-1}$ [17]; 3 — аннигиляции суперсимметричных частиц массой 30–60 GeV в темном гало Галактики [18].

взаимодействий космических лучей с межзвездной средой, и позволяли сделать предположение о существовании в космическом пространстве дополнительных источников антипротонов. Ситуация еще больше обострилась после баллонного эксперимента группы Калифорнийского университета, измерившего в 1980 г. с использованием прибора, регистрирующего акты аннигиляции антипротонов, отношение потоков антипротонов и протонов на уровне $2.2 \pm 0.6 \cdot 10^{-4}$ в энергетической области 0.13–0.32 GeV [7]. Выполненные в этот же период в США измерения потоков позитронов в области высоких энергий 10–50 GeV показали также превышение на порядок измеренных потоков позитронов над ожидаемыми из взаимодействий в межзвездной среде. Процессы, ответственные за генерацию позитронов в этой энергетической области, могли быть по энергии связаны с рождением антипротонов области энергий порядка нескольких GeV. Экспериментальные работы стимулировали появление серии теоретических исследований, связанных с возможными источниками антипротонов. Были тщательно проанализированы различные модели рождения антипротонов в межзвездной среде, облаках

молекулярного водорода, метагалактические источники из антиматерии, генерация антипротонов в первичных черных дырах, осцилляции нейтронов, "темная материя" (фотино, хитсино) в гало Галактики, релятивистские астрофизические объекты.

В 1983–1985 гг. в ФТИ были выполнены высокоширотные баллонные эксперименты с помощью магнитных спектрометров в энергетической области 0.2–2 GeV. В результате экспериментов было измерено отношение потоков антипротонов и протонов на уровне $0.6_{-0.5}^{+1.4} \cdot 10^{-4}$ [8], поставившее под сомнение результаты измерений группы Калифорнийского университета и позволившее сделать вывод о наличии кинематического обрезания, характерного для вторичного происхождения антипротонов в космических лучах. Этот вывод был впоследствии подтвержден в измерениях, выполненных группами США и Японии в 1992–1994 гг. в экспериментах IMAX, BESS, CAPRICE [9–11].

В 1986–1989 гг. измерения потоков антипротонов в энергетической области 2–5 GeV были продолжены в многосуточных полетах магнитных спектрометров ФТИ с полуострова Камчатка с целью уточнения предыду-

ших измерений. В результате экспериментов уточненное значение отношения потоков антипротонов и протонов составило $2.4_{-1.3}^{+2.4} \cdot 10^{-4}$ [12]. В энергетической области 4–19 GeV группой университета Нью-Мексико в баллонном полете, выполненном в 1991 г. (эксперимент MASS2), было получено значение отношения потоков антипротонов и протонов на уровне $1.24_{-0.51}^{+0.68} \cdot 10^{-4}$ [13], существенно понизившее значение, измеренное этой группой ранее.

Заключение

В результате баллонных исследований по проблеме антипротонов в первичном космическом излучении мировая статистика составляет к настоящему времени примерно 90 антипротонов, распределенных в энергетической области 0.1–19 GeV. Энергетическое распределение отношений потоков антипротонов и протонов позволяет сделать вывод, что, вероятнее всего, регистрируемые в экспериментах антипротоны рождаются в Галактике при ядерных взаимодействиях космических лучей на межзвездной среде. Результаты экспериментов и расчетов для относительных потоков антипротонов, рождающихся в космическом пространстве в ядерных взаимодействиях при возможном испарении первичных черных дыр, при аннигиляции суперсимметричных частиц в темном гало, окружающем Галактику, представлены на рис. 2. На основе наблюдений галактических антипротонов могут быть, в частности, получены экспериментальные ограничения на число испарений первичных черных дыр в космическом пространстве на уровне меньше $3 \cdot 10^{-3} pc^{-3} \cdot yr^{-1}$ и на массу хиггсовых частиц на уровне больше 50 GeV.

Возможности поиска антиматерии во Вселенной с помощью измерений спектра антипротонов ограничены уровнем фона $2 \cdot 10^{-6}$ при энергиях сотни MeV и уровнем $2 \cdot 10^{-4}$ в области энергий свыше нескольких GeV из-за рождения антипротонов в ядерных взаимодействиях в межзвездной среде. Возможности решения проблемы путем поиска антиядер существенно лучше, так как рождение ядер антигелия в ядерных взаимодействиях космических лучей ожидается при отношении потоков антигелия-3 и гелия на уровне порядка 10^{-12} и экспериментальные ограничения связаны с уровнем разделения частиц в приборах и числом зарегистрированных событий.

Полученный в последние годы в баллонных экспериментах исследователей из США и Японии верхний предел для отношения потоков ядер антигелия и гелия в энергетической области 0.1–8.6 GeV/nucleon соответствует уровню $8 \cdot 10^{-6}$ [19]. Минимальный измеренный верхний предел для отношения потоков антиядер к ядрам с зарядом больше 3 равен $8 \cdot 10^{-5}$ в энергетической области 1–15 GeV/nucleon. [20]. Эти результаты позволяют сделать вывод, что объекты из антиматерии отсутствуют в радиусе порядка 1 Mpc. В целом для поиска антиматерии путем

наблюдения космических лучей существует ограничение, вероятно, на уровне расстояния порядка 10 Mpc, связанное с выходом космических лучей из источников, диффузией в магнитных полях и проникновением внегалактических космических лучей в Галактику. Гамма-астрономия позволяет проводить наблюдение процессов аннигиляции на больших расстояниях, но результат наблюдений пока отрицательный.

Эксперименты по исследованию позитронов в космических лучах в области высоких энергий, проведенные в США на баллонах в последнее время, дают для отношения потоков позитронов и электронов результаты, близкие к ожидаемым за счет ядерных взаимодействий на межзвездной среде [21].

Таким образом, десятилетия экспериментального поиска антиматерии с помощью космических лучей дали к настоящему времени отрицательный результат. В этот же период произошли изменения в теоретических представлениях по проблеме барионной симметрии Вселенной. Если до теории "великого объединения" считалось, что барионное число точно сохраняется в любых реакциях, то, согласно современным представлениям, есть реакции, которые нарушают закон сохранения барионного числа. В этих реакциях участвуют сверхтяжелые хиггсовские и калибровочные частицы, поэтому реакции с изменением барионного числа могут эффективно идти только при очень больших энергиях. При температурах выше 10^{28} K и временах меньше 10^{-35} s во Вселенной была смесь равного числа частиц и античастиц, находящихся в термодинамическом равновесии, и барионное число было равно нулю. Барионный заряд появляется, когда температура падает ниже 10^{28} K и темп процессов с сверхтяжелыми частицами и античастицами оказывается медленнее, чем темп расширения Вселенной. В последующих процессах распада и аннигиляции к моменту 10^{-6} s формируются избыток барионов и отношение числа протонов и фотонов на уровне 10^{-10} – 10^{-9} , сохраняющееся впоследствии. Таким образом, формируется представление, что Вселенная может быть несимметричной с точки зрения барионного заряда.

Перспективы дальнейших исследований античастиц в космических лучах связаны с организацией длительных (порядка месяца) баллонных полетов светосильных магнитных спектрометров и с планируемыми экспериментами на космических аппаратах. В рамках российско-итальянского космического проекта с магнитным спектрометром "Памела", в котором принимает участие также ФТИ, планируются, начиная с 2001 г., измерение спектров антипротонов и позитронов в энергетической области 0.1–100 GeV и поиск антиядер на уровне отношения антигелия к гелию порядка 10^{-7} [22]. На Международной космической станции "Альфа" коллаборацией США и европейских стран готовится в начале следующего тысячелетия эксперимент по поиску антиядер с помощью магнитного спектрометра АМС с еще более высокой чувствительностью [23].

Список литературы

- [1] *Ivanova N.S., Baranov D.G., Yakubovsky E.A.* // Proc. 14th ICRC. Munchen, 1975. Vol. 1. P. 300–304.
- [2] *Константинов Б.П., Бредов М.М., Беляевский А.И., Соколов И.А.* // Космические исследования. 1966. Т. 4. С. 66–73.
- [3] *Константинов Б.П., Бредов М.М., Голенецкий С.В., Мазец Е.П.* и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1969. Т. 33. № 11. С. 1820–1826.
- [4] *Bogomolov E.A., Lubyayaya N.D., Romanov V.A.* // Proc. 12th ICRC. Hobart, 1971. Vol. 5. P. 1730–1739.
- [5] *Bogomolov E.A.* et al. // Proc. 16th ICRC. Kyoto, 1979. Vol. 1. P. 330–335.
- [6] *Golden R.L.* et al. // Phys. Rev. Lett. 1979. Vol. 43. P. 1196–1199.
- [7] *Buffington A.* et al. // Ap. J. 1981. Vol. 248. P. 1179–1193.
- [8] *Bogomolov E.A.* et al. // Proc. 20th ICRC. Moscow, 1987. Vol. 2. P. 72–75.
- [9] *Labrador A.W.* et al. // Proc. 24th ICRC. Rome, 1995. Vol. 3. P. 64–67.
- [10] *Orito S.* et al. // Proc. 24th ICRC. Rome, 1995. Vol. 3. P. 76–79.
- [11] *Barbiellini G.* et al. // Proc. 25th ICRC. Durban, 1997. Vol. 4. P. 217–220.
- [12] *Bogomolov E.A.* et al. // Proc. 21th ICRC. Adelaida, 1990. Vol. 3. P. 288–290.
- [13] *Hof M.* et al. // Ap. J. 1996. Vol. 467. P. L33–L36.
- [14] *Golden R.L.* et al. // Astrophys. Lett. 1984. Vol. 24. P. L75–L80.
- [15] *Matsunaga H.* et al. // Phys. Rev. Lett. 1998. Vol. 81. N 19. P. 4052–4055.
- [16] *Labrador A.W., Mewaldt R.A.* // Ap. J. 1997. Vol. 480. P. 371–376.
- [17] *Maki K., Mitsui T., Orito S.* // Phys. Rev. Lett. 1996. Vol. 76. N 19. P. 3474–3477.
- [18] *Mitsui T., Maki K., Orito S.* // Phys. Lett. B. 1996. Vol. 389. P. 169–173.
- [19] *Ormes J.F.* et al. // Ap. J. 1997. Vol. 482. P. L187–L190.
- [20] *Smoot G.F., Buffington A., Orth C.D.* // Phys. Rev. Lett. 1975. Vol. 35. N 4. P. 258–261.
- [21] *Muller D.* et al. // Proc. 24th ICRC. Rome, 1995. Vol. 3. P. 13–16.
- [22] *Воронов С.А.* и др. // Изв. РАН, Сер. физ. 1999. Т. 63. № 4. С. 623–626.
- [23] *Ahlen S.* et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 1994. Vol. 350. P. 351–370.