

## ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПОТОКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ КОМПОНЕНТ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ PAMELA И AMS-02

*В. В. Алексеев*<sup>1</sup>, *К. М. Белоцкий*<sup>2</sup>, *Ю. В. Богомолов*<sup>1</sup>,  
*Р. И. Будаев*<sup>2</sup>, *А. М. Гальпер*<sup>2</sup>, *О. А. Дунаева*<sup>1</sup>,  
*А. А. Кириллов*<sup>1,2</sup>, *А. В. Кузнецов*<sup>1,\*</sup>, *А. Д. Лукьянов*<sup>1</sup>,  
*А. Г. Майоров*<sup>1,2</sup>, *М. А. Майорова*<sup>2</sup>, *В. В. Малахов*<sup>2</sup>,  
*А. Ф. Мосичкин*<sup>1</sup>, *А. А. Округин*<sup>1</sup>, *С. А. Роденко*<sup>2</sup>,  
*А. М. Шитова*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова, Ярославль, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Приводится обзор результатов прецизионных измерений потоков различных заряженных компонент галактических космических лучей (позитронов и антипротонов, протонов и ядер гелия) в современных экспериментах на магнитных спектрометрах PAMELA и AMS-02, которые уже несколько лет (с 2006 и 2011 г. соответственно) успешно работают на околоземной орбите. Обозначается приоритет научных открытий спектрометра PAMELA, и отмечается высокая статистическая достоверность измерений в эксперименте AMS-02, которые надежно подтвердили предыдущие данные, а также продвинулись в область больших энергий.

The paper provides an overview of the results of precision measurements of fluxes of different charged components of galactic cosmic rays (positrons and antiprotons, protons and helium nuclei) in modern experiments on magnetic spectrometers PAMELA and AMS-02, working successfully for several years (since 2006 and 2011 respectively) in the Earth orbit. A priority of the PAMELA spectrometer scientific discoveries is represented and a high statistical accuracy is noted of the measurements in AMS-02 experiment, which reliably confirmed previous data, being able to move also to higher energies.

PACS: 98.70.Sa; 96.50.sb

---

\*E-mail: avkuzn@uniyar.ac.ru

## ВВЕДЕНИЕ

Сегодня с появлением на околоземной орбите приборов нового поколения определение характеристик космических лучей приобретает особую важность для фундаментальной науки. Получаемая в результате прецизионных измерений информация о потоках галактических позитронов и электронов, протонов и антипротонов, более тяжелых ядер и изотопов, анализ углового распределения частиц и другие сведения активно способствуют развитию наших представлений об эволюции Вселенной, существующих и гипотетических формах материи, распространении космических лучей в межзвездной среде и многом другом. В июне 2006 г. на околоземную орбиту был выведен российский космический аппарат «Ресурс-ДК1», на борту которого размещался магнитный спектрометр PAMELA [1]. Он был создан международной группой ученых из России, Италии, Швеции и Германии для проведения длительных прецизионных измерений потоков заряженных космических лучей с возможностью идентификации античастиц с целью фундаментальных исследований в космофизике, космологии, физике космических лучей и других смежных науках. В успешно функционирующем с момента запуска по настоящее время эксперименте PAMELA сделано несколько важных открытий, которые связаны главным образом с измерениями потоков галактических античастиц — позитронов и антипротонов [2–4]. Однако не меньшую значимость представляют и другие результаты, например, измерения потоков протонов и ядер гелия до энергии  $\sim 1,2$  ТэВ [5]. В мае 2011 г. состоялась успешная установка на борт Международной космической станции (МКС) нового магнитного спектрометра AMS-02 [6]. Он был создан независимо другой международной группой ученых под эгидой NASA и имеет аналогичные задачи. По сравнению с прибором PAMELA спектрометр AMS-02 имеет больший геометрический фактор, за счет чего быстрее набирает статистику, но из-за малого наклона орбиты и относительно небольшой высоты МКС прибор большую часть времени находится в областях с большими порогами геомагнитного обрезания, не позволяющими эффективно измерять потоки античастиц с жесткостями до  $\sim 20$  ГВ. Ниже приводится обзор результатов измерений потоков различных заряженных компонент космических лучей (позитронов и антипротонов, протонов и ядер гелия), выполненных в экспериментах PAMELA и AMS-02.

### 1. ИЗМЕРЕНИЕ ПОТОКОВ ПОЗИТРОНОВ И АНТИПРОТОНОВ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Впервые позитроны в космических лучах были обнаружены в тридцатых годах прошлого столетия, а открытие галактических антипротонов состоялось спустя еще полвека [7]. Долгие годы основная причина, обуславливав-

шая интерес к их изучению, была связана с решением проблемы барионной асимметрии Вселенной, но сегодня хорошо известно, что античастицы могут рождаться во взаимодействиях высокоэнергетической ядерной компоненты космического излучения с межзвездным газом. Тем не менее интерес к изучению позитронов и антипротонов сохранился и определяется поисками решения проблем генерации, ускорения и распространения космических лучей в Галактике. В частности, изучение потоков позитронов и антипротонов может помочь в решении одной из основных современных астрофизических проблем — выяснении природы «темной» материи, которая, по-видимому, состоит из слабо взаимодействующих массивных частиц, чье существование выходит за рамки стандартной модели физики элементарных частиц и рассматривается в моделях суперсимметрии, многомерного пространства, техницвета и др. [8]. Одно из предполагаемых принципиальных свойств частиц «темной» материи — их взаимная аннигиляция с образованием пар известных частиц и античастиц, например, электронов/позитронов или протонов/антипротонов; также не исключается их распад с образованием одного или нескольких позитронов или антипротонов. В 2009 г. в эксперименте PAMELA было сделано важное научное открытие — обнаружен избыток высокоэнергичных позитронов в галактическом излучении [2, 3] по сравнению с предсказаниями стандартной модели физики космических лучей [9]. Результаты измерений потока позитронов по отношению к суммарному потоку позитронов и электронов (доли позитронов), сделанные спектрометром PAMELA и позднее подтвержденные в экспериментах AMS-02 и Fermi, показаны на рис. 1.

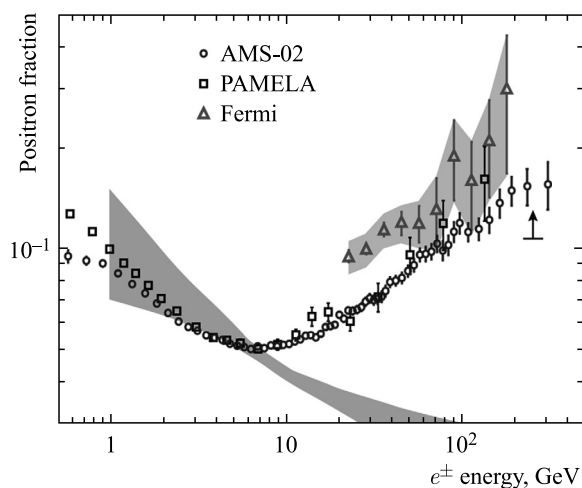


Рис. 1. Доля галактических позитронов в суммарном потоке электронов и позитронов; серая область в нижней части рисунка показывает неопределенность теоретических расчетов в случае только вторичного происхождения позитронов в Галактике

Таким образом, впервые была надежно продемонстрирована необходимость введения дополнительного источника позитронов для объяснения экспериментальных данных, оказавшихся значительно выше ожидаемых теоретических предсказаний. Как упоминалось выше, на роль неизвестного источника превосходно подходит скрытая от прямых наблюдений и пока проявляющая себя только в гравитационном взаимодействии «темная» материя. Существуют попытки объяснения, не привлекающие «новую» физику и связывающие происхождение избытка позитронов с пульсарами и остатками сверхновых (см., например, [10–12]), но все они не являются естественным следствием известной физики этих объектов. В итоге появилось большое количество теоретических работ с возможными объяснениями экспериментального

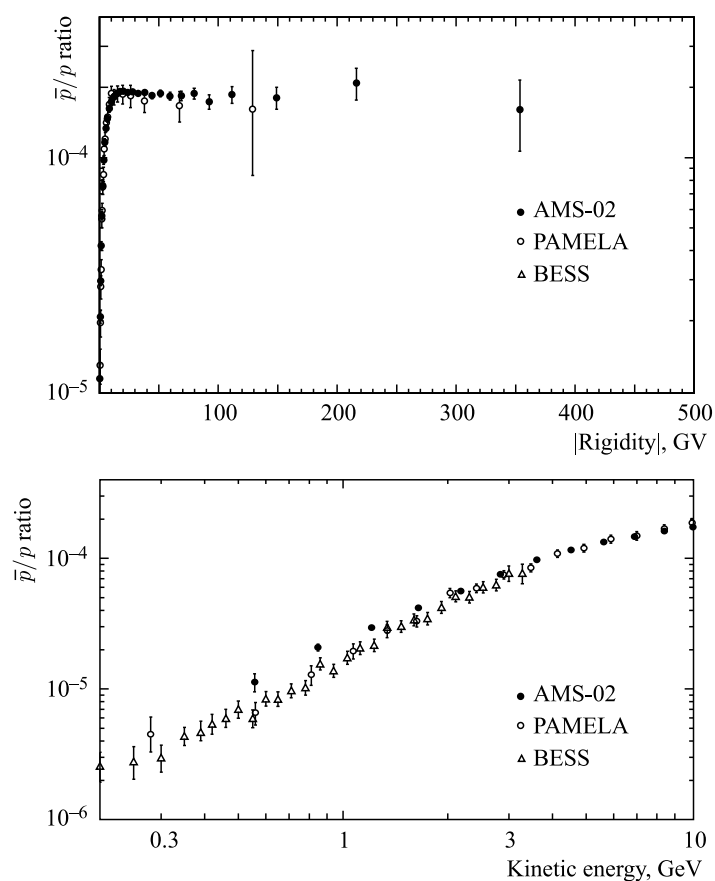


Рис. 2. Отношение потоков антипротонов и протонов в космических лучах по данным спектрометров BESS, PAMELA и AMS-02

результата, который многие сегодня называют «аномальный эффект эксперимента PAMELA». Позднее (в 2012 г.) результат был подтвержден независимо в эксперименте Fermi [13], а в 2013 г. — в эксперименте AMS-02 [14]. Стоит отметить, что спектрометр AMS-02, как и ожидалось, выполнил измерения с самой высокой на сегодняшний день статистической точностью и смог продвинуться в область больших энергий. Это позволило уточнить теоретические модели генерации позитронов в Галактике, но пока не привело к новым выводам или к существенному пересмотру уже созданных моделей. Сегодня нельзя говорить о том, что эти измерения исчерпали себя. Во-первых, обработаны не все данные эксперимента PAMELA, а во-вторых, работа прибора AMS-02 заявлена до 2018 г., а значит, ученые ожидают новых данных и продвижения в область еще больших энергий. Общий анализ современных модельных расчетов доли позитронов показывает их высокую чувствительность именно к значениям при высоких энергиях.

Долгое время оставался открытым вопрос о возможности наблюдения аналогичного избытка в потоке антипротонов, так как это могло бы сильно ограничить свойства частиц «темной» материи. Последние опубликованные данные эксперимента PAMELA по антипротонам датированы 2012 г. [4]. Результат измерения отношения потоков антипротонов и протонов показан на рис. 2.

В этой же работе обсуждаются различные варианты интерпретации экспериментальных данных, среди которых есть и объяснение с помощью введения дополнительного источника антипротонов. Эта возможность, на которую впервые указали данные эксперимента PAMELA [4], сильно зависит, однако, от модели генерации вторичных антипротонов и их распространения в межзвездной среде. По этой причине, даже несмотря на обнаружение более точных данных спектрометра AMS-02 [15], однозначно утверждать о существовании дополнительного источника антипротонов в Галактике пока преждевременно.

## 2. ИЗМЕРЕНИЕ ПОТОКОВ ПРОТОНОВ И ЯДЕР ГЕЛИЯ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Дифференциальные энергетические спектры протонов и ядер гелия до энергии  $\sim 1,2$  ТэВ/нуклон и  $\sim 600$  ГэВ/нуклон соответственно были получены в эксперименте PAMELA с использованием трековой системы в магнитном поле [5]. Результаты свидетельствуют об отклонении формы энергетических спектров как протонов, так и ядер гелия от степенного закона: показатель изменяется при жесткостях 230–240 ГВ, спектр становится более жестким. С физической точки зрения это может означать, что в Галактике присутствуют несколько источников космических лучей. Они формируют раз-

личные энергетические спектры, и в результате измерений наблюдается сложение потоков от этих источников.

На недавно прошедшей в ЦЕРН конференции, посвященной эксперименту AMS-02, были обнаружены новые данные [15]. Продвинувшись в область более высоких энергий и существенно увеличив статистическую точность, спектрометр AMS-02 и в этом случае подтвердил правильность результатов и выводов, полученных ранее в эксперименте PAMELA.

### 3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ

В работе [16] опубликованы прецизионные измерения спектра галактических электронов по данным спектрометра PAMELA в энергетическом интервале от 1 до 625 ГэВ. Аппроксимация спектра одностепенной функцией (для энергии свыше 30 ГэВ) достаточно хорошо описывает его форму с показателем  $-3,18 \pm 0,05$ . Отметим, что этот результат не согласуется с предсказанием мягкого спектра электронов в работе [17], когда наблюдаемая доля позитронов могла бы быть объяснена в рамках стандартной модели распространения космических лучей. Вывод подтверждается вычислениями потока галактических электронов в модели GALPROP [9]: результаты расчета и наблюдений достаточно хорошо совпадают в области энергии выше 10 ГэВ, однако разница между предсказанной и измеренной формами спектра все же есть [16]. По-видимому, модель распространения космических лучей нуждается в улучшении или требуется введение дополнительных источников электронов и позитронов в Галактике.

В 2015 г. были опубликованы данные спектрометра AMS-02, подтвердившие данные спектрометра PAMELA с большей статистической точностью. Различие в области энергии до 10 ГэВ объясняется эффектом солнечной модуляции, поскольку измерения, проводимые ранее, были сделаны в условиях другого уровня солнечной активности.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено сравнение результатов измерений потоков заряженных компонент галактических космических лучей (позитронов и антипротонов, протонов и ядер гелия) в экспериментах на магнитных спектрометрах PAMELA и AMS-02. В эксперименте PAMELA были обнаружены несколько важных особенностей в поведении энергетических спектров заряженных компонент космических лучей. Эти результаты с высокой точностью подтверждены в эксперименте AMS-02. Результаты данных экспериментов будут интересны

для развития моделей генерации и ускорения космических лучей, а также для изучения свойств гипотетических частиц «темной» материи.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-12-10039). Работа группы НИЯУ МИФИ (К. М. Б., Р. И. Б., А. М. Г., М. А. М., В. В. М., С. А. Р.) по анализу моделей генерации вторичных антипротонов в результате взаимодействия протонов с веществом межзвездного газа и некоторых механизмов генерации с участием частиц «темной» материи выполнена в Центре «Фундаментальные исследования и физика частиц» при государственной поддержке Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (Соглашение с Минобрнауки РФ от 27 августа 2013 г. № 02.а03.21.0005).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Adriani O. et al. (PAMELA Collab.) // Phys. Rep. 2014. V. 544. P. 323.*
2. *Adriani O. et al. (PAMELA Collab.) // Nature. 2009. V. 458. P. 607.*
3. *Adriani O. et al. (PAMELA Collab.) // Astropart. Phys. 2010. V. 34. P. 1.*
4. *Адриану О. и др. (колл. PAMELA) // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 96. С. 693.*
5. *Adriani O. et al. (PAMELA Collab.) // Science. 2011. V. 332. P. 69.*
6. *Kounine A. // Intern. J. Mod. Phys. E. 2012. V. 21. P. 1230005;*  
*Ting S. C. C. // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2013. V. 243–244. P. 12.*
7. *Bogomolov E. A. et al. // Proc. of the 16th Intern. Cosmic Ray Conf. Tokyo, 1979. V. 1. P. 330;*  
*Golden R. L. et al. // Phys. Rev. Lett. 1979. V. 43. P. 1196.*
8. *Particle Dark Matter / Ed. G. Bertone. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2010.*
9. *Moskalenko I. V., Strong A. W. // Astrophys. J. 1998. V. 493. P. 694.*
10. *Hooper D., Blasi P., Serpico P. D. // JCAP. 2009. V. 0901. P. 025.*
11. *Fujita Y. et al. // Phys. Rev. D. 2009. V. 80. P. 063003.*
12. *Di Mauro M. et al. // JCAP. 2014. V. 1404. P. 006.*
13. *Ackermann M. et al. (Fermi LAT Collab.) // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 108. P. 011103.*
14. *Aguilar M. et al. (AMS-02 Collab.) // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. P. 141102.*
15. <http://www.ams02.org/2015/04/ams-days-at-cern-and-latest-results-from-the-ams-experiment-on-the-international-space-station>
16. *Adriani O. et al. (PAMELA Collab.) // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 106. P. 201101.*
17. *Delahaye T. et al. // Astron. Astrophys. 2009. V. 501. P. 821.*