

УДК 52,524.1

## ГАЛАКТИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОНЫ И ПОЗИТРОНЫ ЗА 10 ЛЕТ НАБЛЮДЕНИЙ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ПАМЕЛА

© 2019 г. В. В. Михайлов<sup>1, \*</sup>, О. Адриани<sup>2, 3</sup>, Г. А. Базилевская<sup>4, 6</sup>, Дж. Барбарино<sup>5</sup>, Р. Белотти<sup>7, 8</sup>, Э. А. Богомолов<sup>9</sup>, М. Боецио<sup>10</sup>, В. Бонвичини<sup>10</sup>, М. Бонджи<sup>2, 3</sup>, А. Бруно<sup>7</sup>, А. Вакки<sup>10, 11</sup>, Е. Ваннуччини<sup>3</sup>, Г. И. Васильев<sup>9</sup>, С. А. Воронов<sup>1</sup>, А. М. Гальпер<sup>1</sup>, К. Де Сантис<sup>12, 13</sup>, В. Ди Феличе<sup>12, 14</sup>, Дж. Зампа<sup>10</sup>, Н. Зампа<sup>10</sup>, М. Казолино<sup>12</sup>, Д. Кампана<sup>6</sup>, А. В. Карелин<sup>1</sup>, П. Карлсон<sup>15</sup>, Д. Кастеллини<sup>16</sup>, Ф. Кафанья<sup>8</sup>, А. А. Квашнин<sup>4</sup>, А. Н. Квашнин<sup>4</sup>, С. В. Колдашов<sup>1</sup>, С. А. Колдобский<sup>1</sup>, С. Ю. Крутьков<sup>9</sup>, А. А. Леонов<sup>1, 4</sup>, А. Г. Майоров<sup>1</sup>, В. В. Малахов<sup>1</sup>, М. Мартуччи<sup>13, 17</sup>, Л. Марчелли<sup>13</sup>, В. Менн<sup>18</sup>, М. Мерге<sup>2, 13</sup>, Е. Мокьютти<sup>10</sup>, А. Монако<sup>7, 8</sup>, Н. Мори<sup>3</sup>, Р. Мунини<sup>10, 19</sup>, Дж. Остериа<sup>6</sup>, Б. Панико<sup>6</sup>, П. Папини<sup>3</sup>, П. Пикоцца<sup>12, 13</sup>, М. Пирс<sup>15</sup>, М. Риччи<sup>17</sup>, С. Риччиарини<sup>3</sup>, М. Ф. Рунцо<sup>1</sup>, М. Симон<sup>18</sup>, Р. Спарволи<sup>12, 13</sup>, П. Спиллантини<sup>1</sup>, Ю. И. Стожков<sup>4</sup>, Ю. Т. Юркин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
“Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

<sup>2</sup>Университет Флоренции, факультет физики, Флоренция, Италия

<sup>3</sup>Национальный институт ядерной физики, Филиал во Флоренции, Флоренция, Италия

<sup>4</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева  
Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>5</sup>Неаполитанский университет имени Фридриха II, факультет физики, Неаполь, Италия

<sup>6</sup>Национальный институт ядерной физики, Филиал в Неаполе, Неаполь, Италия

<sup>7</sup>Университет Бари, факультет физики, Бари, Италия

<sup>8</sup>Национальный институт ядерной физики, Филиал в Бари, Бари, Италия

<sup>9</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт  
имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

<sup>10</sup>Национальный институт ядерной физики, Филиал в Триесте, Триест, Италия

<sup>11</sup>Университет Удине, факультет математики и информатики, Удине, Италия

<sup>12</sup>Национальный институт ядерной физики, Филиал в Риме “Tor Vergata”, Рим, Италия

<sup>13</sup>Университет Рима “Tor Vergata”, факультет физики, Рим, Италия

<sup>14</sup>Итальянское космическое агентство (ASI), Центр научной информации, Рим, Италия

<sup>15</sup>Королевский технологический институт, факультет физики и Центр физики космических частиц  
имени Оскара Кляйна, Стокгольм, Швеция

<sup>16</sup>Институт прикладной физики “Nello Carrara”, Флоренция, Италия

<sup>17</sup>Национальная лаборатория INFN в Фраскати, Фраскати, Италия

<sup>18</sup>Университет Зигена, факультет физики, Зиген, Германия

<sup>19</sup>Университет Триеста, Триест, Италия

\*E-mail: vvmikhajlov@mephi.ru

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

Магнитный спектрометр ПАМЕЛА был запущен на борту спутника Ресурс-ДК1 на околоземную околополярную орбиту с высотой 350–600 км для изучения потоков частиц и античастиц космического излучения в широком энергетическом диапазоне от ~80 МэВ до сотен ГэВ. В настоящей работе представлены результаты наблюдений потока электронов и позитронов в 2006–2016 гг.

DOI: 10.1134/S0367676519080283

### ВВЕДЕНИЕ

Эксперимент ПАМЕЛА [1] проводился на борту спутника “Ресурс ДК1”, запуск которого состоялся 15 июня 2006 г. Спутник был запущен на

эллиптическую орбиту (высота 350–600 км, наклонение 70.4°). Основная цель эксперимента — изучение энергетических спектров частиц и античастиц космического излучения в широком интервале энергий от десятков МэВ до нескольких ТэВ.

Эксперимент проводился с использованием уникального прибора, состоящего из магнитного спектрометра на основе постоянного магнита  $\sim 0.4$  Тл, окруженного детекторами антисовпадений, позиционно-чувствительного калориметра, времяпролетной системы, сцинтилляционного ливневого счетчика, а также нейтронного детектора. Трекер магнитного спектрометра имеет 6 стриповых кремниевых плоскостей, которые измеряют координаты трека с точностью до 3 мкм, что позволяет определить знак заряда частиц и их жесткость вплоть до  $\sim 1$  ТэВ по отклонению в магнитном поле. Позиционно-чувствительный калориметр состоит из 22 стриповых кремниевых детекторов, прослоенных вольфрамовыми пластинами толщиной 0.26 см каждая. Суммарная толщина поглотителя соответствует  $16.3 X_0$  (радиационной длины). Времяпролетная система обладает разрешением около 300 пс, что дает возможность полностью отсечь частицы, летящие снизу. Геометрический фактор магнитного спектрометра составляет  $21.6 \text{ см}^2 \cdot \text{ср}$ .

Измерения отношения потоков позитронов к суммарному потоку электронов и позитронов в эксперименте ПАМЕЛА [2], подтвержденные последующими данными FERMI-LAT и AMS-02 [3, 4], показали, что оно увеличивается с ростом энергии, начиная с 5 ГэВ в противоположность “стандартной” диффузионной модели генерации и распространения космических лучей. Этот рост может означать существование источников первичных позитронов, в том числе, связанных с гипотетической темной материей.

При низких энергиях  $E < 5$  ГэВ полученное в эксперименте ПАМЕЛА отношение потока позитронов к суммарному потоку электронов и позитронов  $Fe^+/F(e^+ + e^-)$  оказалось заметно ниже, чем в предыдущих стратосферных измерениях, проведенных в период положительной полярности межпланетного поля  $A > 0$  в 80–90 гг. [2]. Как известно, солнечный ветер и межпланетное магнитное поле (ММП) влияют на распространение космических лучей с энергиями менее 10 ГэВ, модулируя их энергетический спектр [5]. Эффект модуляции зависит в первую очередь от уровня солнечной активности и параметров ММП. В минимуме солнечной активности модуляция минимальна и космические лучи имеют максимальную интенсивность вблизи Земли. Так как направление дрейфа, связанного с изменением направления и величины ММП, зависит от знака заряда частицы, то это может привести к зависимости модуляции от знака заряда. В частности, электроны и позитроны должны модулироваться по-разному в периоды положительной и отрицательной полярности ММП [5]. Действительно, при измерениях в 2006–2015 гг. в эксперименте ПАМЕЛА было обнаружено изменение соотношения пото-

ков позитронов и электронов [1, 7] при смене полярности ММП, которая произошла в 2013–2014 гг. [6]. После смены полярности происходило быстрое увеличение отношения потоков позитронов и электронов и в конце 2015 г оно практически вышло на уровень 90-х гг. [7].

Таким образом, изучение потоков электронов и позитронов галактических космических лучей в широком интервале энергий дает уникальную информацию об их источниках и распространении с межзвездном пространстве и гелиосфере. Обзор основных результатов эксперимента ПАМЕЛА, полученных по данным за 2006–2009 гг. приведен в работе [1]. В данной работе представлены новые данные, полученные при обработке всего массива информации, накопленной в эксперименте ПАМЕЛА за 10 лет работы на околоземной орбите с июня 2006 г. по январь 2016 г.

## 1. АНАЛИЗ ДАННЫХ

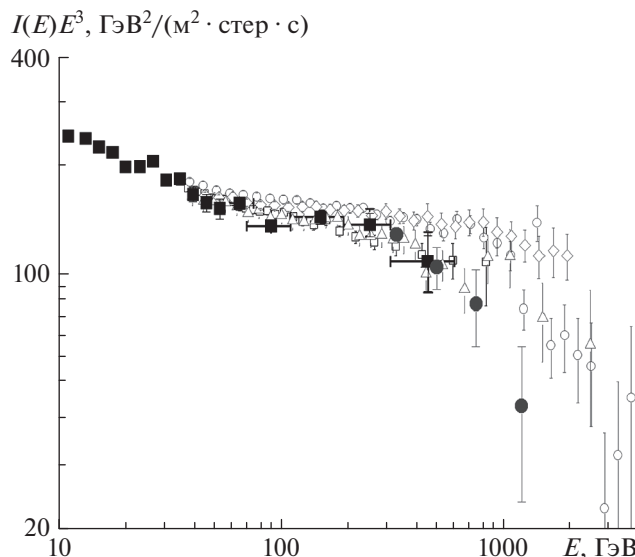
Для анализа были отобраны события, имеющие одиночный трек в магнитном спектрометре, время пролета, соответствующее движению в прямом направлении, и энерговыделение в детекторах, соответствующее заряду  $|Z| = 1$ . Эффективность трека магнитного спектрометра прибора ПАМЕЛА уменьшалась со временем. В данной работе, в отличие от работ [1, 7], для увеличения статистической обеспеченности были использованы “мягкие” критерии для отбора треков по числу точек, используемых для определения кривизны и направления трека (три точки в отклоняющей проекции  $X$  и две в проекции  $Y$ ). Дополнительная проверка качества отобранных треков проводилась по данным калориметра и времяпролетной системы. Для выделения электронов и позитронов на фоне протонов были использованы различия адронных и электромагнитных каскадов в калориметре, связанные с начальными точками развития ливней, их продольными и поперечными профилями [1, 2, 7]. Кроме того, для лучшего подавления фона пионов, рожденных при неупругих взаимодействиях в самом приборе, при низких энергиях отбирались только релятивистские частицы, имеющие скорость  $\beta > 0.9$ , для которых отсутствовали сигналы в системе антисовпадений, ливневом счетчике и нейтронном детекторе. Напротив, при высоких энергиях проверка сигналов в системе антисовпадений не проводилась для уменьшения потерь событий из-за так называемого “обратного тока”, образованного вторичными частицами электромагнитного ливня в самом приборе. Выше  $\sim 100$  ГэВ энергия электронов и позитронов определялась по данным калориметра. Для анализа потоков космического излучения были отобраны события, зарегистрированные в полярных областях с жесткостью, превышающей

порог геомагнитного обрезания в 1.3 раза, чтобы исключить влияние магнитного поля Земли на результаты измерений. Всего было выделено  $\sim 10^6$  электронов и позитронов первичного космического излучения, из них  $\sim 10^3$  событий с энергией выше 100 ГэВ.

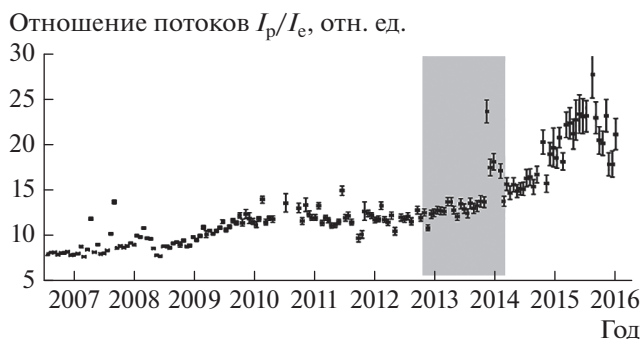
## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Дифференциальный энергетический спектр суммарного потока электронов и позитронов галактических космических лучей показан на рис. 1. Для сравнения приведены данные недавних экспериментов AMS-02 [8], Fermi-LAT [9], DAMPE [10], CALET [11]. Характерной особенностью спектра является его обрезание при высоких энергиях, которое отчетливо проявляется при энергиях выше  $\sim 1$  ТэВ [9–13]. Несмотря на то, что результаты экспериментов близки друг к другу, высокая статистическая обеспеченность данных выводит на первый план систематические ошибки, связанные с точным определением характеристик приборов. Из рисунка видно, что в области энергий от  $\sim 100$  ГэВ до  $\sim 1$  ТэВ наблюдаются систематические различия в измерениях потоков, что, конечно, затрудняет поиск особенностей в спектрах и интерпретацию результатов. Магнитный спектрометр ПАМЕЛА имеет меньшую светосилу, чем многие современные приборы [8–13], и несмотря на более продолжительную работу, накопленная статистика существенно меньше. С другой стороны, при отборе событий имеется возможность сравнивать данные магнитного анализа с топологическими особенностями развития каскада в калориметре, что повышает надежность идентификации частиц и точность определения их характеристик. Из рис. 1 видно, что результаты эксперимента лучше согласуются с прецизионными измерениями спектрометра AMS-02, также основанного на магнитном анализе и калориметрических данных, и дополнительно включающего в анализ информацию детектора переходного излучения, и с данными прибора CALET, который оснащен глубоким ионизационным калориметром. Данные приборов Fermi-LAT и DAMPE лежат систематически выше. На рис. 1 показан также спектр, полученный по данным только одного калориметра прибора ПАМЕЛА в работе [14]. Информации калориметра недостаточно для полного удаления фона протонов. Темп счета фоновых событий был оценен в работе [14] по данным моделирования и вычтен из измеренного темпа счета.

На рис. 2 показано полученное в эксперименте отношение потоков протонов и электронов в зависимости от времени в интервале жесткостей  $R = 0.5\text{--}2.2$  ГВ. Весь период наблюдений разбит на равные интервалы по 20 дней каждый. Максимум отношения наблюдался в конце 2009 г., и он



**Рис. 1.** Дифференциальный энергетический спектр суммарного потока электронов и позитронов около Земли по данным спектрометра “ПАМЕЛА” (квадраты). Для сравнения на рисунке приведены данные экспериментов AMS-02 [8] (открытые квадраты), Fermi-LAT [9] (ромбы), DAMPE [10] (открытые кружки), CALET [11] (треугольники) и данные одного калориметра ПАМЕЛА [14] (темные кружки).



**Рис. 2.** Наблюдаемое отношение потоков протонов и электронов в околосреднем космическом пространстве по данным эксперимента “ПАМЕЛА” с июля 2006 по январь 2015 г. в интервале жесткостей  $R = 0.5\text{--}2.2$  ГВ. Полоса обозначает период смены полярности ММП.

совпадал с минимумом солнечной активности и максимумом в темпе счета протонов. Начиная с 2010 г. отношение потоков протонов и электронов  $p/e$  начинает уменьшаться, а с 2011 по 2013 г. в фазе роста солнечной активности остается практически постоянным. Смена полярности произошла в 2013–2014 гг. [6]. С этого времени происходило быстрое увеличение отношения. Приведенная на рис. 2 зависимость во многом повторяет поведение отношения потоков позитронов к электронам от времени [7], но, в силу большей

статистической обеспеченности данных, на ней видны особенности, связанные с более быстропротекающими процессами в гелиосфере. Уникальность одновременных измерений вариаций электронов, позитронов и протонов заключается в том, что они позволяют определить вклад дрейфовых процессов в эффект модуляции космических лучей, что исключительно важно для разработки теоретических моделей [5].

Работа была поддержана грантом РФФИ № 18-02-00656.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al.* // Phys. Rep. 2014. V. 544. P. 323.
2. *Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al.* // Nature. 2009. V. 458. P. 607.
3. *Abdo A., Ackermann M., Arimoto M. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 102. Art. № 181101.
4. *Accardo L., Aguilar M., Aisa D. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 113. Art. № 121101.
5. *Potgieter M.S.* // Living Rev. Sol. Phys. 2013. V. 10. P. 3.
6. *Sun X., Hoeksema J.T., Liu Y., Zhao J.* // Astrophys. J. 2015. V. 798. P. 114.
7. *Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 116. Art. № 241105.
8. *Aguilar M., Aisa D. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 113. Art. № 221102.
9. *Abdollahi S., Ackermann M., Ajello M. et al.* // Phys. Rev. D. 2017. V. 95. Art. № 082007.
10. *Ambrosi G., Asfandiyarov R., Azzarello P. et al.* // Nature. 2017. V. 552. P. 63.
11. *Adriani O.Y. et al. (CALET Collaboration)* // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 120. Art. № 261102.
12. *Aharonian F., Akhperjanian A.G., Antonet G. et al.* // Astron. Astrophys. 2009. V. 508. P. 561.
13. *Chang J. et al. (The ATIC Collaboration)* // Nature. 2008. V. 456. P. 362.
14. *Karelin A.V., Voronov S.A., Galper A.M., Koldobsky A.S.* // Phys. Atom. Nucl. 2015. V. 78. № 2. P. 281.