

УДК 52:524.1

## СПЕКТРЫ ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ ВЫШЕ 50 МэВ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА ПАМЕЛА

© 2021 г. В. В. Михайлов<sup>1</sup>, \*, С. А. Воронов<sup>1</sup> от имени коллаборации ПАМЕЛА

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

\*E-mail: vvmikhajlov@mephi.ru

Поступила в редакцию 25.03.2021 г.

После доработки 22.04.2021 г.

Принята к публикации 28.05.2021 г.

Магнитный спектрометр ПАМЕЛА был запущен на борту спутника Ресурс-ДК1 на околоземную квазиполярную эллиптическую орбиту с высотой 350–600 км и наклоном 70° для изучения потоков частиц и античастиц первичного космического излучения в широком диапазоне энергий от ~50 МэВ до сотен ГэВ. В настоящей работе представлены результаты измерений дифференциальных энергетических спектров электронов и позитронов в 2006–2016 гг.

DOI: 10.31857/S0367676521090234

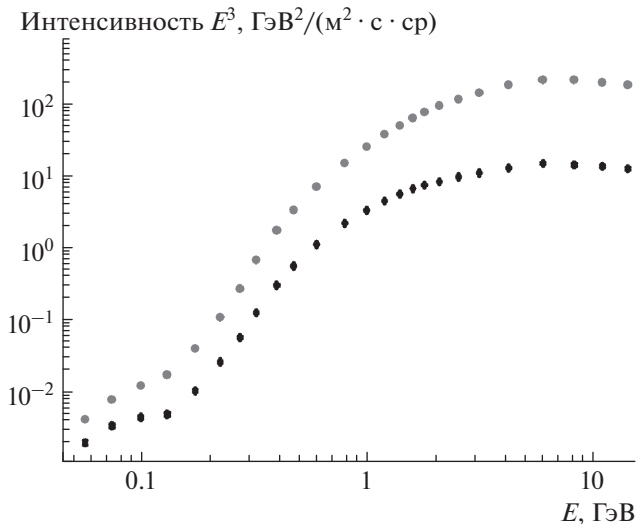
### ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то, что электроны и позитроны высоких энергий составляют малую, около 1%, долю от ядерной составляющей космических лучей, их изучение дает важную информацию об источниках космического излучения в Галактике и о процессах его распространения в межзвездном пространстве и гелиосфере. Эксперимент ПАМЕЛА [1], главной целью которого являлось изучение энергетических спектров античастиц в первичных космических лучах, проводился на борту российского спутника “Ресурс ДК1”, выведенного на околоземную орбиту 15 июня 2006 г. Первоначально спутник был запущен на эллиптическую орбиту (высота 350–610 км, наклонение 70.4°), а в 2010 г. орбита была изменена на круговую с высотой около 570 км. Измерения проводились с использованием магнитного спектрометра на основе постоянного магнита, окруженного детекторами антисовпадений, позиционно-чувствительного калориметра толщиной 16 радиационных длин, времяпролетной и триггерной системы, состоящей из трех сцинтилляционных детекторов, нижнего сцинтилляционного ливневого счетчика и нейтронного детектора [1]. Непрерывные измерения на орбите продолжались с июня 2006 по январь 2016 г. Предварительные результаты по измерению дифференциальных энергетических спектров электронов и спектров позитронов, полученные на разных этапах эксперимента, были представлены в [2–6].

При энергиях ниже ~10 ГэВ отношение потока позитронов к потоку электронов существенно из-

меняется в ходе цикла солнечной активности. Интерпретация поведения этого отношения должна рассматриваться через призму динамики гелиосферных процессов. Когда частицы космического излучения распространяются от границы гелиосферы к Земле, они подвергаются воздействию солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП), испытывая адиабатические потери энергии, участвуя в процессах конвекции, диффузии, дрейфа в неоднородном ММП [5].

Эффект модуляции потоков электронов и позитронов и их отношения зависит в значительной степени от направления ММП, так как направление дрейфа частиц, определяется знаком их заряда. В частности, в периоды так называемой отрицательной полярности ММП  $A < 0$  электроны дрейфуют к Земле через полярные области, тогда как позитроны дрейфуют в противоположном направлении через экваториальную область, испытывая при этом значительное влияние солнечного ветра и спирального магнитного поля. В периоды положительной полярности картина распространения электронов и позитронов меняется на противоположную. В эксперименте ПАМЕЛА при измерениях, проведенных в 2006–2015 гг., были обнаружены вариации отношения потоков позитронов и электронов в интервале энергий 0.5–2.2 ГэВ [8, 9]. Интенсивность позитронов выросла в конце 2009 г., в минимуме солнечной активности, почти в полтора раза по сравнению с 2006 г. и этот рост сопровождался увеличением отношения потоков позитронов и электронов, которое, тем не менее, оставалось на более низком уровне,



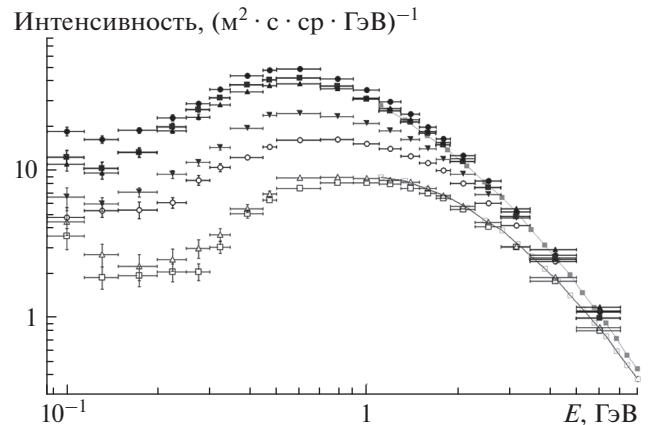
**Рис. 1.** Дифференциальные спектры, умноженные на  $E^3$ , электронов (серые точки) и позитронов (черные точки) в окрестности Земли по данным спектрометра “ПАМЕЛА” за 2006–2015 гг. в зависимости от кинетической энергии  $E$ .

чем в предыдущих экспериментах, проведенных в эпоху положительной полярности ММП. С начала 2010 г. отношение потоков позитронов и электронов уменьшалось, и затем с 2011 по 2013 г. во время фазы роста солнечной активности оставалось практически постоянным вплоть до смены полярности ММП в 2013–2014 гг., за которой последовало увеличение отношения их потоков [5, 8, 9]. Начиная с мая 2011 г. измерения спектров электронов и позитронов при энергиях более 1 ГэВ были также проведены с высокой точностью в эксперименте АМС [10].

В данной работе приведены предварительные результаты измерения спектров электронов и позитронов с энергией ниже 10 ГэВ за все 10 лет работы эксперимента ПАМЕЛА на околоземной орбите с июня 2006 г. по январь 2016 г.

### АНАЛИЗ ДАННЫХ

Для получения энергетических спектров использовались данные измерений, проведенных с июля 2006 г. по январь 2016 г. Для анализа были отобраны события, имеющие одиночный трек в магнитном спектрометре, время пролета, соответствующее движению в “прямом” направлении, и энерговыделения в детекторах, соответствующие электронам и позитронам. Всего было выделено  $\sim 10^6$  электронов и позитронов первичного космического излучения [5, 9]. При низких энергиях  $E < 1$  ГэВ в данной работе рассматривались только события, зарегистрированные в полярных областях с вертикальной жесткостью об-



**Рис. 2.** Дифференциальные спектры электронов с 2009 г. по 2015 г. в период роста солнечной активности. Закрытые кружки – 2009 г., квадраты – 2010 г., треугольники 2011 г., серые треугольники – 2012 г., открытые кружки 2013, открытые квадраты – 2014 г., открытые треугольники 2015 г. Серые квадраты, соединенные линией, – данные АМС за 06.2011, а открытые квадраты – за 06.2015 [10].

резания  $R_0 < 150$  МВ для того, чтобы исключить влияние магнитного поля Земли на результаты измерений.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Дифференциальные энергетические спектры электронов и позитронов галактических космических лучей при энергиях  $E$  ниже 10 ГэВ, умноженные на  $E^3$ , показаны на рис. 1. Спектры построены по измерениям только в полярных областях и усреднены за все время работы эксперимента. Уменьшение наклона спектров при энергиях  $E$  ниже  $\sim 3$ –5 ГэВ обусловлено, по-видимому, как процессами модуляции, так и изменениями в межзвездном спектре [11].

При низких энергиях на рис. 2 показаны усредненные по годам с 2009 г. по 2015 г. энергетические спектры электронов в интервале энергий  $E = 0.85$ –7 ГэВ. Результаты измерений спектров электронов за период 2006–2009 гг. были ранее приведены в работе [6], а отношений потоков в работах [8, 9]. Максимальный поток электронов наблюдался в 2009 г., что по времени совпадало пиком в отношении потоков позитронов и электронов в минимуме 23-го цикла солнечной активности. Как видно из рис. 2, начиная с 2010 г., поток электронов начал уменьшаться. При этом с 2011 по 2013 г. отношение потоков позитронов и электронов оставалось практически постоянным, вплоть до смены полярности ММП в 2013–2014 г, несмотря на рост солнечной активности [8, 9]. В 2014–2016 гг. произошло заметное, почти в 1.5 ра-

за, увеличение отношения потоков позитронов и электронов при энергиях ниже  $\sim 2\text{--}3$  ГэВ [8–10]. Однако, как видно из рис. 2, потоки электронов в 2014 и 2015 г. близки, то есть наблюдаемое увеличение отношения в этот период связано в первую очередь с увеличением потока позитронов, что качественно соответствует теоретическим предсказаниям [7]. Однако для получения количественного согласия между теоретическими расчетами и экспериментальными результатами требуется уточнение локального межзвездного спектра на границе гелиосферы, а также и параметров модели [11] для более точного определения вклада дрейфовых процессов в эффект модуляции космических лучей.

Работа была выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-02-00656).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Picozza P., Galper A.M., Castellini G. et al. (PAMELA collaboration) // *Astropart. Phys.* 2007. V. 27. P. 296.
2. Адриани О., Базилевская Г.А., Барбарино Д. и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2009. Т. 73. № 5. С. 606; Adriani O., Bazilevskaya G.A., Barbarino D. et al. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2009. V. 73. No. 5. P. 568.
3. Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al. (PAMELA collaboration) // *Science*. 2011. V. 332. P. 6025.
4. Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al. (PAMELA collaboration) // *Phys. Rep.* 2014. V. 544. P. 323.
5. Михайлов В.В., Адриани О., Базилевская Г.А. и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2019. Т. 83. № 8. С. 1073; Mikhailov V.V., Adriani O., Bazilevskaya G.A. et al. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2019. V. 83. No. 8. P. 974.
6. Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al. (PAMELA collaboration) // *Astrophys. J.* 2015. V. 810. No. 2. P. 142.
7. Potgieter M.S. // *Living Rev. Sol. Phys.* 2013. V. 10. P. 3.
8. Munini R., Adriani O., Barbarino G.C. et al. (PAMELA collaboration) // *Phys. Rev. Lett.* 2016. V. 116. Art. No. 241105.
9. Михайлов В.В., Адриани О., Базилевская Г.А. и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2017. Т. 81. № 2. С. 173; Mikhailov V.V., Adriani O., Bazilevskaya G.A. et al. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2017. V. 81. No. 2. P. 154.
10. Aguilar M., Ali Cavasonza L., Ambros G. et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2018. V. 121. Art. No. 051102.
11. Bisschoff D., Potgieter M.S., Aslam O.P.M. // *Astrophys. J.* 2019. V. 878. No. 1. P. 8.

## The galactic cosmic ray electrons and positrons spectra above 50 MeV on the PAMELA experiment data

V. V. Mikhailov<sup>a,\*</sup>, S. A. Voronov<sup>a</sup> on behalf of the PAMELA collaboration

<sup>a</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

\*e-mail: vvmikhajlov@mephi.ru

The PAMELA magnetic spectrometer was launched onboard the Resurs-DK1 satellite to the Earth quasipolar elliptic orbit with altitude of 350–600 km and inclination about  $70^\circ$  to study the fluxes of cosmic ray particles and antiparticles in a wide energy range from  $\sim 50$  MeV to hundreds of GeV. In this paper, the results of observations of electron and positron fluxes in energy range more than 50 MeV obtained during 2006–2016 are presented.