

УДК 524.1-65

ЗАВИСИМОСТЬ МОДУЛЯЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ОТ ЗНАКА ЗАРЯДА ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА PAMELA

© 2023 г. П. Мухин¹, *, В. В. Михайлов¹, А. В. Михайлова¹ от имени коллаборации PAMELA

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

*E-mail: pasha_muxin@mail.ru

Поступила в редакцию 25.12.2022 г.

После доработки 12.02.2023 г.

Принята к публикации 29.03.2023 г.

Для изучения солнечной модуляции потоков космических лучей с энергиями ниже 1 ГэВ методами машинного обучения получены соотношения потоков позитронов и электронов энергий от 100 до 500 МэВ, а также потоков электронов и протонов жесткостей 1–1.7 ГВ по данным эксперимента PAMELA за 2006–2016 годы. По наблюдаемым особенностям в полученных результатах по PAMELA, и сравнением их с данными эксперимента AMS-02, можно исследовать зависимость модуляции от знака заряда частиц, в частности в периоды около солнечного минимума 2009 года и максимума 2015 года.

DOI: 10.31857/S0367676523701831, EDN: OJMHUF

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач является исследование космических лучей низких энергий, в частности электронов и позитронов. В области энергий до 1 ГэВ значительно влияние солнечной модуляции на потоки космического излучения. Зависимость модуляции от знака заряда частиц может быть изучена по вариации потоков электронов и позитронов. В последние годы получены новые данные из экспериментов PAMELA [1–6], AESOP [7], которые рассчитаны на регистрацию электронов и позитронов с энергиями от десятков МэВ и при более высоких энергиях в эксперименте AMS-02 [8, 9]. В частности, коллаборацией PAMELA получены отношения потоков позитронов к электронам с 2006 по 2015 гг. с интервалами 90 дней для диапазонов энергий от 0.5 до 5 ГэВ [6]. Для увеличения статистической обеспеченности данных за весь период работы могут быть использованы методы машинного обучения для отбора электронов и позитронов, что в результате позволит более детально исследовать знакозарядную зависимость солнечной модуляции за полный 11-летний цикл солнечной активности.

ОТБОР ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ

PAMELA представляет собой спутниковый эксперимент с геометрическим фактором до $21.6 \text{ см}^2 \cdot \text{ср}$, главной задачей которого является регистрация античастиц в космических лучах [10]. Магнитный спектрометр прибора PAMELA с трековой системой позволяет определить жест-

кость частицы и знак ее заряда. С помощью калориметра, состоящего из полупроводниковых кремниевых стриповых детекторов и вольфрамовых пластин, можно восстановить пространственную картину электромагнитного каскада, образуемого проходящими электронами и позитронами, и отделить их от протонов. Также, по времяпролетной системе определяются скорость и величина заряда частицы, а система антисовпадений дает возможность исключать из рассмотрения “ложные” внеапертурные события. При анализе данных детекторов можно идентифицировать типы регистрируемых частиц космического излучения.

Прибор PAMELA был установлен на спутнике Ресурс ДК-1 [10] и работал на низкой околоземной орбите с 2006 по 2016 гг.; орбита спутника имела наклонение 70° , что позволяет регистрировать первичную компоненту низкоэнергетических космических лучей. Для ее выделения отбираются частицы с жесткостью $R > kR_c$, где $R_c = 14.9/L^2$ – жесткость геомагнитного обрезания в ГВ, L – параметр Мак-Илвейна [11], $k = 1.2$ – коэффициент запаса. Ввиду этого первичные частицы с энергиями до 100 МэВ могут быть зарегистрированы только в узкой приполярной области ($L > 13$), поэтому требуется обеспечить высокую эффективность их отбора.

Ранее использованная методика отбора электронов и позитронов представляла собой набор критериев, значительная часть которых была основана на параметрах ливня в калориметре. Эта методика была испытана на событиях, промодели-

лированных в GEANT4, и использовалась в ранее опубликованных работах [4–6]. При низких энергиях (менее 100 МэВ) эффективность такого отбора резко падает, так как электроны и позитроны практически не доходят до калориметра. Вследствие этого, для отбора частиц в диапазоне энергий 50–100 МэВ требуется более тщательный анализ данных времяпролетной системы.

Для объединения данных с разных детекторов и повышения эффективности отбора в данной работе были применены методы машинного обучения. Был выбран метод Boosted Decision Tree, реализованный в пакете ROOT для мультивариационного (многопараметрического) анализа TMVA [12]. Для выделения электронов и позитронов выбрано более 20 параметров одноканальных событий из базы данных PAMELA, которые относятся к времяпролетной системе (скорость и ионизационные потери частицы), характеристикам трека в магнитном спектрометре и ливня в калориметре, и использовались для идентификации типов частиц в предыдущих работах [4–6]. В качестве “сигнальной” и фоновой выборки для обучения алгоритма идентификации частиц по этим параметрам взяты смоделированные в GEANT4 соответственно электронные и протонные события с энергиями 0.05–50 ГэВ. После обучения алгоритм был применен к экспериментальным данным прибора PAMELA. В результате применения данного метода в диапазоне энергий от 50 МэВ до 3 ГэВ получен коэффициент режекции протонов $\sim 10^4$ при эффективности выделения электронов выше 80%; при данных энергиях число отобранных событий увеличилась примерно в 1.5 раза по сравнению с ранее проведенным анализом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

После обучения программы метод испытан на полной базе данных эксперимента за 2006–2016 гг. Для исследования зависимости модуляции от знака заряда построены временные зависимости отношения потоков частиц позитронов и электронов, аналогичные полученным в работе [6], в более широком диапазоне, включая энергии ниже 500 МэВ.

На рис. 1 представлены соотношения потоков позитронов и электронов за 2006–2016 гг. Эти зависимости позволяют заметить динамику отношения потоков позитронов и электронов за почти полный цикл солнечной активности. Модуляция в диапазонах от 100 до 500 МэВ примерно соответствует наблюдаемой при более высоких энергиях до ~ 1 ГэВ. Во всех зависимостях проявляется особенность конца 2007–начала 2008 гг. как уменьшение отношения потоков. Этот период соответствует наблюдению рекуррентных вариаций потоков космических лучей [13].

Ранее для изучения зависимости модуляции от знака заряда проводились работы по сравнению

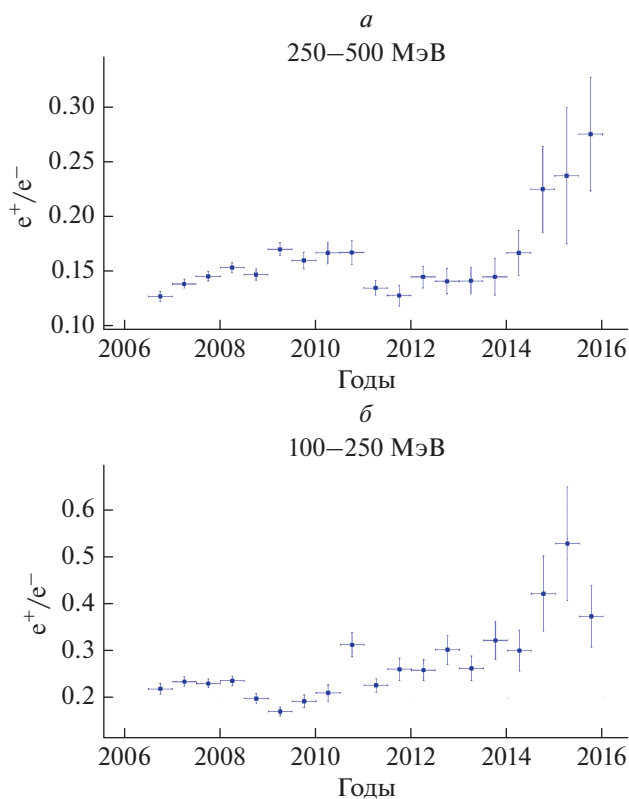


Рис. 1. Отношение потоков позитронов и электронов энергий 250–500 МэВ с 2006 по 2016 гг. (а). Отношение потоков позитронов и электронов энергий 100–250 МэВ с 2006 по 2016 гг. (б).

вариаций потоков электронов и ядер гелия [14]. Тренды регрессии потоков, полученной в результате таких работ, образуют две ветви гистерезиса, соответствующие смене полярности A гелиосферного магнитного поля; данная особенность объяснялась моделями дрейфа космических лучей в гелиосфере [15, 16]. Для исследования подобных особенностей были использованы наборы новых данных из экспериментов PAMELA за 2006–2016 гг. и опубликованных AMS-02 за 2011–2017 гг. [8, 9], по которым получены регрессии потоков электронов и протонов; на рис. 2 представлены данные в диапазоне жесткостей 1–1.7 ГВ. Сравнивая измерения PAMELA с данными AMS-02, можно заметить две ветви, соответствующие отрицательной ($A < 0$) полярности гелиосферного магнитного поля до 2013 г. и положительной ($A > 0$) с 2015 г. В период минимума солнечной активности (2008–2010 гг.) наблюдается особенность, связанная с тем, что максимумы потоков электронов и протонов не совпадают по времени. Еще одна особенность наблюдается в период максимума солнечной активности (2014–2015 гг.). Также стоит отметить более мелкие детали, в частности в конце 2007–начале 2008 гг., когда наблюдались рекуррентные вариации потоков [13].

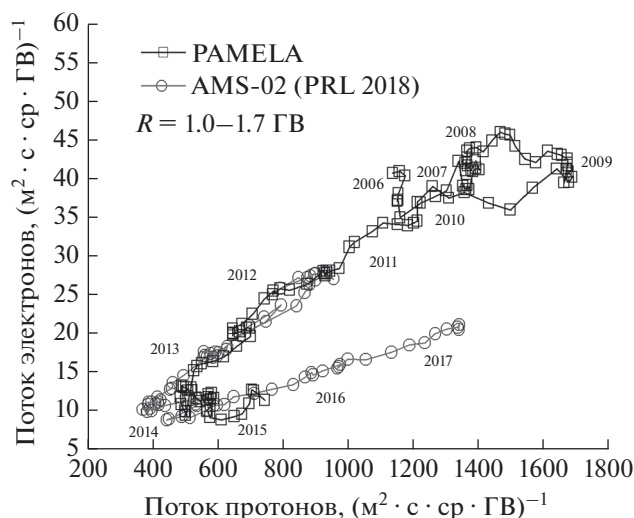


Рис. 2. Регрессии потоков электронов и протонов по данным экспериментов PAMELA за 2006–2016 гг. и AMS-02 за 2011–2017 гг. [8, 9], обозначенных $\square$ и $\circ$ соответственно. Указаны годы, соответствующие определенным областям графика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование новой методики на основе методов машинного обучения позволило получить предварительные, статистически значимые результаты для временных рядов потоков электронов и позитронов с энергиями от 100 до 500 МэВ за весь период работы PAMELA с 2006 по 2016 гг. Эти ряды позволяют анализировать долговременную зависимость модуляции от знака заряда частиц, а также ее особенности, связанные с текущей солнечной активностью. Более подробно особенности модуляции можно наблюдать по регрессиям потоков электронов и протонов, полученных из данных PAMELA и AMS-02. В частности, на регрессионной зависимости проявляются отклонения от долговременного 11-летнего тренда около солнечных минимумов 2009 г. и максимума 2015 г. Последующие доработанные результаты могут послужить основой для работ по моделированию потоков космических лучей, в

частности, по вопросам их модуляции при низких энергиях.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект “Фундаментальные проблемы космических лучей и темная материя” № 0723-2020-0040).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов В.В., Воронов С.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 9. С. 1344; *Mikhailov V.V., Voronov S.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 9. P. 1036.*
2. 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. 203.*
3. 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.*
4. *Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al. // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 106. Art. No. 201101.*
5. *Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al. // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 111. Art. No. 081102.*
6. *Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al. // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 116. Art. No. 241105.*
7. *Mechbal S., Mangeard P.-S., Clem J.M. et al. // Astrophys. J. 2020. V. 903. No. 1. Art. No. 21.*
8. *Aguilar M., Ali Cavasonza L., Ambrosi G. et al. // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 121. Art. No. 051101.*
9. *Aguilar M., Ali Cavasonza L., Ambrosi G. et al. // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 121. Art. No. 051102.*
10. *Picozza P., Galper A.M., Castellini G. et al. // Astropart. Phys. 2007. V. 27. No. 4. P. 296.*
11. *Shea M.A., Smart D.F., Gentile L.C. // Phys. Earth Planet. Interact. 1987. V. 48. No. 3–4. P. 200.*
12. https://root.cern.ch/doc/master/classTMVA_1_1MethodBDT.html.
13. *Modzelewska R., Bazilevskaya G.A., Boezio M. et al. // Astrophys. J. 2020. V. 904. No. 1. Art. No. 3.*
14. *Garcia-Munoz M., Meyer P., Pyle K.R., Simpson J. // Proc. 20th ICRC. V. 3. (Moscow, 1987). P. 303.*
15. *Marcelli N., Boezio M., Lenni A. et al. // Astrophys. J. Lett. 2022. V. 925. No. 2. Art. No. L24.*
16. *Bishoff D., Potgieter M.S., Aslam O.P.M. // Astrophys. J. 2019. V. 878. No. 1. Art. No. 59.*

Charge-sign dependence of cosmic-ray modulation by the PAMELA experiment

P. Mukhin^a, *, V. V. Mikhailov^a, A. V. Mikhailova^a on behalf of the PAMELA Collaboration

^aNational Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: pasha_myxin@mail.ru

To study the solar modulation of cosmic-ray fluxes below 1 GeV, machine learning methods allowed obtaining the flux ratios of positrons and electrons with energies from 100 to 500 MeV, and the fluxes of electrons and protons with 1–1.7 GV rigidities from the PAMELA experiment for 2006–2016. The observed features of the data obtained and its comparison with the AMS-02 experimental data enable researching the charge-sign dependence of the modulation around the solar minimum in 2009 and the maximum in 2015.