

Памяти А.М. Гальпера посвящается

ИЗОТОПЫ БОРА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ PAMELA

© 2024 г. Э. А. Богомолов^{1), *}, Г. И. Васильев¹⁾, В. Менн²⁾, О. Адриани^{3), 4)}, Г. А. Базилевская⁵⁾, Дж. Барбарини^{6), 7)}, Р. Белотти^{8), 9)}, М. Боецио¹¹⁾, В. Бонвичини¹¹⁾, М. Бонджи^{3), 4)}, С. Боттай⁴⁾, А. Бруно^{8), 9)}, А. Вакки^{11), 12)}, Е. Ваннуччини⁴⁾, С. А. Воронов¹⁰⁾, А. М. Гальпер¹⁰⁾, К. Де Сантис^{13), 14)}, В. Ди Феличе^{13), 15)}, Дж. Зампа¹¹⁾, Н. Зампа¹¹⁾, М. Казолино¹³⁾, Д. Кампана⁷⁾, П. Карлсон¹⁶⁾, Г. Кастеллини¹⁷⁾, Ф. Кафанья⁹⁾, А. А. Квашнин⁵⁾, А. Н. Квашнин⁵⁾, С. А. Колдобский¹⁰⁾, И. А. Лагойда¹⁰⁾, А. А. Леонов¹⁰⁾, А. Г. Майоров¹⁰⁾, В. В. Малахов¹⁰⁾, М. Мартуччи^{14), 18)}, Л. Марчелли¹⁴⁾, М. Мерге^{13), 14)}, В. В. Михайлов¹⁰⁾, Е. Моккьютти¹¹⁾, А. Монако^{8), 9)}, Н. Мори⁴⁾, Р. Мунини^{11), 19)}, Дж. Остериа⁷⁾, Б. Панико⁷⁾, П. Папини⁴⁾, П. Пикоцца^{13), 14)}, М. Риччи¹⁸⁾, С. Риччиарини⁴⁾, М. Симон²⁾, Р. Спарволи^{13), 14)}, П. Спиллантини^{3), 4)}, Ю. И. Стожков⁵⁾, Ю. Т. Юркин¹⁰⁾

Поступила в редакцию 15.09.2023 г.; после доработки 18.10.2023 г.; принята к публикации 18.10.2023 г.

В работе проведен новый анализ изотопного состава ядер бора (В) в галактических космических лучах (ГКЛ) в диапазоне жесткостей 1–5 ГВ (энергии ядер 0.1–1.5 ГэВ/нуклон) с использованием данных космического эксперимента PAMELA 2006–2014 гг. о жесткости регистрируемых ядер и их скорости (времяпролетный анализ и ионизационные потери в многослойном калориметре прибора). Новые результаты эксперимента PAMELA расширяют энергетический диапазон предшествующих измерений, согласуются с существующими немногочисленными данными и указывают на отклонения соотношений изотопов ядер В от данных моделирования GALPROP для ГКЛ, подобные отклонениям для изотопов Li и Be в данных PAMELA, которые можно интерпретировать как свидетельство наблюдения на фоне ГКЛ вклада нескольких локальных источников от взрывов близких (сотни парсек) сверхновых.

DOI: 10.31857/S0044002724020016, EDN: KSAWPE

1. ВВЕДЕНИЕ

В космическом эксперименте PAMELA впервые обнаружены [1] источники позитронов с энергией свыше нескольких десятков ГэВ, вероятно связанные с генерацией пар e^+ , e^- вблизи пульсаров в остатках близких (~сотен парсек) сверхновых

(SNR) [2]. Потоки этих позитронов на порядки выше фона от галактических космических лучей (ГКЛ). Подобные объекты могут быть также источниками ядер, и их поиск возможен, в частности, путем анализа отклонений изотопного состава ядер от ожидаемого в ГКЛ из-за различия условий

¹⁾ Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия.

²⁾ Университет Зиген, Зиген, Германия.

³⁾ Университет Флоренции, факультет физики, Флоренция, Италия.

⁴⁾ Национальный институт ядерной физики, Филиал во Флоренции, Флоренция, Италия.

⁵⁾ Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия.

⁶⁾ Неаполитанский университет имени Фридриха II, факультет физики, Неаполь, Италия.

⁷⁾ Национальный институт ядерной физики, Филиал в Неаполе, Неаполь, Италия.

⁸⁾ Университет Бари, факультет физики, Бари, Италия.

⁹⁾ Национальный институт ядерной физики, Филиал в Бари, Бари, Италия.

¹⁰⁾ Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия.

¹¹⁾ Национальный институт ядерной физики, Филиал в Триесте, Триест, Италия.

¹²⁾ Университет Удине, факультет математики и информатики, Удине, Италия.

¹³⁾ Национальный институт ядерной физики, Филиал в Риме “Tor Vergata”, Рим, Италия.

¹⁴⁾ Университет Рима “Tor Vergata”, факультет физики, Рим, Италия.

¹⁵⁾ Итальянское космическое агентство (ASI), Центр научной информации, Рим, Италия.

¹⁶⁾ Королевский технологический институт, факультет физики и Центр физики космических частиц имени Оскара Кляйна, Стокгольм, Швеция.

¹⁷⁾ Институт прикладной физики “Nello Carrara”, Флоренция, Италия.

¹⁸⁾ Национальная лаборатория INFN в Фраскати, Фраскати, Италия.

¹⁹⁾ Университет Триеста, Триест, Италия.

*E-mail: Edward.Bogomolov@gmail.com

распространения ядер. Скорее всего, потоки ядер, наблюдаемые в ГКЛ, являются смесью ГКЛ и космических лучей (КЛ) от локальных источников (ЛИ), которые могут возникать за счет ядерных взаимодействий ГКЛ с веществом SNR [3] либо генерироваться там за счет энергетики пульсаров. Предварительный изотопный анализ ядер В в гауссовом приближении был проведен нами при жесткостях 1–3.5 ГВ в 2018 г. [4]. В условиях собранной в эксперименте PAMELA статистики ядер Li и Be использование стандартных методов анализа изотопов показало ограниченность их применения [5]. В настоящем анализе использованы новые, нестандартные подходы, разработанные в ФТИ РАН.

2. МЕТОД АНАЛИЗА

Для изотопного анализа отбираются события, прошедшие без ядерных взаимодействий через времяпролетную систему (ToF) и более пяти слоев вольфрама в калориметре (Cal) спектрометра PAMELA. Анализ изотопов проводился в ФТИ с использованием собственного подхода [4, 6]. При анализе изотопов ядер лития (Li) и бериллия (Be) в условиях относительно низкой статистики обнаружилась ограниченность стандартного подхода [5].

Наряду с отличием экспериментальных распределений от гауссовых GEANT4-моделирование давало завышенный эффект от рассеяний ядер в материале прибора. Расчетное положение пиков изотопов и FWHM в распределениях по массе и потерях энергии в калориметре согласуется с полетными данными. Для разрешения проблемы в области перекрытия спектров изотопов в ФТИ при поиске изотопов ^{14}C были впервые использованы распределения, полученные из полетных данных [6]. Последующий опыт анализа изотопов Li и Be выявил наряду с завышением при GEANT4-моделировании эффектов от рассеяния ядер в материале прибора асимметрию экспериментальных распределений. При селекции изотопов ядер ^{10}B и ^{11}B отдельно использовались правые (для ^{10}B) и левые (для ^{11}B) ветви суммарного распределения $^{10}\text{B} + ^{11}\text{B}$. Положение границы раздела ядер ^{10}B и ^{11}B в анализируемом распределении, где события левее границы считаются ядрами ^{10}B , а правее — ядрами ^{11}B , определяется тождеством числа событий в области перекрытия в расчетных “хвостах” для ^{10}B и ^{11}B [4]. В настоящей работе использован этот подход и полученные результаты вероятно наиболее реалистичны.

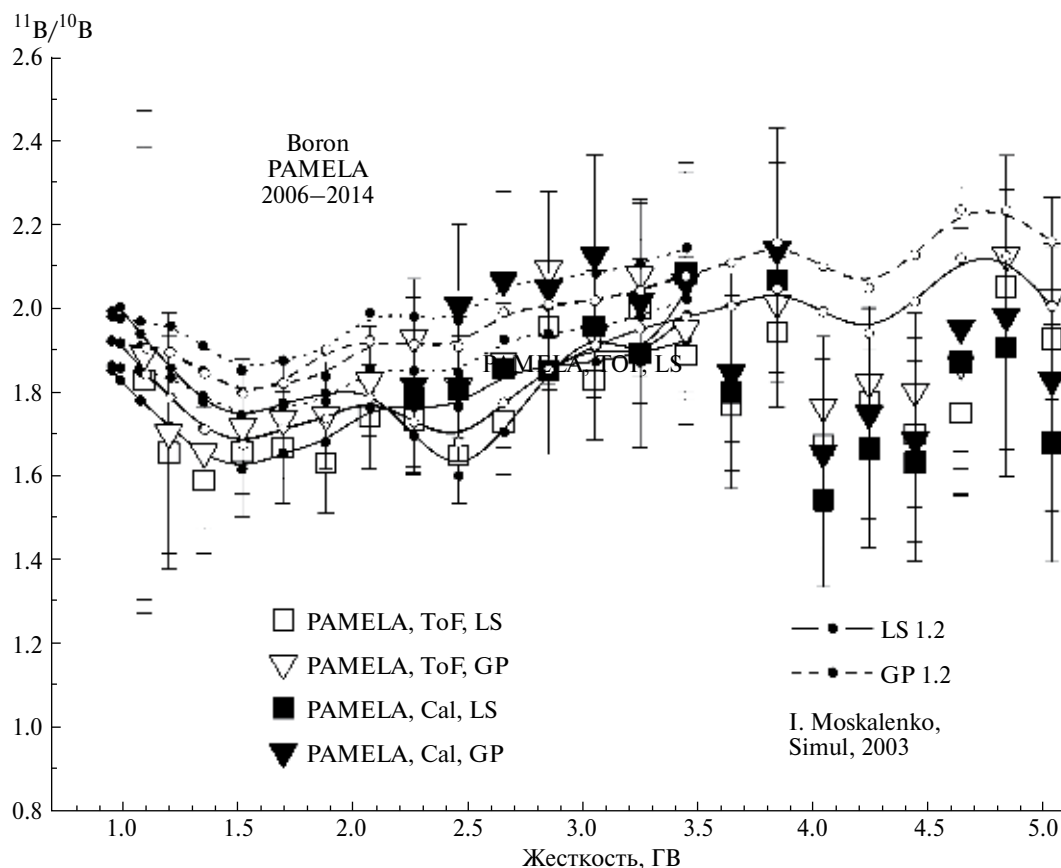


Рис. 1. $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ -отношения в зависимости от жесткости ядер.

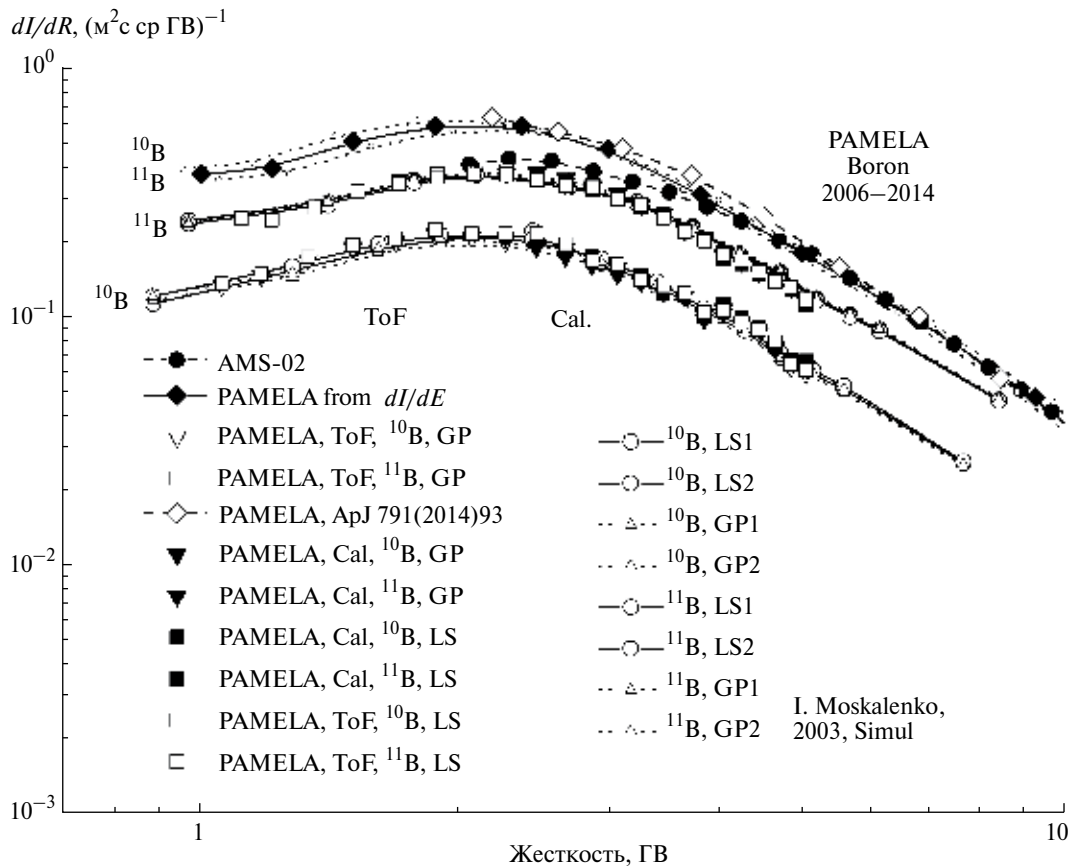


Рис. 2. Спектры ядер ¹⁰B и ¹¹B в зависимости от жесткости.

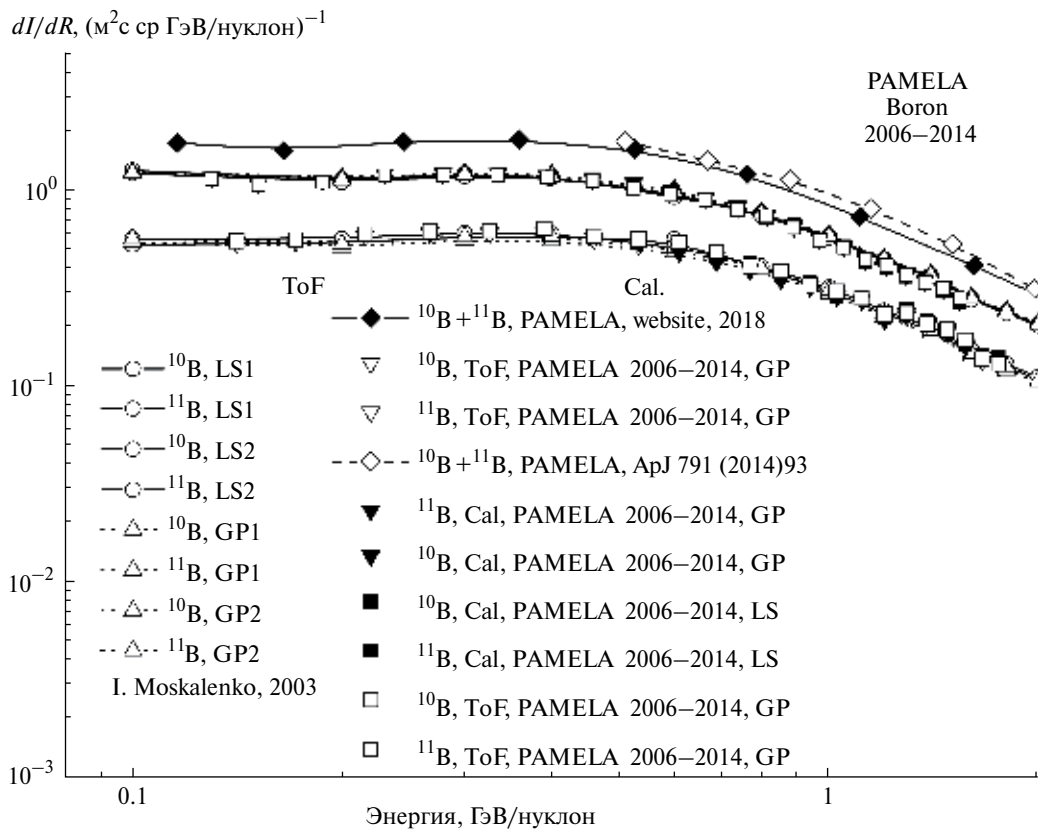


Рис. 3. Спектры ядер ¹⁰B и ¹¹B в зависимости от энергии.

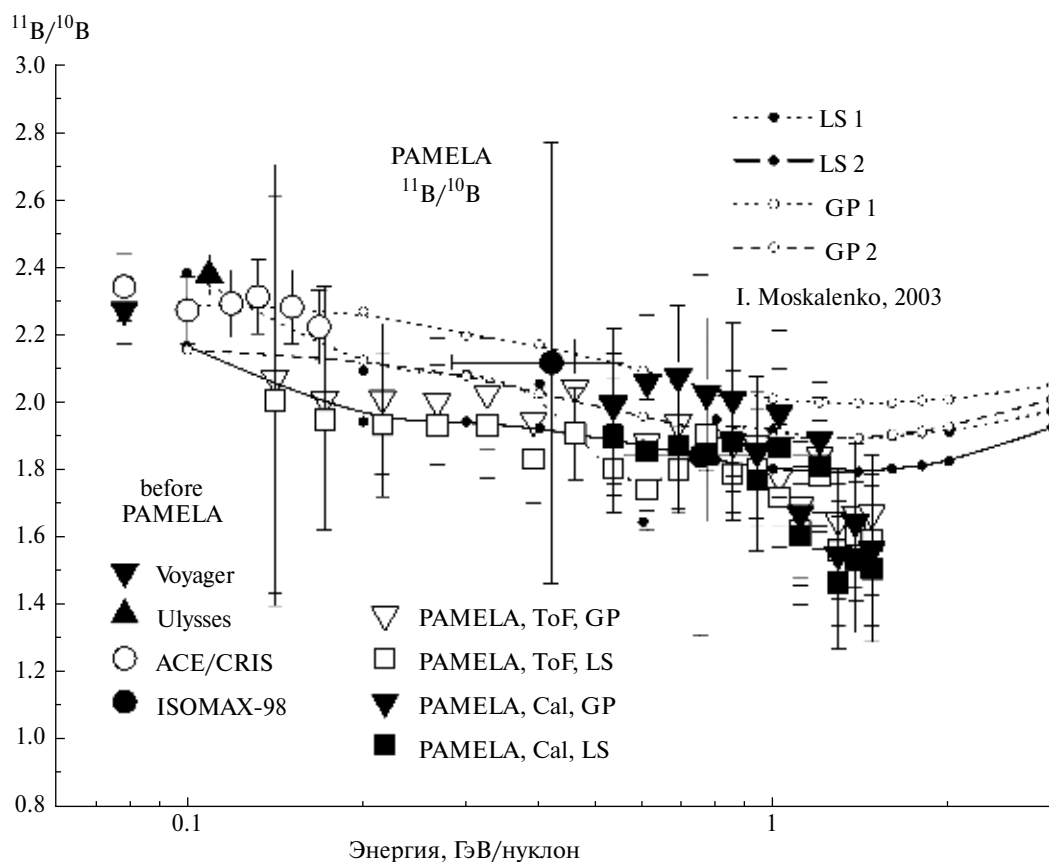


Рис. 4. $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ -отношения в зависимости от энергии ядер.

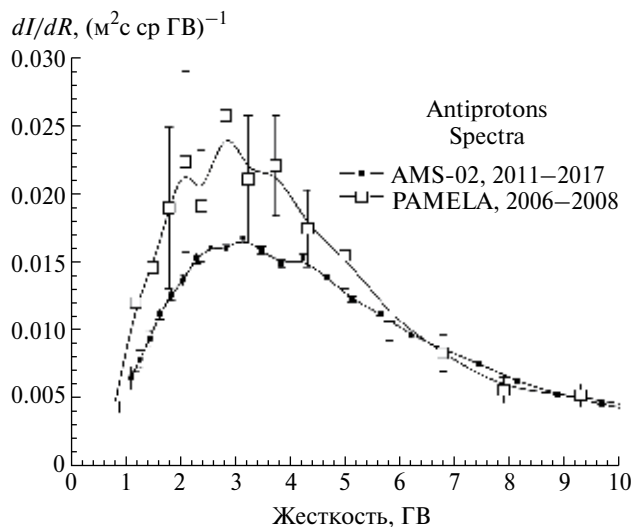


Рис. 5. AMS-02 и PAMELA, спектры антипротонов при жесткости 1–10 ГВ.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В результате анализа полетных данных эксперимента PAMELA, собранных в 2006–2014 гг., с использованием вышеупомянутого подхода в диапазоне жесткостей $\sim 1\text{--}5$ ГВ с шагом по жесткости

0.2 ГВ получены отношения $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$, представленные на рис. 1. Данные позволяют получить спектры изотопов ^{10}B и ^{11}B в зависимости от жесткости, представленные на рис. 2, преобразовать их в энергетические спектры, показанные на рис. 3, и получить отношение $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ в зависимости от энергии, представленное на рис. 4. Изотопный анализ потоков ядер бора (B) в ГКЛ до эксперимента PAMELA был проведен для отношения $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ только в энергетической области — $\sim 0.08\text{--}0.17$ ГэВ/нуклон в космических экспериментах Voyager 1 и 2, Ulysses, ACE/CRIS, а также измерен с точностью $\sim 30\%$ в баллонном эксперименте ISOMAX-98 при энергии 0.28–0.56 и 0.56–0.95 ГэВ/нуклон [3, 7]. Результаты нового анализа полетных данных эксперимента PAMELA 2006–2014 гг. для изотопов B в КЛ согласуются в пределах статистических ошибок с немногочисленными данными ранних измерений [3, 7], сравниваются с результатами GALPROP-моделирования $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ в ГКЛ (GP на рис. 1–4) и генерации в локальных источниках (LS на рис. 1–4), но дают отклонение от предсказаний для соотношений этих изотопов в ГКЛ [3] и могут указывать на присутствие дополнительного низкоэнергетического компонента предположительно из ЛИ, таких как остатки близких сверхновых (SNRs). Отклонения от предсказаний GALPROP-моделирования

для ГКЛ наблюдаются для отношений $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ при жесткостях ядер $\sim 1\text{--}2$ и $\sim 3\text{--}5$ ГВ или при энергиях $\sim 0.1\text{--}0.4$ и $0.7\text{--}1.4$ ГэВ/нуклон. Аналогичная картина при анализе данных PAMELA получена нами для изотопов Li и Be [8]. Отклонения могут достигать $\sim 20\text{--}30\%$ и не связаны со статистическими флуктуациями или методикой анализа. Также интересно, что согласно нашему анализу прецизионных данных AMS-02 [9, 10] данные экспериментов PAMELA и AMS-02 для антипротонов, представленные на рис. 5, и изотопов He в данных AMS-02 также могут указывать на подобные “волны” отклонений при жесткостях до ~ 5 ГВ. Недавний анализ спектра ядер Fe [11] показал особенность при жесткостях менее ~ 2 ГВ, которую авторы связывают с изотопом ^{60}Fe из локальных источников. Наш анализ данных AMS-02 для спектра ядер Fe, отношений Fe/He, Fe/O и Fe/Si [12] указывает на такую особенность также при жесткостях $\sim 3\text{--}5$ ГВ. Вероятными локальными источниками в SNRs особенностей изотопного состава и спектров при жесткостях до ~ 20 ГВ, согласно нашему анализу, могут быть, в частности, близкие взрывы белых карликов в созвездии Vela на расстоянии 200–250 пк. При жесткостях менее 5 ГВ часть наблюдаемых антипротонов может быть при этом из локальных источников.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаруженные при анализе данных эксперимента PAMELA для изотопов B при жесткостях $\sim 1\text{--}5$ ГВ отклонения изотопного состава от ожидаемого для ГКЛ являются вероятным указанием на вклад локальных источников с эффектом на уровне десятков процентов. Данные для соотношений $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ получены в хорошем согласии двумя независимыми методами (анализ данных TOF и калориметра), хорошо согласуются с многочисленными результатами существующих измерений [3, 7], что повышает их достоверность. Наш анализ данных AMS-02 при жесткостях $\sim 30\text{--}1000$ ГВ для позитронов, антипротонов и ядер от H до Fe [9] указывает на коррелированные подъемы интенсивности с эффектом на уровне единиц процентов от ГКЛ, которые могут быть связаны с обычными вторичными ядерными взаимодействиями и процессами ускорения в остатках близких SNRs, и складывается впечатление, что данные AMS-02 для антипротонов и позитронов не связаны с проблемой природы темной материи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. O. Adriani, G. C. Barbarino, G. A. Bazilevskaya, R. Bellotti, M. Boezio, E. A. Bogomolov, L. Bonechi, M. Bongi, V. Bonvicini, S. Bottai, A. Bruno, F. Cafagna, D. Campana, P. Carlson, M. Casolino, G. Castellini, *et al.*, *Nature* **458**, 607 (2009).
2. A. E. Petrov, A. M. Bykov, and S. M. Osipov, *J. Phys.: Conf. Ser.* **1697**, 012002 (2020).
3. I. V. Moskalenko, A. W. Strong, S. G. Mashnik, and F. C. Jones, *astro-ph/0306349*.
4. E. A. Bogomolov, G. I. Vasilyev, W. Menn, and S. A. Voronov (on behalf of the PAMELA Collab.), *Phys. At. Nucl.* **82**, 704 (2019).
5. W. Menn, E. A. Bogomolov, M. Simon, G. Vasilyev, O. Adriani, G. C. Barbarino, G. A. Bazilevskaya, R. Bellotti, M. Boezio, M. Bongi, V. Bonvicini, S. Bottai, A. Bruno, F. Cafagna, D. Campana, P. Carlson, *et al.*, *Astrophys. J.* **862**, 141 (2018).
6. Э. А. Богомолов, Г. И. Васильев, В. Менн, Изв. РАН. Сер. физ. **85**, 466 (2021) [*Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. Sci.: Phys.* **85**, 341 (2021)].
7. T. Hams, L. M. Barbier, M. Bremerich, E. R. Christian, G. A. de Nolfo, S. Geier, H. Göbel, S. K. Gupta, M. Hof, W. Menn, R. A. Mewaldt, J. W. Mitchell, S. M. Schindler, M. Simon, and R. E. Streitmatter, *Astrophys. J.* **611**, 892 (2004).
8. Э. А. Богомолов, Г. И. Васильев, В. Менн, О. Адриани, Г. А. Базилевская, Дж. Барбарино, Р. Белотти, М. Боецио, В. Бонвичини, М. Бонджи, С. Боттаи, А. Бруно, А. Вакки, Е. Ваннуччини, С. А. Воронов, А. М. Гальпер и др., Изв. РАН. Сер. физ. **87**, 918 (2023) [*Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* **87**, 863 (2023)].
9. M. Aguilar, L. Ali Cavazonza, G. Ambrosi, L. Aruda, N. Attig, F. Barao, L. Barrin, A. Bartoloni, S. Başeğmez-du Pree, J. Bates, R. Battiston, M. Behlmann, B. Beischer, J. Berdugo, B. Bertucci, V. Bindi, *et al.*, *Phys. Rep.* **894**, 1 (2021), Supplemental material and data.
10. M. Aguilar *et al.* (AMS Collab.), *Phys. Rev. Lett.* **123**, 181102 (2019), Supplemental material and data.
11. M. J. Boschini, S. Della Torre, M. Gervasi, D. Grandi, G. Jóhannesson, G. La Vacca, N. Masi, I. V. Moskalenko, S. Pensotti, T. A. Porter, L. Quadrani, P. G. Rancoita, D. Rozza, and M. Tacconi, *Astrophys. J.* **913**, 5 (2021).
12. M. Aguilar *et al.* (AMS Collab.), *Phys. Rev. Lett.* **126**, 041104 (2021), Supplemental material and data.

BORON ISOTOPES IN THE PAMELA EXPERIMENT

© 2024 E. A. Bogomolov¹⁾, G. I. Vasilyev¹⁾, W. Menn²⁾, O. Adriani^{3),4)}, G. A. Bazilevskaya⁵⁾, G. C. Barbarino^{6),7)}, R. Bellotti^{8),9)}, M. Boezio¹¹⁾, V. Bonvicini¹¹⁾, M. Bongi^{3),4)}, S. Bottai⁴⁾, A. Bruno^{8),9)}, A. Vacchi^{11),12)}, E. Vannuccini⁴⁾, A. M. Galper¹⁰⁾, C. De Santis^{13),14)}, V. Di Felice^{13),15)}, G. Zampa¹¹⁾, N. Zampa¹¹⁾, M. Casolino¹³⁾, D. Campana⁷⁾, P. Carlson¹⁶⁾, G. Castellini¹⁷⁾, F. Cafagna⁹⁾, A. A. Kvashnin⁵⁾, A. N. Kvashnin⁵⁾, S. A. Koldobskiy¹⁰⁾, I. A. Lagoida¹⁰⁾, A. A. Leonov¹⁰⁾, A. G. Mayorov¹⁰⁾, V. V. Malakhov¹⁰⁾, M. Martucci^{14),18)}, L. Marcelli¹⁴⁾, M. Merge^{13),14)}, V. V. Mikhailov¹⁰⁾, E. Mocchiutti¹¹⁾, A. Monaco^{8),9)}, N. Mori⁴⁾, R. Munini^{11),19)}, G. Osteria⁷⁾, B. Panico⁷⁾, P. Papini⁴⁾, P. Picozza^{13),14)}, M. Ricci¹⁸⁾, S. B. Ricciarini⁴⁾, M. Simon²⁾, R. Sparvoli^{13),14)}, P. Spillantini^{3),4)}, Y. I. Stozhkov⁵⁾, S. A. Voronov¹⁰⁾, Y. T. Yurkin¹⁰⁾

¹⁾ Ioffe Institute 194021, Saint-Petersburg, Russia

²⁾ University Siegen, 57068, Siegen, Germany

³⁾ University of Florence, Department of Physics, I-50019 Sesto Fiorentino, Florence, Italy

⁴⁾ INFN, Sezione di Florence, I-50019 Sesto Fiorentino, Florence, Italy

⁵⁾ Lebedev Physical Institute, RU-119991 Moscow, Russia

⁶⁾ University of Naples "Federico II", Department of Physics, I-80126 Naples, Italy

⁷⁾ INFN, Sezione di Naples, I-80126 Naples, Italy

⁸⁾ University of Bari, Department of Physics, I-70126 Bari, Italy

⁹⁾ INFN, Sezione di Bari, I-70126 Bari, Italy

¹⁰⁾ National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), RU-115409 Moscow, Russia

¹¹⁾ INFN, Sezione di Trieste, I-34149 Trieste, Italy

¹²⁾ University of Udine, Department of Mathematics and Informatics, I-33100 Udine, Italy

¹³⁾ INFN, Sezione di Rome "Tor Vergata", I-00133 Rome, Italy

¹⁴⁾ University of Rome "Tor Vergata", Department of Physics, I-00133 Rome, Italy

¹⁵⁾ Agenzia Spaziale Italiana (ASI) Science Data Center, I-00133 Rome, Italy

¹⁶⁾ KTH Royal Institute of Technology, Department of Physics, and the Oskar Klein Centre for Cosmoparticle Physics, AlbaNova University Centre, SE-10691 Stockholm, Sweden

¹⁷⁾ IFAC, I-50019 Sesto Fiorentino, Florence, Italy

¹⁸⁾ INFN, Laboratori Nazionali di Frascati, I-00044 Frascati, Italy

¹⁹⁾ University of Trieste, Department of Physics, I-34147 Trieste, Italy

In this work, a new analysis of the isotopic composition of boron nuclei (B) in galactic cosmic rays (GCR) in the range of rigidities of 1–5 GV (nuclear energies 0.1–1.5 GeV/nucleon) was carried out using data from the PAMELA space experiment 2006–2014 on the rigidity of detected nuclei and their velocity (time-of-flight analysis and ionization losses in the instrument's multilayer calorimeter). The new results of the PAMELA experiment expand the energy range of previous measurements, are consistent with the few existing data, and indicate deviations of the B isotope ratios from the GALPROP simulation data for the GCR, similar to the deviations for the Li and Be isotopes in the PAMELA data, which can be interpreted as evidence of observation against the background of the GCR the contribution of several local sources from explosions of nearby (hundreds of parsec) supernovae.