

УДК 524.1

ИЗОТОПЫ БОРА И УГЛЕРОДА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ РАМЕЛА

© 2021 г. Э. А. Богомолов¹, *, Г. И. Васильев¹, В. Менн² от коллаборации РАМЕЛА

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

²Университет Зиген, Зиген, Германия

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

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.

После доработки 19.11.2020 г.

Принята к публикации 28.12.2020 г.

С использованием данных РАМЕЛА 2006–2014 гг. о жесткости регистрируемых ядер и их скорости предпринята попытка определить $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ отношение в области энергий $\sim 0.1\text{--}1.0$ ГэВ/нуклон и впервые оценить отношение $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ при энергиях $\sim 0.1\text{--}1.5$ ГэВ/нуклон с использованием данных РАМЕЛА для бора. Представлены результаты изотопного анализа ядер бора и углерода в ГКЛ (спектры ^{12}C , ^{13}C , верхние пределы для ^{14}C и отношения $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ в зависимости от жесткости и энергии ядер) в сравнении с ограниченными данными измерений. Данные по отношению $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ позволяют оценить нижние пределы расстояний до возможных локальных источников ^{14}C .

DOI: 10.31857/S0367676521040086

ВВЕДЕНИЕ

В международном космическом эксперименте РАМЕЛА при исследовании первичного космического излучения впервые обнаружены источники позитронов высоких энергий, связанные с генерацией пар электронов-позитронов в остатках недавних (до \sim млн лет) близких (до ~ 300 пк) взрывов сверхновых (SN) [1]. Данные по позитронам подтверждены в орбитальных наблюдениях коллаборации AMS-02 [2, 3]. При анализе данных РАМЕЛА по изотопному составу легких ядер от водорода до бериллия также впервые получены вероятные свидетельства обнаружения вклада локальных источников легких ядер в галактических космических лучах (ГКЛ) [4]. За последние 2 тыс. лет люди наблюдали свыше 10 SN, причем в основном (~ 10) это были взрывы в двойных системах на расстояниях до ~ 20 тыс. световых лет от Земли, определяемых по наблюдениям остатков SN. При этих взрывах могли образовываться и ускоряться изотопы легких ядер, формируя суммарные спектры изотопов элементов от этих локальных источников. Данные о расстояниях до остатков SN с учетом датировки событий позволяют оценить современный возраст SN. Попытка изотопного анализа ядер бора в данных РАМЕЛА с использованием информации о жесткости ядер, их времени пролета через прибор и ионизационных потерь ядер в 44-х слоях стриповых детекторах калориметра РАМЕЛА была представлена на ISCR-2019 [5]. Статистика собран-

ных данных РАМЕЛА по изотопам бора ^{10}B и ^{11}B не позволила достоверно выделить вклад локальных источников [6] и последующий дополнительный анализ 2019–2020 гг. принципиально не изменил этот вывод.

Сравнительно высокая интенсивность ядер углерода в космических лучах и период полураспада 5700 лет нестабильного изотопа ^{14}C позволяет, согласно оценкам, провести поиск локальных источников ядер углерода от взрывов близких сверхновых в течение последних ~ 50 тыс. лет на расстояниях до $\sim 100\text{--}200$ пс. Данные по изотопному составу ядер углерода в космических лучах в настоящее время ограничены наблюдениями $^{13}\text{C}/^{12}\text{C} = 6.29 \pm 0.33\%$ на зондах Voyager 1, 2 в 1976–1994 гг. при энергиях 48–126 МэВ/нуклон [7] и верхним пределом для $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} + ^{13}\text{C}$ на уровне $2.3 \cdot 10^{-4}$ при энергиях 120–430 МэВ/нуклон, определенном в космическом эксперименте ACE/CRIS в 1997–1999 гг. [8]. Согласно расчетам, ожидаемое при распространении в Галактике отношение $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ равно $\sim 8\%$, а в звездах $\sim 1\%$ [9]. При временах, характерных для распространения космических лучей в Галактике, ядра ^{14}C полностью распадаются и в случае их обнаружения указывают на локальное происхождение ^{14}C . Положительный результат измерения отношения $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$ в широком энергетическом диапазоне позволяет оценить либо усредненное расстояние до локальных взрывов SN, либо до отдельных ис-

точников. Анализ данных PAMELA по регистрации ядер углерода в космических лучах предпринят с целью поиска ядер ^{14}C и расширения энергетического диапазона наблюдений отношения $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ до ~ 1.5 ГэВ/нуклон.

МЕТОД АНАЛИЗА

Селекция изотопов ядер до углерода в диапазоне жесткостей $\sim 1\text{--}5$ ГВ в международном космическом эксперименте PAMELA осуществляется с использованием данных траекторных измерений в трекаре из стриповых детекторов в поле зазора магнита прибора, дающих жесткость ядер, анализа времени пролета (TOF) ядер от их входа в прибор до выхода из магнита спектрометра и измерениями ионизационных потерь ядер в калориметре PAMELA [10]. Заряд ядер определяется из данных сцинтилляционного телескопа прибора. При жесткостях анализируемых событий свыше ~ 2 ГВ измерение скоростей ядер методом TOF не позволяет разделять изотопы и для селекции изотопов используются данные о ионизационных потерях ядер в стриповых детекторах многослойного калориметра PAMELA. При изотопном анализе в эксперименте PAMELA отбираются события, прошедшие через прибор без ядерных взаимодействий. Для каждого события в многослойном калориметре PAMELA возникает распределение ионизационных потерь (от 1 до 44 сигналов). По аналогии с анализом данных, полученных на идентификаторах релятивистских частиц из газовых пропорциональных камер на ускорителях высоких энергий, для улучшения разрешения изотопов из общего распределения ионизационных потерь (асимметричное распределение Ландау) отбирается половина минимальных сигналов (метод обрезания) и распределение сигналов приближается к распределению Гаусса с лучшей полусириной.

Для определения числа событий ^{12}C , ^{13}C и ^{14}C в выбранных с шагом 0.2 ГВ интервалах жесткостей, измеренных в зазоре магнита PAMELA и отличающихся от жесткостей на входе в прибор, при TOF анализе в области 0.7–2.3 ГВ проводилось сравнение экспериментальных распределений $1/\beta$ с результатами GEANT4 моделирования. В настоящее время пакет программ GEANT4 позволяет, к сожалению, моделировать только электромагнитные взаимодействия изотопов ядер углерода ^{12}C , ^{13}C , ^{14}C при пересечении материала PAMELA и только для ядер ^{12}C возможно моделирование ядерных взаимодействий. Из-за недостаточного разрешения изотопов ^{12}C и ^{13}C использовалось соотношение $^{13}\text{C}/^{12}\text{C} = 0.06$, которое согласуется с наблюдениями Voyager 1, 2 и не противоречит расчетным данным. Для оценки отношения $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ анализировались разности

распределений экспериментальных данных и результатов моделирования суммы распределений ^{12}C и ^{13}C . Аналогичная процедура использовалась при анализе данных калориметра в диапазоне измеренных жесткостей ядер 1.7–5.0 ГВ. Полученные предварительные результаты на уровне $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} \sim 0.02$ привели к выводу, что использованные для ядер ^{12}C и ^{13}C модельные распределения Гаусса недостаточно учитывают эффекты рассеяния ядер в материале PAMELA. Для решения задачи оценки фона $^{12}\text{C} + ^{13}\text{C}$ при поиске ядер ^{14}C были использованы с необходимой модификацией экспериментальные распределения ядер $^{10}\text{B} + ^{11}\text{B}$ (только 2 изотопа!) при анализе данных TOF и калориметра. В результате применения нового подхода фон рассеяний ядер бора полностью исключил события с ядрами ^{14}C и верхние пределы для соотношений $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ определялись статистикой ядер ^{12}C и статистическими ошибками используемого метода анализа. Данные времяпролетного анализа распределений и данных калориметра хорошо согласуются.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В результате анализа полетных данных PAMELA получены только верхние пределы для отношения $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ в зависимости от жесткости ядер до ~ 5 ГВ. При переходе от приборных результатов измерения соотношений изотопов к космическому пространству использованы данные GEANT4 моделирования. Полученные в зависимости от жесткости ядер оценки отношений $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ и верхних пределов $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ в ГКЛ с использованием данных PAMELA о спектре ядер углерода [11] преобразованы после получения жесткостных и энергетических спектров изотопов углерода на входе в прибор в отношения в зависимости от энергии изотопов. Оценка $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ и верхних пределов для $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ отношений, а также оценки спектров изотопов ^{12}C , ^{13}C и ^{14}C в зависимости от их жесткости представлены на рис. 1а и 1б. Аналогичные данные в зависимости от энергии ядер в сравнении с существующими экспериментальными данными для $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ [7] и верхнего предела для $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ [8] представлены на рис. 2а и 2б. Верхние пределы для отношения $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$ при жесткостях $\sim 3\text{--}5$ ГВ из данных PAMELA оценены на уровне $\sim 0.014\text{--}0.029$, а для $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ на 2 порядка меньше.

Проведенный в 2019–2020 гг. с использованием новых подходов дополнительный анализ изотопного состава ядер бора не позволил изменить принципиальный вывод, полученный предварительно к конференции ISCR-2019 [5], о невозможности из-за статистики данных PAMELA заметного выделения вклада локальных источни-

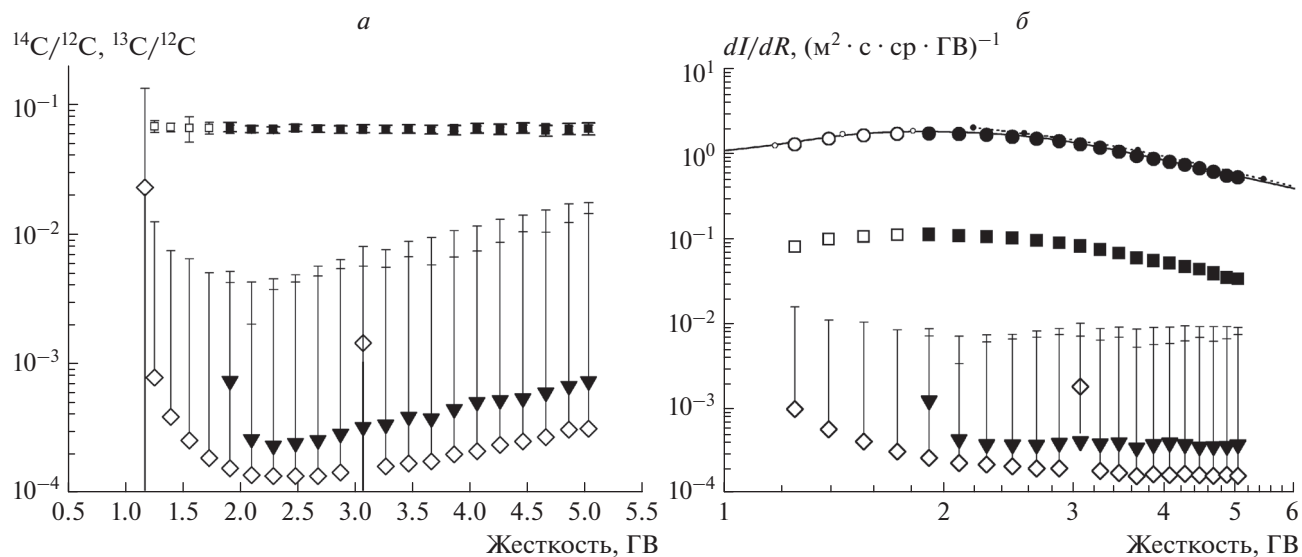


Рис. 1. \square – $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, TOF, \blacksquare – $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, калориметр, \diamond – $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$, TOF, верхние пределы, \blacktriangledown – $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$, калориметр, верхние пределы в зависимости от жесткости ядер (а); линия – спектр углерода в ГКЛ [11], \square – ^{13}C , TOF, \blacksquare – ^{13}C , калориметр, \diamond – ^{14}C , TOF, верхние пределы, \blacktriangledown – ^{14}C , калориметр, верхние пределы в зависимости от жесткости ядер (б).

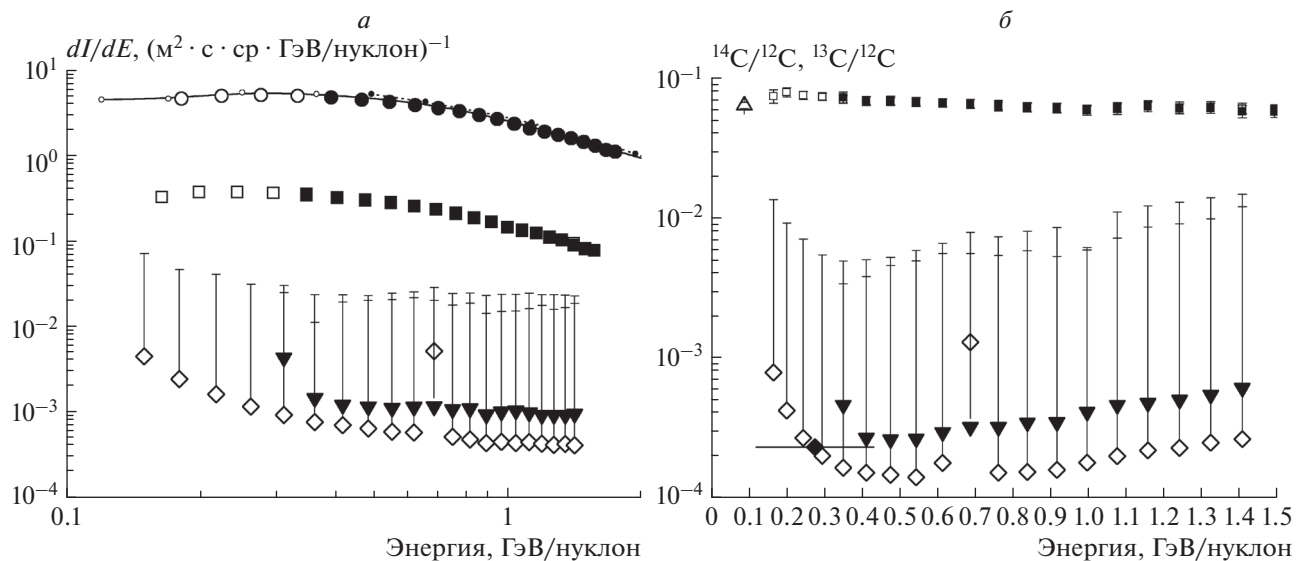


Рис. 2. Линия – спектр углерода [11], \square – ^{13}C , TOF, \blacksquare – ^{13}C , калориметр, \diamond – ^{14}C , TOF, верхние пределы, \blacktriangledown – ^{14}C , калориметр, верхние пределы в зависимости от энергии ядер (а); \square – $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, TOF, \blacksquare – $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, калориметр, \diamond – $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$, TOF, верхние пределы, \blacktriangledown – $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$, калориметр, верхние пределы в зависимости от энергии ядер, \triangle – $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, Voyager 1, 2 [7], \blacklozenge – $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$, верхний предел, ACE/CRIS [8] (б).

ков ядер бора при анализе соотношений $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ в зависимости от жесткости и энергии ядер. Соотношения изотопов меняются в пределах статистических ошибок, сохраняя общие тенденции распределения данных и подтверждая стабильность вывода. В дальнейшем возможно расширение изотопного анализа ядер бора до ~ 5 ГВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в настоящей работе предварительные данные анализа изотопного состава ядер углерода в космических лучах в энергетической области ~ 0.1 – 1.0 ГэВ/нуклон полученные в эксперименте PAMELA при измерениях в 2006–2014 гг., являющиеся основными результатами

данной работы, согласуются с данными измерений на космических аппаратах Voyager 1, 2 и ACE/CRIS, расширяют диапазон измерений, методические ошибки PAMELA в ~ 3 раза меньше. Оценка соотношений изотопов ^{14}C с периодом полураспада 5700 лет (с учетом Лоренц-фактора 1.154–2.517 в диапазоне измерений PAMELA ~ 6600 –14300 лет) и стабильных изотопов ^{13}C на уровне меньше ~ 0.01 с учетом процесса диффузии ядер от возможного источника при коэффициенте диффузии $\sim 3.3 \cdot 10^{28} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ [6] позволяет заключить, что возможный источник ядер ^{14}C не может находиться ближе ~ 190 пк и рождение сверхновой не могло произойти ранее ~ 73 тыс. лет назад. Из известных SN ближайшей является Geminga на расстоянии ~ 190 пк, но с возрастом ~ 342 тыс. лет. Анализ возможного наблюдения соотношения $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$ от локальных взрывов SN, наблюдавшихся на Земле в последние 2 тыс. лет показывает, что увеличение по сравнению возможностями PAMELA статистики регистрации изотопов ядер углерода примерно на 1–2 порядка, может привести к регистрации ядер ^{14}C от локальных источников. Решение этой задачи может быть выполнено коллаборацией AMS-02 благодаря огромной светосиле прибора. Соавторами работы, естественно, являются члены коллаборации PAMELA

[10, 11], обеспечившие получение исходной полетной информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al.* // Nature. 2009. V. 458. No. 7238. P. 607.
2. *Aguliar M., Ali Cavazonza L., Ambrosi G. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. Art. No. 141102.
3. *Aguliar M., Alberti G., Alpat B. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2019. V. 122. Art. No. 041102.
4. *Богомолов Э.А., Васильев Г.И.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 8. С. 1066; *Bogomolov E.A., Vasilyev G.I.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 8. P. 967.
5. *Bogomolov E.A., Vasilyev G.I., Menn W., Voronov S.A.* // Phys. Atom. Nucl. 2019. V. 82. P. 704.
6. *Moskalenko I.V., Strong A.W., Mashnik S.G. et al.* // arXiv: astro-ph/0306349. 2003.
7. *Webber W.R., Lukasiak A., McDonald F.B., Ferrando P.* // Astrophys. J. 1996. V. 457. P. 435.
8. *Yanasak N.E., Wiederbeck M.E., Mewald R.A. et al.* // Astrophys. J. 2001. V. 563. P. 768.
9. *Strong A.W., Moskalenko I.V.* // arXiv: astro-ph/0101068. 2001.
10. *Picozza P., Galper A.M., Castellini G. et al.* // Astropart. Phys. 2007. V. 27. P. 296.
11. *Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al.* // Astrophys. J. 2014. V. 791. P. 93.

Boron and carbon isotopes in the PAMELA experiment

E. A. Bogomolov^{a,*}, G. I. Vasilyev^a, W. Menn^b, on behalf of the PAMELA Collaboration

^a*Ioffe Institute RAS, Saint-Petersburg, 194021 Russia*

^b*University Siegen, Siegen, 57068 Germany*

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

Using PAMELA data from 2006–2014 on the rigidity of detected nuclei and their velocity, an attempt was made to determine the $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ ratio in the energy range of 0.1–1.0 GeV/nucleon and for the first time estimate the $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio at energies of ~ 0.1 –1.5 GeV/nucleon using the PAMELA data for boron. The results of isotopic analysis of boron and carbon nuclei in GCR (^{12}C , ^{13}C spectra, upper limits for ^{14}C and $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios depending on the rigidity and energy of nuclei) are presented in comparison with limited measurement data. The data on the $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio allow us to estimate the lower limits of the distances to possible local sources of ^{14}C .