

ПОТОКИ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИНДЕКСЫ РЕДКИХ И ОБИЛЬНЫХ ЯДЕР КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА НУКЛОН

© 2023 г. И. А. Кудряшов¹ *, А. Н. Турундаевский¹, Д. Е. Карманов¹, И. М. Ковалев¹,
А. А. Курганов¹, А. Д. Панов¹, Д. М. Подорожный¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

*E-mail: ilya.kudryashov.85@gmail.com

Поступила в редакцию 25.12.2022 г.

После доработки 12.02.2023 г.

Принята к публикации 29.03.2023 г.

В ходе обработки данных, полученных в космическом эксперименте НУКЛОН, получены результаты, имеющие важное астрофизическое значение. С помощью пакета GALPROP решена обратная задача распространения КЛ от источника (близкой сверхновой) до наблюдателя, построен покомпонентный спектр в источнике, показано, что в источнике наблюдается систематическое изменение степенного индекса (наклона спектра), что может быть интерпретировано как неполная ионизация космических лучей в момент ускорения на фронте ударной волны сверхновой. При анализе спектров по магнитной жесткости изучены потоки ядер азота и суммарный спектр редких ядер с нечетными зарядами от 9 до 19 (F, Na, Al, P, Cl, K). Построены отношения потоков нечетных и четных ядер. Обнаружено, что спектр редких нечетных ядер более жесткий, чем спектр обильных четных ядер ($Z = 10-20$) в области магнитных жесткостей 300–10 000 ГВ.

DOI: 10.31857/S0367676523701612, EDN: ONDZKB

ВВЕДЕНИЕ

Исследование химического состава и энергетического спектра галактических КЛ дает важную информацию о физике галактических источников космических лучей-сверхновых звезд. Наблюдаемые у земли спектры ГКЛ существенно отличаются от спектров в источниках, так как транспорт галактических космических лучей с жесткостью меньше 100 ТВ имеет диффузионный характер, с коэффициентом диффузии, зависящим от жесткости. При этом отдельным важным вопросам являются возможные отличия спектров обильных и редких ядер. Для изучения спектров источников необходимо решить обратную задачу распространения КЛ через галактическую межзвездную среду.

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

Для решения обратной задачи распространения были использованы результаты моделирования широко известного пакета GALPROP, в котором задача решается в прямом приближении [1]. При этом был использован набор параметров

диффузионной модели распространения, полученный коллективом коллаборации HELMOD на основе Монте-Карло моделирования [2].

Пакет GALPROP рассчитывает транспорт частиц в приближении изотропной диффузии, где диффузионный коэффициент D зависит от магнитной жесткости следующим образом

$$D = D_0(R/R_0)^d. \quad (1)$$

Из-за того, что характеристической величиной для механизмов распространения КЛ является магнитная жесткость, а в космических экспериментах измеряется энергия на частицу, энергетический диапазон измерений одного эксперимента недостаточен для построения модели. Поэтому для расширения диапазона экспериментальных данных в анализ включены два эксперимента – НУКЛОН [3–5] (два метода измерений – кинематический и классический калориметр) и АТИК [6]. Совместный анализ данных различных экспериментов ранее применялся в [7].

Для решения задачи перехода от наблюдаемому в локальном окружении спектра к спектру в источнике использовалась следующая методика:

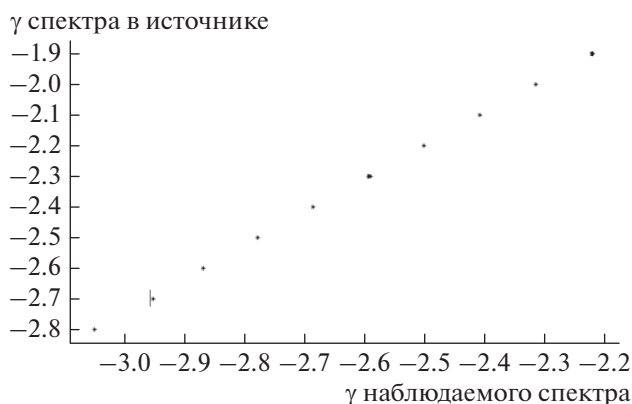


Рис. 1. Зависимость показателя спектра в источнике от наблюдаемого показателя спектра для фиксированных значений D_0 и δ .

— для каждого D_0 и δ из уравнения 1 в диапазоне трех стандартных отклонений от полученной методом Монте-Карло величины строилось семейство наблюдаемых спектров с различным показателем наклона спектра в источнике (γ_{star});

— область, соответствующая диапазону экспериментальных данных, аппроксимировалась степенной зависимостью, где показатель наклона — свободный параметр;

— для каждого такого семейства получалась зависимость наклона спектра в источнике от наклона наблюдаемого спектра, полученная зависимость аппроксимировалась прямой, и зная наблюдаемый наклон спектра из уравнения прямой можно получить спектр в источнике.

Зависимость показателя спектра в источнике от наблюдаемого показателя представлена на рис. 1 для фиксированных параметров модели. Подобное моделирование было проведено для всех обильных ядер и получены наклоны спектров КЛ в источнике. Полученные значения очень чувствительны к параметрам модели распространения КЛ — прежде всего D_0 и δ .

Зависимость от параметра δ ожидаема и предсказывается упрощенной моделью распространения Leaky box [8], зависимость же от D_0 можно наблюдать только в диффузионной модели распространения, Leaky box же к ней не чувствителен. Для уменьшения систематической неопределенности построена разность показателей наклона спектров гелия и остальных обильных элементов в измеряемом диапазоне D_0 и δ .

На рис. 2 показана разница между показателем наклона спектра гелия и остальных обильных первичных ядер, включая никель. Статистические ошибки пересчитаны из ошибок измеренного наклона спектров, верхняя и нижняя кривая

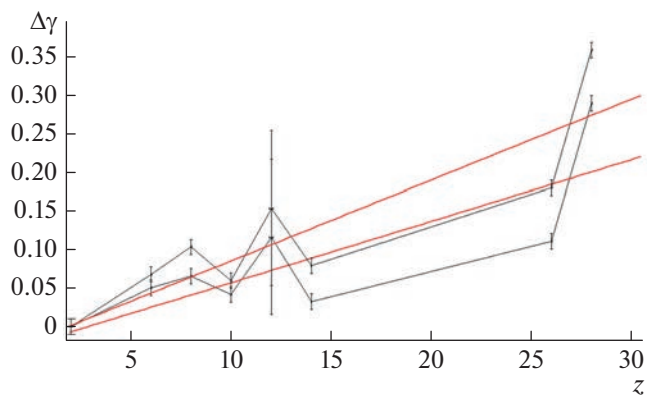


Рис. 2. Зависимость $\Delta\gamma$ от заряда ядра.

соответствуют соотношению D_0 и δ , при которых вычисляемая разница минимальна и максимальна соответственно. Им соответствуют две линейные аппроксимации, более пологая имеет наклон $6.9 \cdot 10^{-3} \pm 5 \cdot 10^{-5}$ ($\Delta\gamma/Z$). Таким образом прямая зависимость показателя наклона спектра в источнике от заряда ядра космических лучей в диапазоне от 25 до 1500 ГВ статистически обеспечена как минимум на уровне 9 стандартных отклонений.

Этот результат подтверждает ранее полученное наблюдение коллаборации АТИС [6]. Также указание на этот эффект получено по данным AMS-02 и HEAO-3-C2 [9] после учета солнечной модуляции в пакете HelMod.

Полученный результат можно интерпретировать несколькими способами:

— как особенность среды вокруг сверхновой, в которой происходит ускорение. Такая среда может быть обогащена тяжелыми элементами от звездного ветра перед взрывом сверхновой. Эффект тогда обусловлен радиальным наслоением различных элементов [10, 11];

— как неполную ионизацию тяжелых ядер космических лучей при ускорении на ударных волнах при взрывах сверхновых звезд;

— как зависимость эффективности инжекции в процессе ускорения от соотношения A/Z [12].

Полученный с высокой статистической достоверностью для всех ядер классического нуклеосинтеза, результат позволит существенно уточнить механизмы взрыва сверхновых звезд и последующего ускорения КЛ на ударных волнах, проецируемых этими взрывами.

СПЕКТРЫ РЕДКИХ ЯДЕР

При анализе информации, полученной в эксперименте НУКЛОН, возникает вопрос, отличаются ли спектры редких и обильных ядер. Как

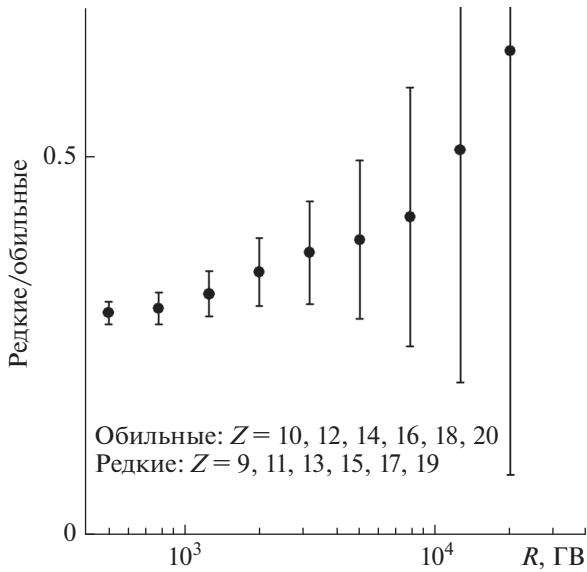


Рис. 3. Отношение спектров редких и обильных ядер.

правило, обильными являются ядра с четным зарядом, начиная с углерода, редкими – нечетные ядра (азот, фтор и т.д.). Естественно, искать возможные различия спектров в шкале по магнитной жесткости. Сложность работы со спектрами редких ядер заключается в том, что из-за конечного зарядового разрешения возможна перекачка из соседних обильных ядер. Поэтому пришлось использовать более жесткие критерии для идентификации ядер: отбирались только ядра с $Z = Z_0 \pm 0.4$.

Для увеличения статистики сравнивались суммарные потоки редких ядер с зарядами 9, 11, 13, 15, 17, 19 и обильных ядер с зарядами 10, 12, 14, 16, 18, 20. Полученное отношение спектров представлено на рис. 3. Это отношение растет с ростом магнитной жесткости, что говорит о более жестком спектре редких ядер. Однако статистические ошибки велики и требуется более детальный анализ для определения статистической обеспеченности. При различных порогах по магнитной жесткости методом максимального правдоподобия определялся показатель спектра как для редких, так и для обильных ядер. На рис. 4 представлены распределения по абсолютной величине показателя интегрального спектра для порогов 400 и 4000 ГВ. Оказалось, что показатели спектра обильных и редких ядер при пороге по магнитной жесткости 400 ГВ равны 2.34 ± 0.015 и 2.24 ± 0.025 соответственно. Таким образом, разница показателей на уровне 3.4 σ .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный анализ экспериментальных данных показал наличие неизвестных ранее эффектов в спектрах космических лучей. Обнаружена прямая зависимость показателя наклона спектра в источнике от заряда ядра космических лучей в диапазоне от 25 до 1500 ГВ, с использованием пакета GALPROP сделаны оценки спектров в источниках. Показано отличие спектров редких и обильных ядер, спектр редких нечетных ядер более жесткий.

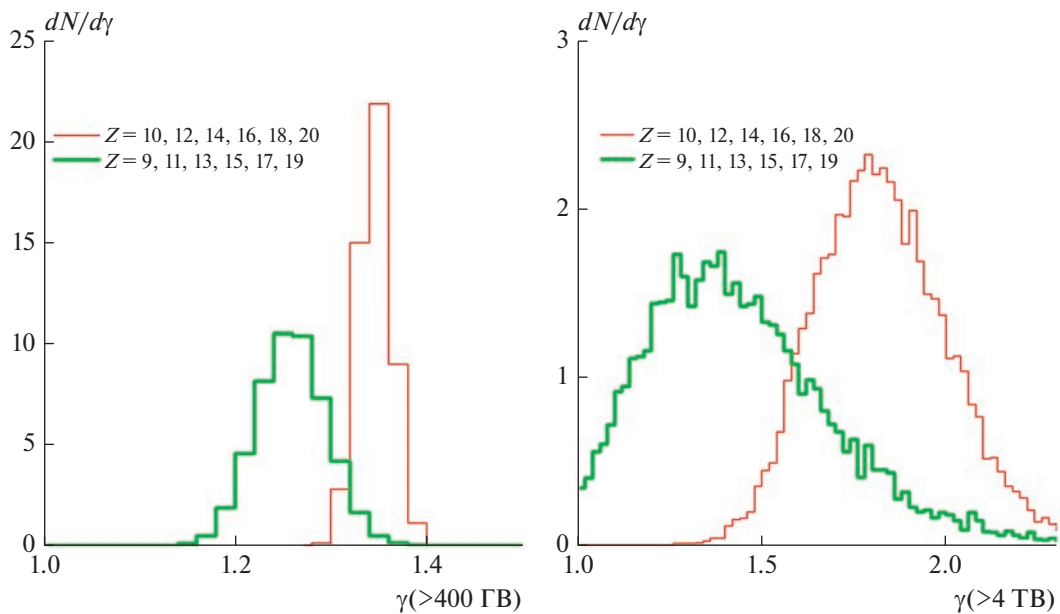


Рис. 4. Распределения восстановленных показателей интегрального спектра для порогов 400 и 4000 ГВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://galprop.stanford.edu>.
2. <https://www.helmod.org/index.php>.
3. Турундаевский А.Н., Васильев О.А., Карманов Д.Е. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 4. С. 478; *Turundaevskiy A.N., Vasiliev O.A., Karmanov D.E. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 4. P. 353.
4. Аткин Э.В., Булатов В.Л., Васильев О.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 8. С. 1077; *Atkin E.V., Bulatov V.L., Vasiliev O.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 8. P. 977.
5. Панов А.Д., Аткин Э.В., Булатов В.Л. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 8. С. 1080; *Panov A.D., Atkin E.V., Bulatov V.L. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 8. P. 980.
6. Панов А.Д., Зацепин В.И., Сокольская Н.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 3. С. 318; *Panov A.D., Zatsepin V.I., Sokolskaya N.V.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 3. P. 285.
7. Кудряшов И.А., Ковалев И.М., Курганов А.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 4. С. 508; *Kudryashov I.A., Kovalev I.M., Kurganov A.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 4. P. 379.
8. Ptuskin V, Strelnikova O., Sveshnikova L. // Proc. 31st ICRC (Łodz, 2009). P. 593.
9. Boschini M.J., Della Torre S., Gervasi M. et al. // *Astrophys. J.* 2018. V. 858. P. 61.
10. Ohira Y., Ioka K. // *Astrophys. J. Lett.* 2011. V. 729. P. L13.
11. Ohira Y., Kawanaka N., Ioka K. // *Phys. Rev. D.* 2016. V. 93. Art. No. 083001.
12. Malkov M.A. // *Phys. Rev. E.* 1998. V. 58. P. 4911.

Fluxes and spectral indices of rare and abundant nuclei of cosmic rays according to the data of the NUCLEON satellite experiment

I. A. Kudryashov^{a, *}, A. N. Turundaevskiy^a, D. E. Karmanov^a, I. M. Kovalev^a,
A. A. Kurganov^a, A. D. Panov^a, D. M. Podorozhny^a

^a *Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: ilya.kudryashov.85@gmail.com*

During the processing of the data obtained in the space experiment NUCLEON, results were obtained that were of significant astrophysical importance. Using the GALPROP package, the inverse problem of the propagation of cosmic rays from the source (close Supernovae) to the observer was solved, a component spectrum was calculated at the source. It was shown that a systematic change in the power index (slope of the spectrum) was observed at the source, which can be interpreted as incomplete ionization of cosmic rays now of acceleration at the front of the supernova shock wave. Magnetic rigidity spectra analysis was applied for nitrogen nuclei fluxes and the total spectrum of rare nuclei with odd charges from 9 to 19 (F, Na, Al, P, Cl, K). Ratios of odd and even nuclei fluxes are calculated. It turned out that the spectrum of rare, odd nuclei is more rigid than the spectrum of abundant even nuclei ($Z = 10-20$) at the magnetic rigidity area 300–10000 GV.