УДК 524.1

О ВОЗМОЖНОСТИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОЛЕНА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВБЛИЗИ 10 ТВ КАК ВКЛАДА ОДНОГО БЛИЗКОГО ИСТОЧНИКА

© 2021 г. И. А. Кудряшов^{1,} *, И. М. Ковалев¹, А. А. Курганов¹, Ф. К. Гасратов², В. В. Латонов³, В. Д. Юровский², А. Д. Панов¹, А. Н. Турундаевский¹

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

 $^2\Phi$ едеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

"Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова", физический факультет, Москва, Россия

 3 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

"Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова",

механико-математический факультет, Москва, Россия

**E-mail: ilya.kudryashov.85@gmail.com* Поступила в редакцию 19.10.2020 г. После доработки 19.11.2020 г. Принята к публикации 28.12.2020 г.

Рассматривается описание неоднородности спектра космических лучей в области 10 TB (малое колено), наблюдаемой в данных некоторых прямых экспериментов космических лучей, в терминах изотропной диффузии от одиночного близкого источника. Показано, что такое описание возможно, найдена область возможной локализации источника в пространстве и времени и его энергетика.

DOI: 10.31857/S0367676521040207

ВВЕДЕНИЕ

Результаты некоторых экспериментов физики космических лучей (КЛ) [1-3] свидетельствуют об изменении показателя спектра КЛ в районе магнитной жесткости частиц 10 ТВ (для определенности назовем это явление малым коленом). Данные прямого космического эксперимента НУКЛОН [1] позволяют разрешить поэлементную структуру малого колена для каждого из обильных первичных компонент КЛ и показывают, что излом имеет место вблизи одной и той же магнитной жесткости 10 ТВ для всех обильных ядер, независимо от *Z*.

Такая неоднородность в регулярном спектре КЛ может быть объяснена несколькими причинами: механизмами рождения КЛ (например, предел ускорения в оболочках сверхновых определенного типа), механизмами распространения или вкладом в поток КЛ одиночного близкого источника [4]. Значительная резкость излома в терминах спектров магнитной жесткости [1, 3] является косвенным указанием на то, что малое колено определяется пределом ускорения КЛ в одиночном близком источнике типа остатка сверхновой. Если бы это был вклад нескольких источников, то трудно было бы ожидать столь резкого излома. Поэтому в настоящей статье изучается возможность объяснения малого колена космических лучей вкладом единственного близкого источника.

Для проверки этой гипотезы была развита математическая модель описания спектральных особенностей космических лучей в терминах диффузии от близкого источника, впервые предложенная Ерлыкиным и Вольфендейлом [5].

Авторами проведена аппроксимация свободных параметров модели по экспериментальным данным и построены области параметров для допустимого и наиболее вероятного единичного источника. Существенным отличием от предыдущих работ этого типа, имеющих отношение к большому колену космических лучей Куликова— Христиансена вблизи 3 ПэВ по энергии на частицу, является наблюдение малого колена не только в суммарном спектре всех частиц, но и в спектрах отдельных обильных ядер. То есть мы имеем дело с гораздо более детальной информацией, чем это сейчас доступно для 3 ПэВ — колена КЛ.

РАССЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Математическая модель ожидаемого потока строилась как сумма вклада близкого источника и галактического фона КЛ:

$$F_{summ} = F_{bgr}(R) + F_{star}(R).$$

В качестве галактического фона был выбран степенной спектр $F = a_0 R^{-\gamma}$, где параметры a_0 и γ для каждого ядра КЛ соответствуют наклонам спектров, измеренным в диапазоне 50 ГВ—3000 ГВ по данным экспериментов НУКЛОН [1], AMS-2 [6] и ATIC [7].

Вклад близкого источника рассчитывался путем решения уравнения диффузии в приближении источника-вспышки (мгновенного во времени и точечного в пространстве). Это приближение хорошо описывает пространственную локализацию источников типа остатков сверхновых, так как расстояния до таких источников много больше их размеров. Приближение хорошо работает для относительно старых источников космических лучей (десять и более тысяч лет), но может давать лишь качественно верную картину для более молодых остатков сверхновых.

Спектр в источнике задается двойным степенным законом с изломом и гладкой сшивкой двух степенных спектров в точке излома [8]:

$$Q(R,t,r) = R^{-\gamma_0} (1 + (R/R_{ref})^{\omega_0})^{-\delta\gamma_0/\omega_0} dR_{ref}$$

где R — магнитная жесткость, γ_0 — показатель спектра до излома, $\delta\gamma$ — разница в показателях спектров до и после излома, ω_0 — коэффициент сглаживание излома, R_{ref} — положение излома с показателем $\gamma = 2$ и $\delta\gamma = 3$. Предполагается, что форма спектров одинакова для всех компонент КЛ и для различных компонент КЛ различается лишь интегральная интенсивность.

Уравнение диффузии для близкого источника имеет вид:

$$\partial N/\partial t - \nabla (D\nabla N) = Q(R,t,r),$$
 (1)

где N — концентрация КЛ, Q — функция источника, D — коэффициент диффузии, вычисляемый по формуле:

$$D_{xx}[R] = D_{xx0} \left(\frac{R}{R_0} \right)^{\circ},$$

где $D_{xx0} = 4.3 \cdot 10^{28} \text{ см}^2 \text{ c}^{-1}$ и $\delta = 0.395$ и $R_0 = 4.5 \text{ ГВ} -$ параметры, взятые из работы [9].

Так как поток мгновенного точечного источника с определенной магнитной жесткостью выражается просто функцией Грина уравнения диффузии, то поток космических лучей F, удовлетворяющий уравнению (1) для точечного источника в приближении мгновенной вспышки со спектром Q(R), вычисляется как:

$$F(R,t,r) = (c/4\pi)G(R,t,r)Q(R),$$

где G(R, t, r) — функция Грина для трехмерной диффузии в бесконечном пространстве.

АППРОКСИМАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В работе использованы данные всех прямых экспериментов КЛ, доступные на текущий момент времени в диапазоне энергий от 100 ГэВ до 100 ТэВ: НУКЛОН [1], AMS-02 [6], ATIC [7], CREAM [3], PAMELA [10], CALET [11], DAMPE [12].

Для поиска гипотетического близкого источника, описывающего обсуждаемую неоднородность спектра, необходимо оптимизировать его параметры по положению в пространстве, возрасту, энергии взрыва (в предположении, что источник КЛ – остаток сверхновой). Для поиска оптимальных возраста и расстояния до источника {*t*, *r*} проводилась минимизация функционала:

$$\chi^2 = \sum \left[\left(f_i^{mod} - F_i \right) / \sigma_i \right]^2,$$

где f_i^{mod} – вклады модельных спектров, F_i – точки экспериментальных спектров, σ_i – соответствующие экспериментальные ошибки; суммирование проводится по всем доступным экспериментальным точкам *i* различных *Z*-спектров различных экспериментов. Иными словами, оптимизация проводится по всем доступным прямым экспериментам сразу с учетом наличия информации по отдельным ядрам.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для каждой точки пространства $\{t, r\}$ минимизировалось значение χ^2 по параметрам энергии и химического состава источника. Полученная поверхность $\chi^2(t, r)$ имеет сложную форму с выраженной областью минимума.

Допустимой считается область пространства $\{t, r\}$ с потребной энергетикой источника $W < 10^{51}$ эрг, так как мощность взрыва сверхновой по современным представлениям [13] не превышает это значение. В расчетах предполагалось, что в энергию космических лучей уходит одна десятая часть полной энергии взрыва.

На рис. 1 показана карта линий уровня χ^2 (на одну степень свободы), где величина χ^2 передана также и в цветовой шкале. Оптимальное значение χ^2 заметно больше единицы в основном по той причине, что разные экспериментальные данные не очень хорошо соответствуют друг другу, поэтому хорошо оптимизировать данные всех экспериментов одновременно невозможно. Нижняя извилистая линия соответствует уровню энергии $W = 10^{50}$ эрг, средняя – уровню $W = 10^{51}$ эрг, верхняя – $W = 10^{52}$ эрг.

Оптимальное положение источника в пространстве $\{t, r\}$ (область минимума χ^2) соответствует области 0.2—0.3 кпс и возрасту от 7 до 10 килолет. Энер-

ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ том 85 № 4 2021



Рис. 1. Карта линий уровня функции χ^2 на одну степень свободы. Величина χ^2 передана также в цветовой шкале.

гия источника находится между 10^{50} и 10^{51} эрг. Ожидаемые спектры, соответствующие источнику 10 килолет, 0.3 кпс, вместе с некоторыми экспериментальными данными, использованными в анализе, показаны на рис. 2. На данном этапе мы не обсуждаем вклад близкого источника в анизотропию ГКЛ, так как это довольно сложный вопрос, требующий специального анализа. Данный вклад будет зависеть от суперпозиции положения источника и направления локального межзвездного магнитного поля (так как локальный тензор диффузии существенно анизотропен ($D_{II}/D_{\perp} > 10$) [14] и может варыироваться в широких пределах [15, 16]). Модель диффузионного транспорта с учетом изменения соотношения компонентов тензора локальной $D_{II}/D_{\perp} > 10$ и глобальной диффузии $D_{II}/D_{\perp} \sim 2$ [17] будет рассмотрена в следующих публикациях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для объяснения природы малого колена КЛ, в работе предложена модель вклада одиночного точечного источника-вспышки в фоновый спектр КЛ в приближении диффузии без энергетических потерь и фрагментации. Модель демонстрирует разумное согласие с экспериментальными данными при разумной энергетике источника до 1051 эрг и предсказывает наиболее вероятную область существования такого гипотетического источника на расстоянии 0.2-0.3 кПа от Земли с возрастом от 7 до 10 килолет. Надо отметить, что оптимальный источник получается довольно мопоэтому приближение лодым. источникавспышки для его описания является не очень точ-



Рис. 2. Спектры водорода и гелия, получаемые в модели для источника с возрастом 10 килолет, на расстоянии 0.3 кпс, вместе с экспериментальными данными, использованными для аппроксимации.

ным. Поэтому представленные результаты следует считать предварительными, и в последующей работе мы предполагаем включить в анализ развитие источника во времени. Таким образом, в работе продемонстрировано, что объяснение нового колена КЛ вблизи 10 ТВ по магнитной жесткости (малого колена) вкладом единственного остатка близкой сверхновой в наблюдаемые потоки космических лучей возможно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Аткин Е., Булатов В., Дорохов В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т. 108. № 1. С. 5; Atkin E., Bulatov V., Dorokhov V. et al. // JETP Lett. 2018. V. 108. No. 1. P. 513.
- Alfaro R. et al. (HAWC Collaboration) // Phys. Rev. D. 2017. V. 96. Art. No. 122001.
- 3. Yoon Y.S., Anderson T., Barrau A. et al. // arXiv: 1704.02512. 2017.
- Guo Y.Q., Yuan Q. // Chin. Phys. C. 2018. V. 42. No. 7. Art. No. 075103.
- Erlykin A.D., Wolfendale A.W. // J. Phys. G. 1997. V. 23. P. 9.
- Aguilar M. // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 114. No. 17. Art. No. 171103.

- 7. Панов А.Д., Адамс Д.Х., мл., Ан Х.С. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2009. Т. 73. № 5. С. 602; *Panov A.D., Adams J.H., Ahn H.S. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2009. V. 73. No. 5. P. 564.
- 8. Hörandel J.R. // Astropart. Phys. 2003. V. 19. P. 193.
- Boschini M.J., Della Torre S., Gervasi M. et al. // Astrophys. J. 2017. V. 840. No. 2. P. 115.
- Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. // Astrophys. J. 2013. V. 765. No. 2. P. 91.
- Adriani O. et al. (CALET Collaboration) // Phys. Rev. Lett. 2019. V. 122. No. 18. Art. No. 181102.
- DAMPE Collaboration // Nature. 2017. V. 552. No. 7683. P. 63.
- Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Тутынь И.А. Нуклеосинтез во Вселенной. (Основные этапы развития Вселенной от момента Большого Взрыва). М.: URSS, 2019.
- Giacinti G., Kachelrieβ M., Semikoz D.V. // J. Cosmol. Astropart. Phys. 2018. V. 2018. No. 7. Art. No. 051.
- 15. Becker Tjus J., Merten L. // Phys. Rep. 2020. V. 872. P. 1.
- Casse F., Lemoine M., Pelletier G. // Phys. Rev. D. 2002. V. 65. No. 2. Art. No. 023002.
- Гинзбург В.Л. Астрофизика космических лучей. М.: Наука, 1990.

About the possibility of interpreting the knee of cosmic rays near 10 TV as a contribution of one close source

I. A. Kudryashov^{*a*, *}, I. M. Kovalev^{*a*}, A. A. Kurganov^{*a*}, F. K. Gasratov^{*a*}, V. V. Latonov^{*a*}, V. D. Yurovskiy^{*a*}, A. D. Panov^{*a*}, A. N. Turundaevskiy^{*a*}

^aMoscow State University, Moscow, 119991 Russia *e-mail: ilya.kudryashov.85@gmail.com

We discuss the description of the inhomogeneity of the spectrum of cosmic rays in the region of 10 TV (small knee), observed in the data of some direct experiments of cosmic rays, in terms of isotropic diffusion from a single close source. It is shown that such a description is possible, the area of possible localization of the source in space and time and its energy are found.