УДК 524.1

ОСОБЕННОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ПЕРВИЧНЫХ И ВТОРИЧНЫХ ЯДЕР КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ: СОГЛАСОВАННАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

© 2021 г. А. А. Лагутин^{1,} *, Н. В. Волков¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Алтайский государственный университет", Барнаул, Россия

> **E-mail: lagutin@theory.asu.ru* Поступила в редакцию 19.10.2020 г. После доработки 19.11.2020 г. Принята к публикации 28.12.2020 г.

Обсуждается сценарий, позволяющий дать самосогласованное объяснение основных особенностей энергетических спектров первичных и вторичных ядер космических лучей, установленных в последнее десятилетие в экспериментах. Представлены новые результаты расчетов спектров H, He и основных групп ядер.

DOI: 10.31857/S0367676521040219

введение

Анализ данных, полученных в последнее десятилетие в экспериментах нового поколения ATIC-2 [1], CREAM [2], PAMELA [3], AMS-02 [4–9], DAMPE [10], CALET [11] и NUCLEON [12] по спектрам различных групп ядер показал, что они не описываются степенным законом. В области R > 100 ГВ наблюдается уполаживание спектров. Эту особенность поведения спектров в англоязычной литературе принято называть "hardening".

Прецизионные данные AMS-02 [6, 9] показали, что в области $R \sim 60 \ \Gamma B - 3 \ T B$ спектры групп ядер He, C, O и Ne, Mg, Si имеют практически одинаковую зависимость от жесткости R. Спектры вторичных ядер Li, Be, B также имеют одинаковую зависимость от жесткости [7]. Вместе с тем, в области $R > 200 \ \Gamma B$ эти спектры уполаживаются быстрее, чем спектры первичных ядер.

Выявленные особенности стимулировали разработку новых теоретических моделей для их объяснения. В работах [13–22] для решения проблемы "hardening" предложены модификации механизмов ускорения частиц в источниках, модели с разными режимами диффузии ядер космических лучей (КЛ) в разных областях Галактики и суперпозицией вкладов от близких и далеких групп источников.

Целью данной работы является формулировка сценария, который позволяет дать самосогласованное объяснение основных особенностей энергетических спектров первичных и вторичных ядер КЛ.

МОДЕЛЬ

Основные положения предлагаемого в работе сценария заключаются в следующем: 1. Все частицы с жесткостями 30 $\leq R \leq 5 \cdot 10^7 \, \Gamma B$, наблюдаемые в Солнечной системе, ускоряются галактическими источниками, спектр генерации сте-

пенной $J \propto R^{-\gamma}$.

2. Источники КЛ делятся на две группы [23]: многочисленные старые ($t \ge 10^6$ лет) удаленные ($r \ge 1$ кпк) и близкие молодые источники ($r < 10^6$ сталь в сталь и сточники ($r < 10^6$ сталь в сточники ($r < 10^6$ сточники (r < 1

< 1 кпк, $t < 10^6$ лет). Пространственное разделение источников приводит к разделению наблюдаемых потоков ядер на две компоненты:

$$V(\vec{r},t,R) = J_G(\vec{r},R) + J_L(\vec{r},t,R).$$

Здесь J_G — глобальная компонента спектра, обозначающая вклад многочисленных старых удаленных источников, включая вклад вторичных ядер от ядерных взаимодействий частиц, ускоренных в стационарных источниках, с межзвездной средой; J_L — локальная компонента, определяемая близкими молодыми источниками.

3. Резко-неоднородный характер распределения вещества и магнитного поля в Галактике приводит к неклассическому характеру диффузии КЛ [24]. Такой характер движения проявляется в наличии аномально больших свободных пробегов r частиц в межзвездной среде ("полеты Ле́ви") со степенным распределением $p(r, R) \propto A(R, \alpha) r^{-\alpha-1}$, $r \to \infty$, $0 < \alpha < 2$. Наряду с этим, пространственно-перемежающееся магнитное поле межзвездной среды [25] приводит к более высокой вероятности длительного пребывания частиц в неоднородностях, что приводит к наличию так называемых "ловушек Ле́ви". Плотность распределения q(t, R) времени t пребывания частиц

в неоднородностях среды также имеет степенное распределение $q(t, R) \propto B(R, \beta) t^{-\beta-1}, t \rightarrow \infty, \beta < 1.$

4. Уравнение для плотности частиц с жесткостью R, генерируемой в резко-неоднородной галактической среде в точке \vec{r} в момент времени t, источниками с плотностью распределения $S(\vec{r}, t, R)$ без учета потерь энергии и ядерных взаимодействий может быть записано в виде [26, 27]

$$\frac{\partial N\left(\vec{r},t,R\right)}{\partial t} = -D\left(R,\alpha,\beta\right) D_{0+}^{1-\beta} \left(-\Delta\right)^{\alpha/2} N\left(\vec{r},t,R\right) + \frac{1}{(1)} + S\left(\vec{r},t,R\right).$$

Здесь $D_{0+}^{1-\beta}$ обозначает дробный оператор Римана— Лиувилля [28], а $(-\Delta)^{\alpha/2}$ — дробный лапласиан (оператор Рисса) [28]. Коэффициент неклассической диффузии $D(R, \alpha, \beta) \sim A(R, \alpha)/B(R, \beta) =$ = $D_0(\alpha, \beta)(R/1 \ \Gamma B)^{\delta}$.

Решение уравнения (1) для точечного импульсного источника со временем эмиссии *T* и степенным спектром инжекции $S(\vec{r},t,R) =$ $= S_{im}R^{-\gamma}\delta(\vec{r})\Theta(T-t)\Theta(t)$ ($\Theta(\tau)$ – ступенчатая функция) имеет вид [27]

$$N\left(\vec{r},t,R\right) = \frac{S_0 R^{-\gamma}}{D\left(R,\alpha,\beta\right)^{3/\alpha}} \times \\ \times \int_{max[0,t-T]}^{t} d\tau \tau^{-3\beta/\alpha} \Psi_3^{(\alpha,\beta)} \left(\left|\vec{r}\right| \left(D\left(R,\alpha,\beta\right) \tau^{\beta} \right)^{-1/\alpha} \right),$$
(2)

где $\Psi_{3}^{(\alpha,\beta)}(\rho)$ — плотность дробно-устойчивого распределения [29].

Характерной особенностью спектра (2) является наличие излома [23, 24, 26, 27]. Поскольку в этих работах установлено, что спектральный индекс наблюдаемого потока частиц η в районе излома $R = R_k$ равен показателю спектра генерации в источнике γ , из уравнения (2) можно получить

$$\eta_{R \ll R_{\nu}} = \gamma - \delta, \quad \eta_{R \gg R_{\nu}} = \gamma + \delta/\beta. \tag{3}$$

В нашей работе [30] было показано, что при переходе от импульсного источника с конечным временем эмиссии *T* к стационарному, для которого $T = \infty$, форма энергетического спектра изменяется принципиально: жесткость излома стремится к нулю, он становится степенным с показателем, равным (3) для $R \gg R_k$.

В предлагаемом в работе сценарии предполагается, что наряду с первичными ядрами в галактических источниках происходит ускорение и вторичных ядер [31]. Спектр вторичных ядер КЛ в

 $R^{-\delta}$ раз мягче спектра первичных частиц, т.е.

$$N_s(\vec{r},R) \sim R^{-\gamma-o/\beta-o}$$

Самосогласованное восстановление параметров γ и β предлагаемой в работе модели можно провести из экспериментальных данных. Ключевым элементом процедуры восстановления является наличие излома в спектре КЛ при энергиях

$$\gamma = \eta_{R \ll R_k} + \delta$$
 и $\beta = \frac{\delta}{\eta_{R \gg R_k} - \eta_{R \ll R_k} - \delta}.$

Поскольку $\eta_{R \ll R_k} \sim 2.56 - 2.64$, $\eta_{R \gg R_k} - \eta_{R \ll R_k} \sim 0.6 - 0.7$ [32, 33] и $\delta \sim 0.27$ [7], последние уравнения дают оценки для показателей $\gamma \sim 2.8 - 2.9$ и $\beta \sim 0.6 - 0.8$.

Отметим, что полученная оценка показателя γ спектра генерации частиц в источниках подтверждается результатами эксперимента Fermi-LAT для остатков сверхновых W44 и IC 443 [34, 35], а также результатами H.E.S.S и Fermi-LAT для сверхновой W49B [36]. Интерпретация данных наблюдений остатка сверхновой RX J1713.7-3946 привела авторов [37] к выводу о том, что показатель спектра γ должен иметь значение $\gamma \sim 3$. Анализ спектра гамма-излучения остатка сверхновой Тихо, проведенный коллаборациями VERITAS и Fermi-LAT при энергиях >400 ГэВ, дает значение показателя $\gamma \sim 2.92$ [38].

Значения остальных параметров модели и обоснование их выбора даны в работе [31].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На рис. 1 показаны результаты расчетов спектров H и He, полученные в рамках предлагаемого сценария. На рис. 2 показаны спектральные индексы H, He и основных групп первичных и вторичных ядер KЛ. Экспериментальные данные и результаты расчетов показаны на рисунках в единицах жесткости \tilde{R} , принятых в работах [4–9] для представления результатов.

Полученные результаты, позволяют сделать следующие выводы:

1. В рамках предложенного сценария, элементом которого является предположение об ускорении в галактических источниках всех наблюдаемых в Солнечной системе частиц с жесткостями $30 \leq R \leq 5 \cdot 10^7 \ \Gamma B$, достигается самосогласованное объяснение основных особенностей энергетических спектров первичных и вторичных ядер КЛ.

2. Наблюдаемое в области $R \sim 60 \ \Gamma B - 3 \ T B$ изменение показателя спектров ядер КЛ обусловлено переходом от, в основном, вкладов многочисленных далеких источников, включая и вклады ядерных взаимодействий этих частиц при их распространении в межзвездной среде, к вкладам, главным образом, близких источников, наблюдаемые спектры которых более жесткие.

3. В области $R \ge 10^6$ ГВ должна наблюдаться спектральная универсальность, т.е. практически одинаковая зависимость показателей наблюдаемых спектров ядер от жесткости.



Рис. 1. Сопоставление спектров протонов (*a*) и ядер гелия (*б*), полученных в рамках сценария, предлагаемого в работе, с экспериментальными данными [1–5, 10–12, 39–42].



Рис. 2. Сопоставление спектральных индексов, полученных в рамках сценария, предлагаемого в работе (линии на графике), с данными AMS-02 (точки на графике) [4–9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Панов А.Д., Адамс Д.Х., Ан Х.С. и др. (эксперимент ATIC-2) // Изв. РАН. Сер. физ. 2009. Т. 73. № 5. C. 602; Panov A.D., Adams J.H., Ahn H.S. et al. (ATIC-2 Experiment) // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2009. V. 73. No. 5. P. 564.
- Yoon Y.S., Anderson T., Barrau A. et al. (CREAM-III Experiment) // Astrophys. J. 2017. V. 839. No. 5. P. 1.
- Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al. (PAMELA Experiment) // Adv. Space Res. 2013. V. 51. No. 2. P. 219.
- Aguilar M., Aisa D., Alpat B. et al. (AMS-02 Collaboration) // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 114. Art. No. 171103.
- Aguilar M., Aisa D., Alpat B. et al. (AMS-02 Collaboration) // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115. Art. No. 211101.
- Aguilar M., Ali Cavasonza L., Alpat B. et al. (AMS-02 Collaboration) // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 119. Art. No. 251101.
- Aguilar M., Ali Cavasonza L., Alpat B. et al. (AMS-02 Collaboration) // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 120. Art. No. 021101.
- Aguilar M., Ali Cavasonza L., Alpat B. et al. (AMS-02 Collaboration) // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 121. Art. No. 051103.
- Aguilar M., Ali Cavasonza L., Alpat B. et al. (AMS-02 Collaboration) // Phys. Rev. Lett. 2020. V. 124. Art. No. 211102.
- An Q., Asfandiyarov R., Azzarello P. et al. (DAMPE Collaboration) // Sci. Adv. 2019. V. 5. No. 9. Art. No. eaax3793.
- Adriani O., Akaike Y., Asano K. et al. (CALET Collaboration) // Phys. Rev. Lett. 2019. V. 122. No. 18. Art. No. 181102.
- Grebenyuk V., Karmanov D., Kovalev I. et al. (NUCLEON Experiment) // Adv. Space Res. 2019. V. 64. No. 12. P. 2546.
- Biermann P.L., Becker J.K., Dreyer J. et al. // Astrophys. J. 2010. V. 725. P. 184.
- Erlykin A.D., Wolfendale A. // Astropart. Phys. 2012. V. 35. P. 449.
- *Thoudam S., Hörandel J. //* Month. Not. Royal Astron. Soc. 2012. V. 421. P. 1209.
- Tomassetti N. // Astrophys. J. Lett. 2012. V. 752. Art. No. L13.
- Vladimirov A.E., Johannesson G., Moskalenko I.V. et al. // Astrophys. J. 2012. V. 752. No. 68. P. 1.
- Blasi P., Amato E., Serpico P. // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 109. Art. No. 061101.
- Ptuskin V., Zirakashvili V., Seo E.-S. // Astrophys. J. 2013. V. 763. No. 47. P. 1.

- Bernard G., Delahaye T., Keum Y.-Y. et al. // Astron. Astrophys. 2013. V. 555. Art. No. A48.
- 21. Erlykin A.D., Wolfendale A. // J. Phys. G. 2015. V. 42. Art. No. 125201.
- 22. Zatsepin V.I., Sokolskaya N.V. // Astron. Astrophys. 2006. V. 458. P. 1.
- 23. Lagutin A., Strelnikov D., Tyumentsev A. // Proc. 27th ICRC (Hamburg, 2001) V. 5. P. 1896.
- 24. Lagutin A.A., Volkov N.V. // EPJ Web Conf. 2017. V. 145. Art. No. 19018.
- 25. *Shukurov A., Snodin A.P., Seta A. et al.* // Astrophys. J. Lett. 2017. V. 839. Art. No. L16.
- 26. Lagutin A.A., Uchaikin V.V. // Proc. 27th ICRC (Hamburg, 2001). V. 5. P. 1900.
- 27. Lagutin A.A., Uchaikin V.V. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. 2003. V. 201. P. 212.
- Самко С.Г., Килбас А.А., Маричев О.И. Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения. Минск: Наука и техника, 1987.
- 29. Uchaikin V., Zolotarev V. Chance and stability. Utrecht: VSP, 1999.
- 30. Lagutin A.A., Makarov V.V., Tyumentsev A.G. // Proc. 27th ICRC (Hamburg, 2001). V. 5. P. 1889.
- 31. Lagutin A.A., Volkov N.V., Raikin R.I., Tyumentsev A.G. // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1181. Art. No. 012023.
- Bartoli B. et al. (ARGO-YBJ Collaboration) // Phys. Rev. D. 2015. V. 91. Art. No. 112017.
- 33. Bartoli B. et al. (ARGO-YBJ and LHAASO Collaborations) // Phys. Rev. D. 2015. V. 92. Art. No. 092005.
- 34. *Abdo A., Ackermann M., Ajello M. et al.* // Science. 2010. V. 327. P. 1103.
- 35. *Abdo A., Ackermann M., Ajello M. et al.* // Astrophys. J. 2010. V. 712. P. 459.
- Abdalla H., Abramowski A., Aharonian F. et al. (HESS Collaboration) // Astron. Astrophys. 2018. V. 612. Art. No. A5.
- 37. Tanaka T., Uchiyama Y., Aharonian F. et al. // Astrophys. J. 2008. V. 685. P. 988.
- Abeysekara A.U., Archambault S., Archer A. et al. (VER-ITAS and Fermi-LAT Collaborations) // Astrophys. J. 2017. V. 836. No. 205. P. 1.
- 39. Abe K., Fuke H., Haino S. et al. (BESS-Polar Collaboration) // Astrophys. J. 2016. V. 822. No. 2. P. 65.
- Aartsen M.G., Ackermann M., Adams J. et al. (IceCube Collaboration) // Phys. Rev. D. 2019. V. 100. Art. No. 082002.
- 41. Apel W.D., Arteaga-Velazquez J.C., Bekk K. et al. (KASCADE-Grande Collaboration) // Astropart. Phys. 2013. V. 47. P. 54.
- 42. Antoni T., Apel W.D., Badea A.F. et al. (KASCADE Collaboration) // Astropart. Phys. 2005. V. 24. P. 1.

Features of the energy spectra of primary and secondary cosmic rays nuclei: consistent astrophysical interpretation

A. A. Lagutin^{*a*, *}, N. V. Volkov^{*a*}

^aAltai State University, Barnaul, 656049 Russia *e-mail: lagutin@theory.asu.ru

A scenario that makes it possible to give a self-consistent explanation of the main features of the energy spectra of primary and secondary cosmic rays nuclei, established in the last decade in experiments, is discussed. New results of calculations of H and He spectra and also spectra of main groups of nuclei are presented.