



Алтайский государственный университет,
Барнаул, Россия



Особенности энергетических спектров первичных и вторичных ядер космических лучей: согласованная астрофизическая интерпретация

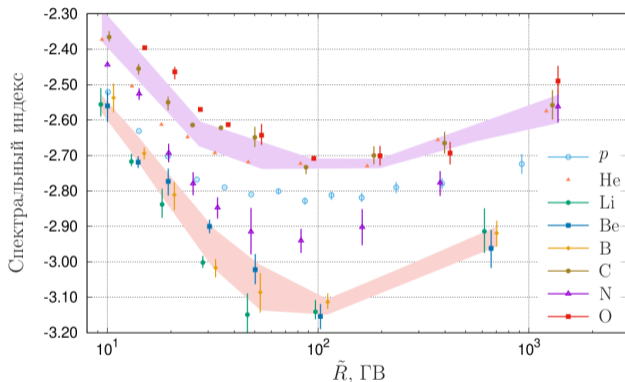


А.А. Лагутин, Н.В. Волков

28 сентября 2020 г.

Особенности спектров ядер космических лучей

Анализ данных ATIC-2, CREAM, PAMELA, AMS-02, DAMPE и CALET по спектрам различных групп ядер показал, что они не описываются степенным законом. В области $R > 100$ ГВ наблюдается уплощение спектров. Эту особенность поведения спектров принято в англоязычной литературе называть «hardening».

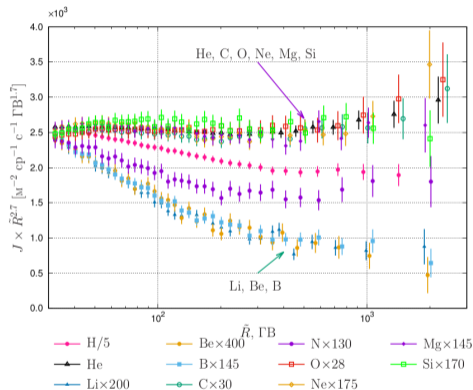


Спектральные индексы ядер КЛ по данным AMS-02



Особенности спектров ядер космических лучей

- В эксперименте AMS-02 установлено, что в области $R \sim 60 \text{ ГВ} \div 3 \text{ ТВ}$ 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 R . В области $R > 200 \text{ ГВ}$ спектры уползаживают быстрее, чем спектры He, C, O.



Главная цель доклада — представить сценарий, который позволяет дать самосогласованное объяснение основных особенностей энергетических спектров первичных и вторичных ядер космических лучей.

Ключевые положения модели

- Все частицы с жесткостями $30 \lesssim R \lesssim 5 \cdot 10^7$ ГВ, **наблюдаемые в Солнечной системе**, ускоряются галактическими источниками, спектр генерации степенной $J \propto R^{-\gamma}$.
- Источники КЛ делятся на две группы: многочисленные старые ($t \geq 10^6$ лет) удаленные ($r \geq 1$ кпк) и близкие молодые источники ($r < 1$ кпк, $t < 10^6$ лет).
- Резко-неоднородный характер распределения вещества и магнитного поля в Галактике приводит к неклассическому характеру диффузии КЛ.



Важным следствием обобщения модели нормальной диффузии являются:

Полеты Лёви: Степенное распределение свободных пробегов частиц r в межзвездной среде

$$p(\mathbf{r}, R) \propto A(R, \alpha)r^{-\alpha-1}, \quad r \rightarrow \infty, \quad 0 < \alpha < 2.$$

Ловушки Лёви: Плотность распределения $q(t, R)$ времени t пребывания частиц в неоднородностях среды также имеет степенное распределение

$$q(t, R) \propto B(R, \beta)t^{-\beta-1}, \quad t \rightarrow \infty, \quad \beta < 1.$$



Уравнение неклассической диффузии

Без учета потерь энергии ($\alpha \in (0, 2]$, $\beta \in (0, 1]$)

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

где $D(R, \alpha, \beta) \sim A(R, \alpha)/B(R, \beta) = D_0(\alpha, \beta)(R/1 \text{ ГВ})^\delta$ — коэффициент неклассической диффузии.

Дробный лапласиан (оператор Рисса)

$$\int_{\mathbb{R}^m} e^{ikx} (-\Delta)^{\alpha/2} f(x) dx = |k|^\alpha \tilde{f}(k). \quad (2)$$

Дробная производная Римана-Лиувилля

$$\int_0^\infty e^{-\lambda t} D_{0+}^\beta f(t) dt = \lambda^\beta \tilde{f}(\lambda). \quad (3)$$



$$S(\mathbf{r}, t, R) = S_{\text{im}} R^{-\gamma} \delta(\mathbf{r}) \Theta(T - t) \Theta(t)$$

$$N(\mathbf{r}, t, R) = \frac{S_{\text{im}} R^{-\gamma}}{D(R, \alpha, \beta)^{3/\alpha}} \left[\int_{\max[0, t-T]}^t d\tau \tau^{-3\beta/\alpha} \Psi_3^{(\alpha, \beta)} \left(|\mathbf{r}| (D(R, \alpha, \beta) \tau^\beta)^{-1/\alpha} \right) \right]. \quad (4)$$

Дробно-устойчивое распределение $\Psi_3^{(\alpha, \beta)}(r)$

$$\Psi_3^{(\alpha, \beta)}(r) = \int_0^\infty g_3^{(\alpha)} \left(r \tau^{\beta/\alpha} \right) g_1^{(\beta, 1)}(\tau) \tau^{3\beta/\alpha} d\tau.$$

$g_3^{(\alpha)}(r)$ ($\alpha \leq 2$) — трехмерное сферически-симметричное устойчивое распределение, $g_1^{(\beta, 1)}(t)$ ($\beta \leq 1$) — одностороннее устойчивое распределение.



Стационарное решение уравнения неклассической диффузии без учета потерь энергии ($\alpha < 2, \beta < 1$)

$$N(\mathbf{r}, R) = S_G R^{-\gamma-\delta/\beta}. \quad (5)$$

Спектр вторичных ядер мягче спектра первичных на величину $R^{-\delta}$. С учетом этого спектр от далеких стационарных источников с учетом вклада вторичных ядер в нашей модели

$$N(\mathbf{r}, R) = S_G R^{-\gamma-\delta/\beta-\delta}. \quad (6)$$



$$J(\mathbf{r}, t, R) = J_G(\mathbf{r}, R) + J_L(\mathbf{r}, t, R)$$

- J_G — вклад многочисленных старых ($t \geq 10^6$ лет) удаленных ($r \geq 1$ кпк) источников, включающий вклад вторичных ядер от ядерных взаимодействий частиц, ускоренных в стационарных источниках, с межзвездной средой;
- J_L — компонента, определяемая близкими молодыми источниками ($r < 1$ кпк, $t < 10^6$ лет).



$$J(\mathbf{r}, t, R) = \frac{v}{4\pi} \left[N(\mathbf{r}, R) + \frac{S_{\text{im}} R^{-\gamma}}{D(R, \alpha, \beta)^{3/\alpha}} \times \sum_{\substack{r_j \leq 1 \text{ кпк} \\ t_j < 10^6 \text{ лет}}} \int_{\max[0, t_j - T]}^{t_j} d\tau \tau^{-3\beta/\alpha} \Psi_3^{(\alpha, \beta)} \left(|\mathbf{r}_j| (D(R, \alpha, \beta) \tau^\beta)^{-1/\alpha} \right) \right] \quad (7)$$

$$\gamma = 2.85, \quad \delta = 0.27, \quad T = 10^4 \text{ лет}$$

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = 1.7 \\ \beta = 0.8 \end{array} \right\} \Rightarrow D_0 \approx 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ пк}^{1.7} / \text{год}^{0.8}$$

A.A. Lagutin, N.V. Volkov, A.G. Tyumentsev, R.I. Raikin // EPJ Web of Conferences, 145, 06004 (2017), DOI: 10.1051/epjconf/201714506004



Энергия на нуклон E_k

$$E_k = \frac{\sqrt{Z^2 \tilde{R}^2 + M^2} - M}{A},$$

где Z , M , A — заряд, масса и атомный номер, соответственно.

Жесткость \tilde{R}

Вдоль оси абсцисс точки расположены для жесткостей \tilde{R} , рассчитанных для потока $\propto R^{-2.7}$, т.о.

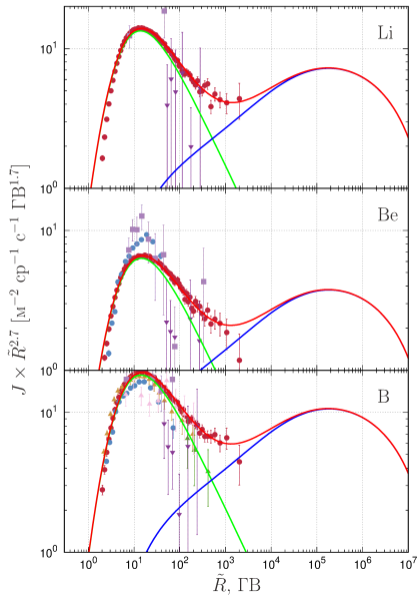
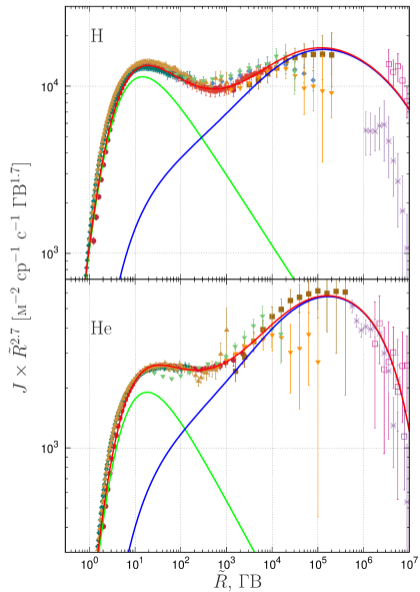
$$f(\tilde{R}) = \frac{1}{\Delta R} \int_{R_1}^{R_2} f(R) dR,$$

где $f(R) = R^{-2.7}$.

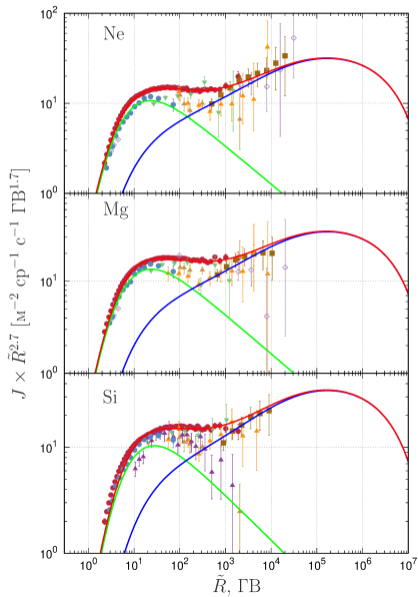
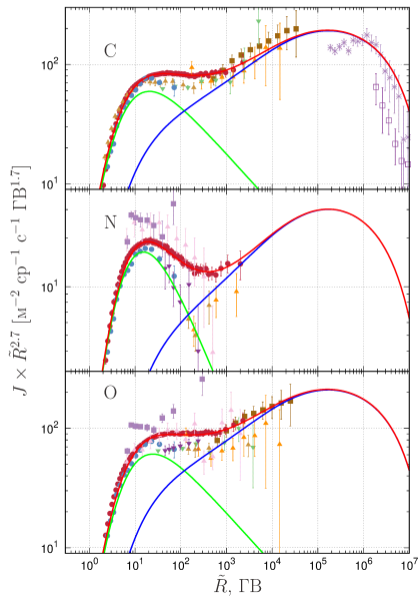
PRL, **115**, 211101 (2015);
NIMPA, **335** (1995) 541–547.



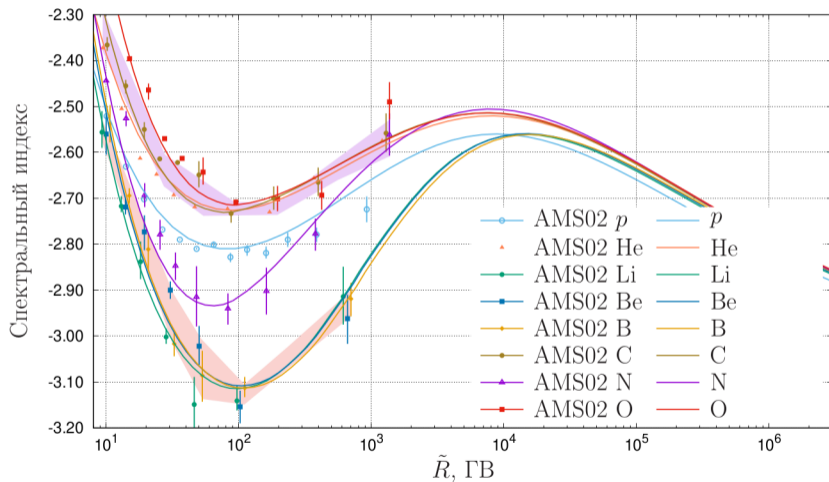
Спектры p , He и группы ядер Li, Be, B



Спектры групп ядер C, N, O и Ne, Mg, Si



Спектральный индекс



1. Показано, что в рамках предложенного сценария, элементом которого является предположение об ускорении в галактических источниках всех наблюдаемых в Солнечной системе частиц с жесткостями $30 < R < 5 \cdot 10^7$ ГВ, достигается самосогласованное объяснение основных особенностей энергетических спектров первичных и вторичных ядер космических лучей.
2. Установлено, что наблюдаемое в области $R \sim 30$ ГВ \div 3 ТВ 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 рамках предложенного сценария в области $R \gtrsim 10^6$ ГВ должна наблюдаться спектральная универсальность, т.е. практически одинаковая зависимость показателей наблюдаемых спектров ядер от жесткости.



Спасибо за внимание!

Приложение

Источники экспериментальных данных

—●— AMS-02 (2015–2020)

—■— CALET (2019)

—◆— DAMPE (2019)

—■— NUCLEON (2019)

—▲— CREAM-III (2017)

—◆— BESS-PolarII (2016)

—▲— PAMELA (2013,2014)

—▼— ATIC-2 (2009)

—▲— CREAM-II (2009)

—◇— TRACER2003 (2008)

—▲— Ichimura et al. (1993)

—▲— CRN-Spacelab 2 (1990)

—●— HEAO3-C2 (1990)

—▲— Simon et al. (1980)

—■— Orth et al. (1978)

—▼— Juliusson (1974)

—□— IceCube/IceTop (2019)

—□— KASKADE-Grande (2013)

—✱— KASKADE (2005)



Спектральный индекс Ne, Mg, Si

