

33-я Всероссийская конференция по космическим лучам

11–15 августа 2014

**Спектры протонов и ядер в
диапазоне $10^{10} \div 10^{20}$ эВ в рамках
галактического сценария
происхождения космических лучей**

Анатолий Лагутин

Александр Тюменцев, Николай Волков

Алтайский государственный университет, Барнаул

The Next Frontier in UHECR Research with an Upgraded Pierre Auger Observatory

The Pierre Auger Collaboration, 30 June 2013

The data taken with the Pierre Auger Observatory have led to major breakthroughs in the field of ultra-high energy cosmic rays.

- Firstly, a suppression of the cosmic ray flux at energies above $5.5 \cdot 10^{19}$ eV has been established unambiguously.
- Secondly, due to the Auger limits on photon and neutrino fluxes at ultra-high energy, it is now clear that unusual «top-down» source processes such as the decay of super-heavy particles cannot account for a significant part of the observed particle flux.
- Finally, there are indications of an anisotropic distribution of the arrival directions of particles with energies greater than $5.5 \cdot 10^{19}$ eV. These results are typically considered as strong support of source scenarios in which particle acceleration takes place at sites distributed similarly to the matter distribution in the universe.

Understanding the origin of the flux suppression will provide fundamental constraints on the astrophysical sources. It will definitively resolve the question of whether some or even **all UHECRs may be of Galactic origin**, and it will enable a reliable calculation of the expected fluxes of GZK neutrinos and gamma rays, which are sought by Auger as well as other collaborations in particle astrophysics.

Цель доклада

- представить новый механизм формирования спектров протонов и ядер в области сверхвысоких энергий в рамках галактического сценария происхождения космических лучей;
- исследовать поведение спектра всех частиц и массового состава в области $E \geq 5 \cdot 10^{18}$ эВ.

Подход

Для описания распространения космических лучей в неоднородной межзвездной среде используется развитая нами модель аномальной диффузии. Считается, что наблюдаемый в Солнечной системе поток частиц формируется как «диффузионными» вкладами от близких молодых и удаленных старых источников, так и частицами, которые пришли без рассеяния.

Введение вклада нерассеянного излучения, определяющего поведение спектра космических лучей в области сверхвысоких энергий, обусловлено наличием больших пробегов частиц («полетов Леви») в используемой модели аномальной диффузии.

$$J(\vec{r}, t, E) = J_G(\vec{r}, E) + J_L(\vec{r}, t, E) + J_{NS}(E)$$

- J_G — вклад многочисленных старых ($t \geq 10^6$ лет) удаленных ($r \geq 1$ кпк) источников;
- J_L — компонента, определяемая близкими молодыми источниками ($r < 1$ кпк, $t < 10^6$ лет);
- J_{NS} — вклад частиц, достигающих Земли без рассеяния.

Аномальная диффузия

В наших ранних работах¹⁻⁴ для решения проблемы излома в спектре первичных космических лучей была представлена модель аномальной диффузии. Аномальность в этой модели является результатом наличия больших свободных пробегов частиц («полеты Леви») между неоднородностями галактической среды (плотность вероятности $p(x, E)$), а также длительным пребыванием частиц в ловушках (плотность вероятности $q(\tau, E)$):

$$\int_{|x|>r}^{\infty} p(x, E) dx \propto A(E, \alpha) r^{-\alpha}, \quad 0 < \alpha < 2, \quad (1)$$

$$\int_t^{\infty} q(\tau, E) d\tau \propto B(E, \beta) t^{-\beta}, \quad 0 < \beta < 1, \quad (2)$$

$$A(E, \alpha) \sim E^{\delta_L}.$$

¹ Lagutin A.A., Nikulin Yu.A., Uchaikin V.V. *Nucl. Phys. B*, 2001.

² Lagutin A. A., Uchaikin V. V. *NIM B*, 2003.

³ Erlykin A. D., Lagutin A. A., Wolfendale A.W. *Astropart. Phys.*, 2003.

⁴ Лагутин А. А., Тюменцев А. Г. *Известия АлтГУ*, 2004.

Уравнение аномальной диффузии

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

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -D(E, \alpha, \beta) D_{0+}^{1-\beta} (-\Delta)^{\alpha/2} N(\vec{r}, t, E) + S(\vec{r}, t, E), \quad (3)$$

- $(-\Delta)^{\alpha/2}$ — дробный лапласиан (оператор Рисса);
- D_{0+}^{β} — дробная производная Римана-Лиувилля;
- $D(E, \alpha, \beta) \sim A(E, \alpha)/B(E, \beta) = D_0(\alpha, \beta) E^{\delta}$ — коэффициент аномальной диффузии.

Оператор Рисса

$$\int_{\mathbb{R}^m} e^{ikx} (-\Delta)^{\alpha/2} f(x) dx = |k|^{\alpha} \tilde{f}(k). \quad (4)$$

Оператор Римана-Лиувилля

$$\int_0^{\infty} e^{-\lambda t} D_{0+}^{\beta} f(t) dt = \lambda^{\beta} \tilde{f}(\lambda). \quad (5)$$

Решение для точечного импульсного источника

$$S(\vec{r}, t, E) = S_{\text{im}} E^{-\gamma} \exp(-E/E_0(z)) \delta(\vec{r}) \Theta(T - t) \Theta(t)$$

$$N(\vec{r}, t, E) = \frac{S_{\text{im}} E^{-\gamma}}{D(E, \alpha, \beta)^{3/\alpha}} \times \left[\int_{\max[0, t-T]}^t d\tau \tau^{-3\beta/\alpha} \Psi_3^{(\alpha, \beta)}(|\vec{r}|(D(E, \alpha, \beta)\tau^\beta)^{-1/\alpha}) \right] \exp\left(-\frac{E}{E_0(z)}\right) \quad (6)$$

$\Psi_3^{(\alpha, \beta)}(r)$ — плотность вероятности дробно-устойчивого распределения.

Дробно-устойчивое распределение $\Psi_3^{(\alpha, \beta)}(r)$ ¹

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

определяется трехмерным сферически-симметричным устойчивым распределением $g_3^{(\alpha)}(r)$ ($\alpha \leq 2$) и односторонним устойчивым распределением $g_1^{(\beta, 1)}(t)$ с характеристическим показателем $\beta \leq 1$.

¹Uchaikin V.V., Zolotarev V.M.: 1999, Chance and stability, VSP. Netherlands, Utrecht.

Интенсивность нерассеянного излучения

Интенсивность нерассеянного излучения J_{NS} определяется спектром инжекции частиц в источнике

$$S_0 E^{-\gamma} \exp(-E/E_0(z))$$

и вероятностью полета Леви $p(E, > r)$. Принимая во внимание, что

$$p(E, > r) \sim A(E, \alpha) r^{-\alpha}, \quad A(E, \alpha) \sim E^{\delta_L},$$

вклад нерассеянного излучения будем описывать выражением

$$J_{NS} = S_{NS} E^{-\gamma+\delta_L} \exp\left(-\frac{E}{E_0(z)}\right).$$

В рамках галактической картины происхождения космических лучей эта компонента определяет, по нашему предположению, поведение спектра в области сверхвысоких энергий $E \geq 10^{18}$ эВ.

Спектр космических лучей

$$J(\vec{r}, t, E) = \frac{v}{4\pi} \left[N(\vec{r}, E) + \frac{S_{\text{im}} E^{-\gamma}}{D(E, \alpha, \beta)^{3/\alpha}} \times \right. \\ \times \sum_{\substack{r_j \leq 1 \text{ кпк} \\ t_j < 10^6 \text{ лет}}} \int_{\max[0, t_j - T]}^{t_j} d\tau \tau^{-3\beta/\alpha} \Psi_3^{(\alpha, \beta)} \left(|\vec{r}_j| (D(E, \alpha, \beta) \tau^\beta)^{-1/\alpha} \right) + \\ \left. + S_{NS} E^{-\gamma + \delta_L} \right] \exp\left(-\frac{E}{E_0(z)}\right)$$

$$N(\vec{r}, E) \sim E^{-\gamma - \delta/\beta}$$

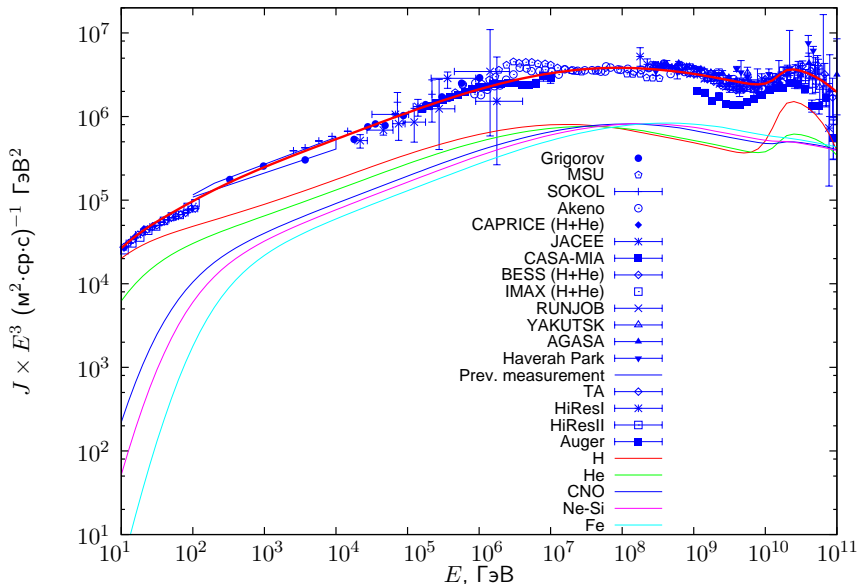
$$\gamma = 2.85, \quad \delta = 0.27, \quad \delta_L = \delta/2, \quad E_0(z) = 4 \cdot 10^{10} z \text{ ГэВ}$$

$$\alpha = 1.1$$

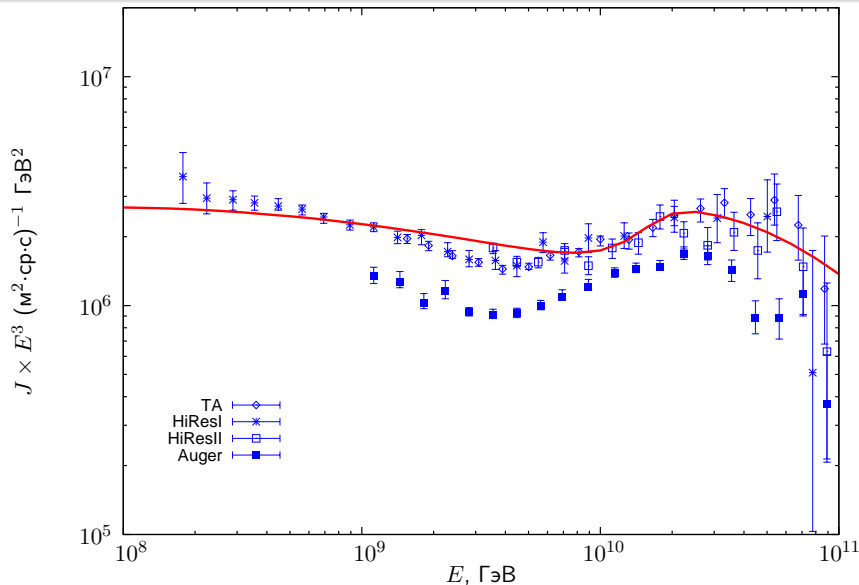
$$\Rightarrow D_0 \approx 10^{-4} \text{ пк}^{1.1} / \text{год}^{0.8}$$

$$\beta = 0.8$$

Спектр КЛ в модели аномальной диффузии



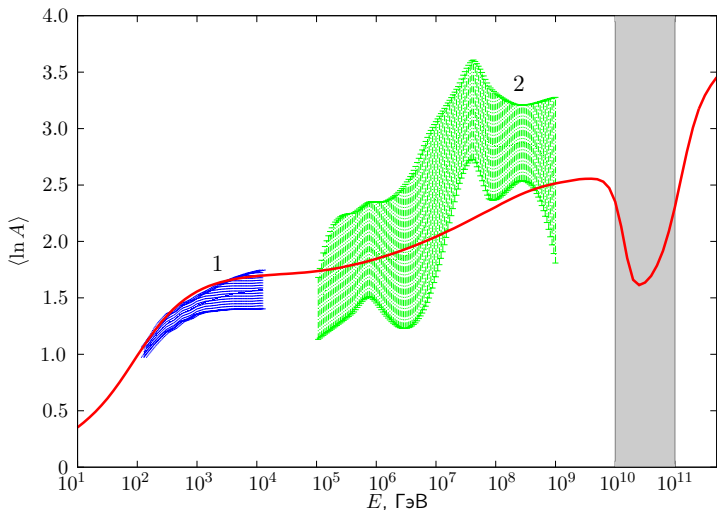
Спектр КЛ в модели аномальной диффузии



Зависимость среднего логарифма массового числа космических лучей от энергии первичной частицы

Заштрихованные области — данные измерений:

1 — Shibata T. Nucl. Phys. B., 1999; 2 — Horandel J.R. Astropart. Phys., 2003.



- 1 В рамках галактического сценария происхождения космических лучей предложен новый механизм формирования наблюдаемых в Солнечной системе спектров протонов и ядер в области сверхвысоких энергий.
- 2 Показано, что при учете как «диффузионных» вкладов от близких молодых и удаленных старых источников, так и вклада нерассеянного излучения, обусловленного наличием больших пробегов («полетов Леви») в используемой модели аномальной диффузии, при спектре генерации частиц в галактических источниках

$$S = S_0 E^{-2.85} \exp(-E/E_0(z)), \quad E_0(z) = 4 \cdot 10^{10} z \text{ ЭВ}$$

достигается описание спектра всех частиц в диапазоне энергий $10^{10} \div 10^{20}$ эВ.

3 Установлено, что:

- укрупнение спектра всех частиц в области $E > 5 \cdot 10^{19}$ эВ обусловлено обрезанием потока протонов, вызванным энергетическими ограничениями галактических ускорителей частиц (наличием E_{\max});
- в области энергий $2 \cdot 10^{19} \div 5 \cdot 10^{19}$ эВ доля протонов составляет ~ 40 %, а железа — около 15 % (нормальный состав);
- в области $4 \cdot 10^{18} \div 2.5 \cdot 10^{19}$ эВ происходит быстрое уменьшение $\langle \ln A \rangle$: от 2.6 до $\langle \ln A \rangle_{\min} \sim 1.6$;
- новое «утяжеление» массового состава наблюдается при $E > 2.5 \cdot 10^{19}$ эВ; при $E = 2 \cdot 10^{20}$ эВ средний логарифм массового числа $\langle \ln A \rangle \sim 3$.

Спасибо за внимание!