

Энергетические спектры и массовый состав космических лучей в трехкомпонентной модели неклассической диффузии

37-я Всероссийская конференция по космическим лучам

А.А. Лагутин¹, Н.В. Волков¹ Р.И. Райкин¹

¹ ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет»,
Барнаул, Россия

28 июня 2022 г.



Отсутствие астрофизической интерпретации наблюдаемого в эксперименте РАО изменения массового состава ПКИ в области $E \geq 10^{18}$ эВ представляет сегодня главное препятствие для надежного физического понимания:

1. особенностей в энергетическом спектре;
2. выявления переходной области энергии, разделяющей космические лучи галактического и внегалактического происхождения;
3. дискриминации моделей ускорения и распространения космических лучей.

1. Построение модели распространения космических лучей в резко-неоднородной межзвездной и межгалактической среде, обеспечивающей согласованное описание экспериментальных данных прецизионных спутниковых измерений и наземных гибридных установок ШАЛ по спектрам и массовому составу космических лучей в диапазоне сверхвысоких и ультравысоких энергий,
2. Оценка вкладов галактических и внегалактических источников в наблюдаемый поток частиц в области энергий $E > 10^{18}$ эВ.

Диффузия космических лучей в резко-неоднородной межзвездной галактической среде

Основные базовые принципы и ключевые положения модели

1. **Все частицы** с жесткостями $30 \lesssim R \lesssim 4 \cdot 10^9$ ГВ, наблюдаемые в Солнечной системе, ускорены, в основном, галактическими источниками. Спектр частиц в источниках $J \propto R^{-\gamma}$.
2. Сильно неоднородное распределение вещества и магнитного поля в Галактике приводит к аномальному характеру диффузии КЛ.

«Полеты Лёви»

Степенное распределение свободных пробегов частиц

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

«Ловушки Лёви»

Степенное распределение времени пребывания частиц в неоднородности

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

Вклады галактических источников КЛ

Глобальная компонента J_G

Компонента наблюдаемого потока частиц, определяемая многочисленными старыми ($t \geq 10^6$ лет) удаленными ($r \geq 1$ кпк) источниками, с учетом ядерных взаимодействий частиц, ускоренных этими стационарными источниками.

Локальная компонента $J_L + J_{NS}$

Вклад близких ($r < 1$ кпк) молодых ($t < 10^6$ лет) источников. Включает потоки частиц, достигающие Солнечную систему в результате диффузионного распространения (J_L), и частицы, приходящие из области ускорения без рассеяния (в силу наличия «полетов Леви»); **нерассеянная компонента J_{NS}** определяет поведение спектров в области $10^7 - 4 \cdot 10^9$ ГВ.

Наблюдаемый поток галактических КЛ (ГКЛ)

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

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

$N(\vec{r}, t, R)$ — концентрация частиц в точке \vec{r} среды в момент времени t в единичном интервале жесткостей около R .

D_{0+}^{β} — дробная производная Римана-Лиувилля;
 $(-\Delta)^{\alpha/2}$ — дробный лапласиан («оператор Рисса»);

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

$S(\vec{r}, t, R)$ — плотность источников.

В случае $\alpha = 2$, $\beta = 1$ получаем уравнение нормальной диффузии Гинзбурга-Сыроватского.

В случае точечного импульсного источника со степенным спектром генерации $S(\vec{r}, t, R) = S_0 R^{-\gamma} \delta(\vec{r}) \Theta(T - t) \Theta(t)$ решение имеет вид (Lagutin, 2003)

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

где $\Psi_3^{(\alpha, \beta)}(\rho)$ плотность дробно-устойчивого распределения (Uchaikin and Zolotarev, 1999)

$$\Psi_3^{(\alpha, \beta)}(\rho) = \int_0^\infty g_3^{(\alpha)}(r\tau^\beta) q_1^{(\beta, 1)}(\tau) \tau^{3\beta/\alpha} d\tau.$$

Спектр локальной компоненты имеет «излом».

Наблюдаемый спектральный индекс η при жесткости в точке излома $R = R_k$ равен показателю спектра генерации частиц в источнике: $\eta|_{R=R_k} = \gamma$.

При $R \ll R_k$ и $R \gg R_k$

$$\eta|_{R \ll R_k} = \gamma - \delta, \quad \eta|_{R \gg R_k} = \gamma + \delta/\beta. \quad (3)$$

Замечание

Спектр частиц от многочисленных старых ($t \geq 10^6$ лет) удаленных ($r \geq 1$ кпк) источников не имеет излома (см. Lagutin, 2001). Показатель спектра равен спектральному индексу выше колена ($R > R_k$):

$$N_p(\vec{r}, R) \sim R^{-\gamma - \delta/\beta}.$$

Технология определения основных параметров модели основана на сопоставлении теоретических результатов с экспериментальными данными, определяющими ключевую особенность спектра КЛ — излом.

Таблица 1: Параметры модели

Параметр	Значение
p	2.85
α	1.7
β	0.8
$D_0(\alpha)$	$1.5 \cdot 10^{-3}$ пк ^{1.7} /год ^{0.8}
δ	0.27
T	10^4 лет

- Лагутин А.А., Волков Н.В. // Известия РАН. Серия физическая, 2020.
- Lagutin A.A., Volkov N.V. // Physics of Atomic Nuclei, 2021.

Сценарий, обсуждаемый в данной работе, также предполагает ускорение вторичных частиц в галактических источниках.

Возможные механизмы ускорения вторичных ядер обсуждаются в работах (Berezhko,2003; Blasi,2009; Tomassetti,2012; Berezhko,2014, Cholis,2017).

Спектр наблюдаемых вторичных частиц от стационарного источника имеет вид

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

Распространение КЛ в турбулентной межгалактической среде описывается в рамках модели неклассической диффузии (супердиффузии) с учетом потерь энергии:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -D_v(E, \alpha)(-\Delta)^{\alpha/2} \Phi(\vec{r}, t, E) + \frac{\partial B(E)\Phi}{\partial E} + Q(\vec{r}, t, E). \quad (4)$$

$\Phi(\vec{r}, t, E)$ — концентрация частиц, $Q(\vec{r}, t, R)$ — плотность источников,
 $D_v(E, \alpha) = D_{0v}(\alpha)E^\delta$ — коэффициент аномальной диффузии,

$B(E) = -dE/dt$ — средняя скорость потерь энергии частиц при взаимодействии с реликтовым излучением (фотопионные реакции, образование электронно-позитронных пар, фотоядерное расщепление).

$$Q(\vec{r}, t, R) = Q_{\text{н}} R^{-\gamma} \delta(\vec{r}) \Theta(T - t) \Theta(t) \exp(-E/E^*), \quad E^* = 2 \cdot 10^{19} \text{ эВ}$$

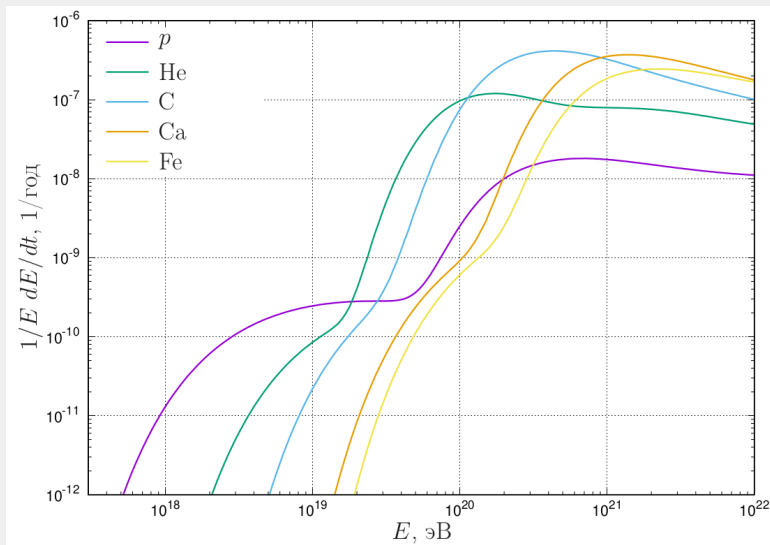
$$J(\vec{r}, t, E) = \frac{cQ_{\text{н}}}{4\pi} \frac{1}{B(E)} \int_{\eta(t-T, E)E}^{\eta(t, E)} dE_0 E_0^{-p} \lambda(E, E_0)^{-3/\alpha} g_3^{(\alpha)}(r \lambda^{-1/\alpha}) \exp(-E_0/E^*).$$

$$\lambda(E, E_0) = \int_E^{E_0} \frac{D(E')}{B(E')} dE'.$$

$$t = \int_E^{E_s} \frac{dE'}{B(E')},$$

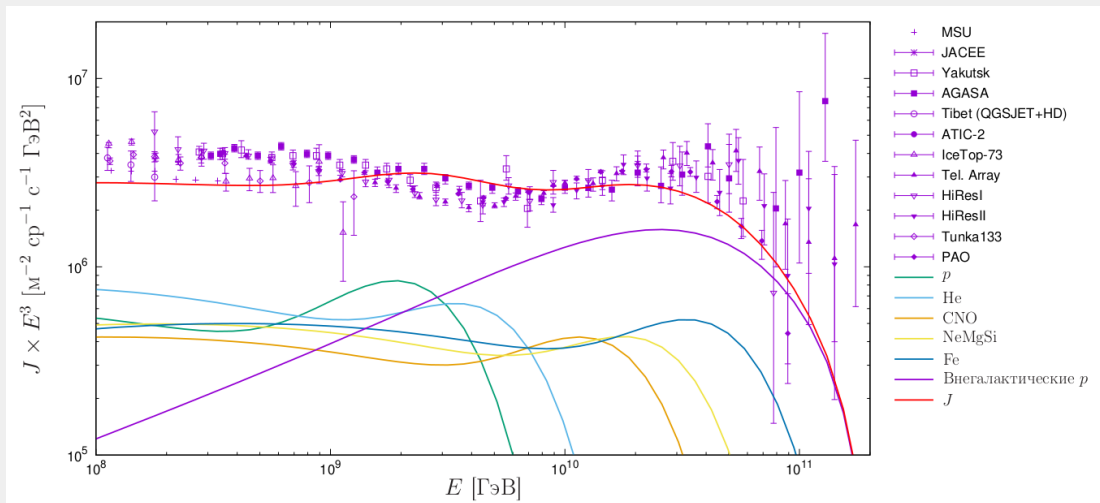
$$E_s = \eta(t, E)E. \tag{5}$$

Потери энергии при взаимодействии с реликтовым излучением

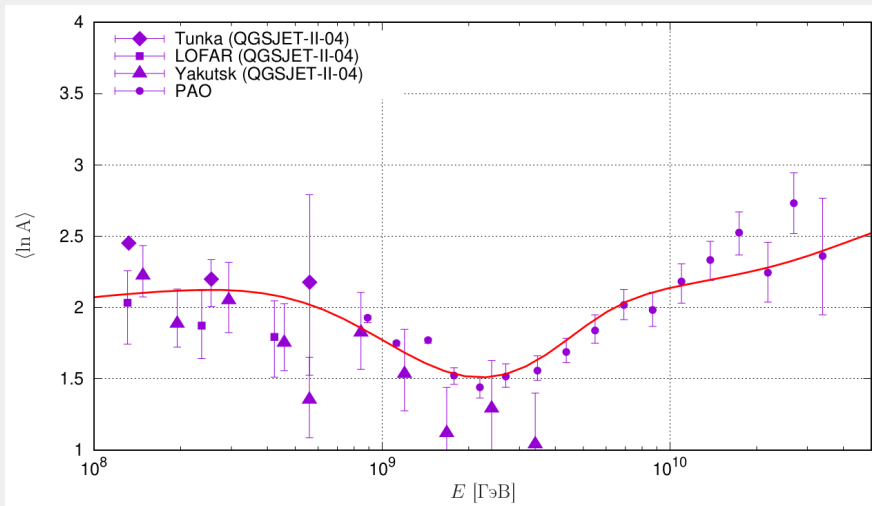


По данным пакета CRProa 3.2.

Спектр всех частиц в рамках модели неклассической диффузии



Средний логарифм массового состава КЛ в области $E > 10^8$ ГэВ



1. Разработана модель распространения КЛ в резко-неоднородной межзвездной и межгалактической среде, обеспечивающая согласованное описание экспериментальных данных прецизионных спутниковых измерений и наземных гибридных установок ШАЛ по спектрам и массовому составу КЛ в диапазоне высоких и сверхвысоких энергий.
2. Учёт неоднородности среды приводит к неклассической (негауссовой) диффузии частиц, испускаемых источниками КЛ.
3. Основываясь на данных по массовому составу КЛ в области сверхвысоких и ультравысоких энергий показано, что основной вклад в наблюдаемый поток в области энергий $E < 10^{18}$ эВ вносят галактические источники. Метагалактические источники вносят заметный вклад в области $E > 10^{19}$ эВ.

Спасибо за внимание!