39-я Всероссийская конференция по космическим лучам

Энергетические спектры первичного космического излучения в области энергий 50 ГВ - 100 ТВ по данным эксперимента DAMPE: астрофизическая интерпретация неоднородностей в спектрах

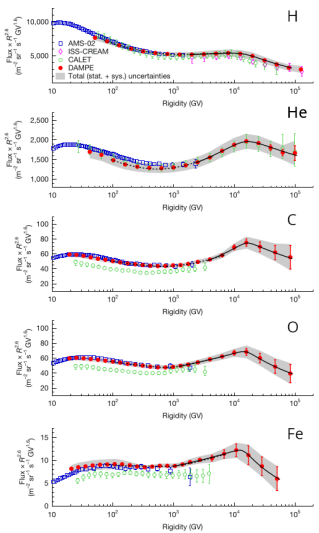
А.А. Лагутин, Н.В. Волков

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет»

29 июня - 3 июля 2026 г.

АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Данные DAMPE 2026 г.



DAMPE collab. // Nature, 2026

- Уполаживание в области 500–1000 ГВ установлено не только в спектрах протонов и ядер гелия, но и в спектрах ядер углерода, кислорода и железа.
- Обнаружен излом в спектрах при $R \sim 15$ ТВ.
- Впервые подтверждена зависимость положения точки излома от заряда ядра $\bar{E}_{br} = 14.6 \pm 1.3$ ТВ для протонов и $\bar{E}_{br} = (15.3 \pm 1.6) \times Z$ ТВ для ядер с $Z \geq 2$.
- Отмечается, что технология описания излома в спектрах авторов коллаборации DAMPE, основанная на некотором фоновом спектре и бампом вида гауссова распределения, не описывает степенные асимптотики наблюдаемых спектров до и после излома.

Выводы из эксперимента

АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

- Полученные значения показателей наблюдаемого спектра в точках изломов свидетельствуют о мягком спектре генерации частиц в источниках.
- Степенные асимптотики спектров до и после точек изломов являются указанием на неклассический характер диффузии КЛ в Галактике.

Выявленные особенности спектров являются указанием на необходимость пересмотра основных положений стандартного сценария происхождения, ускорения и распространения КЛ в Галактике, принятого сегодня научным сообществом.

Цель

АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

- Расчеты спектров основных ядер первичного космического излучения — протонов, гелия, углерода, кислорода и железа в рамках модели неклассической диффузии, созданной авторами.
- Установление зоны расположения и возраста группы источников-тэватронов, формирующих излом в наблюдаемых спектрах протонов и гелия, а также установление показателя спектра генерации КЛ в них.

Свойства среды

Обоснование модели

АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Эксперименты в Гелиосфере

- Данные солнечного зонда Паркер (Parker Solar Probe), показывают, что мелкомасштабные (флуктуационные) неустойчивости в плазме приводят к пересоединению силовых линий магнитного поля, сопровождающемуся значительным усилением его амплитуды (J.A. Rueda // Nature, 2025; J.Y. Park et al. // Nature, 2025).
- Изменение топологии поля приводит к возникновению так называемых транзиентных областей, в которых происходит запирание частиц.
- Одним из возможных механизмов, обеспечивающих запирание частиц, может быть отражение магнитными зеркалами.

Свойства среды

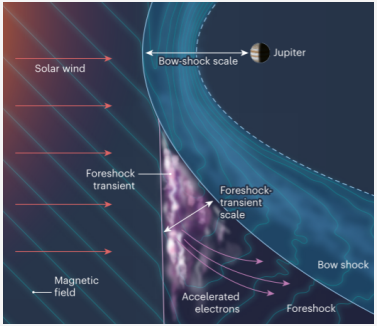
Обоснование модели

АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Головные ударные волны планет

Экспериментальное подтверждение ускорения получены в исследованиях по регистрации электронов КЛ в областях межпланетных ударных волн, а также в областях головных ударных волн внутренних и внешних планет гелиосферы (A. Masters et al. // Nat. Phys., 2013; N. Dresing et al. A&A, 2016; L.B. Wilson et al. Phys. Rev. Lett., 2016.).

Установлено, что в окрестностях фронта головной ударной волны Земли происходит ускорение электронов до энергий, которые более чем в 10^4 раз превышают энергии электронов солнечного ветра.



Pessah M.E. // Nature, 2026, V. 654.

Свойства среды

Обоснование модели

АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Локальная межзвездная среда

- За пределами гелиосферы, в так называемой локальной межзвездной среде (англ. very local interstellar medium, VLISM), по данным миссий Вояджер впервые получены данные, подтвердившие существование пространственно локализованных транзиентов (L.Y. Khoo et al. // ApJ, 990, 64, 2025).
- Установлено, что распределение флуктуаций магнитного поля в них не является гауссовым.
- Анализ полученных до 2024 года данных Вояджер-1 по магнитному полю показал, что перемежаемость при переходе из внутренней гелиосферы в локальную межзвездную среду уменьшается с расстоянием, но, наряду с этим, установлены локальные усиления магнитного поля вблизи фронтов ударных волн на границе гелиопаузы (L.-L. Zhao et al., ApJ Lett., 992, L4, 2025.).

Свойства среды

Обоснование модели

АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Основные выводы

1. Независимо от детализации при описании физических процессов, протекающих в плазме, существование значительного градиента давления и резко-неоднородного характера распределения вещества в прекурсоре ударных волн является необходимым условием создания магнитных полей значительной напряженности в необходимых масштабах.
2. Наличие установленных в экспериментах перемежаемости и транзиентов магнитного поля в области ускорения, приводящих к возникновению в прекурсоре ловушек (ловушки Леви), являются обоснованием для обобщения модели нормальной диффузии на случай распространения КЛ в среде, обладающей такими свойствами.

Подход к решению проблемы

АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Модель неклассической диффузии

- Замена предположения о статистической однородности распределения вещества и связанного с ним магнитного поля на более общее утверждением о фрактальном характере их распределения. Важным следствием этого предположения является степенное распределение пробегов частиц r в среде такого типа $p(r) \propto A(E,\alpha) r^{-\alpha-1}, r \to \infty, 0 < \alpha < 2$ — так называемые полеты Ле́ви.
- Нельзя исключать сильную запутанность силовых линий магнитного поля в неоднородностях, вследствие чего вероятность длительного пребывания частиц в них отлична от нуля. В общем случае распределение времени t пребывания частицы в неоднородностях (ловушках Ле́ви) также имеет степенное распределение $q(t) \propto B(E,\beta) t^{-\beta-1}, t \to \infty, \beta < 1$.

Подход к решению проблемы

АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Уравнение неклассической диффузии

Включение в модель полетов Ле́ви и ловушек Ле́ви приводит к уравнению диффузии с дробными операторами.

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -D(E,\alpha,\beta)\mathrm{D}_{0+}^{1-\beta}(-\Delta)^{\alpha/2}N(\vec{r},t,E) + S(\vec{r},t,E). \qquad (1)$$

В этом уравнении коэффициент неклассической диффузии $D(E,\alpha,\beta)$ определяется выражением

$$D(E,\alpha,\beta) = D_0(\alpha,\beta)E^{\delta}. \qquad (2)$$

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

[a] Самко С.Г. и др. Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения, 1987).

Подход к решению проблемы

Энергетический спектр КЛ

АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Глобальная компонента J_G

Определяется многочисленными старыми ($t \geq 10^6$ лет) удаленными ($r \geq 1$ кпк) источниками

$$J_G(\vec{r}, E) \sim E^{-\gamma-\delta}.$$

Локальная компонента J_L

Вклад близких ($r < 1$ кпк) молодых ($t < 10^6$ лет) источников.

Наблюдаемый поток галактических КЛ

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

Подход к решению проблемы

Энергетический спектр КЛ

АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Локальная компонента J_L

В случае точечного импульсного источника со степенным спектром генерации $S(\vec{r}, t, E) = S_0 E^{-\gamma} \delta(\vec{r}) \Theta(T - t) \Theta(t)$ спектр локальной компоненты имеет «излом».

$$J_L(\vec{r}, t, E) = \frac{S_0 c E^{-\gamma}}{4\pi D(E, \alpha, \beta)^{3/\alpha}} \int\limits_{\max[0, t-T]}^{t} d\tau \tau^{-3\beta/\alpha} \Psi_3^{(\alpha,\beta)} \left(|\vec{r}| (D(r, \alpha, \beta)\tau^{\beta})^{-1/\alpha} \right), \tag{3}$$

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

$$\Psi_3^{(\alpha,\beta)}(\rho) = \int\limits_0^{\infty} g_3^{(\alpha)}(r\tau^{\beta}) q_1^{(\beta,1)}(\tau) \tau^{3\beta/\alpha} d\tau.$$

Подход к решению проблемы

Предсказания модели

АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

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

При $E \ll E_k$ и $E \gg E_k$

$$\eta|_{E \ll E_k} = \gamma - \delta, \quad \eta|_{E \gg E_k} = \gamma + \delta. \tag{4}$$

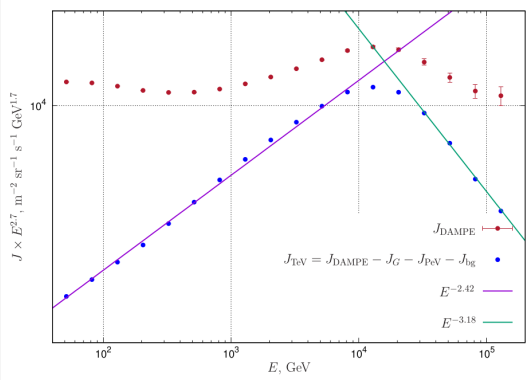
Поток КЛ от локальных источников J_L равен разности наблюдаемого в солнечной системе потока J и спектра от многочисленных старых удаленных источников J_G

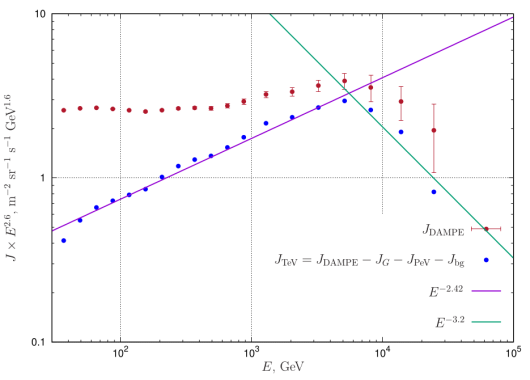
$$J_L = J - J_G. \tag{5}$$

Результаты

Показатель спектра генерации в источнике

АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

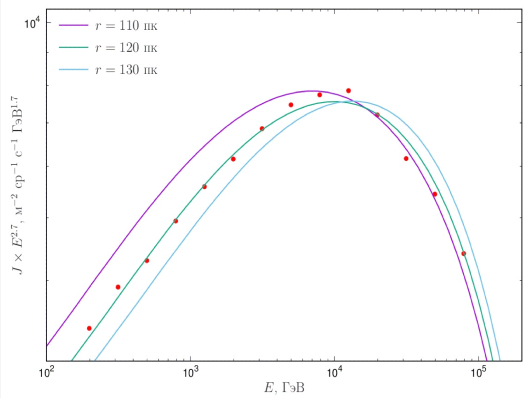


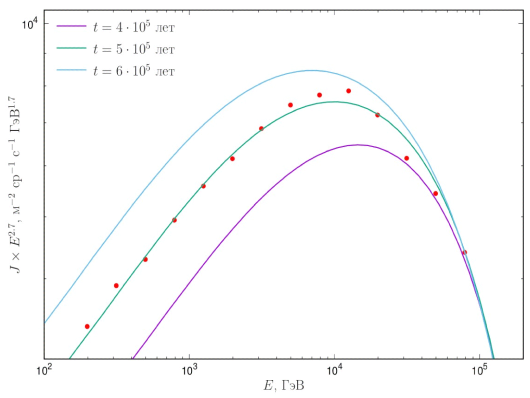


Результаты

Расстояние и возраст тэватронов

АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ





$r \sim 110 - 120$ пк, $\quad t \sim 5 \cdot 10^5$ лет.

Результаты

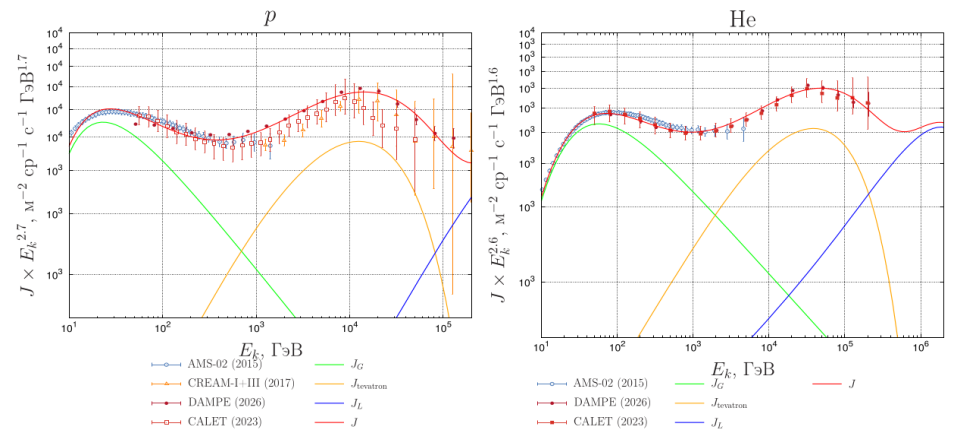
Возможные источники-тэватроны

АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Источник	r, пк	$t, 10^5$ лет
Loop I	120	2.0
Loop II	175	4.0
Loop III	200	4.0
Loop IV	210	4.0
Vela	250	0.46
Geminga	400	3.4
Lopus Loop	400	0.36

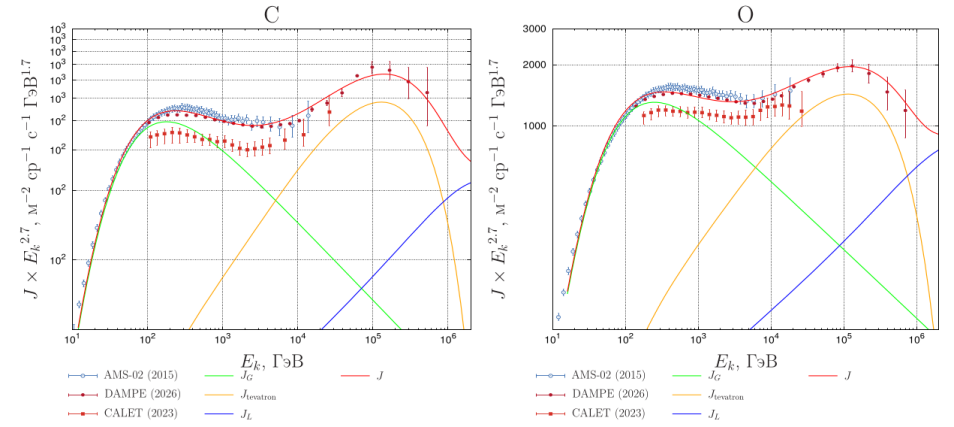
Результаты

Спектр протонов и ядер гелия



Результаты

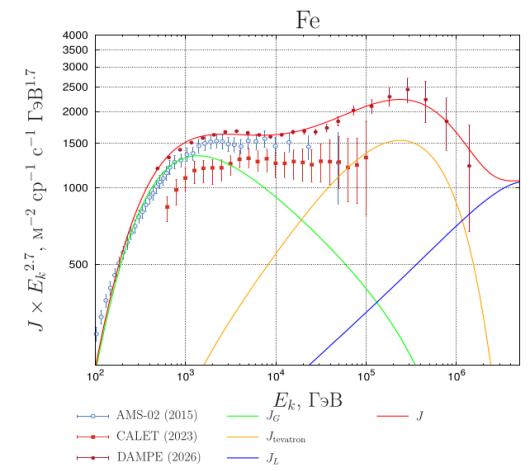
Спектр ядер C и O



Результаты

Спектр ядер Fe

АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ



Заключение

АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

В рамках модели неклассической диффузии, созданной авторами, проведены расчеты спектров основных ядер первичного космического излучения — протонов, гелия, углерода, кислорода и железа. Показано, что установленные в экспериментах DAMPE особенности спектров могут быть объяснены учетом вкладов от группы источников-тэватронов, находящихся на расстоянии $150 - 200$ пк от Земли и имеющих возраст $\sim (4 - 6) \times 10^5$ лет. Спектр генерации частиц источниками — 2.6–2.7.

Обсуждаемые особенности спектров и полученные в работе результаты являются указанием на необходимость пересмотра основных положений стандартного сценария происхождения, ускорения и распространения КЛ в Галактике, принятого сегодня научным сообществом.

Спасибо за внимание!

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда
грант No 23-72-00057

АЛТАЙСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ