

38-я Всероссийская конференция по космическим лучам

Спектры протонов и ядер гелия от тэватронов по данным спутниковых экспериментов: указание на неклассический характер диффузии космических лучей

А.А. Лагутин Н.В. Волков

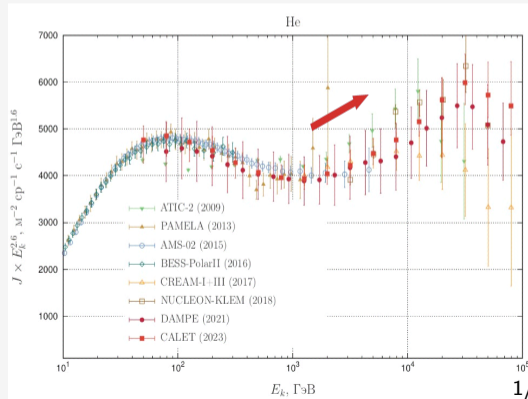
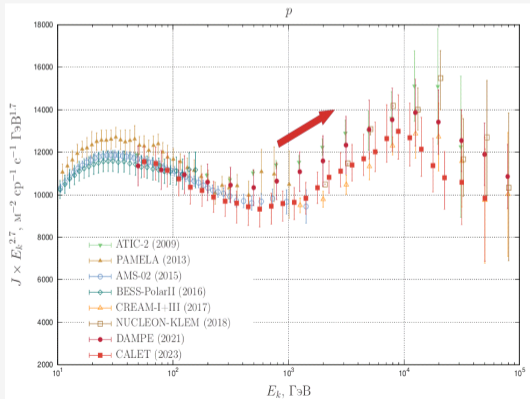
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет»

1-5 июля 2024 г.

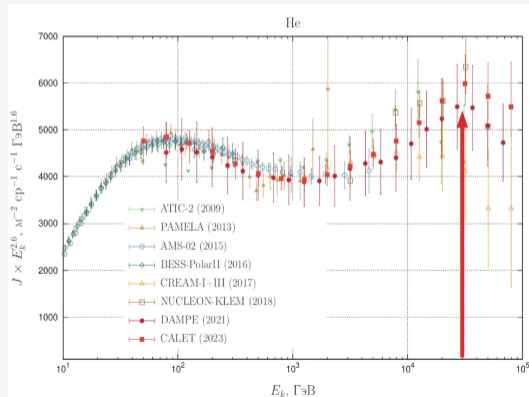
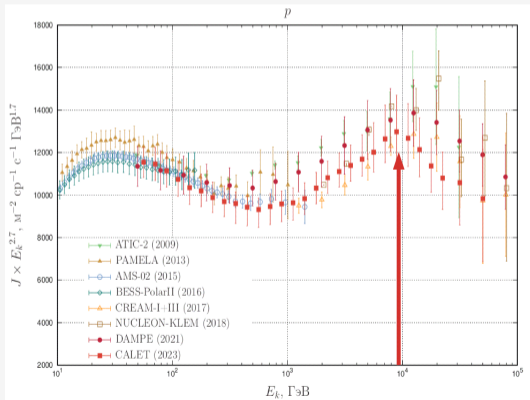


АЛТАЙСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

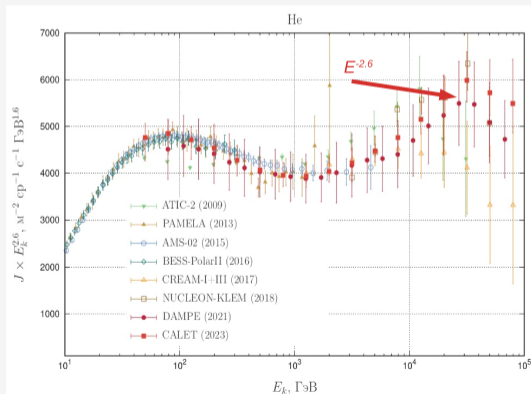
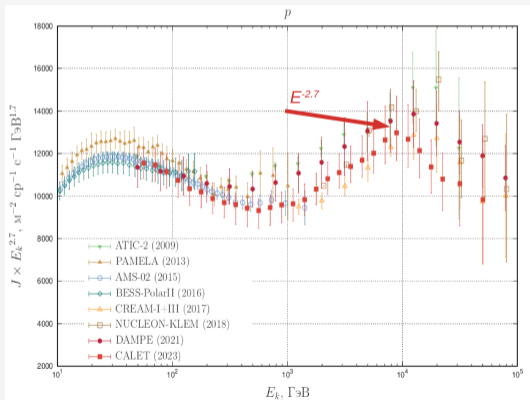
DAMPE и CALET подтвердили уплаживание спектров p и He в области ТэВ-ных энергий, обнаруженное ранее в экспериментах ATIC2, AMS-02, CREAM, NUCLEON.



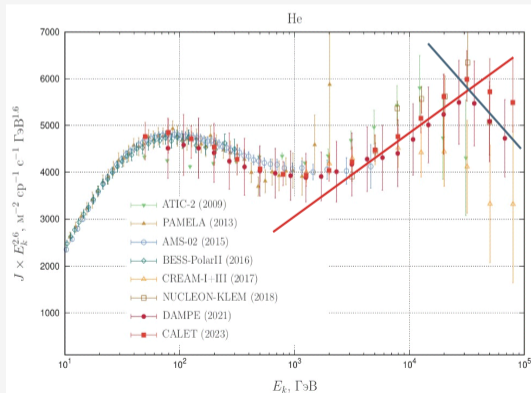
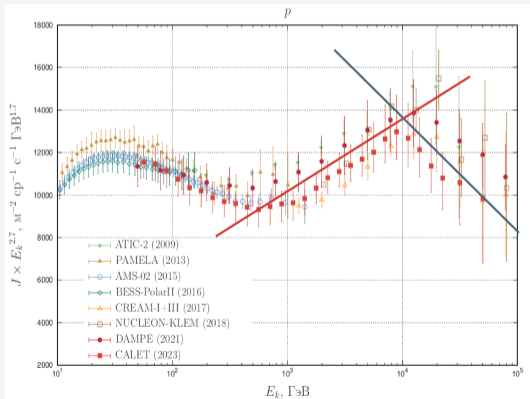
Установлено наличие изломов в спектрах при энергиях ~ 10 ТэВ и ~ 30 ТэВ, соответственно.



Показано, что в точках изломов показатели спектров имеют значения -2.7 для протонов и -2.6 для ядер гелия.



Установлен степенной характер поведения спектров обеих компонент до и после точек изломов.





- 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.



- Расчеты спектров p и He 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.



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 $p(r) \propto A(E, \alpha)r^{-\alpha-1}, r \rightarrow \infty, 0 < \alpha < 2$ — так называемые полеты Лёви.
- 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 Лёви) также имеет степенное распределение $q(t) \propto B(E, \beta)t^{-\beta-1}, t \rightarrow \infty, \beta < 1$.



Уравнение неклассической диффузии

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

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

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

$$D(E, \alpha, \beta) = D_0(\alpha, \beta) E^\delta. \quad (2)$$

D_{0+}^β — дробная производная Римана-Лиувилля;

$(-\Delta)^{\alpha/2}$ — дробный лапласиан («оператор Рисса»)^a.

^aСамко С.Г. и др. Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения, 1987).

Подход к решению проблемы

Энергетический спектр КЛ



Глобальная компонента J_G

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

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

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».

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

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

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

Подход к решению проблемы

Предсказания модели



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 $E \gg E_k$

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

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

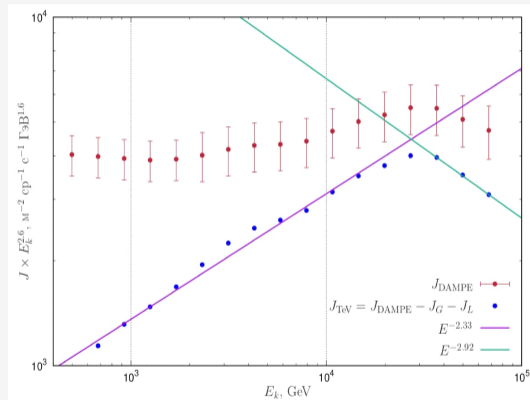
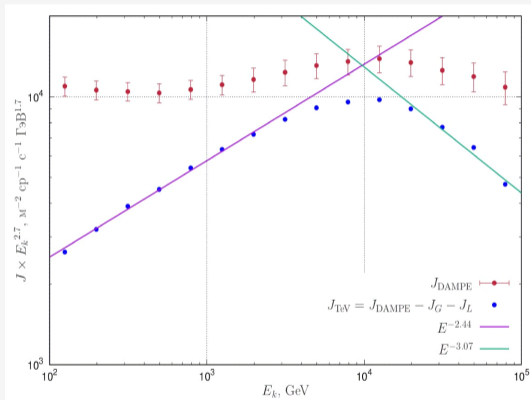
$$J_L = J - J_G. \quad (5)$$

Результаты

Показатель спектра генерации в источнике



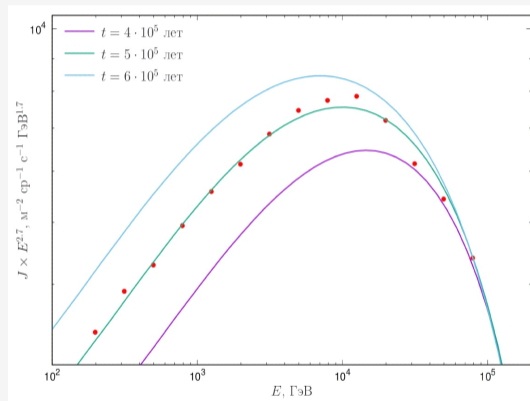
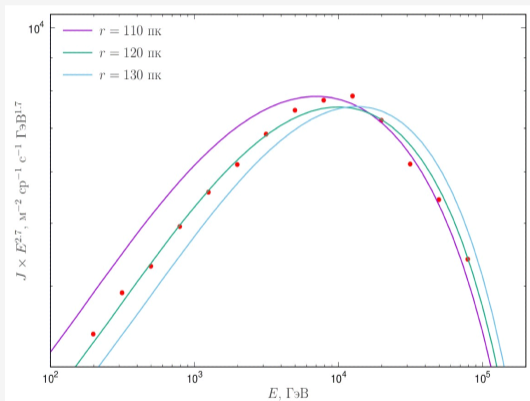
АЛТАЙСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ



Установлено, что показатели спектров имеют значения -2.7 для протонов и -2.6 для ядер гелия.

Результаты

Расстояние и возраст тэватронов



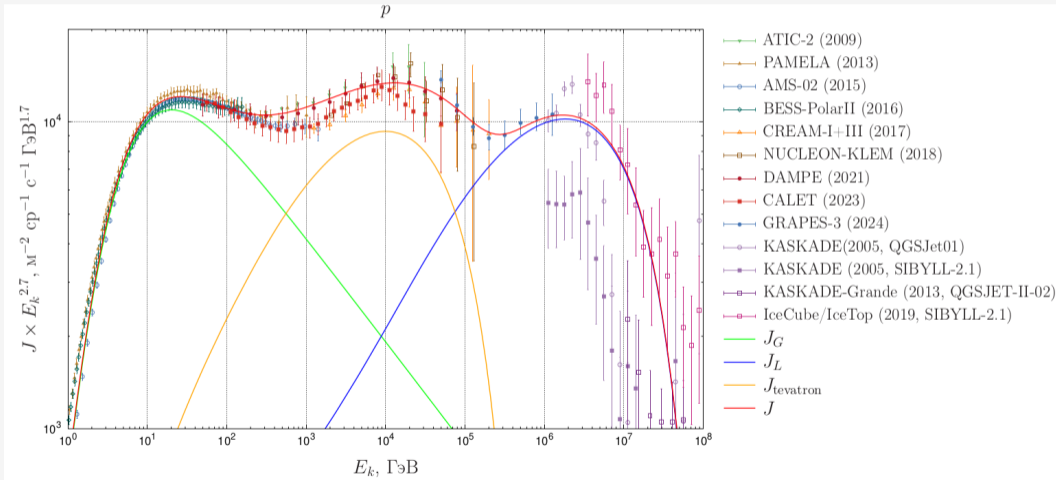
$r \sim 110 - 120$ пк, $t \sim 5 \cdot 10^5$ лет.

Результаты

Спектр протонов

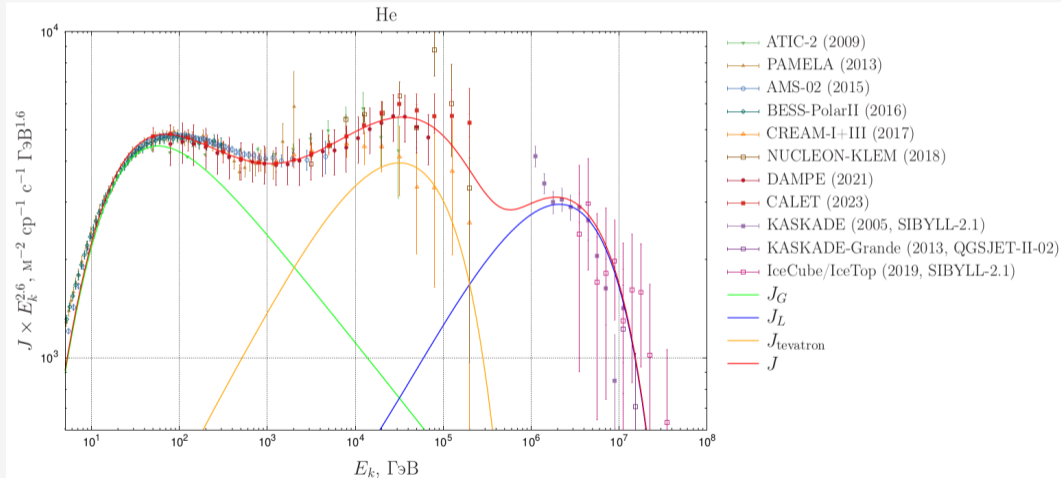


АЛТАЙСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ



Результаты

Спектр ядер He

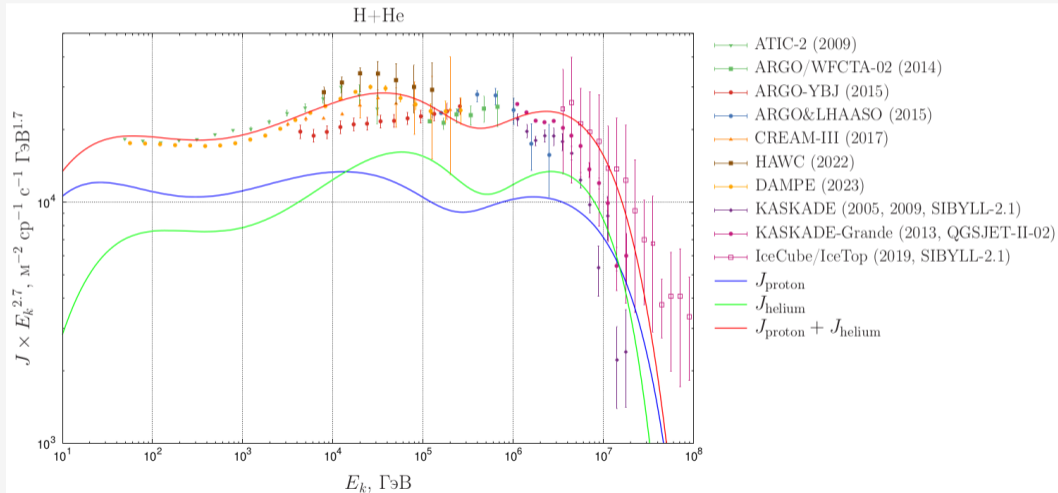


Результаты

Спектр $p + He$



АЛТАЙСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ





В рамках модели неклассической диффузии, созданной авторами, проведены расчеты спектров p и He. Показано, что установленные в экспериментах DAMPE и CALET 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.

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.

38-я Всероссийская конференция по космическим лучам

Спасибо за внимание!

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



**АЛТАЙСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**