

Спектры электронов и позитронов в Галактике: результаты неклассической модели диффузии

37-я Всероссийская конференция по космическим лучам

А.А. Лагутин¹, Н.В. Волков¹

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

28 июня 2022 г.

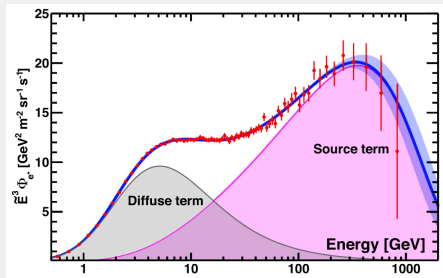


Последние результаты

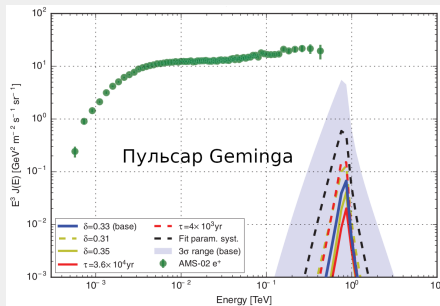
- Прецизионные измерения коллаборации AMS-02 подтвердили установленный ранее в экспериментах PAMELA и Fermi-LAT рост доли позитронов в общем потоке электронов и позитронов в диапазоне энергий 10 – 250 ГэВ. Установлено, что эта доля достигает максимума $\sim 16\%$ при $E \sim 275$ ГэВ.
- Результаты прямых измерений космических обсерваторий DAMPE и CALET впервые подтвердили наличие излома в суммарном спектре электронов и позитронов при энергии $E \sim 0.9$ ТэВ, установленного ранее наземными черенковскими детекторами коллаборации H.E.S.S.
- MILAGRO и HAWC обнаружили протяженные области γ -излучения в зоне расположения нескольких сверхновых звезд, в которых образуются пульсары. Эти результаты рассматриваются как подтверждение выхода пульсара из оболочки, образованной взрывом сверхновой, и того факта, что пульсары являются источниками e^-e^+ пар высокой энергии.

Интерпретация результатов

- Наличие источников первичных позитронов.



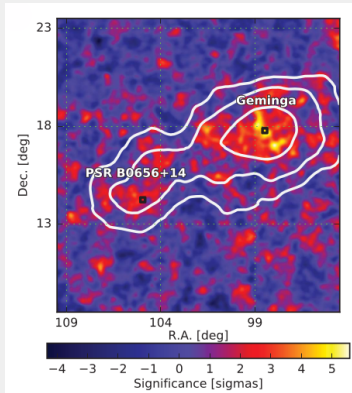
AMS-02 // Phys. Rev., 894, 1–116 (2021).



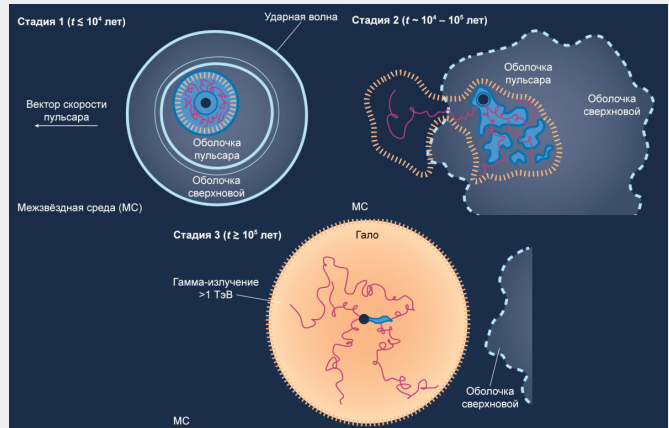
Abeysekara A.U. et al. // Science, 358, 911–914 (2017).

Интерпретация результатов

- Наиболее вероятные кандидаты — сверхновые и пульсары.



Abeysekara A.U. et al. // Science (2017).



Lopez-Coto R. et al. // Nature Astronomy, 6, 199–206 (2022).

Формулировка сценария, позволяющего описать основные особенности спектров электронов и позитронов самосогласованным образом.

Задачи

- Формулировка модели диффузии e^- и e^+ в резко неоднородной межзвездной среде (модель неклассической диффузии).
- Решение уравнения супердиффузии для моделей источников, описывающих генерацию электронов и позитронов в пульсарах и в остатках сверхновых.
- Учет эффекта Клейна-Нишины при описании потерь энергии высокоэнергетичными электронами и позитронами.
- Сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными.

Основные положения

- Электроны и позитроны ускоряются в одних и тех же источниках со степенным спектром инжекции E^{-p} .
- Источники e^- и e^+ 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).
- Вклад вторичных позитронов от взаимодействия p и ядер He, ускоренных в стационарных источниках, с межзвездной средой учтен в первой группе источников.
- Резко-неоднородный характер распределения вещества и магнитного поля в Галактике приводит к неклассическому характеру диффузии e^- и e^+ . Такой характер движения проявляется в наличии аномально больших свободных пробегов r частиц в межзвездной среде («полеты Лёви») со степенным распределением $p(r, E) \propto r^{-\alpha-1}, r \rightarrow \infty, 0 < \alpha < 2$.

Уравнение супердиффузии¹

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

- $N(\vec{r}, t, E)$ — концентрация частиц в точке \vec{r} в момент времени t , отнесенная к единичному интервалу энергий около E ;
- $D(E, \alpha) = D_0(\alpha)E^\delta$ — аномальный коэффициент диффузии;
- $(-\Delta)^{\alpha/2}$ — дробный лапласиан (оператор Рисса).
- $B(E)$ — средние потери энергии в единицу времени в галактической среде.
- $Q(\vec{r}, t, E)$ — плотность распределения источников.

¹Lagutin A.A. et al. // Proc. ICRC, 2001

Lagutin A.A. et al. // Astropart. Phys, 2003

Лагутин А.А., Тюменцев А.Г. // Известия АлтГУ, 2004

Lagutin A.A., Volkov N.V., Tyumentsev A.G. // Journal of Physics: Conference Series, 2015

Функция Грина уравнения супердиффузии

$$G(\vec{r}, t, E; \vec{r}_0, t_0, E_0) = g_3^{(\alpha)}(|\vec{r} - \vec{r}_0| \lambda^{-1/\alpha}) \frac{\lambda^{-3/\alpha}}{B(E)} \delta(t - t_0 - \tau) H(t - t_0). \quad (2)$$

$g_3^{(\alpha)}(r)$ — трехмерное сферически-симметричное устойчивое распределение².

$$\tau(E, E_0) = \int_E^{E_0} \frac{dE'}{B(E')}, \quad \lambda(E, E_0) = \int_E^{E_0} \frac{D(E')}{B(E')} dE'. \quad (3)$$

²Uchaikin V.V., Zolotarev V.M.: 1999, Chance and stability, VSP. Netherlands, Utrecht.

Интенсивность частиц

$$J(\vec{r}, t, E) = \frac{c}{4\pi} \int_{\mathbb{R}^3} d\vec{r}_0 \int_E^\infty dE_0 \int_{-\infty}^t dt_0 G(\vec{r}, t, E; \vec{r}_0, t_0, E_0) Q(\vec{r}_0, t_0, E_0). \quad (4)$$

Энергетический спектр

Пространственное разделение источников приводит к разделению наблюдаемых потоков e^- и e^+ на две компоненты:

$$J(\vec{r}, t, E) = J_G(\vec{r}, E) + J_L(\vec{r}, t, E). \quad (5)$$

- J_G — глобальная компонента спектра (вклад многочисленных старых удаленных источников, включая вклад вторичных позитронов);
- J_L — локальная компонента (определяется близкими молодыми источниками).

Точечный мгновенный источник

$$Q(\vec{r}_0, t_0, E_0) = Q_M E_0^{-p} \delta(\vec{r}_0) \delta(t_0). \quad (6)$$

Спектр

Обозначим корень уравнения $t = \tau(E, E_0) = \int_E^{E_s} \frac{dE'}{B(E')}$ как E_s , тогда

$$J(\vec{r}, t, E) = \frac{cQ_M}{4\pi} \frac{B(E_s)}{B(E)} E_s^{-p} \lambda(E, E_s)^{-3/\alpha} g_3^{(\alpha)}(r \lambda(E, E_s)^{-1/\alpha}), \quad (7)$$

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

Результаты этих и приведенных ниже вычислений удобно представить в виде

$$E_s = \eta(t, E)E.$$

Точечный импульсный источник

$$Q(\vec{r}_0, t_0, E_0) = Q_{\text{и}} E_0^{-p} \delta(\vec{r}_0) H(t_0) H(T - t_0). \quad (8)$$

Локальная компонента спектра

Примем момент включения источника за ноль и учтем, что в момент времени t частица будет иметь энергию E , если ее энергия в источнике была равна E_s , тогда

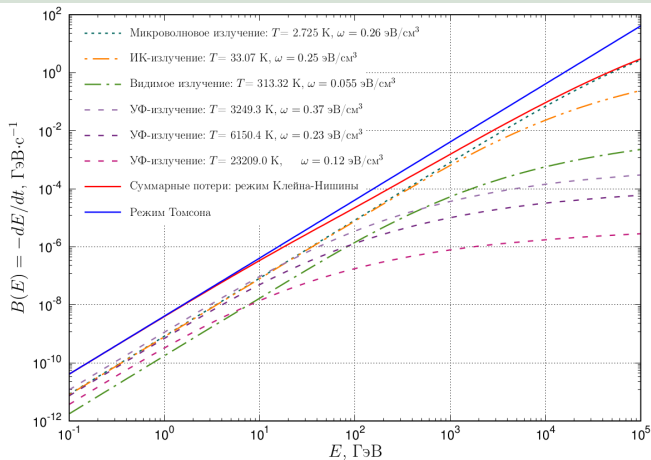
$$J(\vec{r}, t, E) = \frac{cQ_{\text{и}}}{4\pi} \frac{1}{B(E)} \int_{\eta(t-T, E)E}^{\eta(t, E)E} dE_0 E_0^{-p} \lambda(t, E)^{-3/\alpha} g_3^{(\alpha)}(r\lambda^{-1/\alpha}). \quad (9)$$

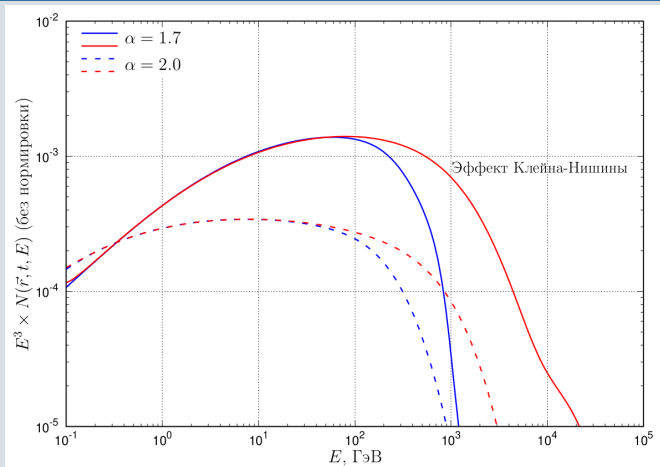
Механизмы потерь

- Ионизационные и тормозные потери.
- Синхротронные потери.
- Обратные комптоновские потери при рассеянии на фотонах¹:
 - ▶ микроволнового,
 - ▶ инфракрасного,
 - ▶ видимого,
 - ▶ ультрафиолетового излучения.

¹Fang K. et al. // Chin. Phys. Lett., 38(3), 039801 (2021).

Скорости потерь энергии





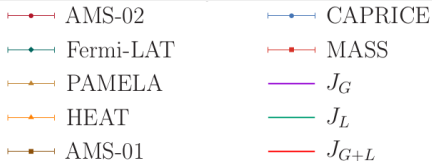
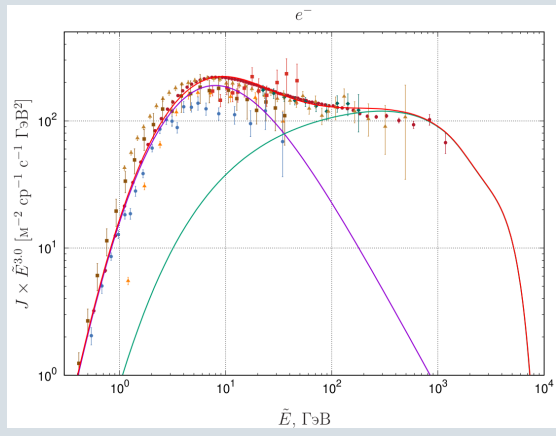
Спектр от точечного импульсного источника для двух режимов диффузии с Томсоновским режимом потерь (синие линии) и с учетом эффекта Клейна-Нишины (красные линии)

Таблица 1: Параметры модели

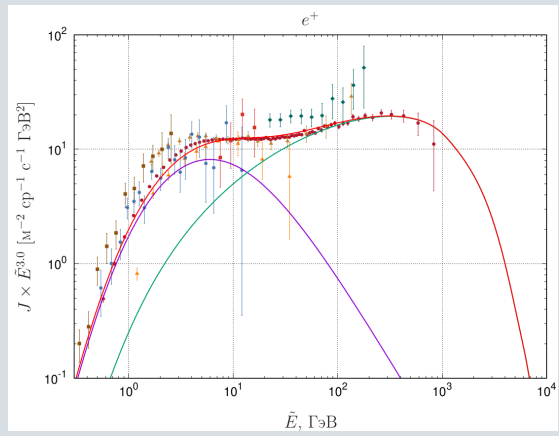
Параметр	Значение
p	2.85
α	1.7
$D_0(\alpha)$	$1.5 \cdot 10^{-3}$ пк ^{1.7} /год
δ	0.27
T	10^4 лет

- Lagutin A.A., Volkov N.V., Tyumentsev A.G. // Journal of Physics: Conference Series, 2015.
- Lagutin A.A., Volkov N.V., Raikin R.I. and Tyumentsev A.G. // Journal of Physics: Conference Series, 2019.
- Lagutin A.A., Volkov N.V. // Physics of Atomic Nuclei, 2021.

Спектр электронов

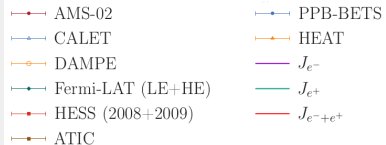
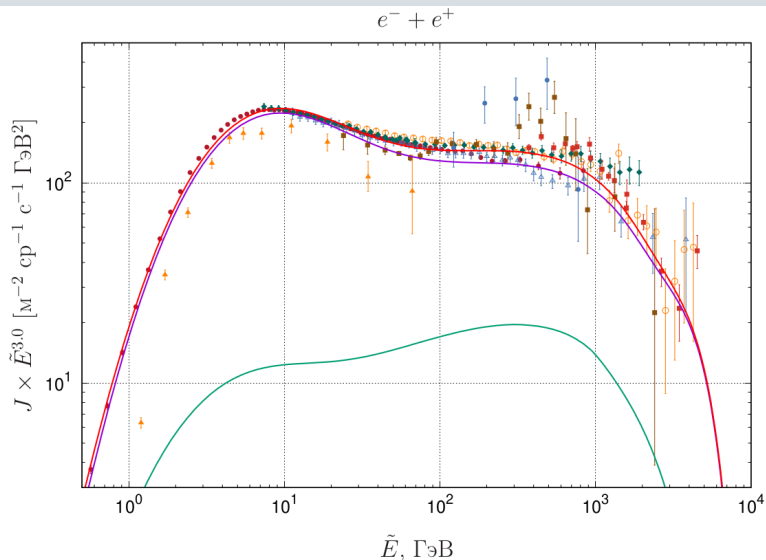


Спектр позитронов



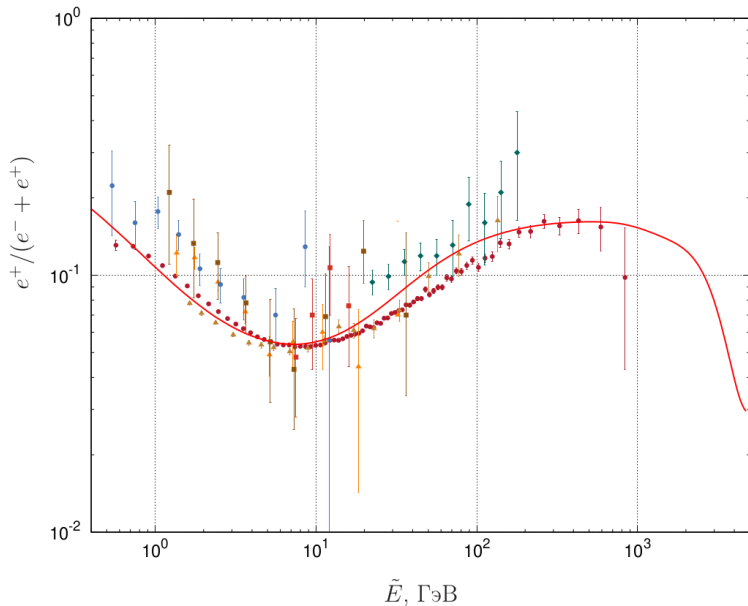
Экспериментальные данные из Cosmic-Ray DataBase (CRDB) (Maurin D., Melot F., Taillet R. // A&A 569, A32 (2014); doi:10.1051/0004-6361/201321344),
<http://lpsc.in2p3.fr/crdb>

Суммарный спектр электронов и позитронов



Экспериментальные данные из
Cosmic-Ray DataBase (CRDB)
(Maurin D., Melot F., Taillet R.
// A&A 569, A32 (2014);
doi:10.1051/0004-
6361/201321344),
<http://lpsc.in2p3.fr/crdb>

Доля позитронов



Экспериментальные данные из
Cosmic-Ray DataBase (CRDB)
(Maurin D., Melot F., Taillet R.
// A&A 569, A32 (2014);
doi:10.1051/0004-
6361/201321344),
<http://lpsc.in2p3.fr/crdb>

Модель источника

$$Q(\vec{r}_0, t_0, E_0) = Q_{\Pi} E_0^{-p} \delta(\vec{r}_0) [T_0 / (T_0 + t_0)]^2 H(t_0), \quad T_0 \sim 10^4 \text{ лет.} \quad (10)$$

Считается, что пульсар становится источником пар после выхода из оболочки родительской сверхновой, т.е. через t_s лет после рождения.

$$J(\vec{r}, t, E) = \frac{cQ_{\Pi}}{4\pi B(E)} \int_{t_s}^{\max(t, t_s)} dt_0 \frac{g_3^{(\alpha)}(r\lambda_s^{-1/\alpha})}{\lambda_s^{3/\alpha}} B(E_s) E_s^{-p} [T_0 / (T_0 + t_0)]^2 \quad (11)$$

$$\lambda_s = \int_E^{E_s} \frac{D(E')}{B(E')} dE', \quad E_s = \eta(t, t_0, E) E \quad - \text{ корень ур-я } t - t_0 = \int_E^{E_s} \frac{dE'}{B(E')}.$$

Светимость пульсара после рождения меняется с течением времени по закону

$$L = L_0 [T/(T + t)]^2,$$

где T — параметр, характеризующий скорость уменьшения инъекции e^-e^+ пар из-за потери энергии пульсара на излучение.

Таблица 2: Параметры пульсара Geminga

Параметр	Значение	Ссылка
T	$\sim 10 - 12$ тысяч лет	Wang S.-H. et al. // Phys. Rev. D., 103, 063035 (2021)
L_0	$2.78 \cdot 10^{37}$ эрг/с	
d	250 пк	Abeyssekara A.U. et al. // Science, 358, 911–914 (2017)
t	$3.42 \cdot 10^5$ лет	
t_s	10^4 лет	

Светимость пульсара (Tang X. et al. // MNRAS, 484, 3491–3501 (2019))

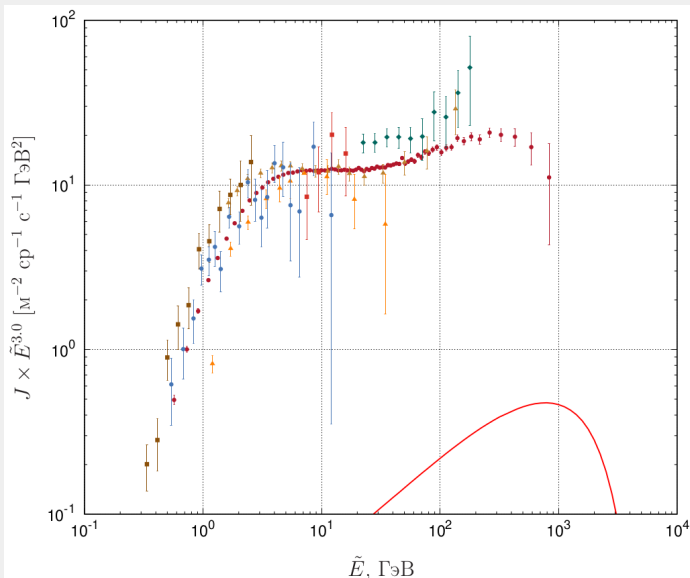
$$\eta L(t) = 2 \int_{E_{lo}}^{E_{hi}} EQ(\vec{r}, t, E) dE,$$

- $E_{lo} = 1$ ГэВ и $E_{hi} = 500$ ТэВ — пороги обрезания спектра генерации (Abeyssekara A.U. et al. // Science; Tang X. et al. // MNRAS).
- η — доля светимости пульсара, обусловленная ускоренными e^-e^+ -парами.

Принимая во внимание, что $Q(\vec{r}, t, E) \sim Q_{\Pi} E^{-p}$ получаем

$$Q_{\Pi} = 1.18 \cdot 10^{37} \text{ эрг/с.}$$

Спектр пульсара Geminga



Экспериментальные данные из
Cosmic-Ray DataBase (CRDB)
(Maurin D., Melot F., Taillet R.
// A&A 569, A32 (2014);
doi:10.1051/0004-
6361/201321344),
<http://lpsc.in2p3.fr/crdb>

- Предложен сценарий, позволяющий описать основные особенности спектров электронов и позитронов самосогласованным образом. Распространение частиц в Галактике описывалось в рамках неклассической модели диффузии, созданной в Алтайском госуниверситете.
- Впервые получено решение уравнения супердиффузии для моделей источников, описывающих генерацию электронов и позитронов в пульсарах и в остатках сверхновых. Новым элементом работы является также учет эффекта Клейна-Нишины при описании потерь энергии высокоэнергетичными электронами и позитронами.
- Показано, что самосогласованное описание экспериментальных данных по спектрам электронов и позитронов, а также доли позитронов в общем потоке электронов и позитронов в сценарии ускорения частиц в окрестностях сверхновых достигается для режима супердиффузии с показателем $\alpha = 1.7$ при показателе спектра генерации частиц в источниках $p = 2.85$.
- Установленный в работе энергетический выход пульсара Geminga $\sim 10^{37}$ эрг/с (типичный для пульсаров) ставит под сомнение возможность формирования спектра позитронов только источниками этого типа.

Спасибо за внимание!