

УДК 524.1/504.32

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОТОКОВ ЯДЕР И ЭЛЕКТРОНОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В МОДЕЛИ НЕКЛАССИЧЕСКОЙ ДИФФУЗИИ

© 2023 г. А. А. Лагутин¹*, Н. В. Волков¹, Р. И. Райкин¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Алтайский государственный университет”, Барнаул, Россия

*E-mail: lagutin@theory.asu.ru

Поступила в редакцию 25.12.2022 г.

После доработки 12.02.2023 г.

Принята к публикации 29.03.2023 г.

Обсуждается сценарий формирования наблюдаемых спектров электронов/позитронов и ядер космических лучей сверхвысоких энергий в рамках неклассической (супердиффузионной) модели распространения частиц в резко-неоднородной межзвездной и межгалактической средах. Показано, что предложенный сценарий обеспечивает согласованное описание экспериментальных данных прецизионных спутниковых измерений, наземных гибридных установок ШАЛ и черенковских телескопов по спектрам лептонов и ядер, а также массовому составу космических лучей в диапазоне сверхвысоких и ультравысоких энергий.

DOI: 10.31857/S0367676523701636, EDN: ONMXES

ВВЕДЕНИЕ

Результаты наземных и спутниковых экспериментов по регистрации лептонной и ядерной компонент космических лучей (КЛ), полученные в последнее десятилетие, позволили выявить ряд особенностей в наблюдаемых спектрах этих частиц. Данные коллаборации AMS-02 [1] подтвердили установленный ранее в экспериментах PAMELA [2] и Fermi-LAT [3] рост доли позитронов в общем потоке электронов и позитронов в диапазоне энергий 10–250 ГэВ. Установлено, что эта доля достигает максимума ~16% при $E \sim 275$ ГэВ. Результаты прямых измерений космических обсерваторий DAMPE [4] и CALET [5] 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. [6]. Одним из важных результатов астрофизики высоких энергий является обнаруженное в эксперименте РАО (Pierre Auger Observatory) [7] облегчение массового состава первичного космического излучения (ПКИ) в области $E \geq 10^{18}$ эВ.

Вместе с тем, отсутствие астрофизической интерпретации наблюдаемых в современных экспериментах особенностей представляет сегодня главное препятствие для надежного физического понимания структуры энергетических спектров лептонов в области ТэВ-ных энергий и ядер КЛ в области сверхвысоких ($E > 10^{15}$ эВ) и ультравысо-

ких ($E > 10^{18}$ эВ) энергий, дискриминации моделей ускорения и распространения КЛ, выявления переходной области энергии, разделяющей КЛ галактического и внегалактического происхождения.

Целью работы является обсуждение сценария формирования наблюдаемых спектров электронов/позитронов и ядер космических лучей сверхвысоких энергий в рамках неклассической (супердиффузионной) модели распространения частиц в резко-неоднородной межзвездной и межгалактической средах.

СЦЕНАРИЙ ФОРМИРОВАНИЯ НАБЛЮДАЕМЫХ СПЕКТРОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Основные базовые принципы и ключевые положения развиваемого сценария формирования наблюдаемых спектров электронов/позитронов и ядер космических лучей сверхвысоких энергий в рамках супердиффузионной модели заключаются в следующем:

1. Электроны и позитроны КЛ, наблюдаемые в Солнечной системе, ускоряются в Галактике в одних и тех же источниках со степенным спектром инъекции $J \propto E^{-\gamma}$. Все ядра с жесткостями $30 \leq R \leq 5 \cdot 10^9$ ГВ также ускорены в основном галактическими источниками, спектр их генерации $J \propto R^{-\gamma} \exp(-R/R^*)$.

2. Резко-неоднородный характер распределения вещества и магнитного поля в межзвездной и межгалактической средах приводит к неклассическому характеру диффузии КЛ (см., например, наши работы [8, 9] и результаты недавнего исследования [10]). Такой характер движения проявляется в наличии аномально больших свободных пробегов r частиц в межзвездной среде (“полеты Леви”) со степенным распределением $p(r, E) \propto r^{-\alpha-1}$, $r \rightarrow \infty$, $0 < \alpha < 2$.

3. Галактические источники КЛ делятся на две группы. Первая группа включает многочисленные старые ($t \geq 10^6$ лет) удаленные ($r \geq 1$ кпк) источники. Эта система стационарных источников, определяющая поведение наблюдаемого спектра первичных и вторичных частиц в области $\leq 10^2$ ГВ, формирует глобальную компоненту J_G КЛ. Во вторую группу входят близкие ($r < 1$ кпк) молодые ($t < 10^6$ лет) источники, которые определяют поведение спектра в области высоких энергий. В работе считается, что в случае ядер эта локальная компонента включает не только потоки частиц, достигающие Солнечную систему в результате диффузионного распространения (J_L), но и частицы, приходящие из области ускорения без рассеяния (в силу наличия “полетов Леви”). Нерассеянная компонента J_{NS} определяет поведение спектров ядер в области $R \sim 10^7 - 5 \cdot 10^9$ ГВ.

4. Спектр частиц, ускоренных внегалактическими источниками КЛ, имеет степенной вид $J \propto R^{-\gamma_1}$. Вклад этих источников J_{EGCR} определяет поведение наблюдаемого спектра в области $E \geq 10^{18}$ эВ.

5. В предлагаемом сценарии считается, что спектр ядерной компоненты, формируемый всеми источниками, имеет вид

$$J = J_G(\bar{r}, R) + J_L(\bar{r}, t, R) + J_{NS}(\bar{r}, R) + J_{EGCR}(\bar{r}, t, R). \quad (1)$$

Спектр электронов и позитронов определяется первыми двумя слагаемыми уравнения (1):

$$J_e = J_G(\bar{r}, R) + J_L(\bar{r}, t, R).$$

6. Уравнение неклассической диффузии для концентрации частиц с жесткостью R , создаваемой в резко-неоднородной среде распределением источников с плотностью $S(\bar{r}, t, R)$, с учетом энергетических потерь имеет вид [11]

$$\frac{\partial N(\bar{r}, t, R)}{\partial t} = -D(R, \alpha)(-\Delta)^{\alpha/2} N(\bar{r}, t, R) + \frac{\partial B(R) N(\bar{r}, t, R)}{\partial R} + S(\bar{r}, t, R). \quad (2)$$

Здесь $N(\bar{r}, t, R)$ — концентрация частиц в точке $\bar{r}$ среды в момент времени t в единичном интервале жесткостей около R ; $(-\Delta)^{\alpha/2}$ — дробный лапласиан (“оператор Рисса”) [12]; $D(R, \alpha) = D_0(\alpha)(R/1 \text{ ГВ})^\delta$ — коэффициент аномальной диффузии; $B(R)$ — средняя скорость потерь энергии частицей; $S(\bar{r}, t, R)$ — плотность источников.

В случае ядер от галактических источников в уравнении (2) можно пренебречь слагаемым, описывающим потери энергии. Отметим, что при $\alpha = 2$ из (2) мы получаем уравнение нормальной диффузии Гинзбурга–Сыроватского.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ В МОДЕЛИ НЕКЛАССИЧЕСКОЙ ДИФФУЗИИ

Решение уравнения супердиффузии для электронов и позитронов в случае точечного стационарного источника, моделирующего вклад от многочисленных старых ($t \geq 10^6$ лет) удаленных ($r \geq 1$ кпк) источников, показано в [13]. В случае ядер в [14] установлено, что в стационарном случае спектр не имеет излома, показатель спектра равен спектральному индексу наблюдаемых частиц выше колена ($R > R_k$): $J_G \sim R^{-\gamma-\delta}$. Развиваемый в данной работе сценарий также предполагает ускорение вторичных частиц в галактических источниках. Возможные механизмы ускорения вторичных ядер обсуждаются в работах [15–19]. Спектр наблюдаемых вторичных частиц от стационарного источника описывается выражением $J_s \sim R^{-\gamma-2\delta}$.

Локальная галактическая и внегалактическая компоненты спектра получены для точечного импульсного источника:

$$S(\bar{r}, t, R) = S_u R^{-\gamma} \delta(\bar{r}) H(t) H(T-t) \exp(-R/R^*).$$

Здесь $H(t)$ — ступенчатая функция, а T — длительность генерации частиц в источнике.

Выражение для спектра частиц для режима супердиффузии с учетом потерь энергии имеет вид

$$J(\bar{r}, t, R) = \frac{c S_u}{4\pi B(R)} \times \int_{\eta(t-T, R)}^{\eta(t, R)} dR_0 R_0^{-\gamma} \lambda(t, R_0)^{-3/\alpha} g_3^{(\alpha)}(r \lambda^{-1/\alpha}) \exp(-R_0/R^*). \quad (3)$$

Здесь $g_3^{(\alpha)}(r)$ — плотность вероятности трехмерного сферически-симметричного устойчивого распределения [20],

$$\lambda(R, R_s) = \int_R^{R_s} \frac{D(R')}{B(R')} dR', \quad (4a)$$

Таблица 1. Параметры модели

Параметр	Галактическая компонента	Внегалактическая компонента
γ	2.85	2.4
D_0 , пк ^{1.7} /год	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
R^* , ГВ	$5.5 \cdot 10^8$	$2.0 \cdot 10^{10}$
δ	0.27	
r , Мпк	[11]	10
T , лет	10^4	10^6

$$t = \int_R^{R_s} \frac{dR'}{B(R')}. \tag{46}$$

В выражениях (4а) и (4б) $R_s = \eta(t, R) R$ есть энергия, которая была у частицы в источнике в момент включения источника, если в момент времени t ее энергия R , $\eta(t, R)$ – корень уравнения (4б).

Расчеты с использованием выражения (4) требуют задания функции потерь энергии $B(R)$. В случае электронов и позитронов учитываются потери на ионизацию атомов среды, тормозное и синхротронное излучение, а также обратные комптоновские потери (см., например, [13]). Отметим, что в релятивистском случае (режим Клейна–Нишины) пороговая энергия обратного комптоновского рассеяния достигается даже при взаимодействии электронов с фотонами видимого излучения. Сечения взаимодействия электронов с фоновыми фотонами становятся существенно меньше по сравнению с поперечным сечением Томсона, традиционно используемым в расчетах. В результате скорость потерь энергии электрона при взаимодействии с фоновым электромагнитным излучением Галактики уменьшается (эффект Клейна–Нишины). В работе в расчетах спектров электронов и позитронов с энергиями $E > 100$ ГэВ для учета эффекта Клейна–Нишины использовались аппроксимационные формулы, предложенные в [21]. В данной работе не учитываются потери энергии ядер при их распространении в межзвёздной галактической среде.

Потери энергии ядрами КЛ в межгалактической среде при их взаимодействии с реликтовым излучением (фотоионные реакции, образование электронно-позитронных пар, фотоядерное расщепление) описывались в соответствии с аппроксимациями, используемыми в пакете CRPropa v 3.2 [22].

ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ

Значения параметров модели неклассической диффузии, а также технология их самосогласованного определения на основании имеющихся экспериментальных данных для галактических КЛ обсуждаются в [13, 23].

Первая наша оценка параметра α , характеризующего фрактальность среды, в проблеме диффузии частиц в Галактике, была получена в [8]: $\alpha = 5/3$. Анализ экспериментальных данных, выполненный, например, в работах [24–30] подтвердил эту оценку. Было установлено, что диффузия электронов и ионов в космической плазме носит супердиффузионный характер. Установлено, что зависимость среднеквадратичного смещения электронов от времени имеет вид $\langle \Delta x \rangle^2 \sim t^{1.02} - t^{1.38}$, а ионов – $\langle \Delta x^2 \rangle \sim t^{1.08} - t^{1.33}$. Поскольку в режиме супердиффузии зависимость изменения ширины диффузионного пакета Δx^2 от времени имеет вид $\Delta x^2 \sim t^{2/\alpha}$, то параметр α , определяемый в этих экспериментах, равен 1.45–1.85.

Следует также отметить, что интерпретация результатов коллаборации HAWC для гало пульсара Geminga [31] приводит к выводу о том, что супердиффузионная модель может объяснить морфологическую структуру гало этого пульсара при $\alpha \sim 1.6 - 1.8$.

Важным результатом сегодня является и недавняя работа [10]. Авторами показано, что блуждание силовых линий магнитного поля приводит к супердиффузионному режиму переноса частиц с показателем $\alpha < 2$.

Методика определения значения коэффициента диффузии D_0 для межзвездной и межгалактических сред основана на связи между наблюдаемыми изломами в спектре КЛ при энергиях $3 \cdot 10^{15}$ и $1.3 \cdot 10^{19}$ эВ с изломом в устойчивом распределении $g_3^{(1.7)}(r)$ [32].

Методика определения одного из ключевых параметров модели – показателя спектра генерации частиц в источниках γ – основана на сопоставлении наблюдаемых спектров КЛ до и после излома с асимптотическим поведением расчетных спектров и детально обсуждается в [13].

Пространственно-временные характеристики ближайших источников КЛ показаны в [11]. Значения основных параметров модели приведены в табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Результаты расчетов спектров электронов и позитронов, а также доли позитронов, полученные в рамках предлагаемого в работе сценария, показаны на рис. 1 и 2. Установлено, что самосо-

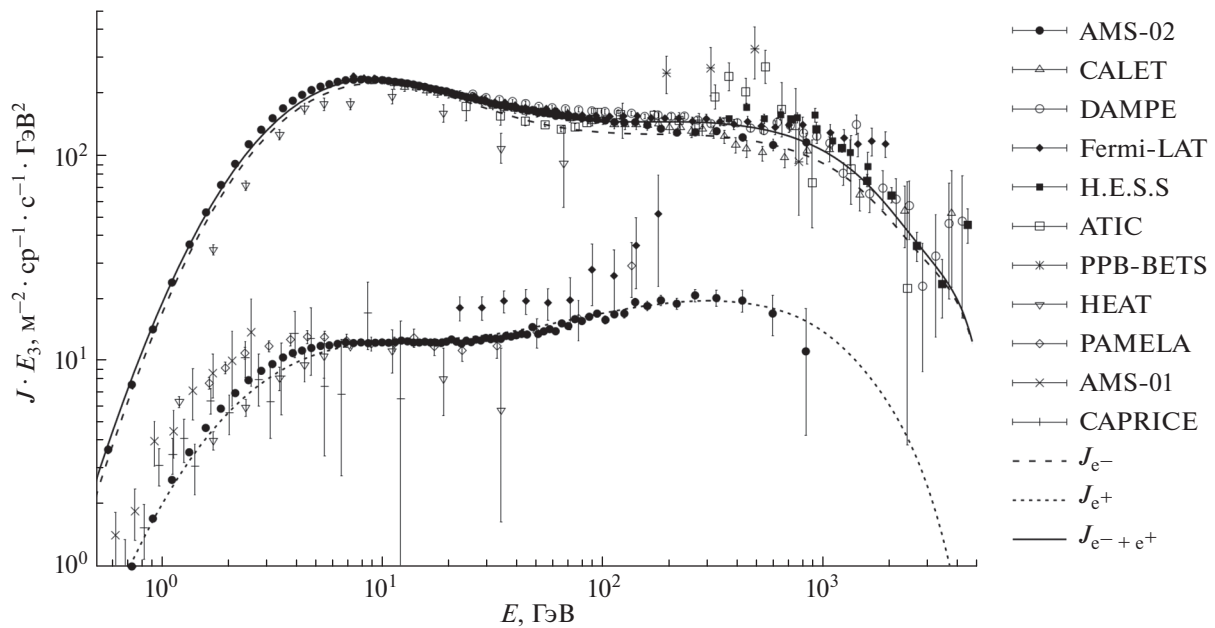


Рис. 1. Сопоставление суммарного спектра электронов и позитронов (сплошная линия), а также спектра позитронов (точечная линия), полученного в модели неклассической диффузии, с экспериментальными данными: AMS-02 [33], CALET [34], DAMPE [4], Fermi-LAT [3, 35], H.E.S.S. [6], ATIC [36], PPB-BETS [37], HEAT [38], PAMELA [39, 40], AMS-01 [41], CAPRICE [42]. Пунктирной линией показан спектр электронов, полученный в модели неклассической диффузии.

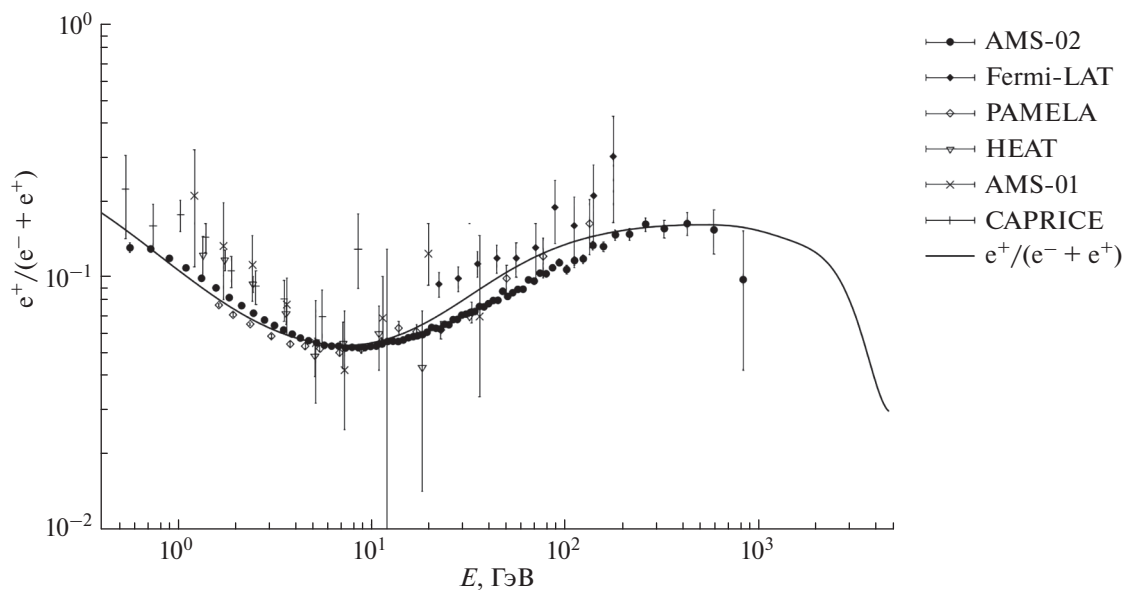


Рис. 2. Сопоставление доли позитронов в общем потоке электронов и позитронов, полученной в модели неклассической диффузии, с экспериментальными данными: AMS-02 [33], Fermi-LAT [3, 35], PAMELA [40], HEAT [38], AMS-01 [41], CAPRICE [42].

гласованное описание экспериментальных данных по спектрам электронов и позитронов достигается для режима супердиффузии с показателем $\alpha = 1.7$ при показателе спектра генерации частиц в источниках $\gamma = 2.85$.

На рис. 3 и 4 показаны результаты расчетов спектра и массового состава КЛ в области высоких и сверхвысоких энергий. Расчеты проведены для режима супердиффузии с показателями $\alpha = 1.7$. Спектральный индекс галактических ис-

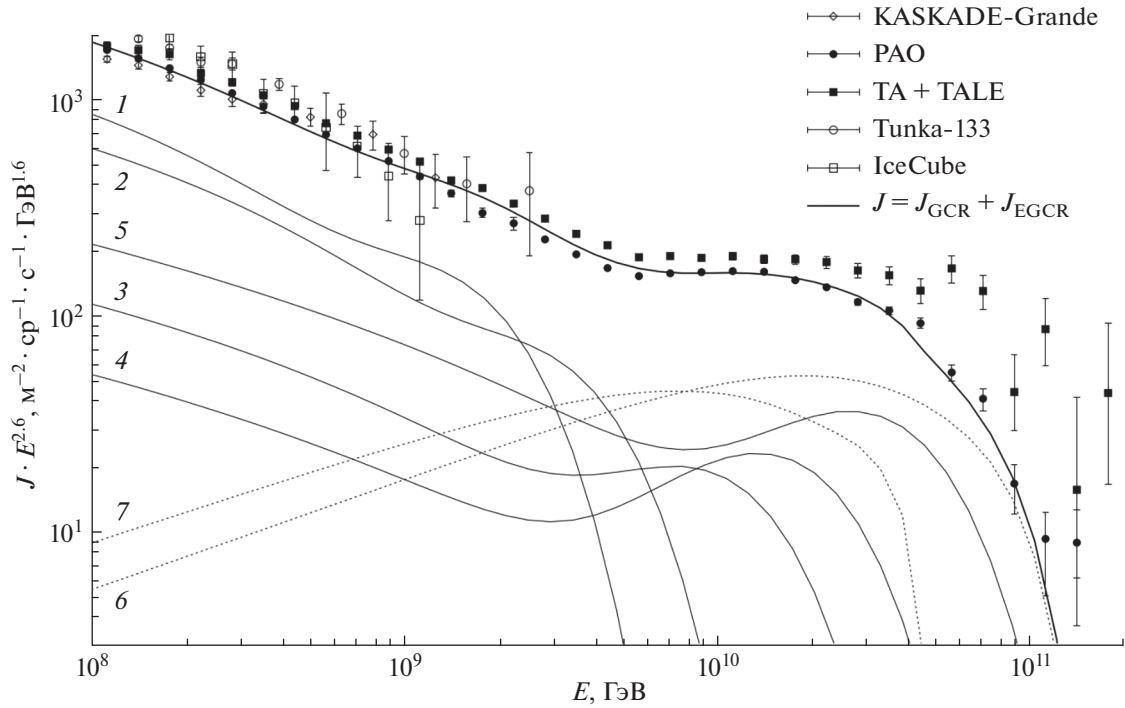


Рис. 3. Сопоставление спектра КЛ с экспериментальными данными: KASCADE-Grande [43], TA+TALE [44], IceCube [45], PAO [46], Tunka-133 [47]. 1 – спектр протонов, 2 – гелия, 3 – группы CNO, 4 – группы NeMgSi и 5 – железа, ускоренных галактическими источниками (компоненты $J_G + J_L + J_{NS}$ предлагаемого сценария). Пунктирные линии 6 и 7 – вклад в спектр КЛ протонов и ядер гелия, ускоренных внегалактическими источниками (компонента J_{EGCR} предлагаемого сценария). Сплошная жирная линия – суммарный спектр галактических J_{GCR} и внегалактических источников J_{EGCR} .

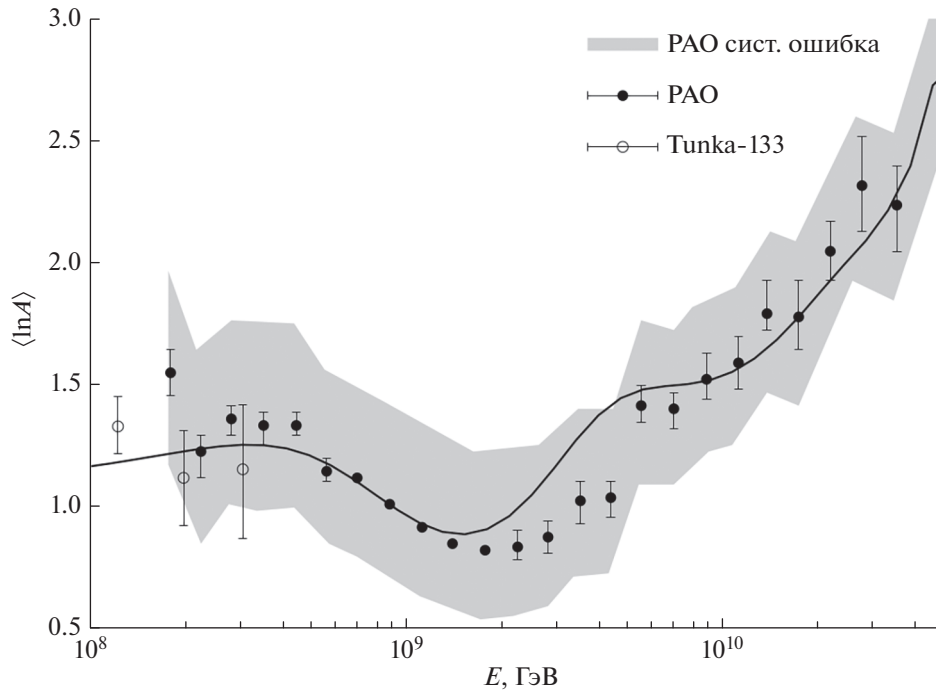


Рис. 4. Средний логарифм массового состава КЛ, полученный в модели неклассической диффузии. Экспериментальные данные: Tunka-133 [48], PAO [49] (модель EPOS-LHC). Закрашенная область – систематическая ошибка PAO [49].

точников $\gamma = 2.85$, для внегалактических $\gamma = 2.4$. Сопоставление результатов расчетов с данными по массовому составу КЛ показало, что основной вклад в наблюдаемый поток в области энергий $E < 10^{18.5}$ эВ вносят галактические источники, в то время как вклад метагалактических источников заметен в области $E > 10^{18.5}$ эВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен сценарий формирования наблюдаемых спектров электронов/позитронов в области до ~ 5 ТэВ, а также спектра ядер и массового состава космических лучей сверхвысоких энергий и ультравысоких энергий.

Ключевыми элементами сценария являются предположение о резко-неоднородном (фрактального типа) характере распределения вещества и магнитного поля в межзвездной и межгалактической средах, приводящем к аномальной (супердиффузионной) модели распространения частиц [8], а также к наличию изломов в спектрах наблюдаемых частиц от галактических и метагалактических источников в этих средах. Эти изломы, позволяющие восстановить основные параметры модели по экспериментальным данным (см., например, [23]), являются важными элементами обсуждаемого сценария. В частности, они позволяют оценить коэффициент диффузии по наблюдаемым данным, а также показатель спектра генерации частиц в галактических источниках [32].

Важным элементом предложенного сценария является также предположение о наличии частиц, приходящих из области ускорения источника без рассеяния (в силу наличия “полетов Леви”). Нерассеянная компонента J_{NS} , которая есть поток высокоэнергетических КЛ из экспоненциального “хвоста” ускоренных источником частиц, определяет поведение спектров ядер в области $R \sim 10^7 - 5 \cdot 10^9$ ГВ. В данной работе установлено, что поток этих частиц определяет и поведение массового состава в области $E \sim 2 \cdot 10^9 - 10^{10}$ ГэВ.

Главным результатом работы является сценарий, который демонстрирует согласованное описание современных экспериментальных данных прецизионных спутниковых измерений, наземных гибридных установок ШАЛ и черенковских телескопов по спектрам электронов/позитронов и доли позитронов в общем потоке электронов и позитронов, а также спектру и массовому составу КЛ в диапазоне сверхвысоких энергий и ультравысоких энергий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №23-72-00057).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aguilar M., Alberti G., Alpat B. et al. (AMS-02 Collaboration) // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. Art. No. 141102.
2. Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al. (PAMELA experiment) // Nature. 2009. V. 458. P. 607.
3. Ackermann M., Ajello M., Allafort A. et al. (Fermi-LAT Collaboration) // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 108. Art. No. 011103.
4. Ambrosi G., An Q., Asfandiyarov R. et al. (DAMPE Collaboration) // Nature. 2017. V. 552. P. 63.
5. Adriani O., Akaike Y., Asano K. et al. (CALET Collaboration) // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 119. Art. No. 181101.
6. Aharonian F., Akhperjanian A.G., Barres de Almeida U. et al. (H.E.S.S. Collaboration) // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 101. Art. No. 261104.
7. Aab A., Abreu P., Aglietta M. et al. (Pierre Auger Collaboration) // Phys. Lett. B. 2016. V. 762. P. 288.
8. Lagutin A.A., Nikulin Yu.A., Uchaikin V.V. // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2001. V. 97. P. 267.
9. Lagutin A.A., Uchaikin V.V. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. 2003. V. 201. P. 212.
10. Hu Y., Lazarian A., Xu S. // MNRAS. 2022. V. 512. P. 2111.
11. Лагутин А.А., Волков Н.В., Кузьмин А.С., Тюменцев А.Г. // Изв. РАН. Сер. физ. 2009. Т. 73. № 5. С. 620; Lagutin A.A., Volkov N.V., Kuzmin A.S., Tyumentsev A.G. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2009. V. 73. No. 5. P. 581.
12. Samko S., Kilbas A., Marichev O. Fractional integrals and derivatives. Theory and Applications. New York: Gordon and Breach, 1993. 976 p.
13. Volkov N.V., Lagutin A.A., Tyumentsev A.G. // J. Phys. Conf. Ser. 2015. V. 632. Art. No. 012027.
14. Lagutin A.A., Makarov V.V., Tyumentsev A.G. // Proc. 27th ICRC. V. 5. (Hamburg, 2001). P. 1889.
15. Berezhko E.G., Ksenofontov L.T., Ptuskin V.S. et al. // Astron. Astrophys. 2003. V. 410. P. 189.
16. Blasi P., Serpico P. // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 103. Art. No. 081103.
17. Tomassetti N., Donato F. // Astron. Astrophys. 2012. V. 544. P. 16.
18. Berezhko E., Ksenofontov L. // Astrophys. J. Lett. 2014. V. 791. P. L22.
19. Cholis I., Hooper D., Linden T. // Phys. Rev. D. 2017. V. 95. Art. No. 123007.
20. Uchaikin V., Zolotarev V. Chance and stability. Utrecht: VSP, 1999. 594 p.
21. Fang K., Bi X.-J., Lin S.-J., Yuan Q. // Chin. Phys. Lett. 2021. V. 38. No. 3. Art. No. 039801.
22. Batista R.A., Tjus J.B., Dörner J. // Proc. Sci. ICRC2021 (Berlin, 2021). Art. No. 978.
23. Lagutin A.A., Volkov N.V. // Phys. Atom. Nucl. 2021. V. 84. No. 6. P. 975.
24. Perri S., Zimbardo G. // Astrophys. J. 2007. V. 671. P. 177.
25. Perri S., Zimbardo G. // Astrophys. Space Sci. Trans. 2008. V. 4. P. 27.
26. Perri S., Zimbardo G. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. Art. No. A03107.

27. Sugiyama T., Shiota D. // *Astrophys. J. Lett.* 2011. V. 731. P. 34.
28. Perri S., Zimbardo G. // *Adv. Space Res.* 2011. V. 44. P. 465.
29. Zimbardo G., Perri S., Pommois P., Veltri P. // *Adv. Space Res.* 2012. V. 49. P. 1633.
30. Perri S., Amato E., Zimbardo G. // *Astron. Astrophys.* 2016. V. 596. Art. No. A34.
31. Wang S.-H., Fang K., Bi X.-J., Yin P.-F. // *Phys. Rev. D.* 2021. V. 103. Art. No. 063035.
32. Лагутин А.А., Тюменцев А.Г. // *Изв. АЛТГУ.* 2004. № 35(4). С. 4.
33. Aguilar M., Ali Cavasonza L., Alpat B. et al. (AMS-02 Collaboration) // *Phys. Rev. Lett.* 2019. V. 122. Art. No. 101101.
34. Adriani O., Akaike Y., Asano K. et al. (CALET Collaboration) // *Phys. Rev. Lett.* 2018. V. 120. Art. No. 261102.
35. Abdollahi S., Ackermann M., Ajello M. et al. (Fermi-LAT Collaboration) // *Phys. Rev. D.* 2017. V. 95. Art. No. 082007.
36. Chang J., Adams J.H., Ahn H.S. et al. (Fermi-LAT Collaboration) // *Nature.* 2008. V. 456. P. 362.
37. Yoshida K., Torii S., Yamagami T. et al. // *Adv. Space Res.* 2008. V. 42. P. 1670.
38. DuVernois M.A., Barwick S.W., Beatty J.J. // *Astrophys. J.* 2001. V. 559. P. 296.
39. Alcaraz J., Alpat B., Ambrosi G. // *Phys. Lett. B.* 2000. V. 484. P. 10.
40. Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al. (PAMELA Experiment) // *Phys. Rev. Lett.* 2011. V. 106. Art. No. 201101.
41. Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al. (PAMELA Experiment) // *Phys. Rev. Lett.* 2013. V. 111. Art. No. 081102.
42. Boezio M., Carlson P., Francke T. // *Astrophys. J.* 2000. V. 532. P. 653.
43. Schoo S., Apel W.D., Arteaga-Velázquez J.C. et al. // *Proc. Sci. ICRC2015 (Hague, 2015).* P. 263.
44. Abbasi R.U., Abe M., Abu-Zayyad T. et al. // *Astrophys. J.* 2018. V. 865. P. 74.
45. Aartsen M.G., Ackermann M., Adams J. et al. // *Phys. Rev. D.* 2019. V. 100. Art. No. 082002.
46. Abreu P., Aglietta M., Albury J.M. et al. (Pierre Auger Collaboration) // *Eur. Phys. J.* 2021. V. 81 P. 966.
47. Budnev N.M., Chiavassa A., Gress O.A. et al. // *Astropart. Phys.* 2020. V. 117. Art. No. 102406.
48. Prosin V., Astapov I., Bezyazeev P. et al. (TAIGA Collaboration) // *arXiv: 2208.01689.* 2022.
49. Yushkov A.V. (on behalf of the Pierre Auger Collaboration) // *Proc. Sci. ICRC2019 (Madison, 2019).* P. 482.

Interpretation of fluxes of cosmic rays' nuclei and electrons in the nonclassical diffusion model

A. A. Lagutin^a, *, N. V. Volkov^a, R. I. Raikin^a

^a Altai State University, Barnaul, 656049 Russia

*e-mail: lagutin@theory.asu.ru

We discuss new scenario of the formation of the observed spectra of electrons/positrons and nuclei of ultra-high-energy cosmic rays in the framework of the nonclassical (superdiffusion) model of particles propagation in a highly inhomogeneous interstellar and intergalactic media. It is shown that the proposed scenario provides a consistent description of the experimental data of precision satellite measurements, ground-based hybrid EAS arrays and Cherenkov telescopes on the spectra of leptons and nuclei, as well as the mass composition of cosmic rays in the range of super-high and ultrahigh energies.