

СКРЫТАЯ МАССА С ОСОБЫМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ КАК ВОЗМОЖНОЕ ОБЪЯСНЕНИЕ ПОЗИТРОННОЙ АНОМАЛИИ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

*К. М. Белоцкий **, *М. Л. Соловьев ***

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Одним из популярных объяснений позитронной аномалии в космических лучах являются модели распадающихся или аннигилирующих частиц скрытой массы (СМ, также известной как темная материя), имеющих протяженное пространственное распределение. Серьезным недостатком таких моделей является перепроизводство сопутствующего гамма-излучения, входящего в противоречие с данными по космическому гамма-фону. Рассматривается возможность его подавления за счет предположения об особом пространственном распределении скрытой массы, приведены первые оценки в случае распределения СМ в виде рукавов (спиралей) в сравнении с ранее рассмотренными распределениями.

One of the common explanations of positron anomaly in cosmic rays involves decaying or annihilating Dark Matter particles with extended spatial distribution. The main downside of such models lies in overproduction of gamma radiation leading to contradiction to cosmic gamma-ray background data. This work continues consideration of the possibility of gamma suppression due to assumption of special spatial distribution of Dark Matter giving numerical estimate of the effect of simple arm-like annihilating DM distribution.

PACS: 95.35.+d; 96.50.sb

ВВЕДЕНИЕ

Избыток позитронов в космических лучах, впервые обнаруженный в эксперименте PAMELA [1] и в дальнейшем нашедший подтверждение в данных экспериментов AMS-02 и Fermi-LAT [2, 3], все еще остается без общепризнанного объяснения. Наиболее многообещающим предположением о природе этой так называемой позитронной аномалии является существование ранее неизвестных источников первичных позитронов, самыми популярными кандидатами в которые являются пульсары и скры-

* E-mail: k-belotsky@yandex.ru

** E-mail: max07s@mail.ru

тая масса. Несмотря на то, что первые получили серьезное распространение в рамках моделей с двухзонной диффузией [4, 5] после обнаружения гамма-ореолов [6], у них все еще остаются нерешенные вопросы [7–9].

Модели скрытой массы также не лишены своих собственных проблем. Основная из них связана (как, в общем-то, и в случае с пульсарами) с производством сопутствующего гамма-излучения. До сих пор выходящие на эту тему работы указывают на данную проблему [10, 11]. В наших работах мы рассматриваем принципиальную возможность описания позитронной аномалии с помощью модели распадающихся или аннигилирующих частиц скрытой массы с протяженным пространственным распределением с учетом ограничений, накладываемых данными по гамма-излучению. Ранее нами было показано, что использование всего гало скрытой массы в качестве источника позитронов приводит к серьезному перепроизводству гамма-излучения за счет процесса излучения конечного состояния (ИКС) и противоречию с данными по космическому гамма-фону от Fermi-LAT (Isotropic Gamma-Ray Background, IGRB) [12].

Одним из возможных методов решения этой проблемы является использование более экзотического пространственного распределения скрытой массы. Его основная идея базируется на том, что из-за существования магнитного диска Галактики внешние области гало фактически являются источником одного лишь гамма-излучения, так как рождающиеся в них заряженные частицы отражаются магнитным полем. Таким образом, исключив такие области из рассмотрения, можно существенно понизить вклад скрытой массы в космический гамма-фон, практически не изменив сигнал в заряженных частицах. На основе этой идеи была предложена модель «темного диска». В ней делается предположение, что скрытая масса имеет две компоненты: стабильную, составляющую подавляющую часть скрытой массы и образующую гало Галактики, и нестабильную, малую часть, ответственную за сигнал в космических лучах и собранную в диск.

В рамках этой модели удалось достичь значительного подавления сопутствующего гамма-излучения [13–16]. Однако учет гипотетического вклада далеких источников по типу блазаров, которые в настоящее время не могут быть разрешены в качестве точечных телескопом Fermi-LAT, но потенциально могут объяснить весь или практически весь необъяснимый остаток фона космического гамма-излучения [17], серьезно обостряет противоречие и фактически делает модель диска скрытой массы неприемлимой [18].

Также отметим, что наряду с этим возможно рассмотрение подавления гамма-излучения, образующегося в процессе самой реакции аннигиляции или распада (ИКС), за счет физики (лагранжиана) взаимодействия частиц скрытой массы, ответственной за этот процесс. Это является предметом отдельного исследования [15, 19–21].

В качестве логического продолжения модели диска была предложена модель скрытой массы с распределением в виде спиральных рукавов,

подобных структуре барионной материи нашей Галактики. Данная модель была протестирована в первом приближении двумерного распределения в виде концентрических колец, в результате была показана возможность дополнительного подавления сопутствующего гамма-излучения по сравнению с моделью диска [18]. Такие модификации распределения имеют естественное простое обоснование в том, что перемещение источников в кольца в диске Галактики, проходящих вне Солнечной системы, уменьшает напрямую их вклад в сильно ограниченный гамма-фон с больших широт.

В настоящей работе будет кратко рассмотрено следующее техническое приближение такой модели — один спиральный рукав с произвольным количеством оборотов вокруг Галактического центра. В разд. 1 представлена основная методология расчетов, в разд. 2 — полученные результаты.

1. ИСХОДНЫЕ МОДЕЛЬНЫЕ ПРЕДПОЛОЖЕНИЯ

Исходные модельные предположения, использованные для расчета, в целом повторяют таковые в наших предыдущих работах. Рассматривается скрытая масса, состоящая из частиц, способных аннигилировать по трем лептонным каналам:

- $X\bar{X} \rightarrow e^+e^-$;
- $X\bar{X} \rightarrow \mu^+\mu^-$;
- $X\bar{X} \rightarrow \tau^+\tau^-$.

Масса частиц, сечение реакции и относительные вероятности мод (бренчинги) этих каналов являются параметрами модели и определяются в ходе анализа. Остальные параметры частиц скрытой массы не фиксируются для получения наиболее общих результатов.

В качестве профиля плотности было использовано следующее выражение, описывающее спираль с произвольным количеством витков в трехмерном пространстве:

$$\rho_s(x, y, z) = \rho_0 \int_0^{2\pi n} \exp\left(-\frac{|\mathbf{R}(x, y, z) - \mathbf{r}_s(\theta)|}{R_S}\right) d\theta, \quad (1)$$

где значение $\rho_0 = 1,32 \text{ ГэВ/см}^3$ взято из профиля диска; n — количество витков спирали; $\mathbf{R}(x, y, z)$ — радиус-вектор в точку (x, y, z) ; R_S — толщина спирали; $\mathbf{r}_s(\theta)$ — радиус-вектор, направленный на точку на центральной линии спирали, соответствующую внутренней координате интегрирования θ . Центральная линия задается уравнением логарифмической спирали:

$$r_s(\varphi) = b e^{k\varphi}, \quad (2)$$

где $b = 15/e$ и $k = 1/2\pi n$, что позволяет получить n витков в области звездного диска ($r = 15 \text{ кпк}$).

Для расчета потоков позитронов и вторичного гамма-излучения использовался модифицированный программный пакет GALPROP, для генерации спектров инжекции для него — генератор Монте-Карло Pythia. Первичное гамма-излучение рассчитывалось по формуле

$$\Phi_{\gamma}^{\text{prompt}} = \sum_{\text{channels}} \text{Br}_{\text{ch}} \frac{dN_{\text{ch}}}{dE \gamma p} \frac{\langle \sigma v \rangle}{4} \frac{1}{\Delta\Omega} \int_0^{100 \text{ kpc}} \int_{\Delta\Omega} \frac{1}{4\pi r^2} \left(\frac{\rho}{M_X} \right)^2 dr d\Omega, \quad (3)$$

где Br_{ch} — брэнчинги каналов реакции; $dN_{\text{ch}}/dE \gamma p$ — спектры первичного гамма-излучения для соответствующих каналов, полученные с помощью Pythia; $\langle \sigma v \rangle$ — усредненное по скоростям сечение; $\Delta\Omega$ — телесный угол, соответствующий области $|b| > 20^\circ$, на основе которой получены данные по фону гамма-излучения Fermi-LAT.

Из полученных потоков собирается параметризованное выражение для приведенного χ^2 для дальнейшей минимизации:

$$\chi_{\text{tot}}^2 = \frac{1}{N_{\text{d.o.f}}} \left(\sum_{\text{AMS}} \frac{\Delta\Phi_e^2}{\sigma_e^2} + \sum_{\text{Fermi}} \frac{\Delta\Phi_{\gamma}^2}{\sigma_{\gamma}^2} H_{\theta}(\Delta\Phi_{\gamma}) \right), \quad (4)$$

где $N_{\text{d.o.f}}$ — количество степеней свободы; первая сумма — вклад данных по доле позитронов; вторая сумма — вклад данных по космическому гамма-фону; $\Delta\Phi_e$ и $\Delta\Phi_{\gamma}$ — разность между экспериментальной точкой и предсказанием модели для доли позитронов и потока гамма-излучения соответственно; σ_e и σ_{γ} — соответствующие погрешности измерений. Суммирование ведется по точкам данных от энергии 20 ГэВ до последней доступной точки для AMS и по данным эксперимента Fermi-LAT для IGRB (модель B) [22] от энергии 30 ГэВ до последней доступной точки. Так как задачей модели является описание одного только избытка позитронов, то достаточно не превышать в ее рамках экспериментальные данные по гамма-излучению. В связи с этим каждое слагаемое второй суммы дополнительно умножено на тета-функцию Хевисайда H_{θ} , обращающую его в ноль в случае, если предсказание модели находится ниже экспериментальной точки. Для расчета количества степеней свободы учитываются лишь те точки для гамма-излучения, для которых наблюдается превышение. Фон электронов и позитронов взят из работы [23], вклад разрешенных источников в гамма-излучение — из работы [17].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 представлены полученная зависимость χ^2 от числа оборотов спирали вокруг Галактического центра и относительное положение Солнечной системы и центральной линии спирали при двух оборотах, обеспечивающих минимум χ^2 . На рис. 2 представлены графики для доли позитронов и фона гамма-излучения для массы частицы $M_X = 450$ ГэВ,

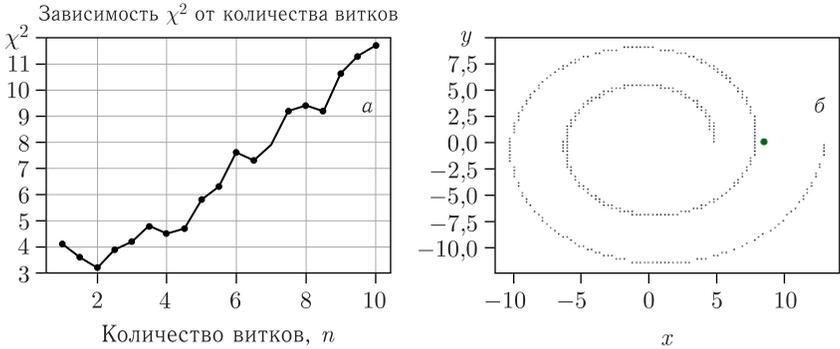


Рис. 1. а) Зависимость значения χ^2 от числа оборотов спирального рукава вокруг Галактического центра; б) схема взаимного расположения спирали и Солнечной системы при двух витках

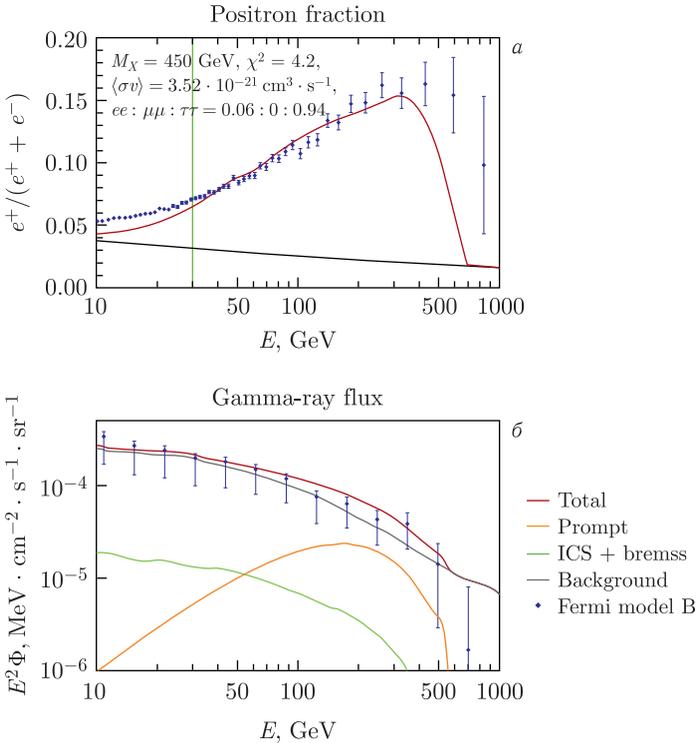


Рис. 2. Доля позитронов (а) и гамма-фон (б) для случая одного спирального рукава с тремя витками и толщиной 100 пк при $M_X = 450 \text{ ГэВ}$

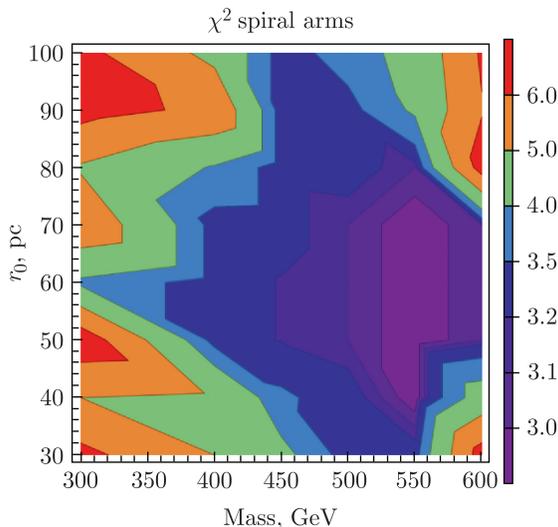


Рис. 3. Зависимость χ^2 от массы начальной частицы и толщины спирального рукава

являвшейся оптимальной в случае первого приближения в виде колец. На рис.3 представлена зависимость χ^2 от массы начальной частицы и толщины спирали. Изрезанный характер графика вызван ошибками интерполяции используемого программного пакета на редкой сетке исходных значений. Полученные минимальные значения χ^2 для моделей с разным пространственным распределением скрытой массы таковы: гало — 200, диск — 11, кольцо — 3, спиральный рукав — 3.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что подобное распределение в виде спирального рукава имеет ряд преимуществ по сравнению с моделью диска. Во-первых, такое пространственное распределение скрытой массы оставляет минимум источников гамма-излучения в зоне интереса IGRB Fermi-LAT, что позволяет существенно снизить противоречие модели с этими данными. Это, в свою очередь, позволяет значительно увеличить бренчинг аннигиляции по каналу тау-лептонов, что вместе с расположением основного массива источников позитронов на некотором расстоянии от Солнечной системы позволяет упростить описание низкоэнергетической части спектра позитронов, с которым у предыдущих моделей наблюдались определенные сложности. В сумме два этих эффекта также позволяют повысить качество описания доли позитронов на самых высоких энергиях, которое зачастую приносилось в жертву в модели диска для улучшения описания низких энергий и снижения противоречия с фоном гамма-излучения ввиду низкой статистической значимости высокоэнергетических точек AMS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлены результаты в продолжение исследований по поиску объяснения позитронной аномалии с помощью скрытой массы в предположении ее особенного пространственного распределения во избежание противоречия с данными по космическому гамма-фону.

Было рассмотрено второе приближение модели спиральных рукавов скрытой массы, а именно пространственное распределение в виде одного спирального рукава с произвольным количеством оборотов вокруг Галактического центра. Подобная модель при определенных параметрах позволяет существенно снизить противоречие с данными по фону гамма-излучения по сравнению с моделью диска, а также продвинуться в решении некоторых присущих последней проблем.

Можно сделать вывод, что предполагаемый вклад неразрешенных точечных источников в гамма-излучение устанавливает требование на практически полное отсутствие источников гамма-излучения вне звездного диска, исключая модели скрытой массы с темным гало и даже темным диском. Возможным решением может быть использование дополнительного, независимого от пространственного распределения метода подавления гамма-излучения или еще более экзотических пространственных распределений активной компоненты скрытой массы, как в модели спиральных рукавов. Для последних при этом обостряется вопрос о физическом обосновании возможности формирования таких структур и возможных значениях параметров таких моделей.

Благодарности. Авторы выражают благодарность М. А. Рахимовой, на работе которой во многом основывается данная публикация.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 24-22-00325 «Поиск объяснения позитронной аномалии в космических лучах с помощью скрытой массы»).

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Adriani O. et al.* An Anomalous Positron Abundance in Cosmic Rays with Energies 1.5–100 GeV // *Nature*. 2009. V. 458, No. 7238. P. 607–609; arXiv:0810.4995 [astro-ph].
2. *Aguilar M. et al.* First Result from the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station: Precision Measurement of the Positron Fraction in Primary Cosmic Rays of 0.5–350 GeV // *Phys. Rev. Lett.* 2013. V. 110. P. 141102.
3. *Ackermann M. et al.* Measurement of Separate Cosmic-Ray Electron and Positron Spectra with the Fermi Large Area Telescope // *Phys. Rev. Lett.* 2012. V. 108. P. 011103; arXiv:1109.0521 [astro-ph.HE].

4. *Linares M., Kachelriess M.* Cosmic Ray Positrons from Compact Binary Millisecond Pulsars // JCAP. 2021. V.02. P.030; arXiv:2010.02844 [astro-ph.HE].
5. *Orusa L. et al.* Constraining Positron Emission from Pulsar Populations with AMS-02 Data. arXiv:2107.06300 [astro-ph.HE]. 2021.
6. *Abeysekara A.U. et al.* Extended Gamma-Ray Sources around Pulsars Constrain the Origin of the Positron Flux at Earth // Science. 2017. V.358, No.6365. P.911–914; arXiv:1711.06223 [astro-ph.HE].
7. *Xi S.Q. et al.* GeV Observations of the Extended Pulsar Wind Nebulae Constrain the Pulsar Interpretations of the Cosmic-Ray Positron Excess // Astrophys. J. 2019. V.878, No.2. P.104.
8. *Bao L.-Z. et al.* Slow Diffusion Is Necessary to Explain the γ -Ray Pulsar Halos // Astrophys. J. 2022. V.936, No.2. P.183; arXiv:2107.07395 [astro-ph.HE].
9. *John I., Linden T.* Pulsars Do Not Produce Sharp Features in the Cosmic-Ray Electron and Positron Spectra // Phys. Rev. D. 2023. V.107, No.10. P.103021; arXiv:2206.04699 [astro-ph.HE].
10. *Rocamora M. et al.* The Cosmic-Ray Positron Excess and Its Imprint in the Galactic Gamma-Ray Sky. arXiv:2403.03303 [astro-ph.HE]. 2024.
11. *Zuriaga-Puig J. et al.* Multi-TeV Dark Matter Density in the Inner Milky Way Halo: Spectral and Dynamical Constraints // J. Cosmol. Astropart. Phys. 2023. V.2023, No.11. P.063.
12. *Belotsky K. et al.* Fermi-LAT Kills Dark Matter Interpretations of AMS-02 Data. Or Not? // JCAP. 2017. V.1701, No.01. P.021; arXiv:1606.01271 [astro-ph.HE].
13. *Belotsky K.M. et al.* Gamma-Rays from Possible Disk Component of Dark Matter // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V.798, No.1. P.012084.
14. *Belotsky K.M., Kirillov A.A., Soloviyov M.L.* Development of Dark Disk Model of Positron Anomaly Origin // Intern. J. Mod. Phys. D. 2018. V.27, No.06. P.1841010; arXiv:1802.04678 [astro-ph.HE].
15. *Belotsky K.M. et al.* Indirect Effects of Dark Matter // Intern. J. Mod. Phys. D. 2019. V.28, No.13. P.1941011; arXiv:1909.04735 [hep-ph].
16. *Belotsky K. et al.* The DAMPE Excess and Gamma-Ray Constraints // Phys. Dark Universe. 2019. V.26. P.100333; arXiv:1904.02456 [astro-ph.HE].
17. *Di Mauro M.* The Origin of the Fermi-LAT γ -Ray Background // Proc. of the 14th Marcel Grossmann Meeting on Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Astrophysics, and Relativistic Field Theories (MG14): In 4 volumes. Rome, July 12–18, 2015. 2017. V.3. P.3098–3104; arXiv:1601.04323 [astro-ph.HE].
18. *Belotsky K.M., Rakhimova M.A., Soloviyov M.L.* Modified Dark Matter Spatial Distribution as Solution to Positron Anomaly Gamma-Ray Problem // Phys. At. Nucl. 2023. V.86, No.4. P.500–509.
19. *Barak R., Belotsky K., Shlepkina E.* Proposition of FSR Photon Suppression Employing a Two-Positron Decay Dark Matter Model to Explain Positron Anomaly in Cosmic Rays // Universe. 2023. V.9, No.8. P.370; arXiv:2310.06859 [astro-ph.HE].

20. *Belotsky K. M., Kamaletdinov A. K.* Consideration of a Loop Decay of Dark Matter Particle into Electron–Positron from Point of View of Possible FSR Suppression. arXiv:2011.12283 [hep-ph]. 2020.
21. *Solovoy M. L. et al.* Studying the Possibility of FSR Suppression in DM Decay in Dependence of the Mass of Intermediate Particle and Vertex // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. V. 1390. P. 012096.
22. *Ackermann M. et al.* The Spectrum of Isotropic Diffuse Gamma-Ray Emission between 100 MeV and 820 GeV // *Astrophys. J.* 2015. V. 799. P. 86; arXiv:1410.3696 [astro-ph.HE].
23. *Ibarra A., Tran D., Weniger C.* Decaying Dark Matter in Light of the PAMELA and Fermi LAT Data // *J. Cosmol. Astropart. Phys.* 2010. V. 1. P. 009; arXiv:0906.1571 [hep-ph].