

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

УДК 524.1

**ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**

**ОЦЕНКА ДОЛИ ПОЗИТРОНОВ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ
ОТ ИСТОЧНИКОВ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ
РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ В ВИДЕ КОЛЬЦА, РАСПОЛОЖЕННОГО
ВОКРУГ ЦЕНТРА ГАЛАКТИКИ**

Научные руководители

_____ М. Л. Соловьёв

_____ К. М. Белоцкий

Выполнила

_____ П. А. Коршунова

Москва 2022

Содержание

Введение	3
1 Описание используемых вычислительных средств	3
2 Модель	4
3 Результаты	6
3.1 Спектр e^+ для колец различного радиуса	6
3.2 Доля e^+ для колец различного радиуса	7
Заключение	9
Список используемых источников	10

Введение

Одной из неразрешенных проблем современной астрофизики является избыток позитронов в космических лучах (КЛ), называемый позитронной аномалией. Впервые она была обнаружена в эксперименте PAMELA [1], а позднее эти данные были подтверждены экспериментом AMS-02 [2].

Одним из возможных объяснений позитронной аномалии могут служить модели нестабильной скрытой массы (тёмной материи, ТМ) в качестве источника первичных позитронов. Однако эти модели имеют свои недостатки, основным из которых является перепроизводство гамма-излучения в процессе распада или аннигиляции частиц скрытой массы. Одним из возможных путей решения данной проблемы является изменение пространственного распределения источников.

Ранее были рассмотрены спектры позитронов для простейших источников (точечный, линейный и тп.). В данной работе были рассчитаны спектры для кольцевых источников, а также производимая ими доля позитронов в КЛ и начата работа по поиску оптимальных параметров для описания позитронной аномалии.

1 Описание используемых вычислительных средств

Для моделирования потока позитронов от различного распределения источников скрытой массы использовался математический пакет Wolfram Mathematica.

Mathematica — система компьютерной алгебры, широко используемая для научных, инженерных, математических расчётов. Разработана в 1988 году Стивеном Вольфрамом, дальнейшим развитием системы занята основанная им совместно с Теодором Греем компания Wolfram Research.

Она оснащена широким перечнем аналитических возможностей, среди которых упрощение выражений, интегрирование, решение дифференциальных уравнений и прочее.

Помимо этого, система осуществляет численные расчеты и предоставля-

ет возможность представления результатов в виде графиков.

Последнее активно использовалось в ходе данной работы.

2 Модель

Предполагается, что скрытая масса состоит из специальных частиц, которые способны распадаться или аннигилировать с образованием позитронов в конечном состоянии. Подробнее о кандидатах в эти частицы [3; 4].

Движение позитронов в межзвездной среде имеет диффузный характер, что приводит к «размазыванию» частиц по объему Галактики. В этом случае за промежуток времени, соответствующий потере энергии от E_0 до E , позитроны распространятся на расстояние [4]

$$\lambda(E, E_0) = 10\text{кpc} \sqrt{\left(\frac{E}{1\text{ГэВ}}\right)^{-0,7} - \left(\frac{E_0}{1\text{ГэВ}}\right)^{-0,7}}, \quad (1)$$

где E_0 – начальная энергия позитронов.

В межзвёздной среде позитроны будут испытывать синхротронные и комптоновские потери, связанные с взаимодействием e^+ с галактическим магнитным полем, фотонами реликтового излучения и света звёзд. Скорости этих потерь можно представить в виде

$$\frac{dE}{dt} = b(E) = -\beta E^2, \quad (2)$$

где $\beta \sim 10^{-16} \text{с}^{-1}\text{ГэВ}^{-1}$. Знак минус указывает на то, что энергия убывает со временем.

Для оценки концентрации позитронов от скрытой массы вблизи Земли была использована формула

$$\frac{dn_{e^+}(E, \vec{r}_{\text{Earth}})}{dE} = \frac{1}{b(E)} \int_E^{E_{0\text{max}}} \frac{dE_0}{(\pi\lambda^2(E, E_0))^{3/2}} \int d^3\vec{r} Q(E_0, \vec{r}) e^{-\frac{(\vec{r}-\vec{r}_{\text{Earth}})^2}{\lambda^2(E, E_0)}}, \quad (3)$$

где $Q(E_0, \vec{r})$ — скорость рождения e^+ в интервале энергий $E_0 \div E_0 + dE_0$ в единице объема в результате аннигиляции частиц ТМ с концентрацией $n(\vec{r})$.

Для простоты, она взята в виде:

$$Q(E_0, \vec{r}) = \frac{1}{4} \langle \sigma v \rangle \frac{\rho_{DM}^2}{M^2} \delta(E_0 - M), \quad (4)$$

где $\rho_{DM} = 0,4 \text{ ГэВ см}^{-3}$, $M = 500 \text{ ГэВ}$.

Для простоты была выбрана система координат с центром в Земле. В этом случае $\vec{r}_{\text{Earth}} = 0$, а \vec{r} задает расстояние от наблюдателя до источника.

Окончательная формула для потока позитронов от источника скрытой массы будет иметь вид

$$\Phi(E) = \frac{c}{4\pi} \frac{1}{\beta E^2} \int_E^{E_{0\text{max}}} \frac{dE_0}{(\pi \lambda^2(E, E_0))^{3/2}} \int d^3\vec{r} Q(E_0, \vec{r}) e^{-\frac{\vec{r}^2}{\lambda^2(E, E_0)}}, \quad (5)$$

где c - скорость света.

В данной работе в качестве источника скрытой массы использовались кольца разного радиуса вокруг центра Галактики, задаваемые параметрически следующим образом:

$$\begin{cases} x = a \cos t + r_{\odot} \\ y = a \sin t \\ z = 0 \end{cases} \quad t \in [0; 2\pi], \quad (6)$$

здесь a - радиус кольца, $r_{\odot} = 8.5 \text{ кпк}$ - положение Солнца относительно центра Галактики.

В качестве фоновых потоков электронов и позитронов были взяты потоки из [5]

$$\Phi_{e^-}^{\text{bkg}}(E) = \left(\frac{82.0\epsilon^{-0.28}}{1 + 0.224\epsilon^{2.93}} \right) \text{ GeV}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}, \quad (7)$$

$$\Phi_{e^+}^{\text{bkg}}(E) = \left(\frac{38.4\epsilon^{-4.78}}{1 + 0.0002\epsilon^{5.63}} + 24.0\epsilon^{-3.41} \right) \text{ GeV}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}, \quad (8)$$

где $\epsilon = E/1\text{GeV}$.

При энергиях, меньших, чем $\sim 10 \text{ ГэВ}$, потоки электронов и позитронов в верхней части атмосферы могут значительно отличаться от межзвездных

потоков из-за эффектов солнечной модуляции. Данные потоки связаны следующим образом [5]

$$\Phi_{e^\pm}^{\text{TOA}}(E_{\text{TOA}}) = \frac{E_{\text{TOA}}^2}{E_{\text{IS}}^2} \Phi_{e^\pm}^{\text{IS}}(E_{\text{IS}}), \quad (9)$$

где $E_{\text{IS}} = E_{\text{TOA}} + \phi_F$, E_{IS} и E_{TOA} – энергии электронов или позитронов на границе гелиосферы и в верхней части атмосферы Земли соответственно, ϕ_F – параметр солнечной модуляции.

Общие потоки электронов и позитронов можно рассчитать по формуле

$$\Phi_{e^\pm}^{\text{tot}} = \Phi_{e^\pm}^{\text{DM}} + \Phi_{e^\pm}^{\text{bkg}} \quad (10)$$

Тогда соотношение для доли позитронов в верхней части атмосферы будет выглядеть следующим образом

$$\frac{e^+}{e^+ + e^-} = \frac{\Phi_{e^+}^{\text{tot}}}{\Phi_{e^+}^{\text{tot}} + \Phi_{e^-}^{\text{tot}}} \quad (11)$$

3 Результаты

С помощью описанных ранее формул и математического пакета Wolfram Mathematica были смоделированы энергетические спектры позитронов в космических лучах для пространственного распределения источников в виде колец различного радиуса.

В качестве массы частицы ТМ было взято значение, равное 500 ГэВ.

3.1 Спектр e^+ для колец различного радиуса

Для начала рассмотрим зависимость потока e^+ от энергии для колец вокруг центра Галактики следующего радиуса: 1 кпк, 4 кпк, 6 кпк, 6.5 кпк, 10.5 кпк и 15 кпк. Полученная зависимость показана на рисунке 1.

Видно, что чем больше радиус кольца, тем больше низкоэнергетичных позитронов долетает до нас. При этом, чем больше кратчайшее расстояние от наблюдателя до кольца, тем «круче» спад кривой.

Для примера были отдельно рассмотрены случаи кольца радиусом 6.5 кпк и 10.5 кпк. Кратчайшее расстояние от нас до кольца в обоих случаях составляет 2 кпк. Из рисунка 1 видно, что характер зависимости потока e^+ от энергии одинаковая. Разница состоит лишь в том, что от кольца большего радиуса до нас доходит большее число позитронов как низких энергий, так и высоких.

3.2 Доля e^+ для колец различного радиуса

Следующим шагом стало проведение анализа доли позитронов в космических лучах для колец различного радиуса.

На рисунке 2 приведены зависимости доли позитронов от энергии для колец вокруг центра Галактики различного радиуса. Также на графиках показаны фон [5] – черным цветом и экспериментальные точки AMS-02 [6] – синим цветом.

Для каждого кольца было подобрано наилучшее значение сечения $\langle \sigma v \rangle$, позволяющее оптимальным образом описать экспериментальные данные, а также рассчитан χ^2 . Под χ^2 здесь понимается приведенный хи-квадрат $\frac{\chi^2}{N_{\text{dof}}}$, где N_{dof} – число степеней свободы.

Было рассмотрено два случая – кратчайшее расстояние от наблюдателя до колец составляет 3.5 кпк и 2 кпк.

Можно заметить, что дальние кольца лучше описывают экспериментальные точки на низких энергиях до ~ 50 ГэВ. Зависимость же для колец, до которых кратчайшее расстояние меньше, имеет более выраженный «пик» на больших энергиях и в целом лучше описывает экспериментальные данные, что можно заметить по значениям χ^2 .

Сама кривая зависимости доли позитронов от энергии по форме схожа с кривой, описываемой экспериментальными точками.

В таблице 1 приведены значения $\langle \sigma v \rangle$ и χ^2 для колец различного радиуса.

Можно заметить, что ближайшие к нам кольца лучше описывают экспериментальные точки и имеют меньшее оптимальное значение $\langle \sigma v \rangle$. При этом, если рассматривать кольца с одинаковым кратчайшим расстоянием до

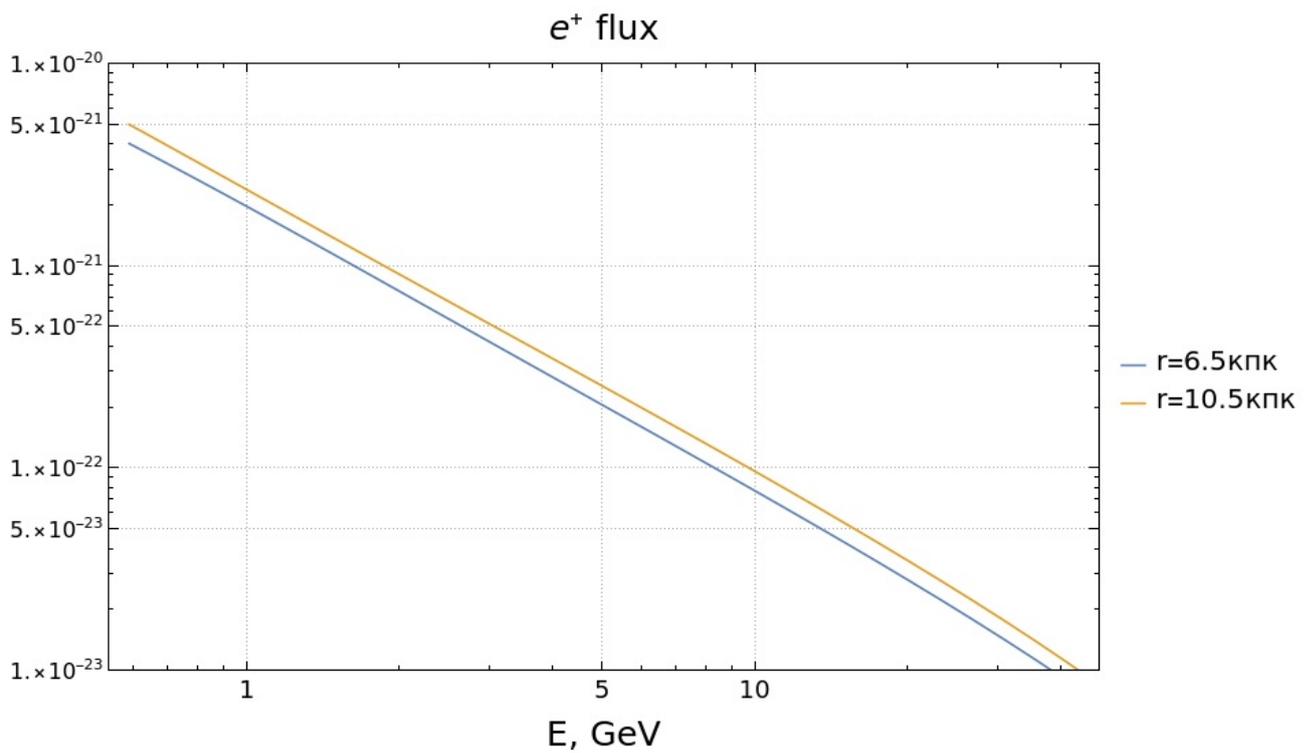
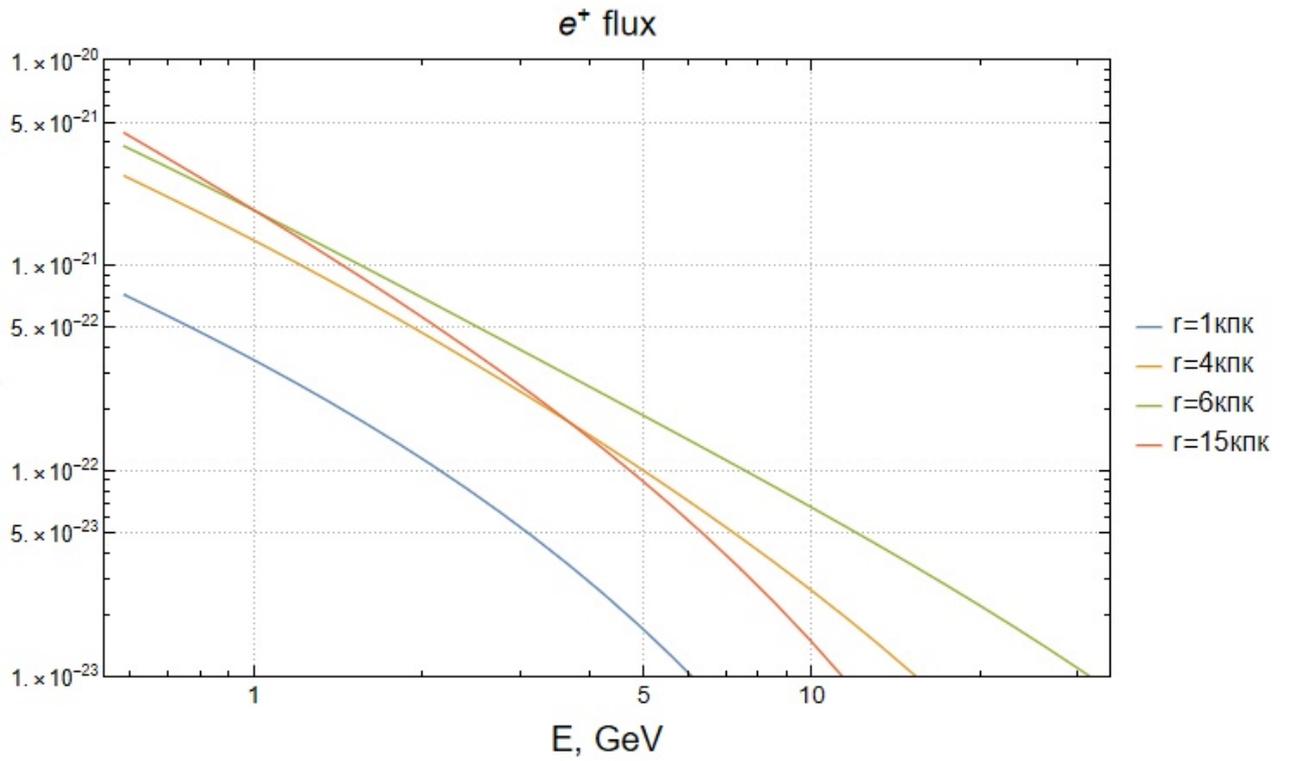


Рисунок 1 – Зависимость потока позитронов от энергии для колец вокруг центра Галактики различного радиуса. Различным цветом показаны спектры от колец разного радиуса.

нас, видно, что с ростом радиуса кольца, наилучшее значение $\langle \sigma v \rangle$ уменьшается.

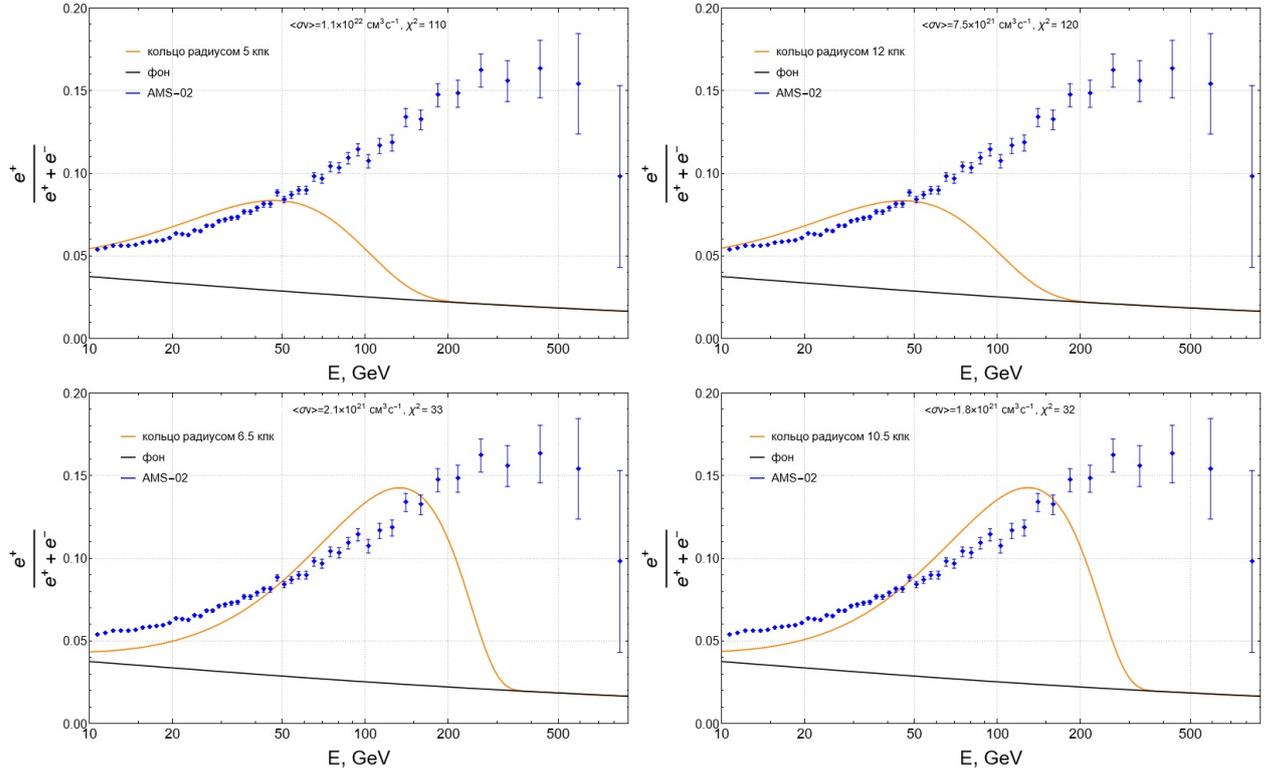


Рисунок 2 – Зависимость доли позитронов от энергии для колец вокруг центра Галактики различного радиуса. Черным цветом обозначен фон, синим – данные AMS-02, оранжевым – спектр от кольца.

r , кпк	5	6.5	10.5	12
$\langle \sigma v \rangle$, $\text{cm}^3 \text{ c}^{-1}$	1.1×10^{22}	2.1×10^{21}	1.8×10^{21}	7.5×10^{21}
χ^2	110	33	32	120

Таблица 1: Значения $\langle \sigma v \rangle$ и χ^2 для колец различного радиуса.

На основании значений χ^2 можно сделать вывод, что рассмотренный случай источника скрытой массы в виде тонких колец с частицей массой 500 ГэВ с δ -функциональным спектром начальных позитронов не подходит для описания позитронной аномалии.

Заключение

В данной работе были получены спектры позитронов для случая пространственного распределения источников в виде колец различного радиуса вокруг центра Галактики, а также производимая ими доля позитронов в КЛ.

Помимо этого была начата работа по поиску оптимальных параметров для описания позитронной аномалии. Масса начальной частицы в ходе работы считалась постоянной и равной 500 ГэВ.

В дальнейшем планируется сделать массу частицы свободным параметром, рассмотреть случаи различных профилей плотности и начальных спектров и, в конечном итоге, сделать оценки доли позитронов для модели ТМ, собранной в спиральные рукава.

Список используемых источников

1. *Adriani O.* [et al.]. Cosmic-Ray Positron Energy Spectrum Measured by PAMELA // Phys. Rev. Lett. — 2013. — Vol. 111. — P. 081102. — arXiv: [1308.0133 \[astro-ph.HE\]](#).
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. — Vol. 110. — P. 141102.
3. *Belotsky K., Khlopov M., Laletin M.* Dark Atoms and their decaying constituents // Bled Workshops Phys. / ed. by N. S. Mankoc Borstnik, H. B. Nielsen, D. Lukman. — 2014. — Vol. 15, no. 2. — P. 1–9. — arXiv: [1411.3657 \[hep-ph\]](#).
4. *Belotsky K.* [et al.]. Decaying Dark Atom constituents and cosmic positron excess // Adv. High Energy Phys. — 2014. — Vol. 2014. — P. 214258. — arXiv: [1403.1212 \[astro-ph.CO\]](#).
5. *Ibarra A., Tran D., Weniger C.* Decaying Dark Matter in Light of the PAMELA and Fermi LAT Data // JCAP. — 2010. — Vol. 01. — P. 009. — arXiv: [0906.1571 \[hep-ph\]](#).
6. *Aguilar M.* [et al.]. Towards Understanding the Origin of Cosmic-Ray Electrons // Phys. Rev. Lett. — 2019. — Vol. 122, no. 10. — P. 101101.