

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
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКРЫТОЙ МАССЫ НА ОБЪЯСНЕНИЕ
С ЕЕ ПОМОЩЬЮ ПОЗИТРОННОЙ АНОМАЛИИ В
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

Научные руководители

_____ М. Л. Соловьёв

_____ К. М. Белоцкий

Выполнила

_____ П. А. Коршунова

Москва 2022

Содержание

Введение	3
1 Описание используемых вычислительных средств	4
2 Модель	4
3 Результаты	7
3.1 Доля e^+ для двух колец фиксированного радиуса при фиксированной массе частицы	7
3.2 Доля e^+ для двух колец при фиксированной массе частицы	8
3.3 Доля e^+ для двух колец с массой и радиусами в качестве параметров	10
Заключение	12
Список используемых источников	13

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].

Существует несколько моделей, пытающихся объяснить «позитронную аномалию». В работе рассматривается модель нестабильной скрытой массы (DM) в качестве источника первичных позитронов.

Предполагается, что частицы DM распадаются или аннигилируют с образованием позитронов в конечном состоянии. В работе мы не конкретизируем свойств частиц DM за исключением их массы и будем рассматривать только случай аннигиляции.

Однако рассматриваемая модель имеет свои недостатки, основным из которых является перепроизводство гамма-излучения в процессе аннигиляции или распада частиц скрытой массы по сравнению с наблюдаемыми данными. Одним из возможных путей решения данной проблемы является изменение пространственного распределения источников.

Ранее были рассмотрены спектры позитронов для простейших источников (точечный, линейный и тп.), для источника в виде бесконечно тонкого кольца вокруг центра Галактики, а также производимая ими доля позитронов в КЛ при заданной заранее массе начальной частицы. В данной работе рассматривались два кольцевых источника, чтобы можно было покрыть как высокие, так и низкие энергии, проводилась работа по поиску оптимальных параметров фитирования, в том числе и массы, а также оптимизация кода и устранение проблем, связанных с усложнением алгоритмов фитирования.

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 предоставляет возможность представления результатов в виде графиков.

Последнее активно использовалось в ходе данной работы.

Для поиска оптимальных параметров так же использовалась Wolfram Mathematica, т.к. здесь есть возможность сделать массу параметром фита, чего нельзя, например, в GALPROP.

2 Модель

Предполагается, что скрытая масса состоит из неизвестных на данный момент частиц, которые способны распадаться или аннигилировать с образованием позитронов в конечном состоянии. Подробнее о кандидатах в эти частицы - в работах [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]

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

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 — масса частицы скрытой массы в ГэВ.

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 бесконечно тонкие 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, $r_{\odot} = 8.5$ 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 ~ 10 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 ($\phi_F = 0.7$ ГэВ для электронов, $\phi_F = 0.8$ ГэВ для позитронов).

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 двух бесконечно тонких колец.

Ранее в работе была получена доля позитронов в КЛ для колец четырех различных радиусов при массе частицы скрытой массы равной 500 ГэВ. Оказалось, что такой массы недостаточно, чтобы покрыть экспериментальные данные на высоких энергиях.

3.1 Доля e^+ для двух колец фиксированного радиуса при фиксированной массе частицы

Для начала была рассмотрена доля позитронов в КЛ от двух колец, расположенных симметрично относительно Солнца, при фиксированной массе равной 1000 ГэВ. Было рассмотрено два различных случая: кольца с радиусами 6.5 и 10.5 кпк, кольца с радиусами 5 и 12 кпк.

На рисунке 1 приведены зависимости доли позитронов от энергии для двух колец вокруг центра Галактики различных радиусов. Также на графиках показаны фон [5] – черным цветом и экспериментальные точки AMS-02 [6] – синим цветом.

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, но достаточно плохо описывает экспериментальные точки.

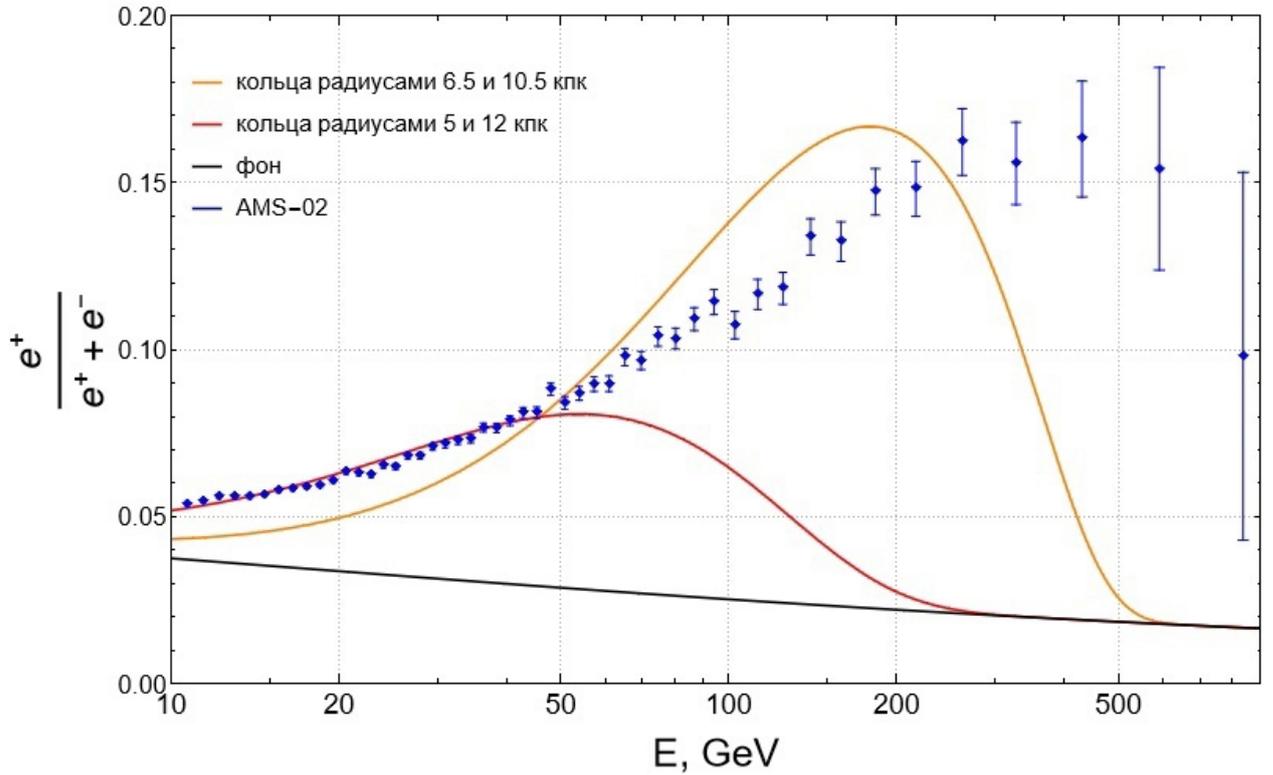


Рисунок 1 – Зависимость доли позитронов от энергии для двух колец вокруг центра Галактики различных радиусов. Черным цветом обозначен фон, синим – данные AMS-02, оранжевым и красным – спектры от колец.

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

3.2 Доля e^+ для двух колец при фиксированной массе частицы

Следующим шагом стал поиск оптимальных значений для радиусов колец при фиксированной массе. То есть мы усложнили алгоритм фитирования, добавив два свободных параметра.

Было рассмотрено два случая: масса частицы скрытой массы 1500 ГэВ и 2000 ГэВ.

Для каждого значения массы были подобраны наилучшее значение сечения $\langle \sigma v \rangle$ и значения радиусов колец, позволяющие 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.

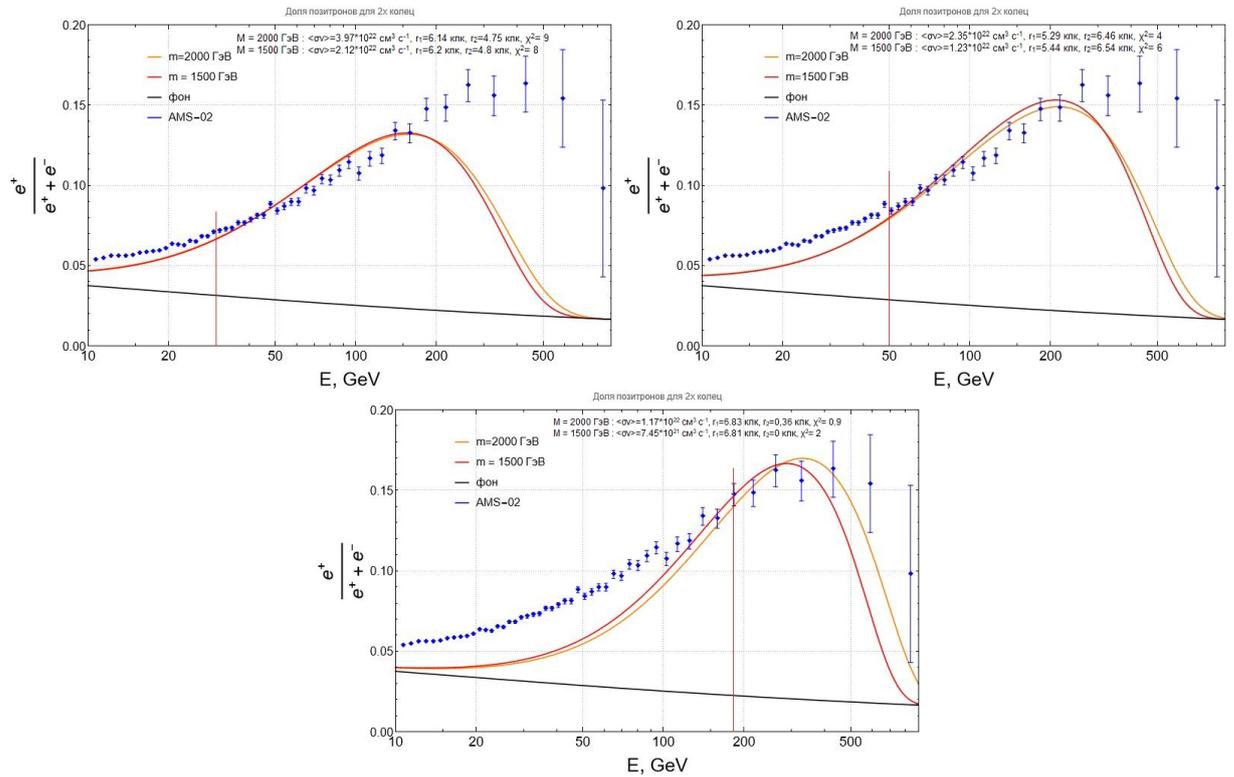


Рисунок 2 – Зависимость доли позитронов от энергии для двух колец вокруг центра Галактики при различной массе частицы. Черным цветом обозначен фон, синим – данные AMS-02, оранжевым и красным – спектры от колец.

В ходе работы была выявлена проблема нахождения параметров модели, соответствующих минимуму χ^2 , в рамках стандартного фитирования данных с энергии 30 ГэВ. В ходе ее поиска и решения была проведена серия расчетов для других, более высоких значений нижней границы фитирования, а именно – 50 и 183 ГэВ.

Смещение границы приводило к улучшению описания данных, как предполагается, из-за исключения из фитирования большого числа точек с маленькими погрешностями. Таким образом, при увеличении количества параметров фитирования начинали возникать проблемы с учетом этих данных, требуя для нормальной работы кода его дополнительной оптимизации.

Результаты, полученные для всех трех значений нижней границы после отладки и оптимизации представлены на рисунке 2. На графиках красная вертикальная линия обозначает нижнюю границу экспериментальных то-

чек, с которых начиналось фитирование.

3.3 Доля e^+ для двух колец с массой и радиусами в качестве параметров

На следующем шаге масса тоже перестала быть фиксированной и выступила в роли параметра фитирования.

При использовании простейших ограничений ($r_1, r_2 > 0$ кпк и $m > 0$ ГэВ) в ходе фитирования возникали проблемы с нахождением минимума, из-за которой оптимальной считалась масса, близкая к нулю. Увеличение нижней границы по массе ($m > 850$ ГэВ) приводило к близким к этой границе значениям массы и почти нулевому радиусу одного из колец (рисунок 3).

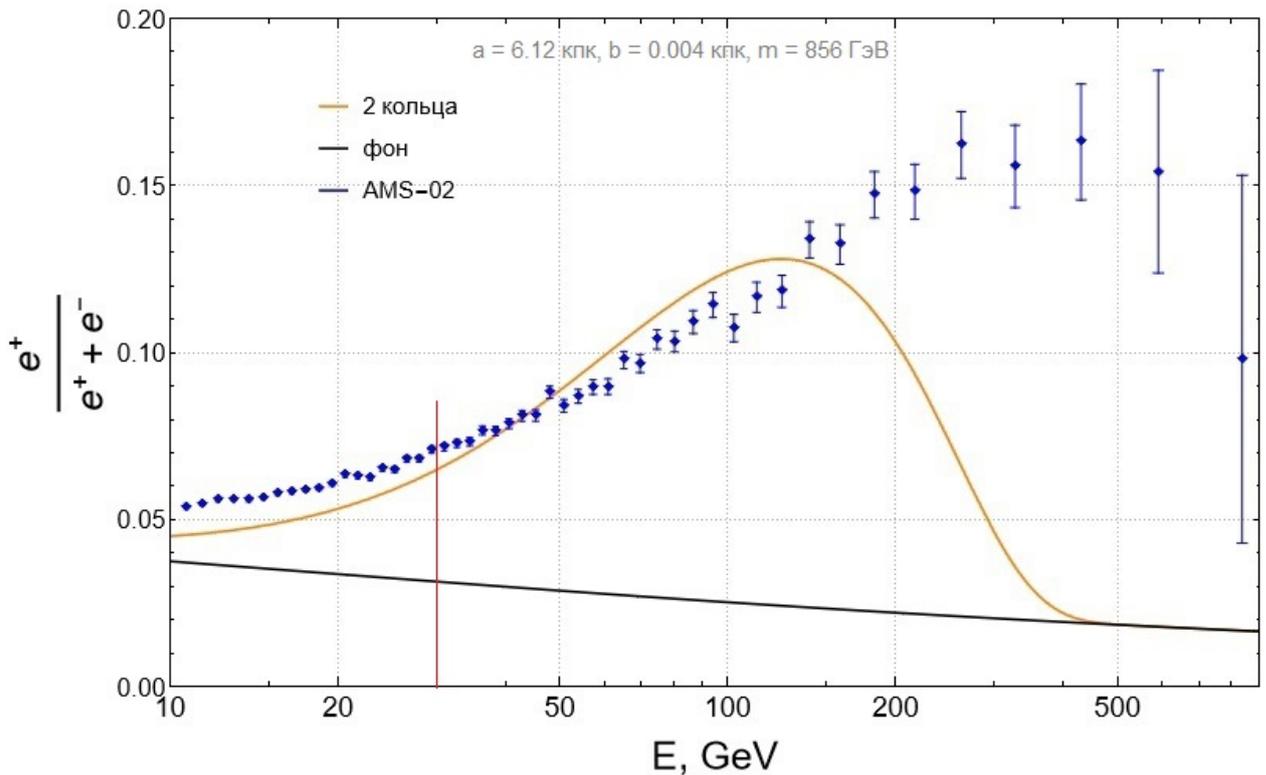


Рисунок 3 – Зависимость доли позитронов от энергии для двух колец вокруг центра Галактики. Черным цветом обозначен фон, синим – данные AMS-02, оранжевым – спектр от колец.

Увеличение нижней энергетической границы фитирования приводит к нулевому кольцу, но уже при достаточно больших значениях массы начальной частицы. При этом исключение подобного сценария и помещение

наблюдателя между двумя кольцами с помощью более сложных ограничений на их радиусы позволяет добиться самых лучших результатов (рисунок 4)

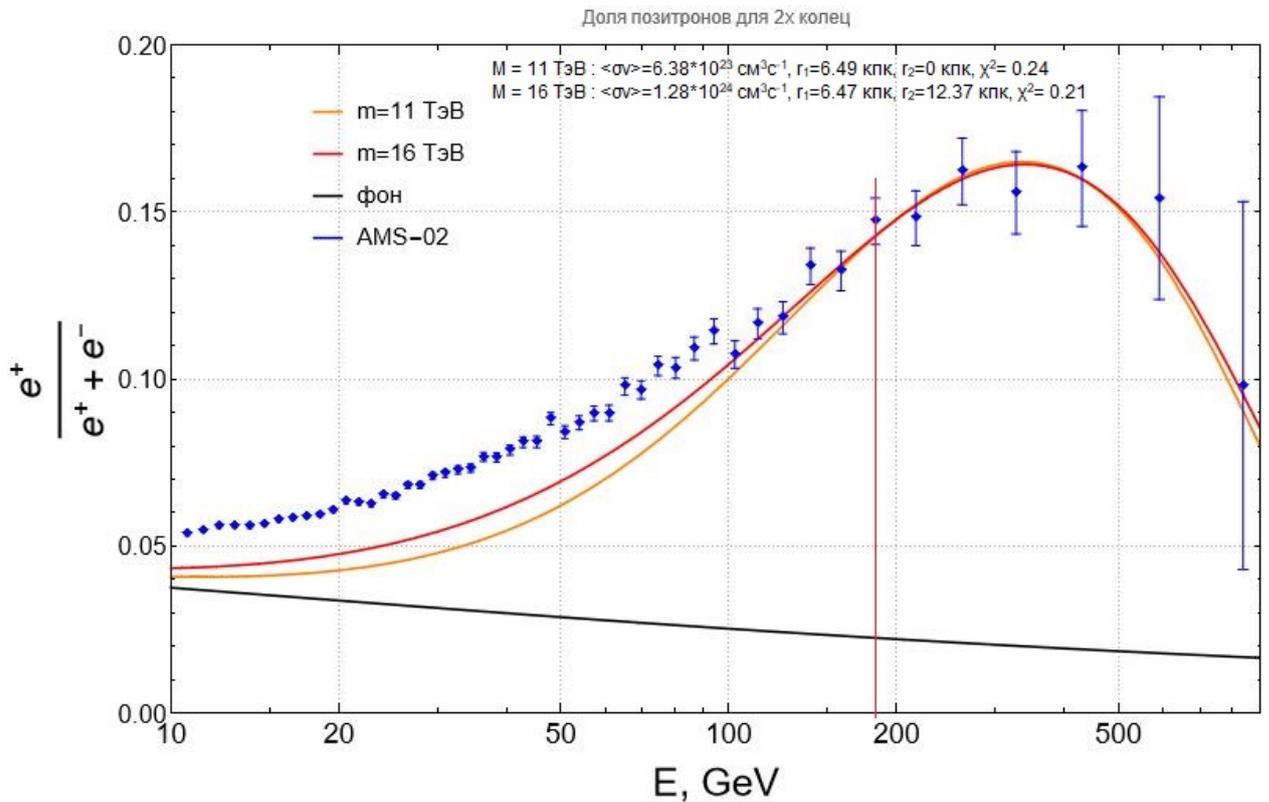


Рисунок 4 – Зависимость доли позитронов от энергии для двух колец вокруг центра Галактики для различных ограничений на радиусы колец в случае, когда масса является параметром фитирования. Оранжевый цвет – радиусы больше нуля, красный – $1 < r_1 < 8.5, 8.5 < r_2 < 15$

Из этого можно сделать вывод, что при очередном увеличении количества параметров фитирования вновь появились проблемы с нахождением локальных минимумов вместо глобального, что требует дальнейшей оптимизации и отладки программы.

Полученные зависимости достаточно хорошо описывают экспериментальные данные на энергиях, начиная с $\sim 100 \text{ ГэВ}$, хотя фитирование начиналось со 183 ГэВ .

Заключение

В данной работе были получены доли позитронов в КЛ для случая пространственного распределения источников в виде двух колец различного радиуса вокруг центра Галактики. Была начата работа по поиску оптимальных параметров для описания позитронной аномалии и устранению проблем, связанных с усложнением алгоритмов фитирования за счет увеличения числа переменных.

В дальнейшем планируется окончательно оптимизировать алгоритм для работы с более сложными случаями распределения скрытой массы, 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.