

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
РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СПИРАЛЬНЫХ РУКАВОВ
СКРЫТОЙ МАССЫ

Научные руководители

_____ М. Л. Соловьёв

_____ К. М. Белоцкий

Выполнила

_____ М. А. Рахимова

Москва 2021

Содержание

1	Введение	2
2	Описание используемых вычислительных средств	2
3	Эксперимент AMS-02	3
4	Модель	4
5	Результаты	8
5.1	Поиск оптимальных параметров модели «темного диска» для описания данных AMS-02	8
5.2	Применение модели концентрических колец к данным AMS-02 .	10
6	Заключение	13
	Список используемых источников	13

1 Введение

Существуют предположения о существовании большого количества форм скрытой массы (ТМ), многие из которых выходят за рамки привычного понятия о бесстолкновительных массивных частицах. Среди них самовзаимодействующая ТМ [1–4], первичные черные дыры [5–9], модели темного диска [10–13], ТМ в форме сгустков скалярного поля [14] и другие. Многие попытки построения модели ТМ также пытаются с ее помощью объяснить другие астрофизические проблемы, такие как избыток позитронов в космических лучах.

Основной сложностью в объяснении позитронной аномалии [15] с помощью ТМ является ограничение по изотропному диффузному фону гамма-лучей (IGRB) [11–13; 16–21]. Одним из подходов к решению проблемы является модификация пространственного распределения ТМ. В рамках этого подхода предлагается модель ТМ, подобно барионной материи распределенной в виде спиральных рукавов. В данной работе в качестве первого приближения рассматривается модель ТМ, распределенной в виде концентрических колец.

2 Описание используемых вычислительных средств

Для расчета эффектов распространения заряженных частиц-продуктов аннигиляции ТМ в Галактике использовалась программа GALPROP [22]. GALPROP — это программа с открытым исходным кодом, предназначенная для моделирования распространения релятивистских заряженных частиц и образующегося при этом диффузного излучения. Изначально разрабатывалась Игорем Москаленко и Эндрю Стронгом и на данный момент существует уже более 15 лет.

Программа численно решает уравнение переноса, описывающее распространение космических лучей в Галактике. Для этого GALPROP создает многомерную сетку в трёхмерном пространстве в пределах Галактики и в пространстве энергий (или импульсов) частиц. Внутри этой сетки частицы

рождаются, движутся и исчезают. Программа использует в расчётах не отдельные частицы, а плотности их потоков. В результате работы можно получить плотность и соответствующий поток частиц в любой точке Галактики для любого значения энергии. Для работы составляют интерес потоки в 8,5 пк от центра Галактики, что соответствует положению Солнечной системы. Чтобы получить потоки частиц вблизи Земли, необходимо учесть эффект солнечных модуляций. После этого их можно сравнивать с экспериментальными данными.

Для работы с ТМ, на кафедре была произведена модификация, позволяющая использовать различные спектры инжекции и профили плотности ТМ.

Для обработки результатов моделирования используется несколько программ, написанных в математическом пакете Wolfram Mathematica.

Спектры инжекции представляют из себя распределение по энергиям числа образовавшихся позитронов в одном акте аннигиляции. Для их получения используется Монте-Карло генератор Pythia [23].

3 Эксперимент AMS-02

AMS-02 (Alpha Magnetic Spectrometer) – детектор частиц, установленный на МКС в 2011 году. Его основные цели – изучение состава КЛ, поиск скрытой массы и антиматерии. Первые результаты, опубликованные в 2013 году, подтвердили наличие избытка позитронов в космических лучах [24], впервые обнаруженный экспериментом PAMELA [25]. В рамках классических моделей КЛ нет источников первичных позитронов, которыми можно было бы объяснить данный избыток, вследствие чего явление получило название «позитронная аномалия».

На рисунке 1 представлен спектр доли позитронов, построенный по данным эксперимента AMS-02 [26]. Синими точками отмечены экспериментальные данные, а черным цветом фон.

Природе позитронной аномалии посвящено много работ. Есть попытки объяснения без привлечения новых источников позитронов, например, с помощью изменения параметров распространения частиц в межзвездной среде

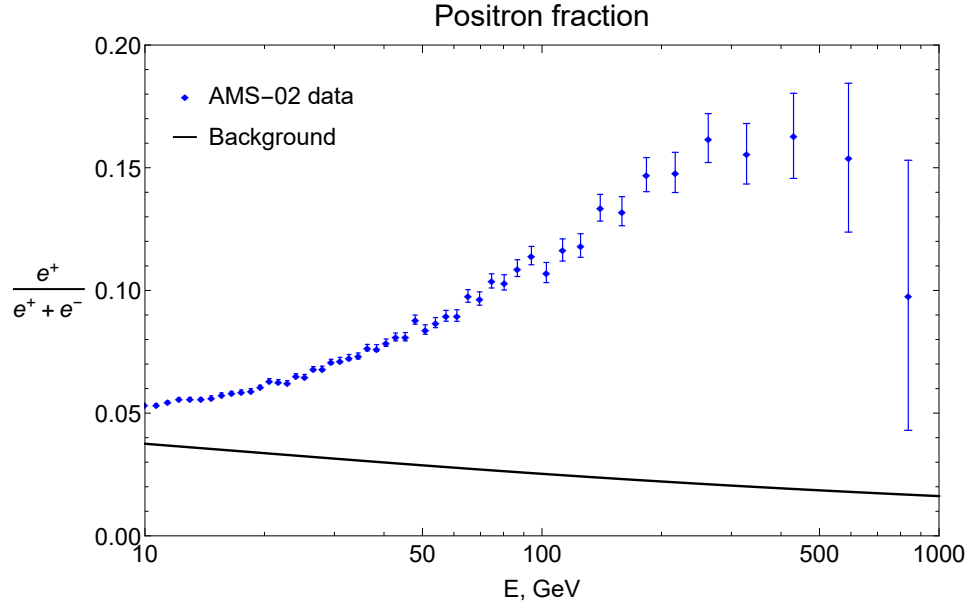


Рисунок 1: Спектр $\frac{e^+}{e^+ + e^-}$, построенный по данным AMS-02.

или особой области с отличными от обычных свойствами, в которой находится Земля, образованной после взрыва сверхновой [27–29]. Однако более распространенными являются модели, предлагающие введение источников позитронов. Среди них – рождение позитронов во время вспышек сверхновых и, наиболее популярные из всех, модели с использованием пульсаров [30–33] и скрытой массы [30; 33–45].

Все вышеперечисленные модели имеют свои преимущества и недостатки, и на данный момент нет общепризнанного объяснения позитронной аномалии.

4 Модель

Основной проблемой в использовании ТМ для объяснения избытка частиц в КЛ является создаваемое в процессе аннигиляции и распространения заряженных частиц сквозь межзвездную среду гамма-излучение. Простые модели гало нестабильной ТМ, описывающие рост доли позитронов в потоке электронов и позитронов в КЛ, приводят к перепроизводству гамма-излучения и противоречию с наблюдаемыми данными по IGRB.

В прошлых работах для разрешения данного противоречия использовалась модель «темного диска», позволяющая отсекаать области, не дающие

вклад в потоки заряженных частиц, но производящие при этом гамма-излучение.

В данной работе мы хотим проверить, может ли концентрация ТМ в более сложную и характерную для барионной материи структуру — спиральные рукава — помочь в объяснении позитронной аномалии. В качестве первого приближения мы рассматриваем ТМ, распределенную в виде концентрических колец. Механизм образования таких структур является отдельной задачей, в этой работе их существование постулируется.

Профиль плотности для такой модели формируется из профиля Рида, использовавшегося для диска, и дополнительного слагаемого для колец.

$$\rho(r, z) = \begin{cases} \rho_{0R} e^{-\frac{r}{R_c}} e^{-\frac{z}{z_c}}, & \text{диск,} \\ \rho_{0R} e^{-\frac{r}{R_c}} (e^{-\frac{z}{z_c}} + b e^{-\frac{z}{z_r}} (\sin^2(kr) - \sin^2(kr_\odot))), & \text{кольца} \end{cases}, \quad (1)$$

где r и z — цилиндрические галактические координаты;

z_c — полутолщина диска;

z_r — полутолщина колец;

$R_c = 6.96$ кпк;

$r_\odot = 8.5$ кпк;

$\rho_{0R} = 1.32$ ГэВ/см³ — константа, получаемая из условия $\rho_{loc} \equiv \rho(r_\odot) = 0.4$ ГэВ/см³;

b — параметр, отвечающий за добавочную плотность колец;

k — параметр, отвечающий за ширину колец;

На рисунке 2 представлены профили плотности для диска и колец, определяемые выражением 1. Желтой линией показан случай диска, синим — колец, а розовая линия соответствует положению Солнца $r_\odot = 8.5$ кпк. Здесь параметр $k = 1.1$, что позволяет добиться нужного расположения Солнца в Галактике — между третьим и четвертым рукавом. Параметр b для примера взят равным 1.1, он отвечает за амплитуду графика.

В рамках данной модели мы предполагаем существование частиц скрытой массы, способных распадаться или аннигилировать по нескольким каналам с образованием позитронов в конечном состоянии. Мы рассматриваем общий случай, не конкретизируя свойств начальных частиц, кроме их массы. Согласно нашим прошлым результатам, случай распада слабо отличается от

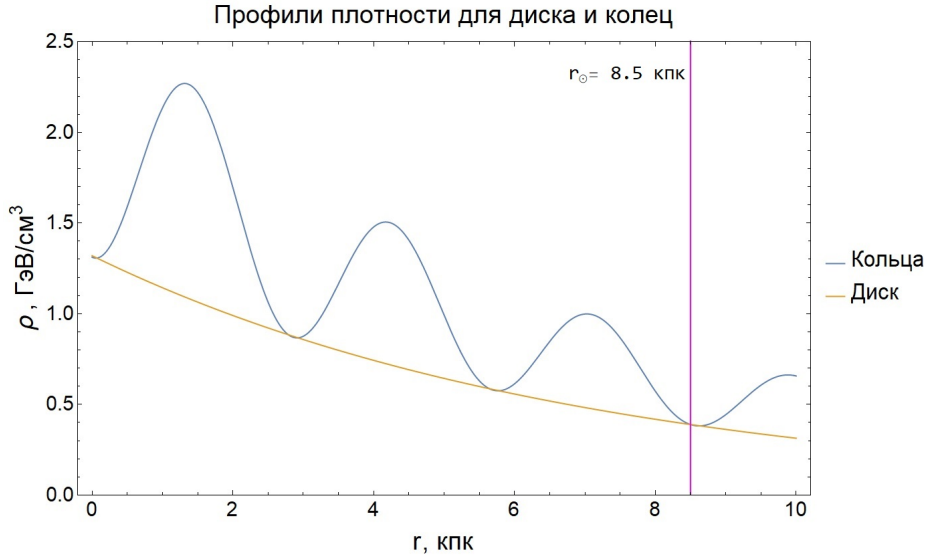


Рисунок 2: Профили плотности $\rho(r)$ для диска и колец.

случая аннигиляции частиц с вдвое меньшей массой, так что в дальнейшем мы будем рассматривать только случай аннигиляции по следующим каналам:

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

где X — частица ТМ, e, μ, τ — электрон (позитрон), мю- и тау-лептон соответственно.

Параметрами рассматриваемой модели, помимо отмеченных ранее k , b и полутолщин диска z_c и колец z_r являются масса частицы M_X и определяемые в процессе дальнейшего анализа усредненное по скоростям сечение $\langle\sigma v\rangle$ и брэнчинги каналов $Br_i (i = e, \mu, \tau; \sum Br_i = 1)$.

В рамках такой модели генерируется гамма-излучение двух типов: первичное и вторичное.

Вторичное гамма-излучение образуется при взаимодействии электронов и позитронов с межзвездной средой за счет эффектов обратного Комптона (Inverse Compton Scattering, ICS) и тормозного излучения (bremsstrahlung, bremss). Спектры вторичного гамма-излучения, а также спектры электронов и позитронов вблизи Земли извлекаются из Гальпропа. С помощью сечения и

брэнчингов из спектров e^+e^- вблизи Земли составляется параметризованное выражение для доли позитронов.

Первичное гамма-излучение образуется во время процесса аннигиляции за счет излучения конечного состояния (ФСР) и в распадах продуктов распада тау-лептонов. Для расчета спектров первичного гамма-излучения используется следующее выражение:

$$\Phi_{prompt}(E_\gamma) = \left(\frac{dN_\gamma^e}{dE_\gamma} Br^e + \frac{dN_\gamma^\mu}{dE_\gamma} Br^\mu + \frac{dN_\gamma^\tau}{dE_\gamma} Br^\tau \right) \frac{\langle \sigma v \rangle}{4} \times$$

$$\times \frac{1}{\Delta\Omega} \int_0^{100 kpc} \int_{20^\circ}^{90^\circ} \int_0^{2\pi} \frac{1}{4\pi r^2} \left(\frac{\rho}{M_X} \right)^2 r^2 \cos(\theta) dr d\theta d\phi, \quad (2)$$

где $\frac{dN_\gamma^{e,\mu,\tau}}{dE_\gamma}$ — спектры гамма от одного акта аннигиляции, берутся из Пифии;

$Br^{e,\mu,\tau}$ — брэнчинги соответствующих спектрам каналов аннигиляции;

$\langle \sigma v \rangle$ — усредненное по скоростям сечение аннигиляции;

ρ — плотность ТМ,

M_X — масса частицы ТМ.

Так как данные IGRB, с которыми сравниваются предсказания модели, представляют собой поток, усредненный по области неба с широтой больше 20° , то потоки гамма от ТМ усредняются аналогично, а $\Delta\Omega$ — угловой размер области неба, по которому идет усреднение.

Далее составляется параметризованное выражение для χ^2 :

$$\chi^2 = \frac{1}{d.o.f.} \left(\sum_{AMS} \frac{(\Delta\Phi_e)^2}{\sigma_e^2} + \sum_{Fermi} \frac{(\Delta\Phi_\gamma)^2}{\sigma_\gamma^2} \Theta(\Delta\Phi_\gamma) \right), \quad (3)$$

где $\Delta\Phi$ — разность между экспериментальными данными и предсказаниями модели;

σ — погрешности экспериментальных данных.

$d.o.f.$ — количество степеней свободы. В данном анализе используется механизм динамического подсчёта степеней свободы: вклад вносят только те точки данных IGRB, над которыми есть превышения сигнала.

Первая сумма соответствует данным AMS — доле позитронов в общем

потоке электронов и позитронов. Суммирование происходит для экспериментальных точек с энергией от 30 ГэВ.

Вторая сумма соответствует данным Fermi-LAT по IGRB. Так как для нашей модели достаточно не превышать данные по гамма-излучению, вторая сумма домножена на тэта-функцию Хевисайда, зануляющую вклад в хи-квадрат в случае, если предсказания ниже экспериментальных данных.

Стоит отметить, что здесь и далее под χ^2 подразумевается приведённый хи-квадрат $\frac{\chi^2}{d.o.f.}$.

Выражение (3) минимизируется с помощью встроенного функционала мат-пакета Wolfram Mathematica. Результатом данной операции является найденное минимальное значение χ^2 , а также значения параметров $\{\langle\sigma v\rangle, Br_i\}$, при котором оно достигается.

В качестве фона были использованы параметрически заданные потоки электронов и позитронов [46].

5 Результаты

5.1 Поиск оптимальных параметров модели «темного диска» для описания данных AMS-02

Ранее на кафедре такой анализ уже проводился, но с тех пор обновились данные AMS-02 [26] и появились модели фона IGRB, поэтому было принято решение включить их в рассмотрение.

На рисунке 3 представлены полученные спектры доли позитронов и IGRB для диска с полутолщиной $z_c = 100$ пк и массой начальной частицы $M_\chi = 500$ ГэВ.

На спектре доли позитронов черным цветом обозначен фон, зеленым — минимальная попадающая в фит энергия позитронов, а красным — предсказание модели (сигнал плюс фон). На спектре гамма-излучения серым цветом обозначен фон — вклад от неразрешенных источников, оранжевым — первичное гамма-излучение от процесса аннигиляции, зеленым — вторичное гамма-излучение, красным — сумма всех компонент.

По графикам видно, что в этом случае не получается одновременно хоро-

по описать и долю позитронов, и гамма-излучение. Приведенный хи-квадрат составил 18.

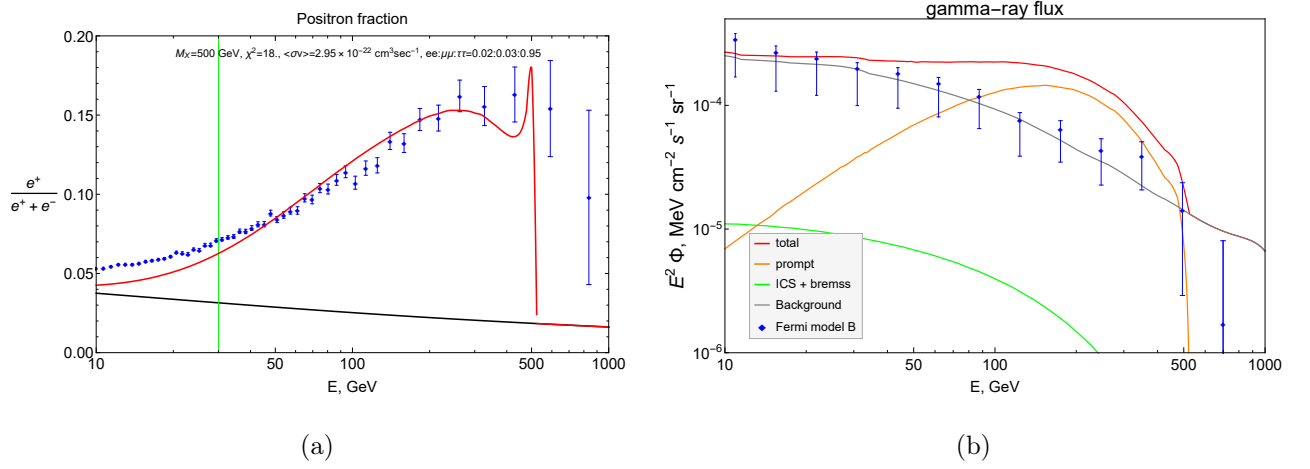


Рисунок 3: Доля позитронов $\frac{e^+}{e^+ + e^-}$ в сравнении с данными AMS-02 (a) и суммарный поток диффузного гамма-излучения (красная кривая) в сравнении с данными Fermi-LAT по IGRB (b) с использованием модели диска.

Затем аналогичный анализ был проведен для различных значений z_c и M_X . На основе полученных данных был построен представленный на рисунке 4 контурный график зависимости приведенного χ^2 от полутолщины диска и массы начальной частицы. По оси абсцисс отложены значения массы начальной частицы в пределах от 500 до 900 ГэВ, а по оси ординат — значения полутолщины диска в пределах от 100 до 1000 пк.

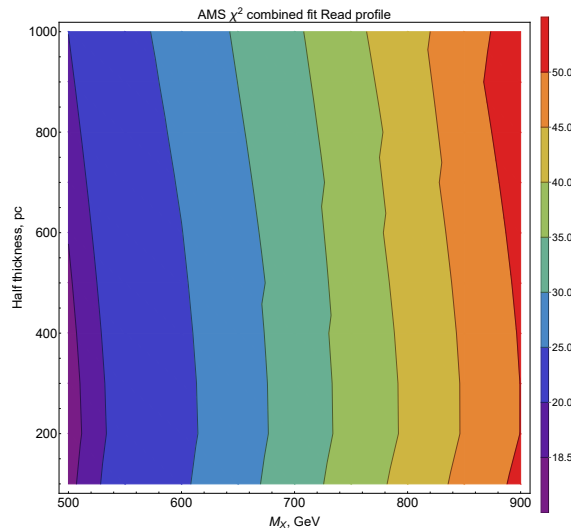


Рисунок 4: Контурный график зависимости приведенного χ^2 от полутолщины диска и массы начальной частицы.

Как можно заметить из графика, χ^2 возрастает с ростом массы начальной частицы. Это можно объяснить тем, что на высоких энергиях мало экспериментальных точек AMS, которые к тому же имеют большие погрешности. Увеличение массы начальной частицы не сильно меняет качество описания доли позитронов, но при этом дает больше гамма-излучения, а в данной модели общий χ^2 складывается из суммы χ^2 для доли позитронов и χ^2 для гамма.

Из графика понятно, что χ^2 будет падать при уменьшении массы начальной частицы, однако нам не интересен этот случай. При меньшей массе начальной частицы наша модель сможет хорошо описывать позитроны низких и средних энергий, игнорируя при этом экспериментальные данные на высоких энергиях, поэтому мы решили остановиться на минимальной $M_X = 500$ ГэВ.

Кроме того, на графике видно область минимальных значений $\chi^2 < 18.5$ для массы начальной частицы 500 ГэВ и полутолщин $100 \div 500$ пк. Для дальнейшего анализа в качестве бест-фитного значения было выбрано $\chi^2 = 17.7$, достигаемое при $M_X = 500$ ГэВ и $z_c = 200$ пк.

5.2 Применение модели концентрических колец к данным AMS-02

Следующим шагом стало проведение анализа с использованием модели концентрических колец при бест-фитных параметрах для диска.

На рисунке 5 представлены спектры доли позитронов и гамма-излучения для колец с $k = 1.1$ и $b = 1.1$ при массе начальной частицы $M_X = 500$ ГэВ и полутолщинами диска и колец $z_c = z_r = 200$ пк.

Из графиков видно, что модель колец позволяет добиться лучшего качества одновременного описания доли позитронов и гамма, чем модель диска. Здесь приведенный хи-квадрат составил 6.5.

Далее было проведено исследование зависимости χ^2 от ширины колец k и добавочной плотности b . Так как модель построена по аналогии с барионной материей, параметр k подбирался таким образом, чтобы Солнце находилось в нужном месте Галактики — между третьим и четвертым рукавом.

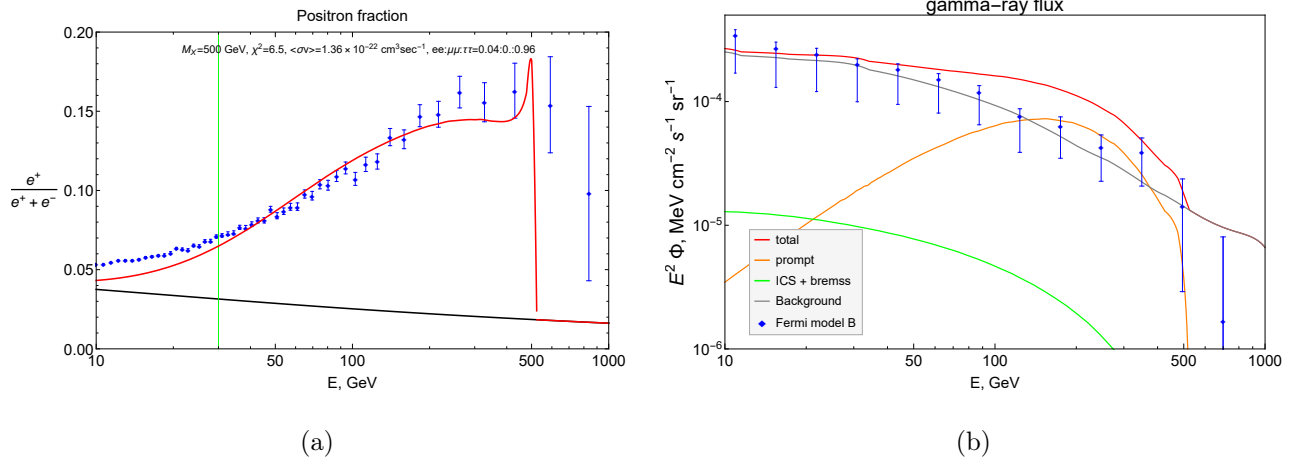


Рисунок 5: Доля позитронов $\frac{e^+}{e^+ + e^-}$ в сравнении с данными AMS-02 (a) и суммарный поток диффузного гамма-излучения (красная кривая) в сравнении с данными Fermi-LAT по IGRB (b) с использованием модели колец.

На рисунке 6 представлены профили плотности для четырех значений k , соответствующих разным расположениям Солнца между рукавами. Розовой линией отмечено положение Солнца $r_\odot = 8.5$ кпк. Синяя линия соответствует случаю, когда Солнце находится практически в третьем рукаве ($k = 0.96$), а красная — практически в четвертом ($k = 1.25$). Зелёным цветом показан случай расположения Солнца в минимуме — ровно посередине между рукавами ($k = 1.1$), а оранжевым — промежуточный случай, когда Солнце между 3 рукавом и минимумом ($k = 1.0$). Здесь для всех зависимостей $b = 1.1$.

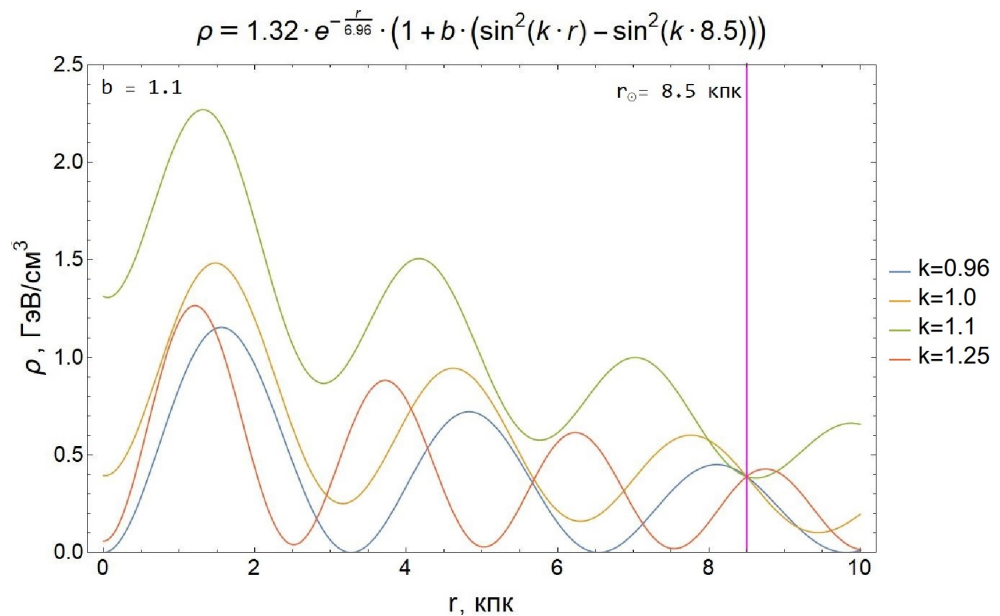


Рисунок 6: Профили плотности $\rho(r)$ для колец различной ширины.

Как можно заметить из данного графика, при увеличении амплитуды некоторые профили плотности могут уйти в отрицательную область, что противоречит физическому смыслу. Поэтому для каждого значения k было найдено максимальное значение $b_{\max}$, при котором плотность ТМ еще остается положительной. В ходе дальнейшего анализа параметр добавочной плотности колец b варьировался в промежутке $(0, b_{\max})$.

На рисунке 7 представлены графики зависимостей χ^2 от добавочной плотности колец b при различных значениях ширины колец k . Легенда графика совпадает с легендой рисунка 6. Последняя точка каждой зависимости соответствует $b_{\max}$, а первая точка $b = 0$ — случаю диска.

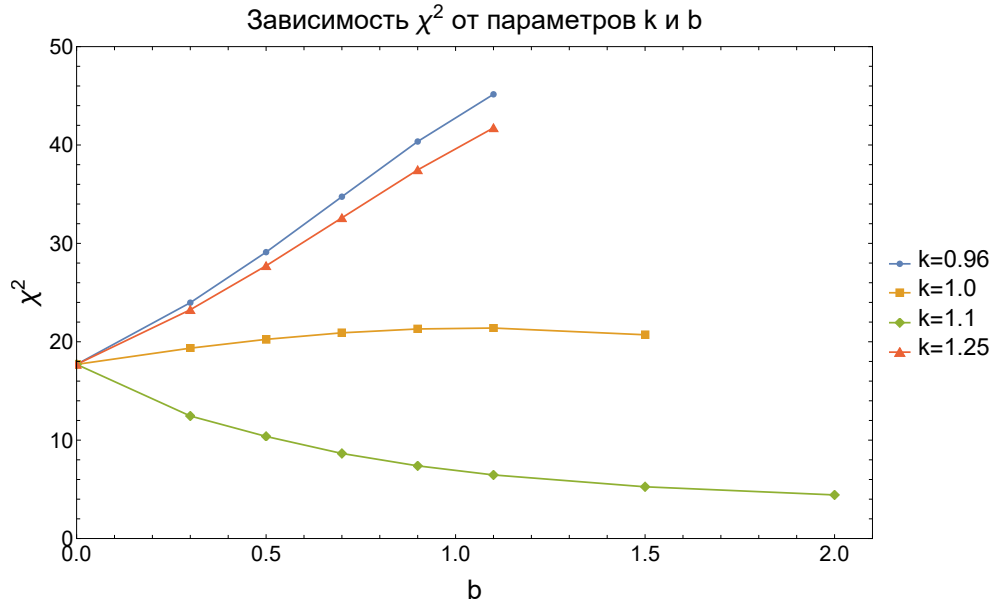


Рисунок 7: Зависимость χ^2 от ширины колец k и добавочной плотности b .

Как четко видно из графика, близкое к рукавам расположение Солнца ($k = 0.96$ и $k = 1.25$) только ухудшает общий χ^2 . В промежуточном случае ($k = 1.0$) модель колец дает сопоставимые с моделью диска результаты. А при нахождении Солнца в минимуме χ^2 значительно уменьшается, так как это позволяет увеличить количество позитронов низких энергий при сохранении количества высокоэнергетических.

В таблице 1 представлены минимальные значения χ^2 для моделей диска и колец с различной шириной. Как можно заметить по таблице, модель колец с расположением Солнца в минимуме позволяет уменьшить χ^2 в 4 раза по сравнению с моделью диска.

	Диск ($b = 0$)	Кольца			
		$k = 0.96$	$k = 1.0$	$k = 1.1$	$k = 1.25$
$\chi^2_{\min}$	17.7	24	19.3	4.4	23.3

Таблица 1: Минимальные значения χ^2 для моделей диска и колец с различной шириной.

6 Заключение

В данной работе был проведен анализ возможности описания новых данных эксперимента AMS-02 с помощью модели «темного диска» и первого приближения модели спиральных рукавов — ТМ, распределенной в виде концентрических колец, без противоречия с данными Fermi-LAT по IGRB.

Были определены бест-фитные значения массы начальной частицы $M_\chi = 500$ ГэВ и соответствующей полутолщины диска $z_c = 200$ пк. Для модели колец было показано, что при расположении Солнца в минимуме между рукавами возможно значительно улучшить χ^2 в сравнении с диском благодаря лучшему описанию низких энергий за счет увеличения плотности ТМ на некотором расстоянии от Солнца.

Так как в работе было показано, что данное направление является перспективным, в дальнейшем планируется переход от кольцевого приближения непосредственно к модели спиральных рукавов.

Список используемых источников

1. *Petraki K., Postma M., de Vries J.* Radiative bound-state-formation cross-sections for dark matter interacting via a Yukawa potential // Journal of High Energy Physics. — 2017. — Vol. 4. — P. 77.
2. *Spethmann C.* [et al.]. Simulations of Galaxy Cluster Collisions with a Dark Plasma Component // ArXiv e-prints. — 2016. — Mar. — arXiv: [1603.07324](https://arxiv.org/abs/1603.07324).
3. *Heikinheimo M.* [et al.]. Dark matter self-interactions via collisionless shocks in cluster mergers // Physics Letters B. — 2015. — Vol. 749. — P. 236–241. — ISSN 0370-2693.

4. *Mavromatos N. E.* [et al.]. Self-interacting dark matter // International Journal of Modern Physics D. — 2017. — Vol. 26, no. 03. — P. 1730007. — eprint: <http://www.worldscientific.com/doi/pdf/10.1142/S0218271817300075>.
5. *Carr B., Kühnel F., Sandstad M.* Primordial black holes as dark matter // Phys. Rev. D. — 2016. — Vol. 94, issue 8. — P. 083504.
6. *Kawasaki M.* [et al.]. Primordial black holes as dark matter in supergravity inflation models // Phys. Rev. D. — 2016. — Oct. — Vol. 94, issue 8. — P. 083523.
7. *Grobov A. V., Rubin S. G., Shalamova V. Y.* Black Component of Dark Matter // Advances in High Energy Physics. —. — Vol. 2014. — P. 6.
8. *Belotsky K. M., Kirillov A. A.* Primordial black holes with mass $10^{16} - 10^{17}$ g and reionization of the Universe // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. — 2015. — Vol. 2015, no. 01. — P. 041.
9. *Belotsky K. M., Kirillov A. A., Rubin S. G.* Primordial black holes and the observable features of the universe // International Journal of Modern Physics D. — 2015. — Vol. 24, no. 13. — P. 1545005. — eprint: <http://www.worldscientific.com/doi/pdf/10.1142/S0218271815450054>.
10. *Randall L., Scholtz J.* Dissipative dark matter and the Andromeda plane of satellites // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. — 2015. — Vol. 2015, no. 09. — P. 057.
11. *Belotsky K.* [et al.]. Fermi-LAT kills dark matter interpretations of AMS-02 data. Or not? // JCAP. — 2017. — Vol. 1701, no. 01. — P. 021. — arXiv: [1606.01271](https://arxiv.org/abs/1606.01271) [[astro-ph.HE](https://arxiv.org/archive/hep)].
12. *Alekseev V. V.* [et al.]. High-energy cosmic antiparticle excess vs. isotropic gamma-ray background problem in decaying dark matter Universe // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — Vol. 675, no. 1. — P. 012023.

13. *Alekseev V. V.* [et al.]. On a possible solution to gamma-ray overabundance arising in dark matter explanation of cosmic antiparticle excess // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2016. — Vol. 675, no. 1. — P. 012026.
14. *Grobov A.* [et al.]. Soliton Dark Matter // *Physics Procedia*. — 2015. — Vol. 74. — P. 28–31. — ISSN 1875-3892. — Fundamental Research in Particle Physics and Cosmophysics.
15. *Adriani O.* [et al.]. An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1.5-100 GeV // *Nature*. — 2009. — Vol. 458.
16. *Ackermann M.* [et al.]. Dark matter constraints from observations of 25 Milky Way satellite galaxies with the Fermi Large Area Telescope // *Phys. Rev. D*. — 2014. — Feb. — Vol. 89, issue 4. — P. 042001.
17. *Ackermann M.* [et al.]. The Spectrum of Isotropic Diffuse Gamma-Ray Emission between 100 MeV and 820 GeV // *The Astrophysical Journal*. — 2015. — Vol. 799, no. 1. — P. 86.
18. *Laletin M.* A no-go theorem for the dark matter interpretation of the positron anomaly // *ArXiv e-prints*. — 2016. — July. — arXiv: [1607.02047 \[astro-ph.HE\]](#).
19. *Cirelli M.* [et al.]. Gamma ray constraints on Decaying Dark Matter // *Phys. Rev.* — 2012. — Vol. D86. — P. 083506. — arXiv: [1205.5283 \[astro-ph.CO\]](#).
20. *Ando S., Ishiwata K.* Constraints on decaying dark matter from the extragalactic gamma-ray background // *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. — 2015. — Vol. 2015, no. 05. — P. 024.
21. *Liu W.* [et al.]. Constraints on dark matter annihilation and decay from the isotropic gamma-ray background // *Chinese Physics C*. — 2017. — Apr. — Vol. 41, no. 4. — P. 045104. — arXiv: [1602.01012](#).
22. GALPROP (). — The GALPROP code for cosmic-ray transport and diffuse emission production.

23. *Sjöstrand T., Mrenna S., Skands P.* PYTHIA 6.4 physics and manual // Journal of High Energy Physics. — 2006. — May. — Vol. 5. — P. 026. — eprint: [hep-ph/0603175](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0603175).
24. *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. — Apr. — Vol. 110, issue 14. — P. 141102.
25. *Adriani O.* [et al.]. An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1.5-100 GeV // Nature. — 2009. — Vol. 458. — P. 607–609. — arXiv: [0810.4995](https://arxiv.org/abs/0810.4995) [[astro-ph](#)].
26. *Aguilar M.* [et al.]. Towards Understanding the Origin of Cosmic-Ray Electrons // Phys. Rev. Lett. — 2019. — Mar. — Vol. 122, no. 10. — P. 101101.
27. *Mertsch P., Sarkar S.* AMS-02 data confront acceleration of cosmic ray secondaries in nearby sources // Phys. Rev. D. — 2014. — Sept. — Vol. 90, issue 6. — P. 061301.
28. *Kohri K.* [et al.]. Can we explain AMS-02 antiproton and positron excesses simultaneously by nearby supernovae without pulsars or dark matter? // Progress of Theoretical and Experimental Physics. — 2016. — Vol. 2016, no. 2. — 021E01. — eprint: [/oup/backfile/content_public/journal/ptep/2016/2/10.1093_ptep_ptv193/4/ptv193.pdf](https://arxiv.org/abs/1602.02101).
29. *Kachelrieß M., Neronov A., Semikoz D. V.* Cosmic ray signatures of a 2–3 Myr old local supernova // Phys. Rev. — 2018. — Vol. D97, no. 6. — P. 063011. — arXiv: [1710.02321](https://arxiv.org/abs/1710.02321) [[astro-ph.HE](#)].
30. *Wang B.* [et al.]. Explanations of the DAMPE high energy electron/positron spectrum in the dark matter annihilation and pulsar scenarios // Sci. China Phys. Mech. Astron. — 2018. — Vol. 61, no. 10. — P. 101004.
31. *Hooper D.* [et al.]. HAWC Observations Strongly Favor Pulsar Interpretations of the Cosmic-Ray Positron Excess // Phys. Rev. — 2017. — Vol. D96, no. 10. — P. 103013. — arXiv: [1702.08436](https://arxiv.org/abs/1702.08436) [[astro-ph.HE](#)].

32. *Profumo S.* [et al.]. Lessons from HAWC pulsar wind nebulae observations: The diffusion constant is not a constant; pulsars remain the likeliest sources of the anomalous positron fraction; cosmic rays are trapped for long periods of time in pockets of inefficient diffusion // *Phys. Rev.* — 2018. — Vol. D97, no. 12. — P. 123008. — arXiv: [1803.09731 \[astro-ph.HE\]](#).
33. *Wang B.-B.* [et al.]. Explanations of the DAMPE high energy electron/positron spectrum in the dark matter annihilation and pulsar scenarios. — 2017. — arXiv: [1707.05664 \[astro-ph.HE\]](#).
34. *Chen C.-H., Chiang C.-W., Nomura T.* Explaining the DAMPE e^+e^- excess using the Higgs triplet model with a vector dark matter // *Phys. Rev.* — 2018. — Vol. D97, no. 6. — P. 061302. — arXiv: [1712.00793 \[hep-ph\]](#).
35. *Li T., Okada N., Shafi Q.* Scalar dark matter, Type II Seesaw and the DAMPE cosmic ray $e^+ + e^-$ excess // *Phys. Lett.* — 2018. — Vol. B779. — P. 130–135. — arXiv: [1712.00869 \[hep-ph\]](#).
36. *Cao J.* [et al.]. Scalar dark matter explanation of the DAMPE data in the minimal Left-Right symmetric model // *Phys. Rev.* — 2018. — Vol. D97, no. 6. — P. 063016. — arXiv: [1712.05351 \[hep-ph\]](#).
37. *Gao Y., Ma Y.-Z.* Implications of dark matter cascade decay from DAMPE, HESS, Fermi-LAT and AMS02 data. — 2017. — arXiv: [1712.00370 \[astro-ph.HE\]](#).
38. *Li T., Okada N., Shafi Q.* Type II seesaw mechanism with scalar dark matter in light of AMS-02, DAMPE, and Fermi-LAT data // *Phys. Rev.* — 2018. — Vol. D98, no. 5. — P. 055002. — arXiv: [1804.09835 \[hep-ph\]](#).
39. *Liu X., Liu Z., Su Y.* Two-mediator dark matter models and cosmic electron excess. — 2019. — arXiv: [1902.04916 \[hep-ph\]](#).
40. *Feng L.* [et al.]. Interpretation of the cosmic ray positron and electron excesses with an annihilation-decay dark matter scenario. — 2019. — arXiv: [1902.09235 \[hep-ph\]](#).

41. *Bai Y., Berger J., Lu S.* Supersymmetric Resonant Dark Matter: a Thermal Model for the AMS-02 Positron Excess // *Phys. Rev.* — 2018. — Vol. D97, no. 11. — P. 115012. — arXiv: [1706.09974 \[hep-ph\]](#).
42. *Xiang Q.-F.* [et al.]. A dark matter model that reconciles tensions between the cosmic-ray $e^\pm$ excess and the gamma-ray and CMB constraints // *Phys. Lett.* — 2017. — Vol. B773. — P. 448–454. — arXiv: [1707.09313 \[astro-ph.HE\]](#).
43. *Yang F., Su M., Zhao Y.* Dark Matter Annihilation from Nearby Ultra-compact Micro Halos to Explain the Tentative Excess at 1.4 TeV in DAMPE data. — 2017. — arXiv: [1712.01724 \[astro-ph.HE\]](#).
44. *Kopp J.* Constraints on dark matter annihilation from AMS-02 results // *Phys. Rev.* — 2013. — Vol. D88. — P. 076013. — arXiv: [1304.1184 \[hep-ph\]](#).
45. *Ibarra A., Lamperstorfer A. S., Silk J.* Dark matter annihilations and decays after the AMS-02 positron measurements // *Phys. Rev.* — 2014. — Vol. D89, no. 6. — P. 063539. — arXiv: [1309.2570 \[hep-ph\]](#).
46. *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 \[hep-ph\]](#).