

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
ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ «ТЁМНОГО ДИСКА» К
РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТА DAMPE

Научные руководители

_____ М. Л. Соловьёв

_____ К. М. Белоцкий

Выполнила

_____ М. А. Рахимова

Москва 2020

Содержание

1	Введение	2
2	Эксперимент DAMPE	2
3	Описание используемых вычислительных средств	3
4	Модель	4
5	Результаты	8
5.1	Сравнение спектров e^+e^- и γ -излучения для моделей гало и «тёмного диска»	8
5.2	Зависимость χ^2 от полутолщины диска	9
6	Заключение	12
	Список используемых источников	12

1 Введение

Многие модели скрытой массы (тёмной материи) (ТМ) используются также для попыток объяснения проблем в астрофизике. Избыток частиц в космических лучах (КЛ) — наиболее яркий пример. Так называемая позитронная аномалия очень часто описывается с помощью ТМ. Недавние результаты эксперимента DAMPE [1] также указывают на возможный избыток, который часто объясняется с помощью ТМ. Однако излучение конечного состояния (FSR) в процессе распада или аннигиляции частиц ТМ может привести к противоречию между ожидаемым потоком гамма-излучения от ТМ и изотропным фоном гамма-излучения (IGRB).

Было показано [2], что простые модели гало нестабильной ТМ, описывающие избыток в потоках электронов и позитронов в КЛ, приводят к перепроизводству гамма-излучения и противоречию с наблюдаемыми данными по IGRB. В данной работе рассматривается возможность устранения данного противоречия с помощью модели «тёмного диска».

2 Эксперимент DAMPE

DAMPE (DArk Matter Particle Explorer) – китайский спутниковый эксперимент, запущенный на солнечно-синхронную орбиту в декабре 2015 года. Основные цели – поиск ТМ с помощью измерения потоков высокоэнергетических электронов и фотонов, исследование источников КЛ с помощью измерения потоков высокоэнергетических ионов, исследование механизмов распространения и ускорения КЛ с помощью измерения потоков высокоэнергетических фотонов.

В 2017 году были опубликованы первые результаты [1], представляющие собой потоки e^+e^- и вызвавшие настоящий ажиотаж в научном сообществе. Основной темой статей стал излом – изменение показателя в степенной зависимости потока от энергии. Однако, кроме этого полученные данные имеют еще одну особенность – выпадающую из общей последовательности точку на энергии около 1.4 ТэВ. Несмотря на отклонение, не превышающее трех сигм, появилось много работ, объясняющих эту точку сигналом от ТМ [3–8].

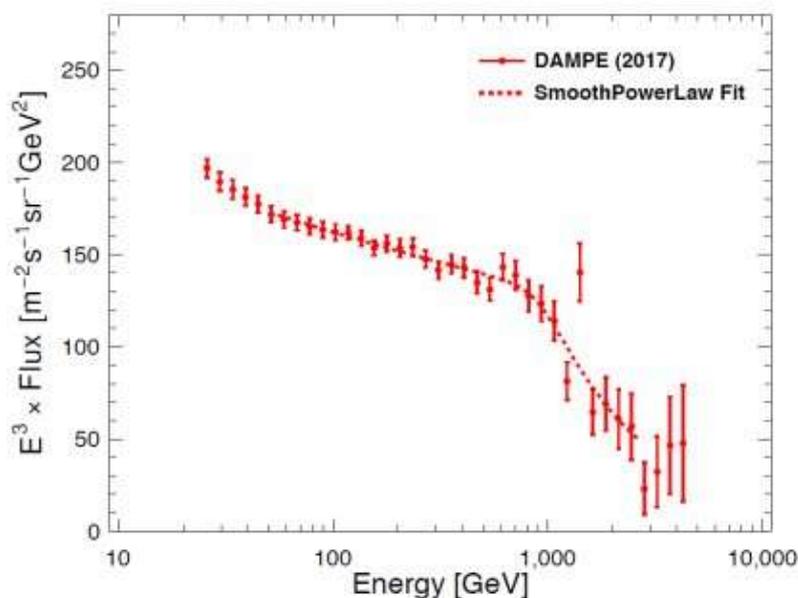


Рисунок 1 – Спектр e^+e^- , полученный экспериментом DAMPE

Существуют работы, видящие в результатах DAMPE не узкий пик, а широкий избыток электронов и позитронов от энергий в десяток ГэВ до нескольких ТэВ. Наиболее популярное объяснение этого избытка – сигнал от ТМ [9–14], однако также есть работы, рассматривающие результаты DAMPE в рамках моделей КЛ от пульсаров [10; 14].

В работе [2] было показано, что применение модели гало нестабильной ТМ к объяснению результатов DAMPE приводит к противоречиям с наблюдаемыми данными по IGRB. Поэтому было принято решение провести анализ с применением модели «тёмного диска».

3 Описание используемых вычислительных средств

Для моделирования КЛ от ТМ на кафедре используются программы GALPROP, Pythia и Wolfram Mathematica.

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. Для работы с ТМ, на кафедре была произведена модифи-

кация, позволяющая использовать различные спектры инъекции и профили плотности ТМ.

Pythia — Монте-Карло генератор, с помощью которого генерируются спектры инъекции — распределение по энергиям числа образовавшихся позитронов в одном акте аннигиляции.

Wolfram Mathematica — математический пакет, используемый как переходник между первыми двумя программами, а также непосредственно для анализа результатов моделирования. В этом семестре моя работа заключалась в обработке результатов в Математике, в дальнейшем планируется освоение остальных вычислительных средств.

4 Модель

Основной проблемой в использовании ТМ для объяснения избытка частиц в КЛ является создаваемое в процессе распада/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.

На кафедре разрабатывается модель, призванная избежать данного противоречия. Это достигается за счет предположения о существовании стабильной и нестабильной компонент ТМ; первая составляет большую часть ТМ и образует гало, тогда как вторая, малая часть ТМ, распадается или аннигилирует с образованием электронов и позитронов и образует диск вокруг Галактического диска. Магнитный диск препятствует проникновению заряженных частиц извне, не позволяя им достичь Земли, тогда как для гамма-квантов такой проблемы нет. Таким образом, концентрация нестабильной компоненты в диск позволяет отсечь области, не дающие вклад в потоки электронов и позитронов, производящие при этом гамма-излучение. Данная модель получила название модель «темного диска».

Механизм образования подобного диска является отдельной задачей, в данной работе его существование постулируется. Однако, существуют работы, предсказывающие формирование диска ТМ [15–17], причем даже в случае

стабильной ТМ.

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 результатам, случай распада слабо отличается от случая аннигиляции частиц с вдвое меньшей массой, так что в дальнейшем мы будем рассматривать только случай аннигиляции.

Таким образом, в классической модели «темного диска» рассматриваются следующие каналы аннигиляции:

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

где X — частица ТМ, e, μ, τ — электрон (позитрон), мю- и тау-лептон соответственно. Усредненное по скоростям сечение $\langle\sigma v\rangle$, а также брэнчинги каналов являются параметрами модели, которые находятся в процессе дальнейшего анализа.

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, brems). 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 потока e^+e^- .

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:

$$\Phi_{prompt}(E_\gamma) = \left(\frac{dN_\gamma^e}{dE_\gamma} Br^e + \frac{dN_\gamma^\mu}{dE_\gamma} Br^\mu + \frac{dN_\gamma^\tau}{dE_\gamma} Br^\tau \right) \frac{\langle \sigma v \rangle}{4} \times \frac{1}{\Delta\Omega} \int_0^{100 \text{ kpc}} \int_{20^\circ}^{90^\circ} \int_0^{2\pi} \frac{1}{4\pi r^2} \left(\frac{\rho}{M_X} \right)^2 r^2 \cos(\theta) dr d\theta d\phi, \quad (1)$$

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 (в данной работе $M_X = 1800$ ГэВ). Так как данные IGRB, с которыми сравниваются предсказания модели, представляют собой 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.

В данной работе было рассмотрено два профиля плотности ТМ:

1. профиль Рида:

$$\rho(R, z) = \rho_0 e^{-\frac{R}{R_c}} e^{-\frac{|z|}{z_c}}, \quad (2)$$

где R и z — цилиндрические галактические координаты, $R_c = 7$ кпк, z_c — полутолщина диска, а ρ_0 — константа, получаемая из условия $\rho_{loc} \equiv \rho(r_\odot = 8.5 \text{ кпк}) = 0.39 \text{ ГэВ/см}^3$

2. профиль Наварро-Фрэнк-Уайта (NFW):

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{\frac{r}{R_s} \left(1 + \frac{r}{R_s}\right)^2}, \quad (3)$$

где $\rho_0 = 0.25 \text{ ГэВ/см}^3$, отвечающее локальной плотности ТМ 0.39 ГэВ/см^3 , а $R_s = 24$ кпк.

Далее составляется параметризованное выражение для χ^2 и вычисляется соответствующее количество степеней свободы (*d.o.f*):

$$\chi^2 = \sum_{DAMPE} \frac{(\Delta\Phi_e)^2}{\sigma_e^2} + \sum_{Fermi} \frac{(\Delta\Phi_\gamma)^2}{\sigma_\gamma^2} \Theta(\Delta\Phi_\gamma), \quad (4)$$

где $\Delta\Phi$ — разность между экспериментальными данными и предсказаниями модели, σ — погрешности экспериментальных данных. Первая сумма соответствует данным DAMPE — потоку e^+e^- . Суммирование происходит для экспериментальных точек с энергией в 20 ГэВ и выше. 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.

Выражение (4) минимизируется с помощью встроенного функционала математического пакета Wolfram Mathematica. Результатом данной операции является найденное минимальное значение приведенного хи-квадрата $\frac{\chi^2}{d.o.f}$, а также значения параметров $\{\langle\sigma v\rangle, Br_i\}$, при котором оно достигается.

Для анализа используются данные DAMPE в диапазоне энергий от 20 до 1600 ГэВ.

Анализ проводился по двум алгоритмам: фитирование только данных по потокам электронов и позитронов и одновременное фитирование этих данных с данными IGRB. В первом случае, называемом нами «е-фит», минимизируется χ_e^2 — вклад электронов и позитронов в хи-квадрат, а затем, при найденных параметрах, вычисляется общий χ^2 с учетом вклада от гамма-излучения. Во втором случае минимизируется сразу общий χ^2 .

В качестве фона электронов и позитронов был взят более близкий к данным DAMPE фон из статьи [14], являющийся бест-фитной моделью фона на основе различных данных о КЛ.

5 Результаты

5.1 Сравнение спектров e^+e^- и γ -излучения для моделей гало и «тёмного диска»

На рисунке 2 представлены полученные спектры для диска с полутолщиной $z_c = 0.4$ кпк. Левые представляют собой зависимость умноженного на куб энергии потока электронов и позитронов от энергии, правые – умноженного на квадрат энергии потока гамма-излучения от энергии.

На спектрах позитронов и электронов: черным цветом обозначен фон, красным – предсказание модели (сигнал плюс фон). На спектрах 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.

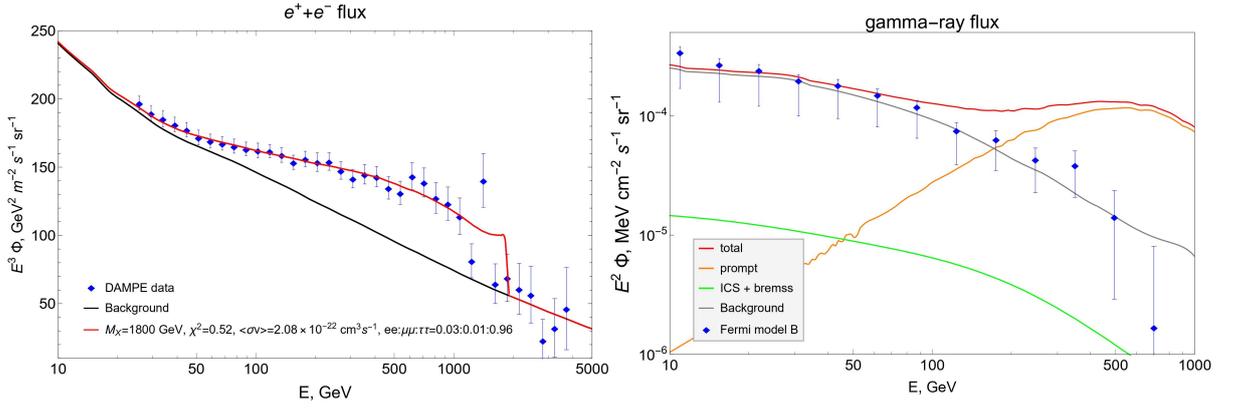
Выбранный фон для потоков электронов и позитронов совпадает с измерениями на энергиях порядка 2 ТэВ и выше. Вследствие этого для анализа используются данные в области энергий от 20 ГэВ до 1.6 ТэВ.

На рисунке 3 представлены графики тех же самых зависимостей, но полученные с применением модели гало нестабильной ТМ, взятые из работы [2].

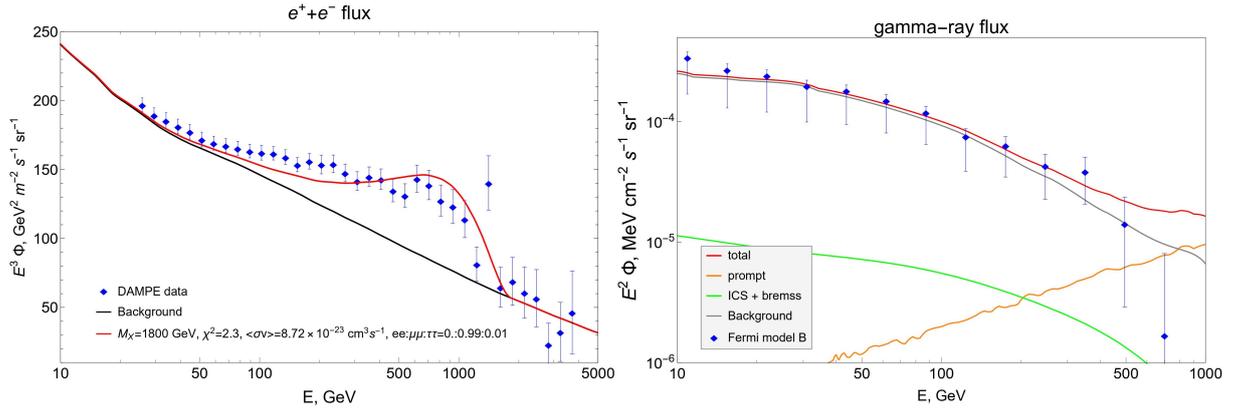
Как чётко видно из графиков, применение модели «тёмного диска» помогает избежать такого сильного превышения гамма-излучения над наблюдениями за счет первичного излучения на высоких энергиях при описании позитронов, как в случае гало.

В таблице 1 представлены полученные значения χ^2 и χ_e^2 . Заметно, что модель «тёмного диска» позволяет добиться той же точности описания позитронов, как и модель гало, давая при этом меньшее противоречие с IGRB. В обоих случаях использование комбинированного фита позволяет улучшить качество фита, однако недостаточно для преодоления противоречия.

Достаточно слабая разница результатов, даваемых моделями гало и диска с полутолщиной $z_c = 0.4$ кпк стала причиной для проведения анализа для различных значений полутолщины диска.



(a) В случае «е-фита»



(b) В случае комбинированного фита

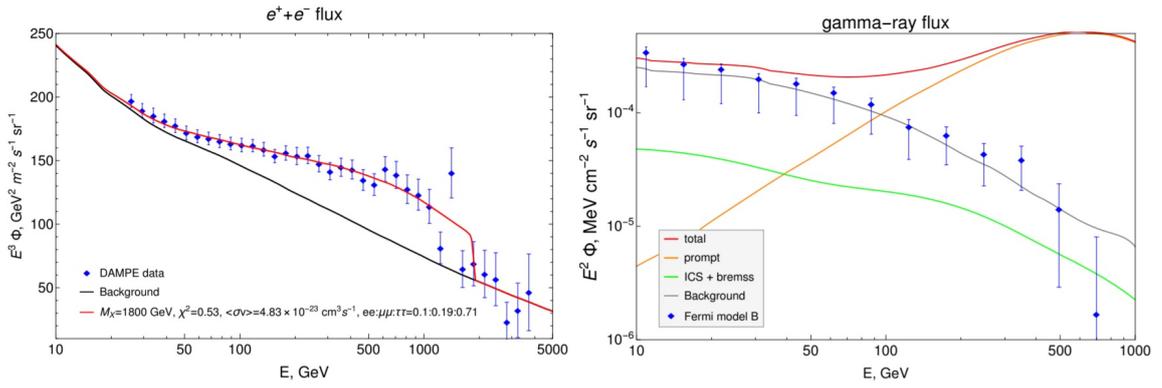
Рисунок 2 – Модель «тёмного диска». *Левые:* поток e^+e^- для прямой аннигиляции в сравнении с данными DAMPE. *Правые:* соответствующий суммарный поток диффузного гамма-излучения (красная кривая) в сравнении с данными Fermi-LAT по IGRB.

Фит Модель	Гало	Диск
«е-фит»	203 (0.53)	17.85 (0.52)
комбинированный фит	3.8 (2.1)	2.3 (2.4)

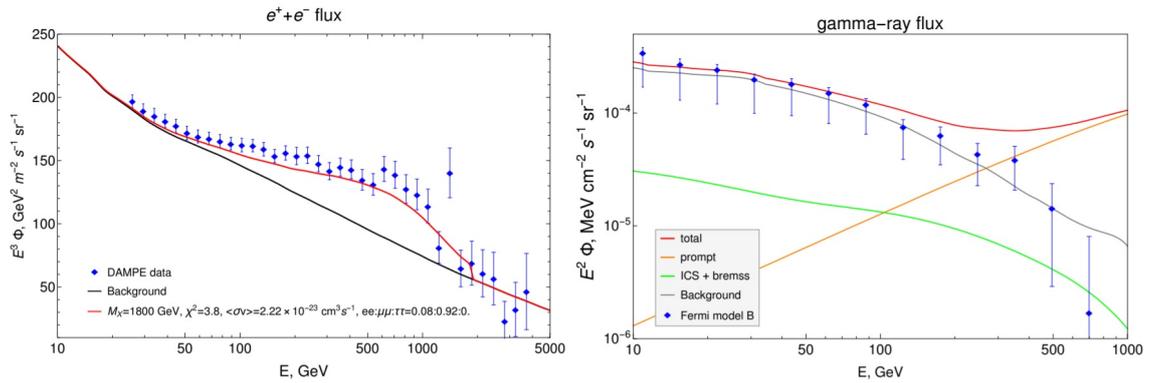
Таблица 1: Наименьшие значения χ^2 для различных моделей ТМ и алгоритмов анализа. В скобках даны соответствующие значения χ_e^2

5.2 Зависимость χ^2 от полутолщины диска

Данный анализ был проведен для различных значений полутолщины диска от 400 до 3200 пк. На рисунке 4 приведены графики зависимости приведенного χ^2 от полутолщины диска в случае «е-фита»(4а) и комбинированного



(a) В случае «е-фита»

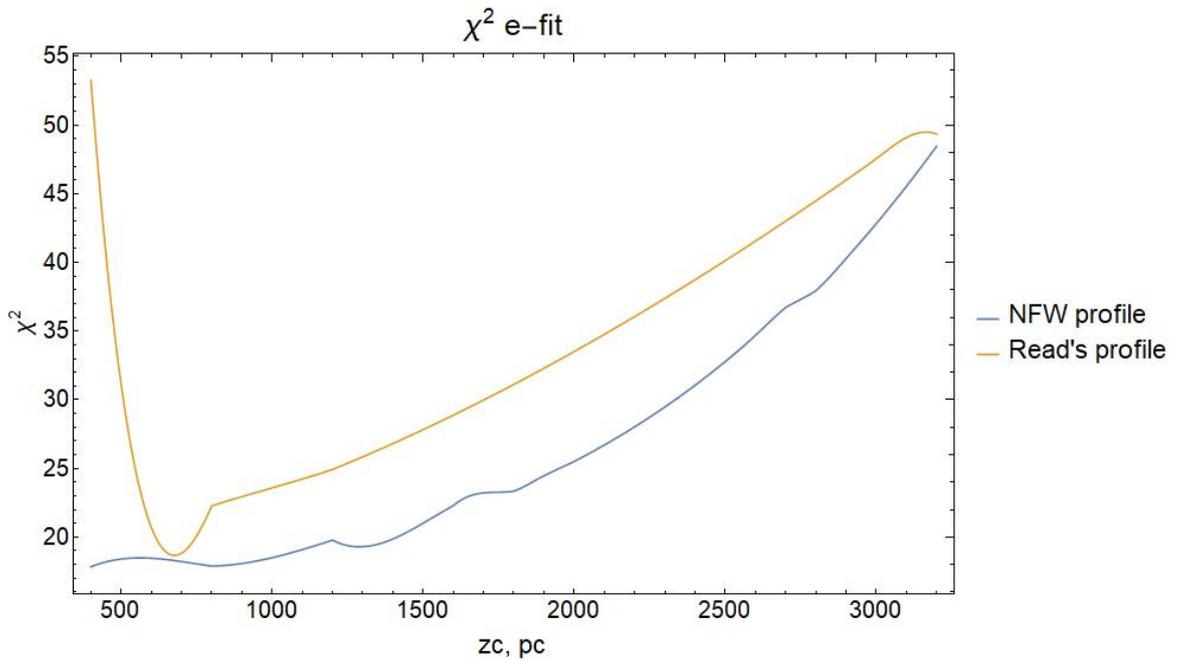


(b) В случае комбинированного фита

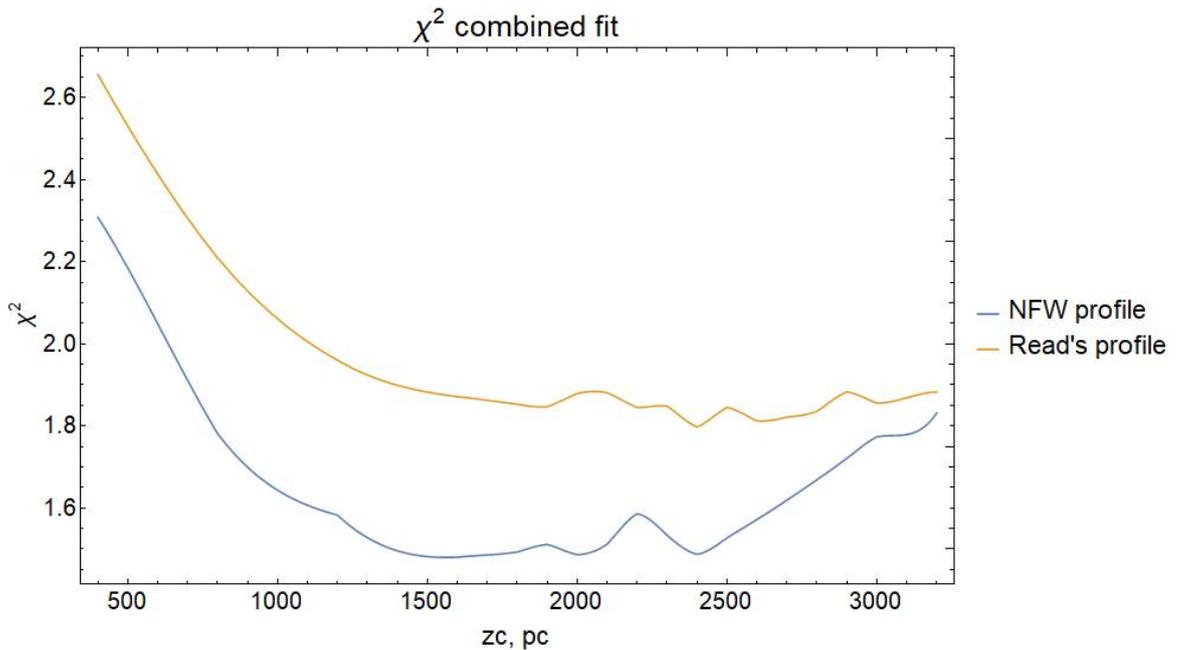
Рисунок 3 – *Модель гало*. *Левые*: поток e^+e^- для прямой аннигиляции в сравнении с данными DAMPE. *Правые*: соответствующий суммарный поток диффузного гамма-излучения (красная кривая) в сравнении с данными Fermi-LAT по IGRB.

фита(4b). Голубым цветом показана зависимость, полученная с использованием профиля плотности NFW, а оранжевым — с использованием профиля Рида.

Как видно из полученных графиков, профиль NFW дает лучшие результаты. Это объясняется тем, что позитроны низких энергий приходят с расстояния около пары кпк, а позитроны высоких энергий - с еще меньших. Так как и профиль NFW, и профиль Рида нормированы на локальную плотность ТМ, а в малой окрестности Земли она практически одинакова, поэтому и позитронов высоких энергий примерно одинаковое количество. Расхождения начинаются при рассмотрении позитронов низких энергий. Профиль Рида спадает по осям r и z по экспоненте, а профиль NFW — сферически сим-



(a) В случае «е-фита»



(b) В случае комбинированного фита

Рисунок 4 – Графики зависимостей приведенного χ^2 от полутолщины диска метричный и спадает медленнее, и соответственно дает больше позитронов низких энергий. Поэтому профилем NFW «легче» описать многочисленные данные DAMPE на низких энергиях, имеющие малые погрешности, которые довольно сильно влияют на χ^2 .

Скачки значения χ^2 в районе 2000 пк при комбинированном фите связаны со скачками количества степеней свободы.

Как видно из графиков, оптимальным значением полутолщины диска оказалось $z_c \approx 1.6$ кпк. Приведенный хи-квадрат составляет порядка единицы.

6 Заключение

В данной работе рассматривалась модель ТМ с активной дисковой компонентой для объяснения результатов эксперимента DAMPE по измерению потоков e^+e^- в КЛ. Было показано, что по сравнению с моделью гало модель «тёмного диска» позволяет значительно уменьшить противоречия с данными по IGRB при описании экспериментальных данных, результаты моделирования можно считать удовлетворительными.

В дальнейшем планируется добавление кварковой моды аннигиляции и соответственно рассмотрение потоков антипротонов, а также добавление данных по гамма-излучению из Галактического Центра.

Список используемых источников

1. *Ambrosi G.* [et al.]. Direct detection of a break in the teraelectronvolt cosmic-ray spectrum of electrons and positrons // *Nature*. — 2017. — Vol. 552. — P. 63–66. — arXiv: [1711.10981 \[astro-ph.HE\]](#).
2. *Belotsky K.* [et al.]. The DAMPE excess and gamma-ray constraints // *Phys. Dark Univ.* — 2019. — Vol. 26. — P. 100333. — arXiv: [1904.02456 \[astro-ph.HE\]](#).
3. *Li T., Okada N., Shafr Q.* Scalar dark matter, Type II Seesaw and the DAMPE cosmic ray $e^+ + e^-$ excess // *Phys. Lett. B*. — 2018. — Vol. 779. — P. 130–135. — arXiv: [1712.00869 \[hep-ph\]](#).
4. *Cao J.* [et al.]. Scalar dark matter explanation of the DAMPE data in the minimal Left-Right symmetric model // *Phys. Rev. D*. — 2018. — Vol. 97, no. 6. — P. 063016. — arXiv: [1712.05351 \[hep-ph\]](#).
5. *Fan Y.-Z.* [et al.]. A model explaining neutrino masses and the DAMPE cosmic ray electron excess // *Phys. Lett. B*. — 2018. — Vol. 781. — P. 83–87. — arXiv: [1711.10995 \[hep-ph\]](#).

6. *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. D. — 2018. — Vol. 97, no. 6. — P. 061302. — arXiv: [1712.00793 \[hep-ph\]](#).
7. *Ding R.* [et al.]. Confronting the DAMPE Excess with the Scotogenic Type-II Seesaw Model // Chin. Phys. C. — 2018. — Vol. 42, no. 8. — P. 083104. — arXiv: [1712.02021 \[hep-ph\]](#).
8. *Liu G.-L.* [et al.]. Explaining DAMPE results by dark matter with hierarchical lepton-specific Yukawa interactions // Chin. Phys. C. — 2018. — Vol. 42, no. 3. — P. 035101. — arXiv: [1712.02381 \[hep-ph\]](#).
9. *Wang B.* [et al.]. Explanations of the DAMPE high energy electron/positron spectrum in the dark matter annihilation and pulsar scenarios // China Phys. Mech. Astron. — 2018. — Vol. 61, no. 10. — P. 101004.
10. *Wang B.-B.* [et al.]. Explanations of the DAMPE high energy electron/positron spectrum in the dark matter annihilation and pulsar scenarios. — 2017. — July. — arXiv: [1707.05664 \[astro-ph.HE\]](#).
11. *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. D. — 2018. — Vol. 98, no. 5. — P. 055002. — arXiv: [1804.09835 \[hep-ph\]](#).
12. *Jin H.-B.* [et al.]. Dark matter explanation of the cosmic ray e^+e^- spectrum excess and peak feature observed by the DAMPE experiment // Phys. Rev. D. — 2018. — Vol. 98, no. 12. — P. 123008. — arXiv: [1712.00362 \[astro-ph.HE\]](#).
13. *Yuan Q.* [et al.]. Interpretations of the DAMPE electron data. — 2017. — Nov. — arXiv: [1711.10989 \[astro-ph.HE\]](#).
14. *Niu J.-S., Li T., Xu F.-Z.* A Simple and Natural Interpretations of the DAMPE Cosmic Ray Electron/Positron Spectrum within Two Sigma Deviations // Eur. Phys. J. C. — 2019. — Vol. 79, no. 2. — P. 125. — arXiv: [1712.09586 \[hep-ph\]](#).

15. *Alexander S., Bramburger J. J., McDonough E.* Dark Disk Substructure and Superfluid Dark Matter // *Phys. Lett. B.* — 2019. — Vol. 797. — P. 134871. — arXiv: [1901.03694 \[astro-ph.CO\]](#).
16. *Kuhlen M.* [et al.]. The Distribution of Dark Matter in the Milky Way's Disk // *Astrophys. J.* — 2014. — Vol. 784. — P. 161. — arXiv: [1308.1703 \[astro-ph.GA\]](#).
17. *Purcell C. W., Bullock J. S., Kaplinghat M.* The Dark Disk of the Milky Way // *The Astrophysical Journal.* — 2009. — Vol. 703, no. 2. — P. 2275–2284. — arXiv: [0906.5348 \[astro-ph.GA\]](#).