

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
МОДЕЛЬ «ТЁМНОГО ДИСКА» В СВЕТЕ ЭКСПЕРИМЕНТА
DAMPE

Научные руководители _____ М. Л. Соловьёв
_____ К. М. Белоцкий

Выполнила _____ М. А. Рахимова

Москва 2021

Содержание

1	Введение	2
2	Обновление модели	2
3	Результаты	4
3.1	Сравнение случая аннигиляции и распада частицы T_M	4
3.2	Добавление кварковой моды аннигиляции частицы T_M	10
4	Заключение	14
	Список используемых источников	15

1 Введение

Избыток позитронов в космических лучах (КЛ), называемый позитронной аномалией [1], остается необъясненным эффектом. Результаты эксперимента DAMPE [2] также указывают на возможный избыток, который часто объясняется с помощью скрытой массы (ТМ).

Однако попытки объяснения позитронной аномалии сталкиваются с серьезными наблюдательными ограничениями. Для моделей распадающейся или аннигилирующей ТМ основным из таких ограничений являются экспериментальные данные по изотропному фону гамма-излучения (IGRB).

Было показано [3], что простые модели гало нестабильной ТМ, описывающие избыток в потоках электронов и позитронов в КЛ, приводят к переизобилию гамма-излучения и противоречию с наблюдаемыми данными по IGRB [4; 5]. В предыдущей работе рассматривалась возможность устранения данного противоречия с помощью модели «темного диска», которая была признана успешной. В данной работе проводится расширение анализа, включающее в себя добавление кварковой моды аннигиляции и рассмотрение данных по антипротонам, а также сравнение случая аннигиляции и распада частиц ТМ.

2 Обновление модели

В классической модели «темного диска» нестабильная компонента может распадаться или аннигилировать по одному из трех каналов: e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, $\tau^+\tau^-$, где e, μ, τ — электрон (позитрон), мю- и тау-лептон соответственно. Однако в данной работе в рассмотрение добавляется канал распада/аннигиляции на кварк-антикварковую пару.

Параметрами рассматриваемой модели помимо массы частицы ТМ M_χ являются полутолщина диска z_c , брэнчинги $Br_i (i = e, \mu, \tau, q; \sum Br_i = 1)$ и скорость аннигиляции/распада, определяющаяся следующим образом:

$$j(\vec{s}) = \begin{cases} \frac{\langle\sigma v\rangle}{4M_x^2} \cdot \rho^2(\vec{s}) & \text{(аннигиляция);} \\ \frac{1}{\tau M_x} \cdot \rho(\vec{s}) & \text{(распад),} \end{cases}$$

где $\langle\sigma v\rangle$ — усредненное по скорости сечение аннигиляции (для Дираковских частиц), τ — среднее время жизни частицы в случае распада, $\rho(\vec{s})$ — плотность ТМ в заданной точке \vec{s} в Галактике.

Было рассмотрено два случая учета данных по антипротонам: фитирование и непревышение экспериментальных данных. Во втором случае выражение в соответствующей сумме домножается на тэта-функцию Хевисайда, зануляющую вклад в хи-квадрат в случае, если предсказания ниже экспериментальных данных. Аналогичное домножение применяется к третьей и четвертой сумме, так как для нашей модели достаточно не превышать данные по гамма-излучению.

- Фитирование данных по антипротонам:

$$\chi^2 = \sum_{DAMPE} \frac{(\Delta\Phi_e)^2}{\sigma_e^2} + \sum_{AMS} \frac{(\Delta\Phi_{\bar{p}})^2}{\sigma_{\bar{p}}^2} + \sum_{Fermi} \frac{(\Delta\Phi_\gamma)^2}{\sigma_\gamma^2} \Theta(\Delta\Phi_\gamma) + \sum_{GC} \frac{(\Delta\Phi_\gamma)^2}{\sigma_\gamma^2} \Theta(\Delta\Phi_\gamma) \quad (1)$$

- Непревышение данных по антипротонам:

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

здесь $\Delta\Phi$ — 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 AMS-02 — доле антипротонов по сравнению с протонами

[6]. Суммирование происходит для экспериментальных точек с энергией от 12 ГэВ. Третья сумма соответствует данным Fermi-LAT по IGRB (модель B) [7]. Четвёртая сумма – данным Fermi-LAT по гамма-излучению из Галактического Центра (ГЦ) [8].

При проведении сравнения случая аннигиляции и распада в секции 3.1 данные по антипротонам не учитываются, поэтому не рассматривается Br_q , а также в выражении для χ^2 отсутствует второе слагаемое.

Анализ проводился по двум алгоритмам: фитирование только данных по потокам e^+e^- и доле антипротонов по сравнению с протонами, а также одновременное фитирование этих данных с данными IGRB и гамма-излучения из ГЦ. В первом случае, называемом нами «е-фит», минимизируются χ_e^2 — вклад e^+e^- в хи-квадрат и χ_p^2 — вклад доли антипротонов, а затем, при найденных параметрах, вычисляется общий χ^2 с учетом вклада от гамма-излучения. Во втором случае минимизируется сразу общий χ^2 .

3 Результаты

3.1 Сравнение случая аннигиляции и распада частицы ТМ

В анализе гамма-излучения из ГЦ коллаборации Fermi-LAT [8] приводится 12 различных моделей, не учитывающих ТМ, которые довольно сильно различаются между собой. Для данной работы представляет интерес "необъясненный остаток" этих моделей. Для анализа была выбрана модель с минимальным остатком, накладывающая самые сильные ограничения. В качестве второй модели были использованы данные по всему потоку гамма-излучения из ГЦ без вычетов Fermi-LAT.

Ранее было показано, что аннигиляция и распад дают сравнимые результаты, однако сравнение проводилось без учета данных по гамма-излучению из ГЦ, поэтому было принято решение включить эти данные в рассмотрение.

На рисунке 1 представлена зависимость различных вкладов в приведенный χ^2 от полутолщины диска для профиля плотности NFW [9] с рассмотрением данных по всему потоку гамма-излучения из ГЦ. Сверху — случай

"е-фита", снизу — случай комбинированного фита. Красными линиями показан случай аннигиляции частицы ТМ с массой $M_x=1800$ ГэВ, синими — случай распада частицы ТМ с массой $M_x=3600$ ГэВ. Толстые сплошные линии иллюстрируют полный приведенный χ^2 , сплошные линии — вклад гамма-излучения из ГЦ, пунктирные линии — вклад гамма-излучения и e^+e^- с учётом только их степеней свободы.

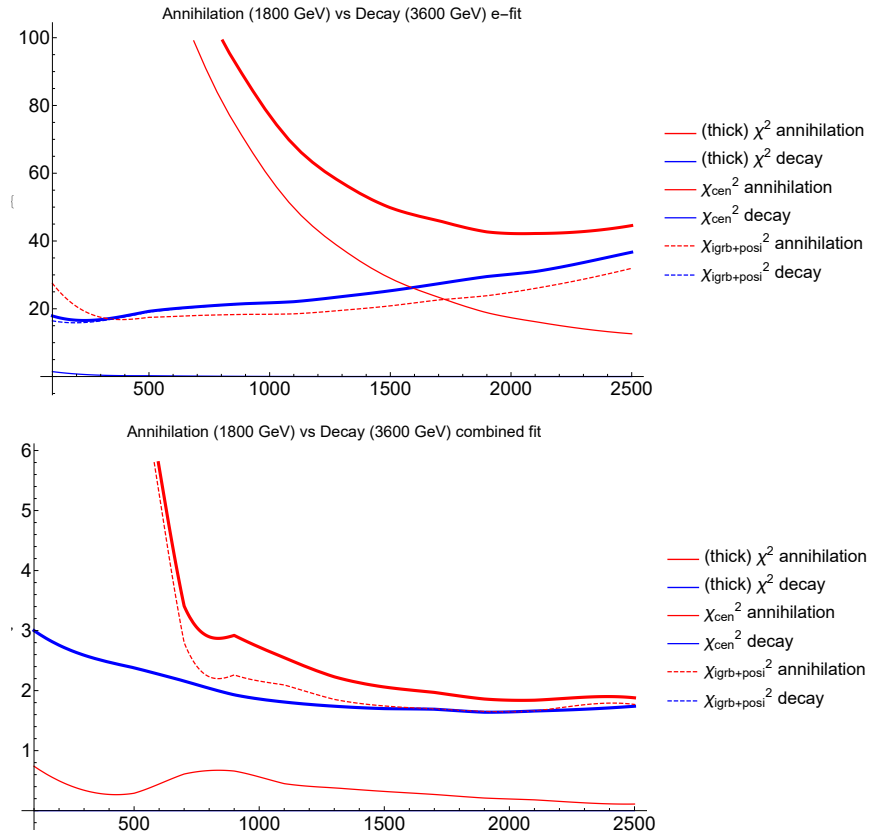


Рисунок 1: Зависимость различных вкладов в приведенный χ^2 от полутолщины диска с использованием данных по всему потоку гамма-излучения из ГЦ для профиля плотности NFW . Сверху — случай "е-фита", снизу — случай комбинированного фита.

Как видно из приведенных графиков, в бест-фитном для аннигиляции случае значения общего χ^2 для двух случаев оказываются близкими.

Для проверки полученного результата были построены аналогичные графики для двух близких к рассмотренному выше значений масс: $M_x=2000$ ГэВ (рисунок 2) и $M_x=1600$ ГэВ (рисунок 3).

Как можно заметить из приведенных графиков, отмеченная тенденция сохраняется и для других значений массы начальной частицы ТМ, поэтому

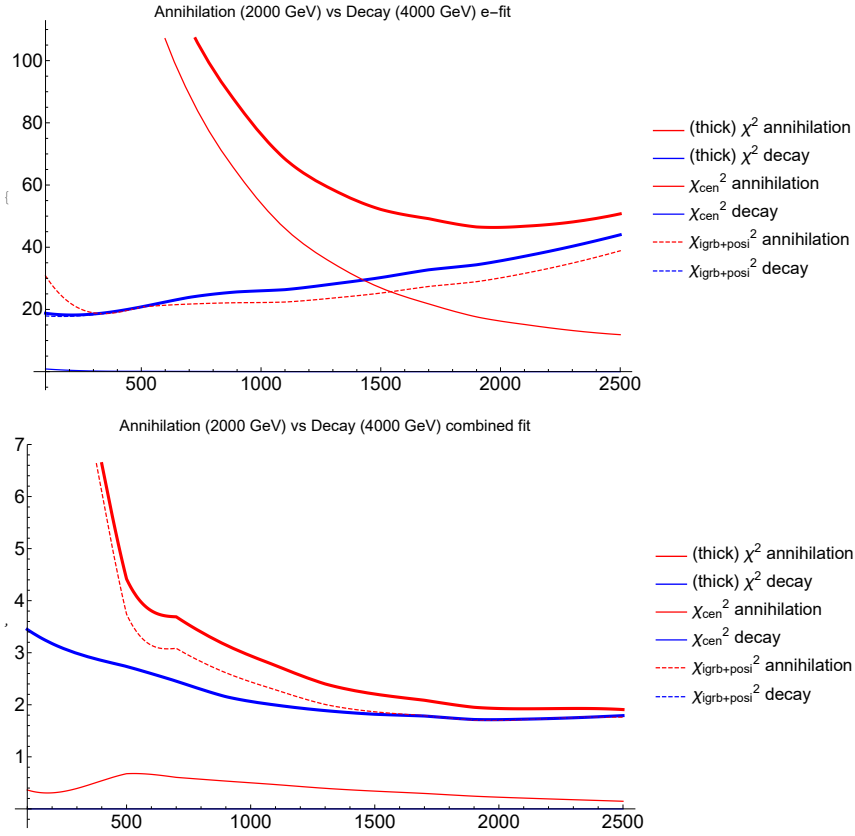


Рисунок 2: Зависимость различных вкладов в приведенный χ^2 от полутолщины диска с использованием данных по всему потоку гамма-излучения из ГЦ для профиля плотности NFW. Сверху — случай "е-фита", снизу — случай комбинированного фита.

в дальнейшем рассматривалось одно значение массы $M_x=2000$ ГэВ.

На рисунке 4 представлены аналогичные графики для модели с минимальным остатком с использованием профиля плотности NFW.

Как можно заметить, в данном случае значения полного χ^2 для аннигиляции и распада довольно сильно различаются. Этот результат обусловлен разницей характеров зависимостей сигнала от аннигиляции и распада от плотности ТМ, а также жёсткими ограничениями, накладываемыми моделью с минимальным остатком.

Затем был проведен идентичный анализ с использованием второго профиля плотности. На рисунке 5 приведена зависимость различных вкладов в приведенный χ^2 от полутолщины диска для профиля плотности Рида [10] с использованием модели с минимальным остатком, а на рисунке 6 — с рассмотрением данных по всему потоку гамма-излучения из ГЦ.

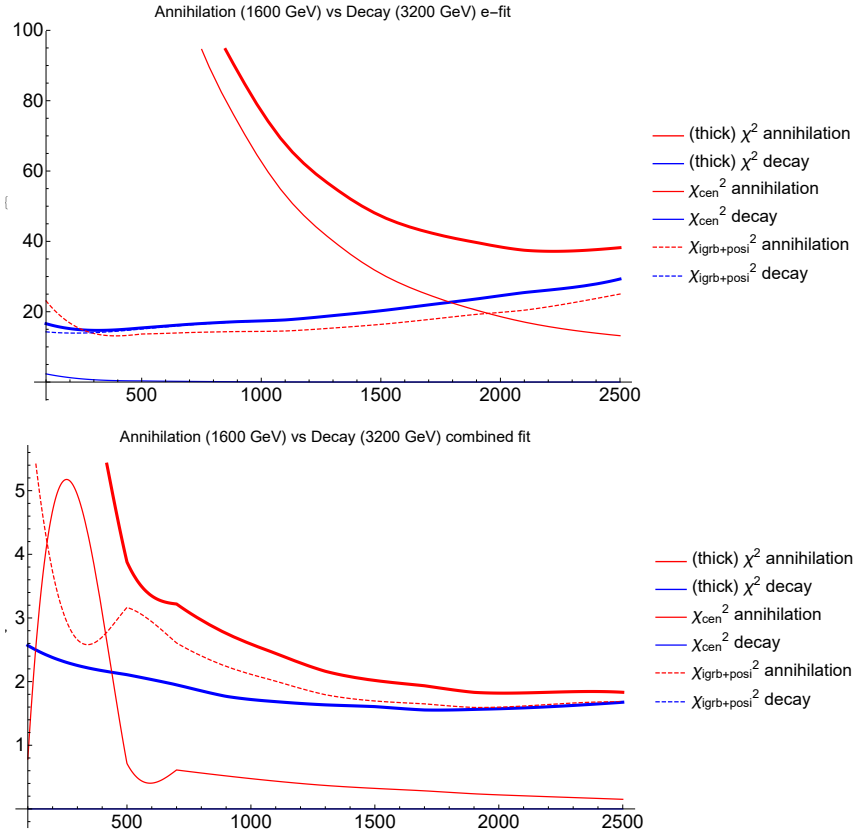


Рисунок 3: Зависимость различных вкладов в приведенный χ^2 от полутолщины диска с использованием данных по всему потоку гамма-излучения из ГЦ для профиля плотности NFW. Сверху — случай "е-фита", снизу — случай комбинированного фита.

Как можно заметить по рисункам 4 и 5, при использовании модели с минимальным остатком профиль Рида помогаете добиться лучших результатов, чем профиль NFW. Это связано с разным поведением этих профилей плотности в нуле. NFW при $r = 0$ имеет расхожимость, а значит производит очень много гамма-излучения в ГЦ. Профиль Рида при $R = 0$ хоть и имеет острый пик, но всё же принимает конечное значение, и соответственно производит меньше гамма-излучения в ГЦ, чем NFW. Учитывая ещё и серьёзные ограничения, накладываемые моделью с минимальным остатком, можем наблюдать совершенно разное поведение χ^2 для двух профилей плотности.

Как четко видно из рисунка 6, при использовании профиля плотности Рида при рассмотрении полного потока полностью подавляется вклад в χ^2 гамма-излучения из ГЦ. Это обусловлено отмеченной выше особенностью поведения профиля Рида в нуле. Однако полный χ^2 в бест-фитном для анни-

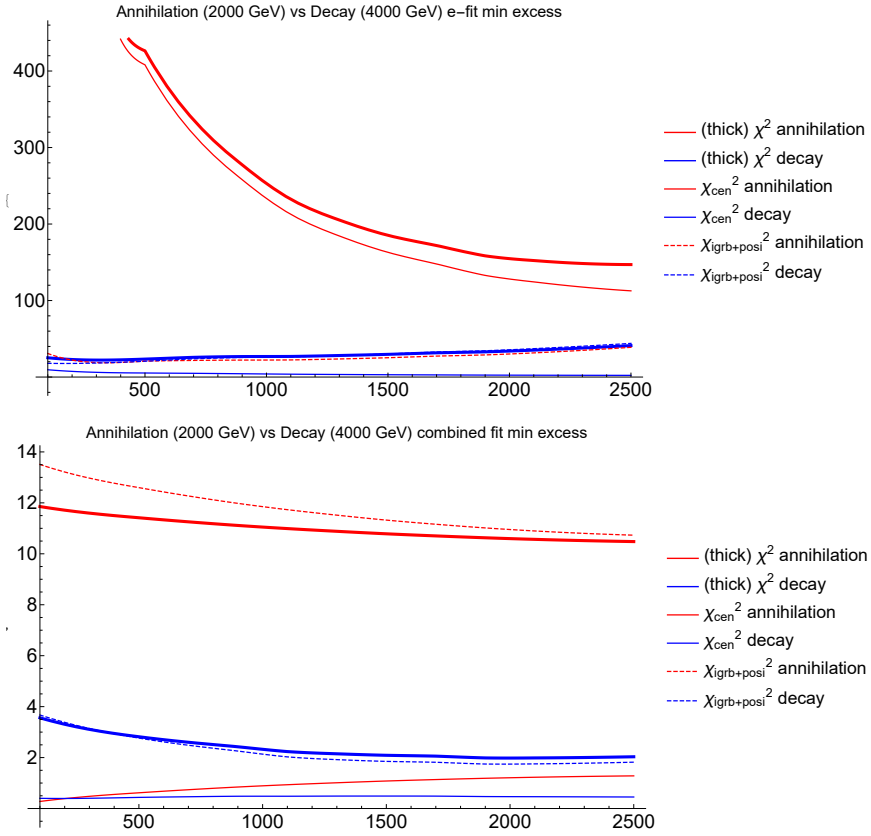


Рисунок 4: Зависимость различных вкладов в приведенный χ^2 от полутолщины диска с использованием модели с минимальным остатком для профиля плотности NFW. Сверху — случай "е-фита", снизу — случай комбинированного фита.

в зависимости от радиуса диска практически совпадает с соответствующим значением χ^2 для распада. Эту же тенденцию для полного χ^2 можно отметить в случае, представленном на 5.

Таким образом из проведенного анализа можно сделать вывод о том, что распад даёт лучшие результаты, но только для самой жёсткой модели остатка и только для "неудачного" для этого набора данных профиля плотности NFW. В остальных же случаях даже с учётом гамма-излучения из ГЦ аннигиляция и распад дают сравнимые результаты.

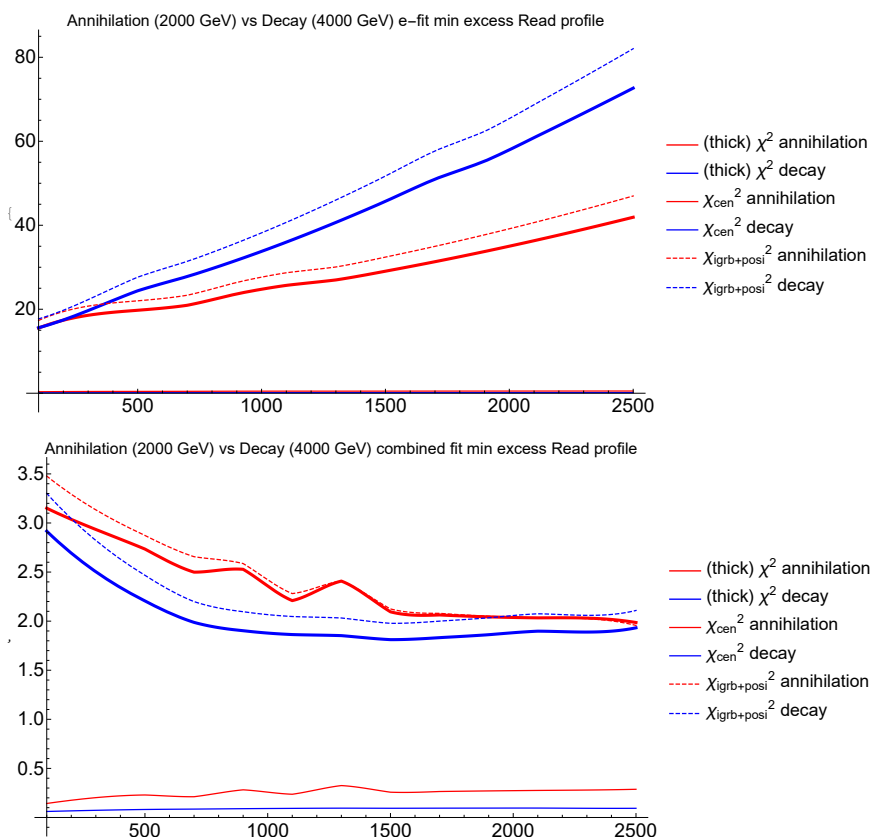


Рисунок 5: Зависимость различных вкладов в приведенный χ^2 от полутолщины диска с использованием модели с минимальным для профиля плотности Рида. Сверху — случай "е-фита", снизу — случай комбинированного фита.

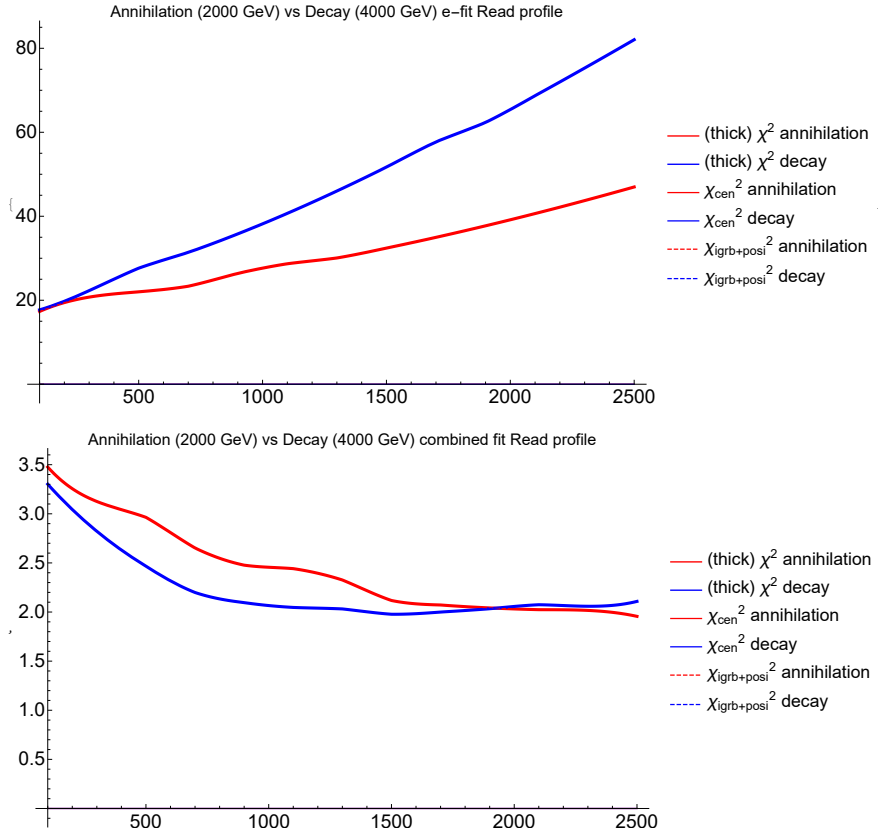


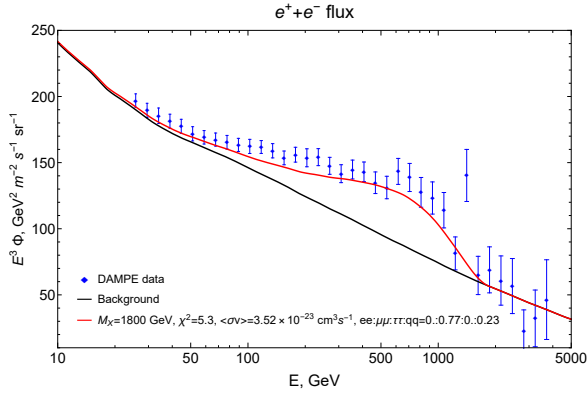
Рисунок 6: Зависимость различных вкладов в приведенный χ^2 от полутолщины диска с использованием данных по всему потоку гамма-излучения из ГЦ для профиля плотности Рида. Сверху — случай "е-фита", снизу — случай комбинированного фита.

3.2 Добавление кварковой моды аннигиляции частицы ТМ

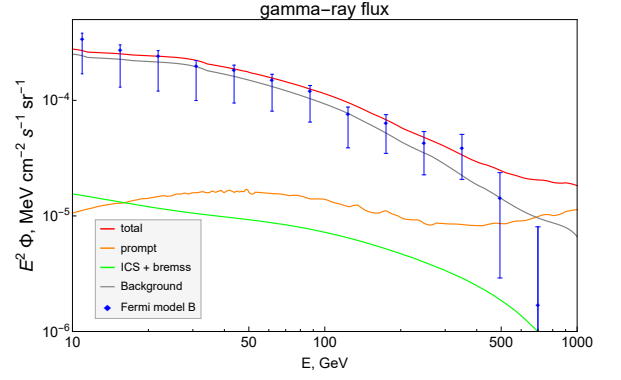
Мотивацией добавления моды аннигиляции на пару $q\bar{q}$ стала возможность описания возможного избытка антипротонов в космических лучах, экспериментальные данные по которому, а также фон были взяты из работ AMS-02. Рассматривалось два варианта конечных кварков: лёгкие ($u\bar{u}$) и тяжёлые ($t\bar{t}$). Масса начальной частицы ТМ $M_x=1800$ ГэВ, полутолщина диска $z_c=1500$ пк аналогично бест-фитному случаю бескварковой модели. Анализ проводился для профиля плотности NFW.

На рисунке 7 представлены спектры e^+e^- , IGRB, гамма-излучения из ГЦ и доли антипротонов с добавлением тяжёлых кварков в конечном состоянии в случае комбинированного фита и фитирования данных по антипротонам.

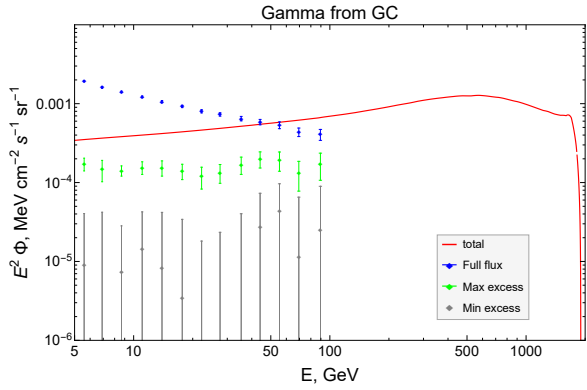
На рисунке 8 представлены аналогичные спектры для случая непревы-



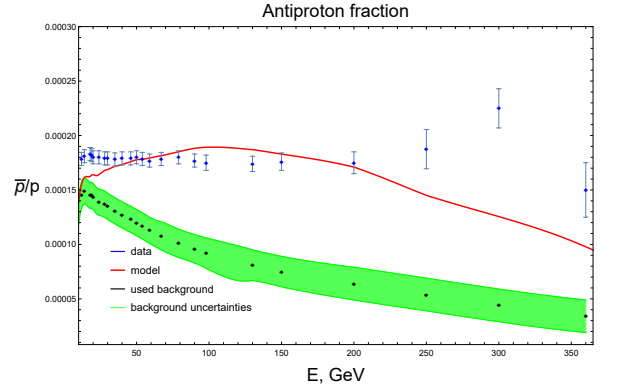
(a)



(b)



(c)



(d)

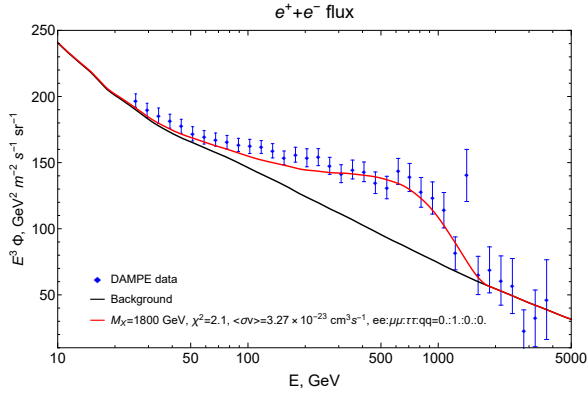
Рисунок 7: Спектры e^+e^- (a), IGRB (b), гамма-излучения из ГЦ (c) и доли антипротонов (d) с добавлением тяжёлых кварков в конечном состоянии. Случай комбинированного фита и фитирования данных по антипротонам

шения данных по антипротонам. В этом случае зануляются все брэнчинги, кроме Br_μ . Природа данного явления на данный момент непонятна и в дальнейшем будет изучаться.

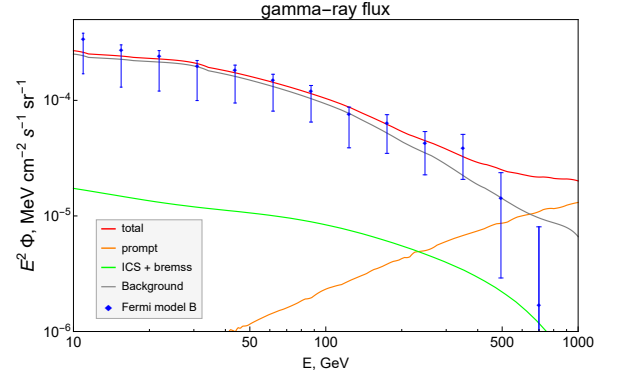
Аналогичные графики были построены для случая с добавлением лёгких кварков в конечном состоянии. На рисунке 9 представлен случай фитирования данных по антипротонам, а на рисунке 10 — случай непревышения.

Как можно заметить по рисунку 10, при добавлении лёгких кварков в случае непревышения данных по \bar{p} также зануляются все брэнчинги, кроме Br_μ .

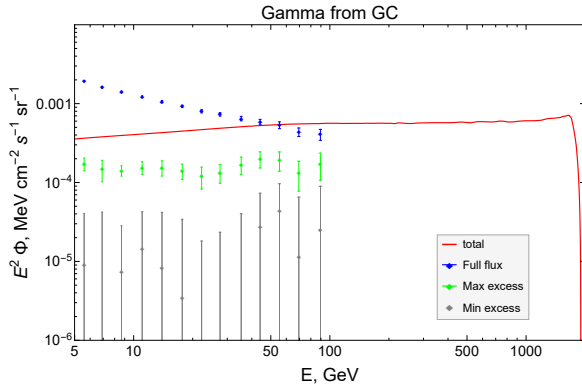
В таблице 1 представлены значения приведённого χ^2 для различных моделей ТМ и алгоритмов описания данных по антипротонам. Как чётко видно из данной таблицы, алгоритм фитирования \bar{p} приводит к ухудшению качества общего фита, в то время как алгоритм непревышения \bar{p} позволяет добить-



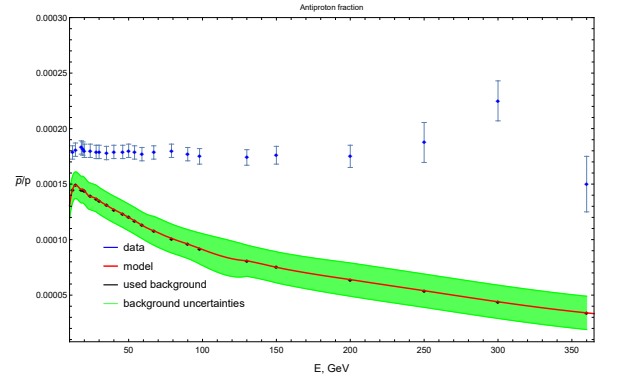
(a)



(b)



(c)

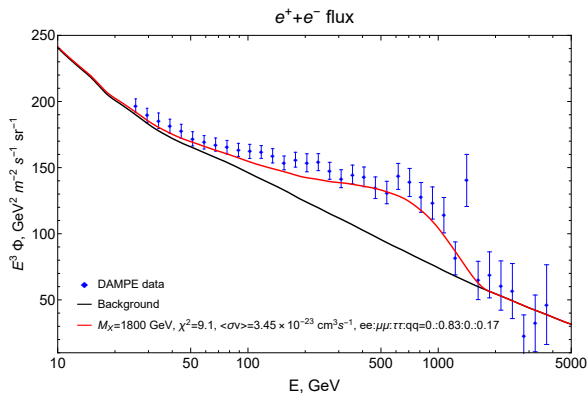


(d)

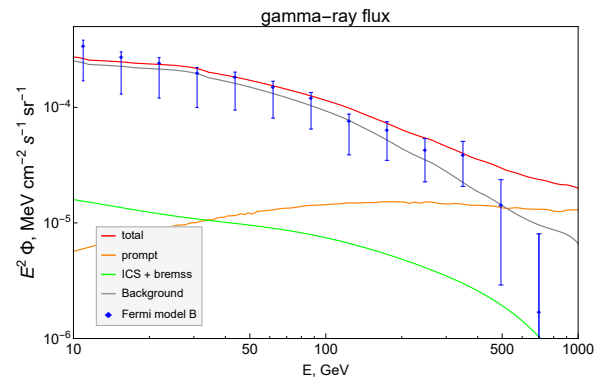
Рисунок 8: Спектры e^+e^- (a), IGRB (b), гамма-излучения из ГЦ (c) и доли антипротонов (d) с добавлением тяжёлых кварков в конечном состоянии. Случай комбинированного фита и непревышения данных по антипротонам сравнимой с бескварковой моделью точности, но ценой нулевого вклада антипротонов в хи-квадрат, что в свою очередь приводит к невозможности описания их избытка в КЛ.

	e, μ, τ	e, μ, τ, t		e, μ, τ, u	
		Фит \bar{p}	Непревышение \bar{p}	Фит \bar{p}	Непревышение \bar{p}
$\chi^2/N_{d.o.f}$	2.06	5.30	2.13	9.14	2.13

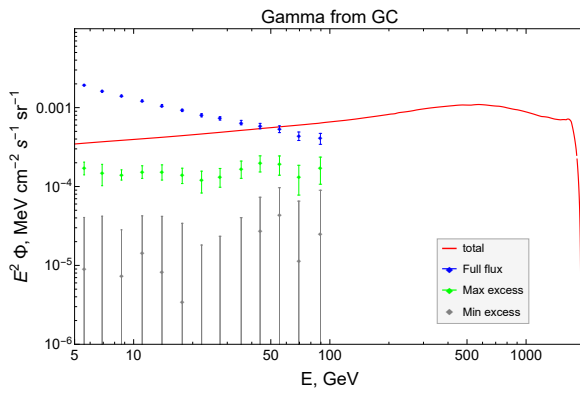
Таблица 1: Значения $\chi^2/N_{d.o.f}$ для различных моделей ТМ и алгоритмов описания данных по антипротонам.



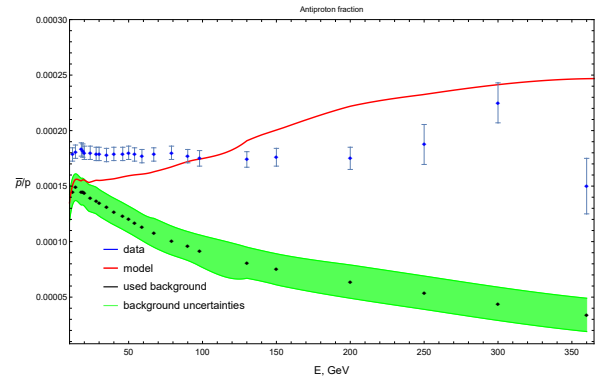
(a)



(b)

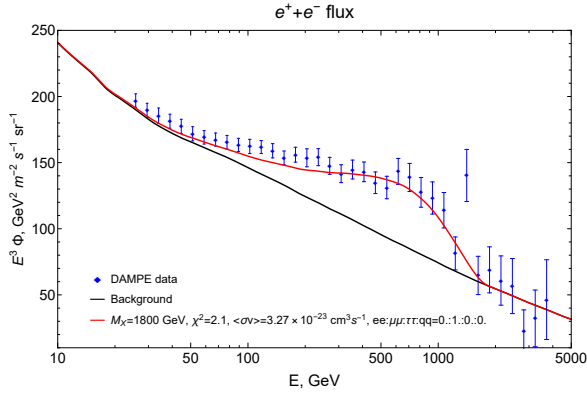


(c)

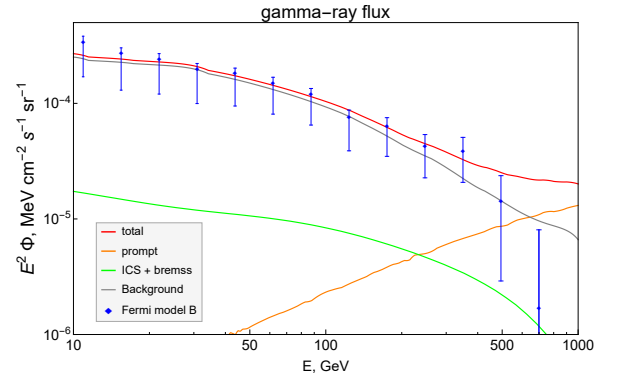


(d)

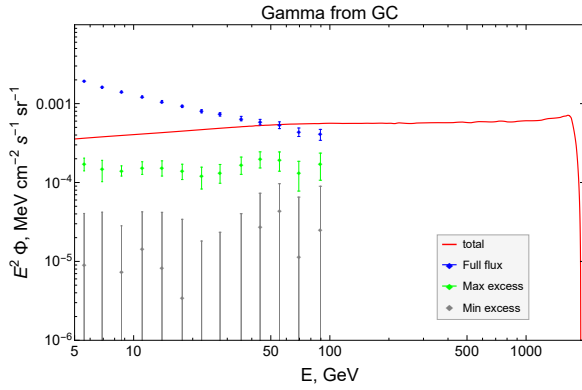
Рисунок 9: Спектры e^+e^- (a), IGRB (b), гамма-излучения из ГЦ (c) и доли антипротонов (d) с добавлением лёгких кварков в конечном состоянии. Случай комбинированного фита и фитирования данных по антипротонам



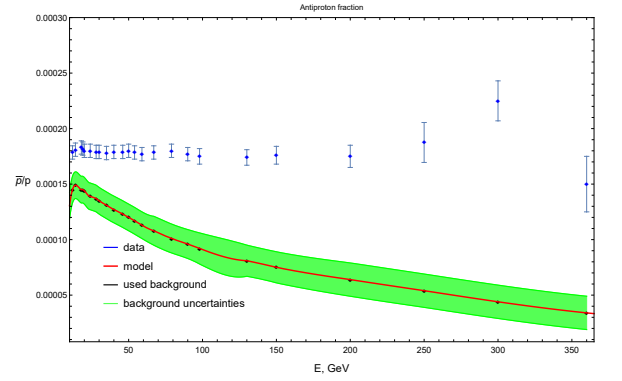
(a)



(b)



(c)



(d)

Рисунок 10: Спектры e^+e^- (a), IGRB (b), гамма-излучения из ГЦ (c) и доли антипротонов (d) с добавлением лёгких кварков в конечном состоянии. Случай комбинированного фита и непревышения данных по антипротонам

4 Заключение

В данной работе было проведено сравнение аннигиляции и распада частицы ТМ с учётом данных по гамма-излучению из ГЦ. Было показано, что они дают сравнимые результаты в большинстве случаев. Единственным исключением оказался случай применения самой жёсткой модели остатка и "неудачного" для этого набора данных профиля плотности NFW.

Также был проведён анализ с рассмотрением кварковой моды аннигиляции с добавлением лёгких и тяжелых кварков в конечном состоянии. Было получено, что для данных DAMPE и профиля плотности NFW добавление кварковой моды аннигиляции не позволяет ни улучшить фит, ни описать избыток антипротонов в КЛ. В дальнейшем планируется более детальное изучение данного вопроса.

Следующим направлением развития данной работы станет исследование возможности описания результатов нескольких экспериментов одновременно (AMS-02 + DAMPE) в рамках единой модели ТМ.

Список используемых источников

1. *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 \[astro-ph\]](#).
2. *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 \[astro-ph.HE\]](#).
3. *Belotsky K.* [et al.]. The DAMPE excess and gamma-ray constraints // *Phys. Dark Univ.* — 2019. — Vol. 26. — P. 100333. — arXiv: [1904.02456 \[astro-ph.HE\]](#).
4. *Belotsky K.* [et al.]. Fermi-LAT kills dark matter interpretations of AMS-02 data. Or not? // *JCAP*. — 2017. — Vol. 01. — P. 021. — arXiv: [1606.01271 \[astro-ph.HE\]](#).
5. *Alekseev V. V.* [et al.]. High-energy cosmic antiparticle excess vs. isotropic gamma-ray background problem in decaying dark matter Universe // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2016. — Vol. 675, no. 1. — P. 012023.
6. *Heisig J., Korsmeier M., Winkler M. W.* Dark matter or correlated errors: Systematics of the AMS-02 antiproton excess // *Phys. Rev. Res.* — 2020. — Vol. 2, no. 4. — P. 043017. — arXiv: [2005.04237 \[astro-ph.HE\]](#).
7. *Ackermann M.* [et al.]. The spectrum of isotropic diffuse gamma-ray emission between 100 MeV and 820 GeV // *Astrophys. J.* — 2015. — Vol. 799. — P. 86. — arXiv: [1410.3696 \[astro-ph.HE\]](#).
8. *Ajello M.* [et al.]. Fermi-LAT Observations of High-Energy γ -Ray Emission Toward the Galactic Center // *Astrophys. J.* — 2016. — Vol. 819, no. 1. — P. 44. — arXiv: [1511.02938 \[astro-ph.HE\]](#).

9. *Navarro J. F., Frenk C. S., White S. D. M.* A Universal density profile from hierarchical clustering // *Astrophys. J.* — 1997. — Vol. 490. — P. 493–508. — arXiv: [astro-ph/9611107](#).
10. *Read J. I.* [et al.]. Thin, thick and dark discs in LCDM // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2008. — Vol. 389. — P. 1041–1057. — arXiv: [0803.2714 \[astro-ph\]](#).