

Белоц

На правах рукописи

Белоцкий Константин Михайлович

Наблюдательные проявления скрытой массы

Специальность

01.04.23 — «Физика высоких энергий»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва — 2021

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

Официальные
оппоненты:

Долгов Александр Дмитриевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
Новосибирский государственный университет, заведующий
лабораторией

Корчагин Владимир Иванович,
доктор физико-математических наук, профессор, Южный
федеральный университет, профессор

Дубрович Виктор Константинович,
доктор физико-математических наук,
Санкт-Петербургский филиал Федерального
государственного учреждения науки «Специальная
астрофизическая лаборатория» РАН, руководитель
лабораторией

Баушев Антон Николаевич,
доктор физико-математических наук, Объединенный
Институт Ядерных Исследований (ОИЯИ), Лаборатория
Теоретической Физики им. Боголюбова (ЛТФ), ведущий
научный сотрудник.

Защита состоится 23 марта 2022 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета МИФИ.01.01 НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <https://ds.mephi.ru>.

Отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, 31, ученому секретарю диссертационного совета МИФИ.01.01.

Автореферат разослан _____ 2021 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

МИФИ.01.01,

д-р.физ.-мат.наук, профессор



Улин Сергей Евгеньевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Поиски решения проблемы скрытой массы (DM) Вселенной насчитывают уже (на данный момент) почти вековую историю. Наверное, наиболее заметным достижением этих поисков является создание парадигмы холодной скрытой массы (CDM). Это форма материи, минимальные требования к свойствам которой – это просто наличие у нее гравитационного взаимодействия и быть нерелятивистской (задолго до перехода с релятивистской (RD) на нерелятивистскую (MD) стадию эволюции Вселенной, $z \sim 10000$).

Однако предлагались модели, где в силу физических или наблюдательных предпосылок скрытая масса обладает либо собственным, либо обычными взаимодействиями. К большому множеству этих моделей относятся модели частиц типа WIMP¹ или SIMP², зеркального вещества, «самовзаимодействующей» скрытой массы. Целый ряд наблюдаемых астрофизических и космологических явлений могут быть объяснены с помощью (само)взаимодействующей скрытой массы безотносительно к ее конкретной физической природе. Это дает большой толчок к феноменологическому развитию соответствующих моделей.

Наличие взаимодействия масштаба слабого у скрытой массы позволяло объяснить ее плотность в случае термодинамически равновесной ранней ее эволюции. Так стали широко рассматриваться частицы-WIMP.

После первых результатов моделирования образования крупномасштабной структуры Вселенной (N-body simulation) в рамках модели CDM стали выдвигаться гипотезы о (само)взаимодействующей скрытой массе [1–4].

С ее помощью предлагалось разрешить возникшие противоречия результатов моделирования с наблюдениями: предсказываемые избыток карликовых галактик, ненаблюдаемые пики плотности в их центрах («cusp crisis») и др. В качестве одного из немногих решений этих проблем модели CDM предлагалась самовзаимодействующая скрытая масса, которая обходила бы эту проблему за счет взаимодействия ее частиц друг с другом [5] в том числе аннигиляции [6].

Есть другие наблюдаемые явления в астрофизике, которые пытаются объяснить с помощью (само)взаимодействующей скрытой массы, связанные с образованием структур, имеющие значимые гравитационные эффекты. Это столкновения гало, образование диска, сверхмассивных черных дыр и др. [4; 7–11].

¹Weakly Interacting Massive Particle

²Strongly Interacting Massive Particle

В целом неизвестная физика возможного взаимодействия скрытой массы может быть связана с другими проблемами астрофизики и космологии, тем самым позволяя продвинуться в решении сразу нескольких проблем космологии и астрофизики.

Большое применение модели взаимодействующей скрытой массы получили в области космических лучей (КЛ). В первую очередь это относится к высокоэнергетичному гамма-излучению, космическим позитронам и электронам, антипротонам, нейтрино.

Есть наблюдения, которые указывают с высокой достоверностью на наличие аномалии. Это относится к избытку космических позитронов, обнаруженному в экспериментах Pamela [12], AMS-2 [13], а также Fermi-LAT [14], который с учетом экспериментальных ошибок и неопределенности теоретических расчетов имеет высочайшую статистическую значимость. Для его объяснения требуется предположение о существовании нестандартных источников, которыми может являться скрытая масса с предполагаемыми определенными свойствами ее распада или аннигиляции.

Аннигиляция или распад частиц DM в этом случае подразумевает наличие общего (известного или неизвестного) взаимодействия между DM и обычными частицами. Однако если речь об аннигилирующей скрытой массе типа WIMP, сечение аннигиляции, которое обеспечивает нужную закаленную концентрацию ($\langle\sigma v\rangle \sim 3 \cdot 10^{-26} \text{ см}^3/\text{с}$), имеет недостаточную величину для обеспечения нужного сигнала в космических позитронах. Но наличие дополнительного собственного взаимодействия может усилить аннигиляцию в позитроны. Возможность такого усиления сигнала в КЛ была впервые отмечена в работе [15], где рассматривались тяжелые нейтрино с дополнительным собственным взаимодействием кулоновского типа. Рассмотрение усиления аннигиляции DM за счет доп.взаимодействия стало крайне популярным после работы [16].

Наличие подобного взаимодействия, в свою очередь, может предполагать наличие носителей разных зарядов и соответственно многокомпонентность скрытой массы.

Идеи о собственном взаимодействии у скрытой массы и ее многокомпонентности получили большое распространение. Это и в контексте объяснения данных о космических лучах [17; 18], и противоречивых результатов прямых поисков частиц скрытой массы [19; 20], и других. Такие идеи, безусловно, с одной стороны обогащают физику скрытой массы и открывают много возможностей в объяснении различных проблем и явлений. Но с другой стороны делают

«зоопарк» частиц скрытой массы порой чересчур пестрым и сложным (даже, возможно, более сложным, чем сектор известных частиц) и требуют все более сложных расчетов для оценки простых эффектов.

Помимо проблемы происхождения космических лучей, с которой может быть связана физика скрытой массы, есть и другие не менее значимые. К числу таких можно отнести отчасти проблему реионизации Вселенной, произошедшей при красном смещении $z \sim 10$.

Такая ситуация в области физики скрытой массы требует построение новых моделей, включающих множество идей и явлений (устанавливая между ними связи) с выходом, возможно, на новые направления исследований в данной области.

Цель работы

Целью настоящей диссертационной работы является развитие совокупности моделей скрытой массы, в рамках которых находит решение проблемы стандартного сценария невзаимодействующей холодной скрытой массы, происхождения космических лучей, противоречия результатов подземных экспериментов по прямому поиску DM, реионизации Вселенной и др.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Предложенные модели техницветовой скрытой массы в виде майорановских частиц (либо в виде связанного состояния техникварка и техниглюона, DG , либо в виде технинейтрино), удовлетворяющие ограничениям по потокам нейтрино из центров Земли и Солнца, либо в виде дважды заряженных частиц (в виде либо связанного состояния двух техникварков UU , либо технилептона), при которых частично объясняется позитронная аномалия в космических лучах, смягчая противоречие с данными по космическому гамма-фону
2. Предложенная модель скрытой массы с малой активной компонентой, образующей в Галактике диск, в рамках которой может объясняться позитронная аномалия в космических лучах, обходя противоречие данным по гамма-фону
3. Модель скрытой массы с собственным взаимодействием кулоновского типа

с классическим описанием ее рекомбинации.

4. Предложенная модель реионизации Вселенной с помощью компоненты скрытой массы в виде первичных черных дыр.

Научная новизна полученных результатов

1. Ограничения на техницветовую скрытую массу получены на основе данных по потокам нейтрино из центра Солнца и Земли впервые и являются более сильными, чем ограничения, накладываемые подземными экспериментами по прямому поиску таких частиц.
2. Параметры техницветовой скрытой массы с дважды заряженными частицами, позволяющие объяснить позитронную аномалию при высоких энергиях, уменьшая противоречие с данными по гамма-фону, получены впервые.
3. Впервые была предложена и разработана модель скрытой массы с малой активной компонентой, образующей в Галактике диск, для объяснения позитронной аномалии, не вступая в противоречие с данными по гамма-фону.
4. Впервые получены условие применимости квантового и классического приближений оценки эффекта рекомбинации в рамках рассмотрения скрытой массы с собственным взаимодействием кулоновского типа и различие в описании эволюции такой скрытой массы в данных двух подходах.
5. Впервые предложена модель реионизации Вселенной с помощью компоненты скрытой массы в виде первичных черных дыр.

Значимость

Значимость и актуальность результатов состоит в следующем.

Модель техницвета, параметры которой были получены в диссертации для объяснения скрытой массы, позволяет объяснить нарушение симметрии электрослабых взаимодействий (массы W - и Z -бозонов) без явного введения поля Хиггса. Она сейчас развивается и проходит проверку на ускорителе [21]. Дополнительным достоинством модели является то, что в ее рамках могут быть получены сразу несколько разных кандидатов в скрытую массу. Некоторые из

них рассмотрены в диссертации. Получены области значений параметров, удовлетворяющие ограничению на восходящие потоки мюонов (индуцированные нейтрино), а также позволяющие частично описать позитронную аномалию в космических лучах, с лучшим согласием с данными по космическим позитронам и гамма-излучению.

Позитронная аномалия в космических лучах (КЛ) — это одна из центральных современных проблем в астрофизике космических лучей. В диссертационной работе рассмотрено возможное ее объяснение за счет распада дважды заряженных техничастиц, составляющую скрытую массу, а также предложена новая модель скрытой массы с дисковой компонентой. Данная модель не только дает возможность объяснения позитронной аномалии, избегая противоречия с данными по гамма-излучению, но и является новым шагом в возможном развитии физики скрытой массы, который требует дальнейшего более всестороннего исследования. Важно отметить, что недавно высказывались предположения о наличии диска скрытой массы из совершенно других соображений (основанные на моделировании скрытой массы с учетом барионов, «выстроенности» в пространстве галактик-спутников Туманности Андромеды). Исследование возможной связи между этими предположениями может также подтолкнуть к неожиданному развитию этой физики.

Модели взаимодействующей скрытой массы в последнее время стали очень популярными. Как указано выше, сейчас выходит множество работ по этой тематике. В них рассматривается образование «темных» атомов и усиление аннигиляции за счет собственного взаимодействия между частицами скрытой массы, также начинают проводиться моделирования образования структуры такой материей. Стоит отметить, что наша группа здесь в числе «пионеров». Эффекты связывания с последующей аннигиляцией за счет взаимодействия кулоновского типа между частицами скрытой массы нами рассматривались в рамках модели тяжелого нейтрино [D1]. В отличие от всех последующих работ зарубежных коллег вероятность (сечение) связывания нами оценивалась, следуя классическому описанию дипольного излучения, как это было в свое время сделано в оценке реликтовой концентрации магнитных монополей [22]. Результат сильно отличается от такового, полученного в (простом) квантовом приближении, которому следовали другие. Данная разница может приводить к радикальным отличиям в описании эволюции таких частиц и выводах о жизнеспособности модели. В диссертации ставится вопрос об условии применимости каждого из приближений. Найдено, что классическое приближение может быть применимо

в очень существенной области параметров, и результаты многих работ тогда следует пересмотреть. Указанием на все это является один из результатов диссертации. Особую важность и актуальность ему придает активное на данный момент развитие именно этого направления в физике скрытой массы, связанное, в частности, с надеждами на решение проблем стандартного сценария холодной скрытой массы.

Причины реионизации Вселенной, случившейся при красном смещении $z \sim 6 \dots 10$ [23], до сих пор до конца не ясны и являются актуальной проблемой в астрономии. Существующие попытки объяснить ионизацию с помощью излучения первых звезд и квазаров наталкиваются на трудности. В диссертации рассматривается альтернативный механизм, основанный на предположении о существовании первичных черных дыр (ПЧД) с массами $10^{15} \dots 10^{17}$ г, которые одновременно являются компонентой DM. Приведенный приближенный расчет показал, что ПЧД с такими массами ($\sim 5 \times 10^{16}$ г) за счет испарения Хоукинга с учетом ограничений по гамма-фону способны внести существенный вклад в ионизацию и также в DM.

Вклад автора.

Автору принадлежит определяющая роль в постановке задач, определении способов их решения и получении конкретных результатов. Под его руководством и при личном участии получены все аналитические и численные результаты.

Апробация работы

Результаты исследований, положенные в основу диссертации, представлялись и обсуждались на семинарах в МИФИ, а также докладывались на различных российских и международных конференциях и школах:

- Helmholtz — DIAS International Summer School «Cosmology, Strings, New Physics», Dubna, Russia (28.08.16-10.09.16).
- XIV Курчатовская междисциплинарная молодежная научная школа, Курчатовский институт (8.11.16-11.11.16).
- The 16th International Baikal Summer School on HEP and Astrophysics, Irkutsk, Russia, (15.07.16-15.07.16).
- The 1st and 2nd International Conferences on Particle Physics and Astrophysics, Москва, Россия, (October 2015 and October).

- 19th International Moscow School of Physics (44th ITEP Winter School) (16.02.16-23.02.16, Подмосковье).
- Международные сессии-конференции Секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий», ОИЯИ (12-15 апреля 2016 г.), ИВФЭ (ноябрь 2014 г.), ИТЭФ (ноябрь 2011 г.).
- Rencontres de Moriond, La Thuile (18-25 марта 2016) Italy.
- XVIII Bled Workshop «What comes beyond the Standard model?» (17 July 2015).
- XXIII Bled Workshop «What comes beyond the Standard Model?» (7 July 2020).
- PAMELA meeting, КТЕ, Стокгольм, Швеция (02.10.2015).
- и другие.

Публикации

Всего непосредственно по теме диссертации (к моменту 2018 г.) опубликовано 23 работы [D1—D23] в журналах, входящих в базы Web of Science и/или Scopus.

Среди них в

- Physics Letters B — 1,
- European Physics Journal C — 1,
- Journal of Cosmology and Astroparticle Physics — 2,
- Physical Review D — 1,
- International Journal of Modern Physics D — 6,
- Ядерная физика — 2,
- Advances in High Energy Physics — 1,
- Modern Physics Letters A — 1,
- Gravitation and Cosmology — 1,
- Journal of Physics: Conference Series — 4,
- Physics Procedia — 2,
- Proceedings of Bled Workshops in Physics — 2.

По главам диссертации публикации распределены следующим образом:

Глава 1. Астрофизические эффекты «техницветовой» скрытой массы (TDM)

- а) Ограничение на майорановские частицы TDM по мюонным потокам [D2].
- б) Космические позитроны и гамма-излучение от составной многокомпонентной TDM [D3—D5]

Глава 2. Скрытая масса с дисковой галактической компонентой [D6—D11; D16]

Глава 3. Скрытая масса с собственным Кулоновским взаимодействием

- а) Квантовое и классическое приближения рекомбинации при описании эволюции взаимодействующей скрытой массы [D12; D13]
- б) О температурной эволюции многокомпонентной взаимодействующей DM [D14]
- в) Случай тяжелого нейтрино [D1; D15]

Глава 4. ПЧД и проблемы реионизации и скрытой массы Вселенной [D18—D23]

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации составляет 149 страниц, включает 110 рисунков, 34 таблицы и список литературы из 264 наименований.

1 Содержание работы

Во **введении** описывается текущая ситуация в области астрофизических исследований проблемы скрытой массы (DM) и других проблем в астрофизике и космологии. Говорится о существующем акценте в текущих исследованиях на отклонении от простейшей модели холодной скрытой массы. С одной стороны отсутствие прямых наблюдательных доказательств физической природы DM, с другой – наличие необъясненных иных наблюдаемых астрофизических явлений, таких как аномалии в космических лучах, проблемы в описании формирования крупномасштабной структуры Вселенной, реионизации Вселенной и других, дает возможность выстраивать различные физические модели, связывающие эти проблемы. Эти физические модели, в свою очередь, подразумевают определенный теоретический и экспериментальный фундамент в физике частиц. Такая разносторонность охватываемой проблематики требует построения новых объединяющих моделей с возможностью выхода на концептуально новые.

Первая глава "Астрофизические эффекты «техницветовой» скрытой массы (TDM)" включает рассмотрение нескольких моделей DM в рамках теории техницвета. Результаты данной главы опубликованы в работах [D2–D5]: материалы части 1.1 в [D2], части 1.2 в [D3–D5].

Сначала строится модель в виде майорановских частиц TDM. По свойствам они похоже на стерильные нейтрино. Рассматривается два варианта их техничастичного состава: либо $X = DG$, либо $X = \nu_2$, где D , G , ν_2 являются соответственно техникварком, техниглюоном и технейтрино (техникварк при данном построении может быть нейтральным). У обоих случаев взаимодействие определяется либо массовым смешиванием, как у стерильного нейтрино, (в случае $X = DG$), либо обычным слабым взаимодействием (как у $X = \nu_2$). В последнем случае необходимая плотность во Вселенной обеспечивается в рамках модели квинтесценции в ранней Вселенной.

Данные частицы имеют определенные сечения взаимодействия и аннигиляции как в ранней Вселенной, так и в современной. Они рассчитаны. Получены необходимые параметры модели. Получены скорости захвата этих частиц с веществом Солнца и Земли, скорости их аннигиляции в них, потоки мюонных нейтрино, вызванные этими нейтрино. От Солнца эффект получается сильнее и для него приводится основной результат. Учтены эффекты поглощения и осцилляций нейтрино. Главный результат представлен в терминах измеряемого потока (восходящих) мюонов, индуцированных нейтрино от аннигиляции ча-

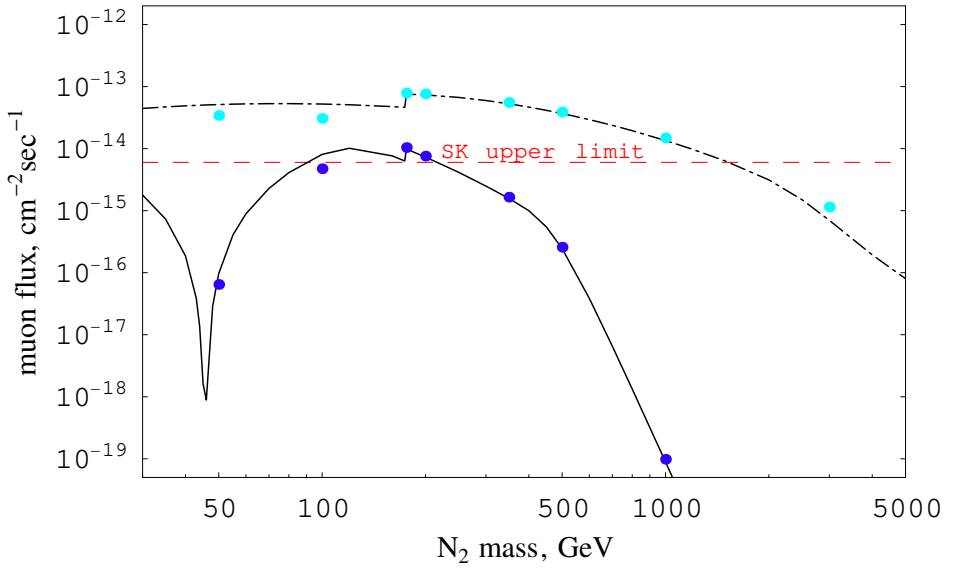


Рисунок 1 — Потоки мюонов, вызванные ν_μ от Солнца, предсказываемые для моделей $X = DG$ [24] (сплошная линия) и $X = \nu_2$ [25] (штрих-пунктирная линия), в сравнении с ограничением Super-Kamiokande. Темные (синие) и светлые (бирюзовые) точки показывают для сравнения аналогичные результаты для отдельных значений масс, но полученные на основе методики [26] для моделей [24] и [25] соответственно.

стиц X , на рис.1.

Из сравнения с данными наблюдений Super-Kamiokande были получены ограничения для выбранных нами параметров. Они исключают интервал масс частицы X

$$100 \text{ ГэВ} < m < 200 \text{ ГэВ} \quad (1)$$

для модели $X = DG$ [24] и

$$m < 1500 \text{ ГэВ} \quad (2)$$

для модели $X = \nu_2$ [25].

Обсуждаемые эффекты осцилляции, неопределенности в описании процессов взаимодействия продуктов аннигиляции с веществом не дают существенного изменения полученного ограничения. Была проведена проверка используемой методики расчета с другими работами [D2]. Результаты сравнения показаны на том же рисунке 1. Как видно, имеет место приемлемое согласие.

Далее рассматривалась другая вариация модели TDM, в которой предпринимается попытка объяснения проблемы позитронной аномалии в космических лучах.

Позитронная аномалия (ПА) открыта в эксперименте Pamela и др. [12–14]. Вопрос ее объяснения на данный момент остается открытым. Проблемой является согласие с данными по гамма-излучению. Существуют пока неудачные попытки ее объяснения с помощью пульсаров и скрытой массы.

В диссертации исследуется возможность объяснения ПА с помощью аннигиляции или распада частиц скрытой массы. Главной отмеченной проблемой здесь является то, что при объяснении наблюдаемого избытка космических позитронов образуется превышающее наблюдаемый гамма-фон сопутствующее гамма-излучение.

В рамках TDM предлагается модель с дважды заряженными частицами. Рассматриваются два случая: частицы DM с малой компонентой в виде $UU^{++}\zeta^{--}$ (U – техникварк, ζ^{--} – технилептон) и $\bar{\zeta}^{--}\bar{U}\bar{u}^{++}$. Дважды положительно заряженные частицы полагаются нестабильными с модой распада на два позитрона. Возможный механизм распада приводится. Массы частиц удовлетворяют действующим ограничениям на ускорителе, т.е. примерно $m > 1$ ТэВ. У двух частиц-кандидатов в DM есть небольшое различие в модах аннигиляции и механизмах рождения в ранней Вселенной. Последние не влияют на предсказываемый спектр КЛ.

С учетом диффузионного распространения КЛ в межзвездном пространстве были получены ожидаемые спектры позитронов и гамма-излучения при максимально подходящих параметрах модели. Учтены ожидаемые фоновые вклады. Рассмотрены различные наборы параметров. Были учтены эффекты солнечных модуляций.

На Рис. 2 представлен один из наиболее успешных модельных случаев, который позволяет описать наблюдаемую долю космических позитронов. Представлен случай распада UU с для масс $m = 0.7, 1$ ТэВ. На рисунках приведены полученные значения Br_i и времени жизни τ . Они согласуются с ограничениями из других работ, в частности [27–30]. При этом стоит учитывать, что в нашем случае рождается два позитрона в конечном состоянии.

Далее производился расчет потока гамма-излучения от распада техницветовой скрытой массы.

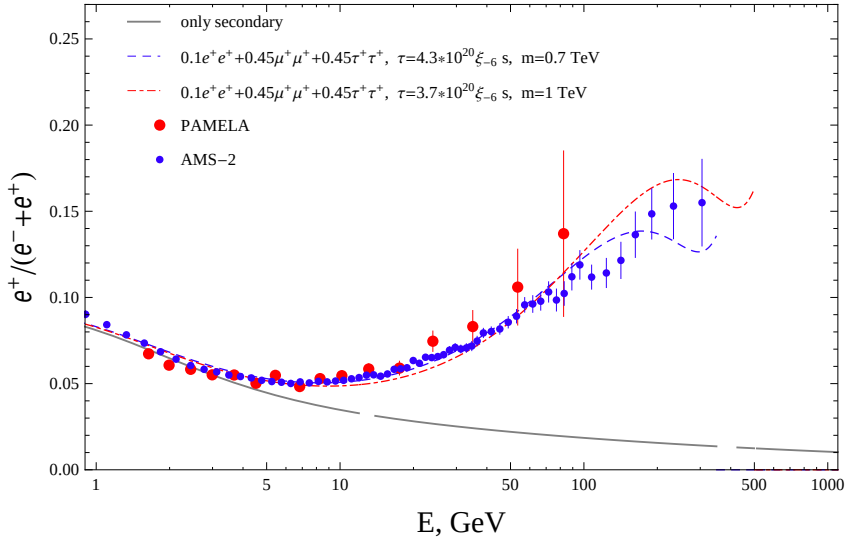


Рисунок 2 — Доля позитронов от распада $UU \rightarrow e^+e^+, \mu^+\mu^+, \tau^+\tau^+$ в сравнении с данными PAMELA и AMS-2.

Рассматривались два вклада: прямое рождение гамма (излучение частиц в конечном состоянии (FSR) и от распадов прямых продуктов аннигиляции типа π^0) и от обратного комптоновского рассеяния позитронов на фоновых фотонах. Для оценки первого вклада использовались программы MC-моделирования (Pythia, CompHEP). Для расчета второго вклада использовалась методика, изложенная в работе [31].

Результаты по потоку гамма представлены на Рис. (3), на котором представлены все перечисленные вклады и полученные при тех же параметрах, что и на Рис. (2).

Из рисунка 3 видно, что рассмотренные сценарии распада UU удовлетворяют ограничениям Fermi/LAT, хотя находятся на грани противоречия с ними.

В результате работы по техницветовой скрытой массе были развиты модели с разными кандидатами и определены их параметры. Это майорановские частиц в виде

- связанного состояния техникварка и техни-глюона, DG ;
- либо в виде технинейтрино,

у которых определены разрешенные диапазоны значений массы исходя из огра-

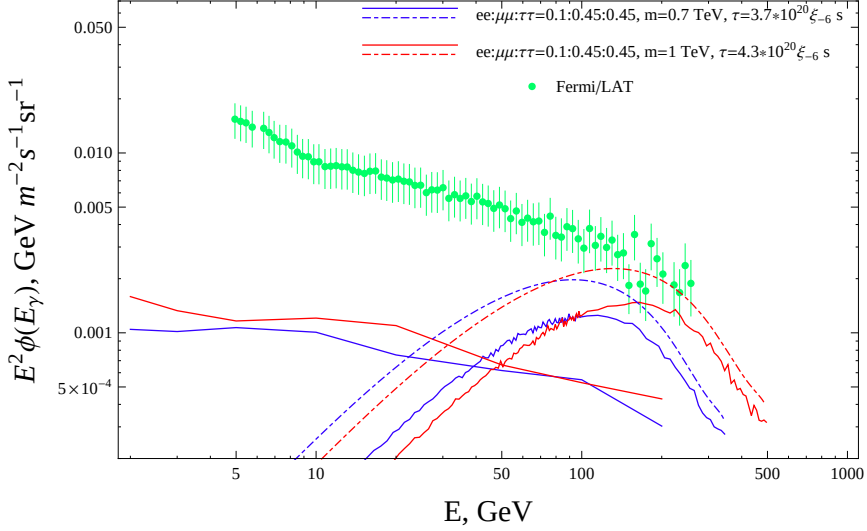


Рисунок 3 — Ожидаемый поток гамма-излучения от распада UU для галактических широт $|b| \geq 10^0$ в сравнении с данными Fermi/LAT по диффузному фону [32]. Изображены два вклада: фотоны, образовавшиеся за счет "обратного Комптона" (линии идут левее) и прямые (линии справа). Сплошные и штрихпунктирные линии справа относятся к потоку от нашей Галактики и суммарному, включающему фотоны как галактического так и внегалактического происхождения соответственно.

ничений по потокам нейтрино из центров Земли и Солнца. Также предложены кандидаты в виде дважды заряженных частиц в виде

- связанного состояния двух техникварков, UU ;
- либо технилептона

с помощью которых частично объясняется позитронная аномалия в КЛ, смягчая противоречие с данными по космическому гамма-фону. Для данных кандидатов были определены массы, моды и вероятности распада.

Вторая глава посвящена разработке модели скрытой массы с малой компонентой в галактическом диске [D6—D11; D16; D17].

Избыток позитронов высоких энергий в космических лучах (КЛ) [12; 13] часто пытаются объяснить как возможное косвенное проявление скрытой массы. Указывается, что такой вид объяснения имеет в качестве наиболее модельно независимого ограничения данные по изотропному гамма-излучению (IGRB — isotropic gamma-ray background [33] телескопа Fermi LAT. Обычные модели скрытой массы, которые объясняют позитронную аномалию и удовлетворяют данным ускорительных и подземных экспериментов, ограничениям, следуемым из наблюдений реликтового излучения (СМВ) и др., неизбежно дают избыток космического гамма-излучения. Последнее сопровождается распадом частиц скрытой массы или их аннигиляцию в пару заряженных лептонов (прямые фотоны) или возникают по мере распространения этих заряженных лептонов в межзвездной среде. Были предприняты безуспешно попытки подавить выход прямых фотонов [] [D17; 34—36]. Здесь предлагается и исследуется возможность подавления гамма за счет пространственного распределения скрытой массы. Дело в том, что позитроны могут рождаться по всему гало скрытой массы, но дают заметный вклад в наблюдаемый на Земле высокоэнергетический спектр из-за их потерь и диффузного характера их распространения только те из них, что образуются в области ~ 3 кпк. Гамма-излучение приходит к нам со всего гало. В связи с этим предлагается модель, где некоторая доля DM, дающая сигнал в КЛ (“активная”), сосредоточена в галактическом диске.

В работе вводится параметр модели DM в виде толщины “темного диска” компоненты DM, дающей вклад в КЛ за счет распада или аннигиляции. Его значение определяется из данных (фитирования) по космическим позитронам и IGRB. Рассматриваются изначально только лептонные моды. Отдельно добавляются адронные моды. В результате получены графики для χ^2 в зависимости

от толщины и массы частицы DM. Использовались два алгоритма фитирования: (1) фитировались только данные по космическим позитронам и потом при полученных фиксированных параметрах данные по гамма, либо (2) сразу одновременно оба набора данных. На рисунке 4 показан основной результат для второго случая. Рисунок 5 показывает сами спектры как для доли позитронов, так и для гамма-излучения, соответствующие наилучшему χ^2 в сравнении случаев “темного диска” и обычного распределения аннигилирующей/распадающейся DM в гало в случае (2).

Также рассматривалось гамма-излучение из центра Галактики. Оно не привнесло существенных изменений в модель. Рассматривались четырехчастичные моды и адронные моды и данные по космическим антипротонам. Они также не принесли существенных изменений в параметры модели, наилучшим образом описывающей данные по позитронам и гамма-излучению.

В **третьей главе** рассматривался случай скрытой массы с взаимодействием кулоновского типа.

Анализ эффектов в космических лучах в рамках моделей скрытой массы с аннигиляцией и/или распадом привел к выводу о необходимости отказа от “традиционных” моделей в виде бесстолкновительных частиц и перехода к моделям с взаимодействующей скрытой массы. Эффекты возможного взаимодействия скрытой массы нами стали изучаться впервые в работах [D1], [15]. Данная глава посвящена изучению эффектов взаимодействия скрытой массы. Рассматриваются случаи с собственным взаимодействием кулоновского типа и сильного взаимодействия [D1; D12—D15].

При рассмотрении космологической эволюции скрытой массы с взаимодействием кулоновского типа (y -взаимодействием) возникает принципиальный вопрос в подходе к ее описанию. Разноименно заряженные по данному взаимодействию частицы скрытой массы могут образовывать связанные состояния, т.е. рекомбинировать. В случае, если это частица и античастица, они аннигилируют. Это меняет их остаточную концентрацию, что имеет принципиальное значение. В космологии частицы DM охлаждаются до очень низких температур. Описание процесса рекомбинации возможно как в рамках квантового подхода, так и классического. Последний протекает за счет классического дипольного излучения и, возможно, применим при очень низких энергиях, которые имеют место в космологии. В диссертации рассмотрен вопрос применимости этих двух приближений и показана разница в результатах описания эволюции такой скрытой массы в рамках двух подходов.

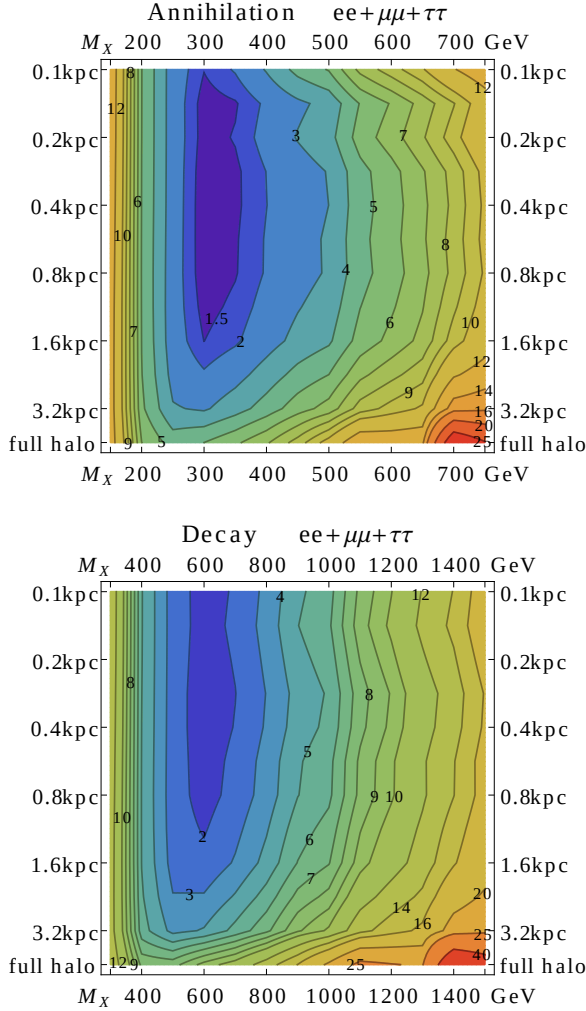


Рисунок 4 — Зависимость χ^2/n от массы частицы темной материи M и полу-высоты темного диска h для аннигиляции (сверху) и распада (снизу) по каналам e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, $\tau^+\tau^-$. Изменение цвета от красного к синему соответствует уменьшению χ^2/n . Цифры на контурах графика обозначают соответствующие значения χ^2/n . Область $h \geq 3.2$ кпк соответствует случаю гало.

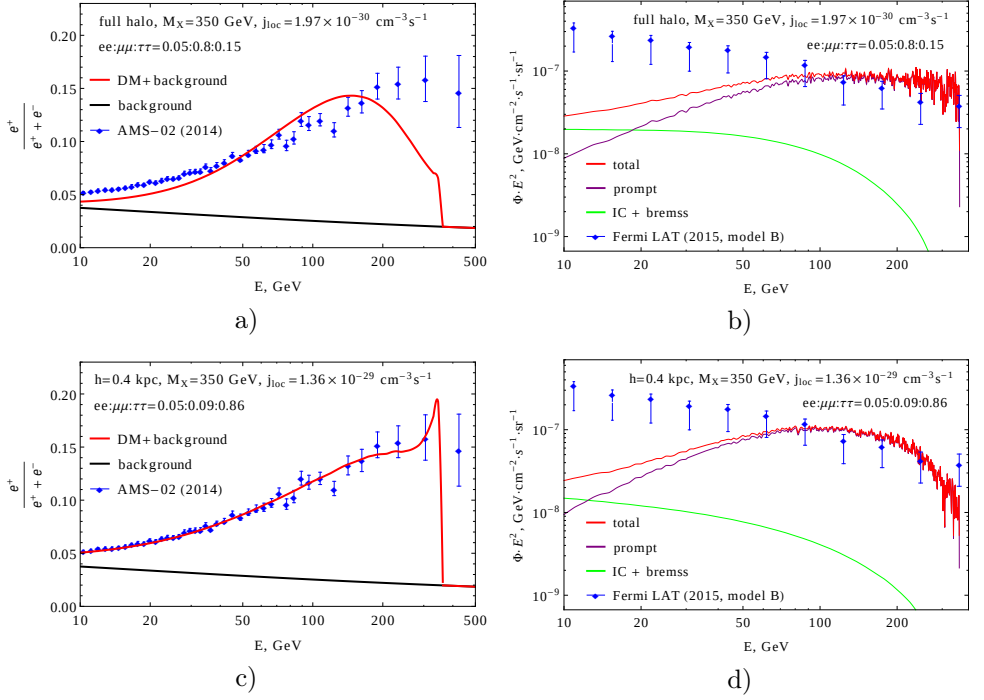


Рисунок 5 — Наилучший ”фит“ позитронной доли (слева), измеренной AMS-02 [37] и изотропного потока гамма-излучения (справа), измеренного Fermi-LAT (IGRB, model B) [38]. Сверху: случай темного гало. Снизу: случай темного диска. Потоки гамма-излучения домножены на E^2 . Значения параметров модели приведены на каждом графике. Представлен случай аннигиляции темной материи.

Указано принципиальное отличие между классическим сечением рекомбинации

$$\sigma_{\text{rec}} = (4\pi)^{2/5} \pi \frac{\alpha_y^2}{\mu^2} \frac{1}{v^{14/5}}, \quad (3)$$

и квантовым

$$\sigma_{\text{rec}} = \frac{32\pi}{3\sqrt{3}} \frac{\alpha_y^3}{\mu^2} \frac{\ln(v^{-1})}{v^2}. \quad (4)$$

Здесь α_y — константа y -взаимодействия, $\mu = \frac{m_a m_b}{m_a + m_b}$ — приведенная масса рассеивающихся частиц с массами m_a и m_b ($m_a \leq m_b$), v — их начальная относительная скорость. Классическое сечение имеет более сильную зависимость от относительной скорости, чем квантовое, и другую зависимость от постоянной α_y . Существует много работ, рассматривающих скрытую массу с таким взаи-

модействием. Но везде используется только квантовое сечение и нигде не поднимается вопрос о возможности применимости классического и соответственно следующей из этого разницы в описаниях.

В диссертации поднят этот вопрос. Исходя из действия системы получена возможная область применимости классического сечения в виде

$$v \ll \alpha_y^{5/2}. \quad (5)$$

Это согласуется с тем, что получено в работе [39] из других соображений. Данное условие выполняется в широком классе случаев моделей скрытой массы.

В диссертации показано, насколько велика разница в описаниях в рамках двух подходов. Получены остаточные плотности частиц ДМ в двух случаях (рис.6). На рисунке показано, как меняется плотность от температуры реликтового излучения (СМВ). При температуре примерно 30 К образуется Галактика и скорость частиц ДМ меняется. Поэтому график оборван на этом значении. Также на этом же рисунке справа показана область значений константы и приведенной массы, где исходя из условия 5 применимы два приближения. Видно, что классика, возможно, применима в очень существенной области.

При получении данных зависимостей были выведены уравнения для изменения температуры частиц скрытой массы. Они учитывали взаимодействие частиц ДМ друг с другом, с “тепловым” фоном y -фотонов – переносчиков y -взаимодействия, а также возможное взаимодействие с обычным веществом.

Данные результаты были применены к модели скрытой массы в виде 4-го поколения фермионов [40]. В результате получено, что в случае наличия -взаимодействия в такой модели удастся избежать ограничений подземных экспериментов (LUX) для таких частиц как в случае зарядовой (1) симметрии, так и (2) асимметрии (см.рис.7 и 8). В первом случае компонентой ДМ является 4-е нейтрино N . Во втором – связанное состояние между N и барионом, состоящим из кварков 4-го поколения UUU .

В **последней главе** “Первичные черные дыры с массой $10^{16} - 10^{17}$ г и реионизация Вселенной” рассмотрена проблема реионизации Вселенной. Эта проблема является одной из центральных в астрофизике. Наблюдения показывают, что вещество во Вселенной стало ионизованным при красных смещениях $z \sim 10$. В диссертации приводится обзор текущего состояния проблемы описания этого явления. Указываются два основных вида попыток его объяснить, но в обоих случаях имеются проблемы. В диссертации предлагается новая модель реио-

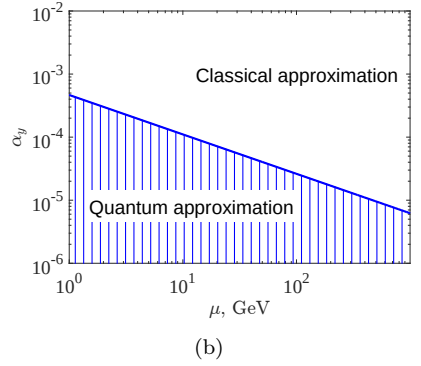
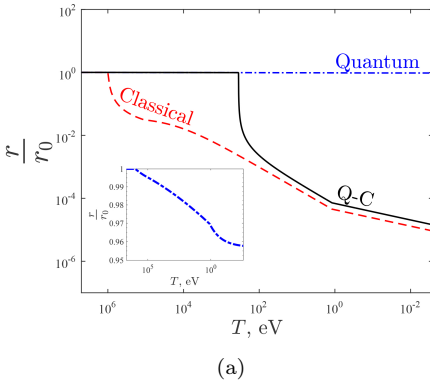


Рисунок 6 — *Слева*: относительная концентрация свободных y -заряженных частиц темной материи как функция от T , полученная при использовании “классического” (красная пунктирная линия) и “квантового” (синяя пунктирная линия с точкой) сечений рекомбинации (σ_{rec}). Кривая “Q-C” получена из “сшивки” решений в классическом и квантовом приближениях в момент $T \approx 200$ эВ. На врезке показан случай квантового приближения с уменьшенным масштабом по вертикальной оси. *Справа*: область значений параметров μ и α_y , где для оценки остаточной концентрации (не)связанных частиц скрытой массы должно быть использовано “классическое” сечение.

низации, основанная на предположении существования скрытой массы в виде первичных черных дыр (ПЧД) с указанными массами.

Механизм основан на испарении Хоукинга легких ПЧД. Хоукинговское излучение способно ионизовать вещество. Разработана собственная методика описания данного процесса. Показано, что среди всех энерговыделений наиболее эффективно ионизует окружающее вещество излучаемые электроны и позитроны. На рис.9 показаны скорости поглощения энергии в обычном веществе в единицах текущей критической плотности в зависимости от красного смещения.

На основе термодинамического рассмотрения получено изменение температуры вещества с учетом поглощения данной энергии, а также степени его ионизации (рис.10) для различных масс ПЧД. В итоге получены диапазон масс ПЧД при которых достигается полная ионизация рисунок (см. рис.11). Он оказался вокруг значений $\sim 10^{16}$ г.

Приводится обсуждение точности используемого приближения. Эффект “сидит” на пределе максимально возможных параметров модели.

Далее рассматривается, как данный эффект можно усилить. Этого можно

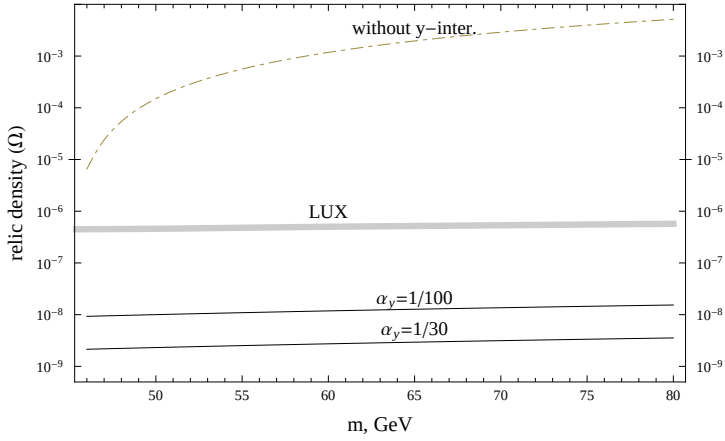


Рисунок 7 — Относительная реликтовая плотность 4-х нейтрино для случаев без и с y -взаимодействием. В последнем случае константы брались как $\alpha_y = 1/30, 1/100$.

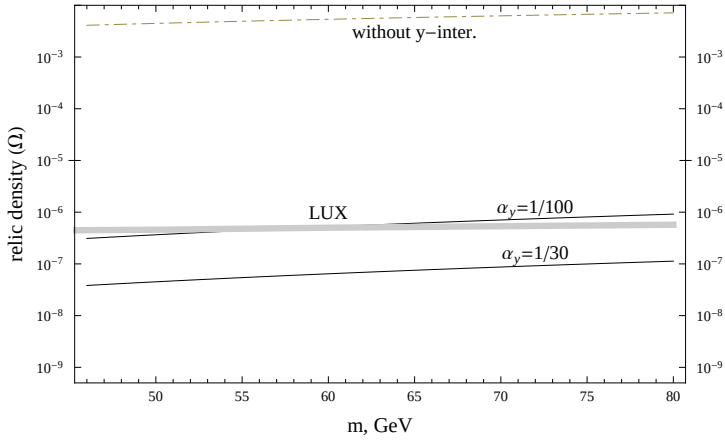


Рисунок 8 — То же, что на рисунке 7, только для случая зарядово-асимметричной скрытой массы в виде $N\bar{U}\bar{U}\bar{U}$.

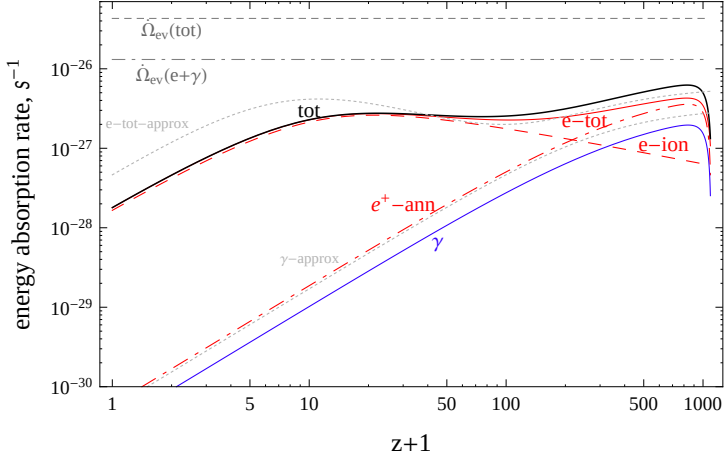


Рисунок 9 — Скорости поглощения энергии для всех рассматриваемых процессов: $\dot{\Omega}_{\text{abs}}^{(e-\text{ion})}$, $\dot{\Omega}_{\text{abs}}^{(e-\text{ann})}$ и их сумма, $\dot{\Omega}_{\text{abs}}^{(\gamma)}$ и полная скорость, для $M = 5 \times 10^{16}$ г. Также показаны $\dot{\Omega}_{\text{abs}}^{(e-\text{ion})} + \dot{\Omega}_{\text{abs}}^{(e-\text{ann})}$ и $\dot{\Omega}_{\text{abs}}^{(\gamma)}$, полученные с помощью соотношений (??)–(??). Величины $\dot{\Omega}_{\text{ev}}$ показаны, чтобы проиллюстрировать полную скорость испарения (для всех сортов частиц) и только для $e^{\pm} + \gamma$.

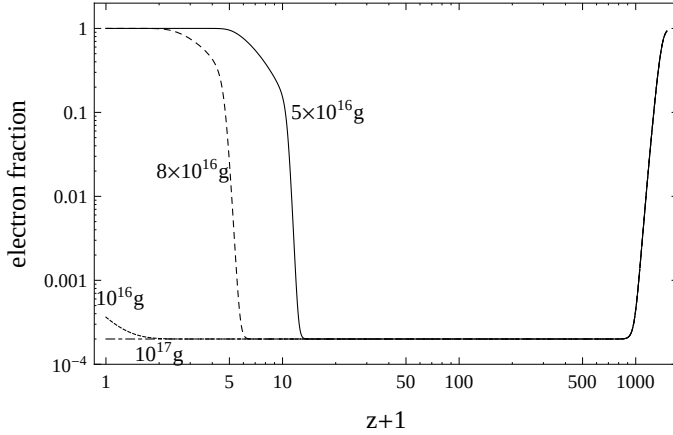


Рисунок 10 — Зависимость электронной доли x_e от красного смещения.

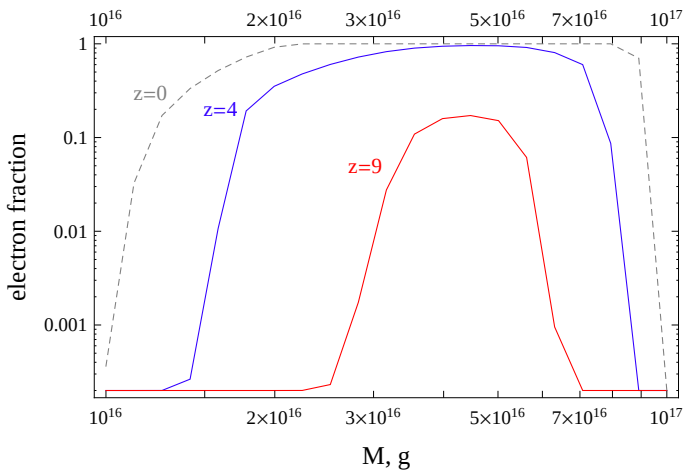


Рисунок 11 — Зависимость электронной доли x_e от массы ПЧД.

добиться за счет использования массового распределения ПЧД. Рассматриваются различные массовые распределения ПЧД и показано, что эффект усиливается в ряде случаев таких распределений, и в том числе усиливается допустимый вклад ПЧД в плотность скрытой массы Вселенной.

Заключение

Помимо проблемы скрытой массы в космологии и астрофизике есть и другие серьезные неразрешенные загадки, связанные с разными наблюдениями. Неизвестная физика скрытой массы здесь может служить неким полигоном для гипотез, предлагающих решение каких-либо загадок, между собой их связывая. Наблюдения различных явлений способствует их пониманию и созданию новых моделей с одной стороны и накладывает ограничения с другой.

В настоящей работе исследовались возможные допущения о природе скрытой массы Вселенной, способствующие решению других проблем космологии, астрофизики или физики частиц. Рассматривались модели скрытой массы в рамках теории техницвета, позволяющие избежать проблемы в секторе Хиггса Стандартной Модели, "темного диска" объясняющие позитронную аномалию в космических лучах, не вступая в противоречие с данными по космическому гамма-излучению, взаимодействующей скрытой массы, с которой связываются надежды на решение ряда проблем космологического сценария Лямбда-CDM,

первичных черных дыр с массой порядка 10^{16} г, позволяющая объяснить реионизацию Вселенной.

В ходе настоящей работы создана совокупность моделей скрытой массы. Получены следующие конкретные результаты.

1. Предложенные модели техницветовой скрытой массы в виде майорановских частиц (либо в виде связанного состояния техникварка и техниглюона, DG , либо в виде технинейтрино), удовлетворяющие ограничениям по потокам нейтрино из центров Земли и Солнца, либо в виде дважды заряженных частиц (в виде либо связанного состояния двух техникварков UU , либо технилептона), при которых частично объясняется позитронная аномалия в космических лучах, смягчая противоречие с данными по космическому гамма-фону.

2. Предложенная модель скрытой массы с малой активной компонентой, образующей в Галактике диск, в рамках которой объясняется позитронная аномалия в космических лучах, обходя противоречие с данными по космическому гамма-фону.

3. Модель скрытой массы с собственным взаимодействием кулоновского типа с классическим описанием ее рекомбинации с указанием принципиального различия в предсказаниях с квантовым подходом.

4. Предложенная модель реионизации Вселенной с помощью компоненты скрытой массы в виде первичных черных дыр.

В целом работа объединяет в одно исследовательское направления различные фундаментальные проблемы космологии, астрофизики и физики частиц.

Публикации по материалам диссертации

- D1. *Belotsky K. M.* [и др.]. Effects of new long-range interaction: Recombination of relic heavy neutrinos and antineutrinos // Grav. Cosmol. — 2005. — Т. 11. — С. 27–33. — arXiv: [astro-ph/0504621](#) [[astro-ph](#)].
- D2. *Belotsky K., Khlopov M., Kouvaris C.* Muon flux limits for Majorana dark matter from strong coupling theories // Phys. Rev. — 2009. — Т. D79. — С. 083520. — arXiv: [0810.2022](#) [[astro-ph](#)].
- D3. *Belotsky K.* [и др.]. Decaying Dark Atom constituents and cosmic positron excess // Adv. High Energy Phys. — 2014. — Т. 2014. — С. 214258. — arXiv: [1403.1212](#) [[astro-ph.CO](#)].
- D4. *Belotsky K., Khlopov M., Laletin M.* Dark Atoms and their decaying constituents // Bled Workshops Phys. — 2014. — Т. 15, № 2. — С. 1–9. — arXiv: [1411.3657](#) [[hep-ph](#)].
- D5. *Belotsky K. M.* [и др.]. High Energy Positrons and Gamma Radiation from Decaying Constituents of a two-component Dark Atom Model // Int. J. Mod. Phys. — 2015. — Т. D24, № 13. — С. 1545004. — arXiv: [1508.02881](#) [[astro-ph.HE](#)].
- D6. *Alekseev V. V.* [и др.]. High-energy cosmic antiparticle excess vs. isotropic gamma-ray background problem in decaying dark matter Universe // J. Phys. Conf. Ser. — 2016. — Т. 675, № 1. — С. 012023.
- D7. *Alekseev V. V.* [и др.]. On a possible solution to gamma-ray overabundance arising in dark matter explanation of cosmic antiparticle excess // J. Phys. Conf. Ser. — 2016. — Т. 675, № 1. — С. 012026.
- D8. *Alekseev V. V.* [и др.]. Analysis of a possible explanation of the positron anomaly in terms of dark matter // Phys. of Atom. Nucl. — 2017. — Т. 80, № 4. — С. 402–406. — eprint: [Phys.Atom.Nucl.80\(2017\)no.4,713-717](#).
- D9. *Belotsky K.* [и др.]. Fermi-LAT kills dark matter interpretations of AMS-02 data. Or not? // JCAP. — 2017. — Т. 1701, № 01. — С. 021. — arXiv: [1606.01271](#) [[astro-ph.HE](#)].

- D10. *Alekseev V. V.* [и др.]. Relieving the Tension between Dark Matter Production of High-energy Cosmic Antiparticles and FERMI/LAT Constraint on Isotropic Diffuse Gamma-ray Background // Phys. Procedia. — 2015. — Т. 74. — С. 48–50.
- D11. *Belotsky K. M.* [и др.]. Gamma-rays from possible disk component of dark matter // Journal of Physics: Conference Series. — 2017. — Т. 798. — С. 012084.
- D12. *Belotsky K. M., Esipova E. A., Kirillov A. A.* On the classical description of the recombination of dark matter particles with a Coulomb-like interaction // Phys. Lett. — 2016. — Т. B761. — С. 81–86. — arXiv: [1506.03094 \[astro-ph.CO\]](#).
- D13. *Belotsky K.* [и др.]. On Recombination of Dark Matter Particles with Dark U(1) Interaction // Phys. Proc. — 2015. — Т. 74. — С. 24–27.
- D14. *Belotsky K.* [и др.]. On the temperature evolution of multicomponent dark matter with Coulomb-like interaction // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — Т. 675. — С. 012017.
- D15. *Belotsky K. M.* [и др.]. Dark Coulomb binding of heavy neutrinos of fourth family // International Journal of Modern Physics D. — 2015. — Т. 24, № 13. — С. 1545008.
- D16. *Belotsky K. M., Kirillov A. A., Soloviyov M. L.* Development of dark disk model of positron anomaly origin // Int. J. Mod. Phys. D. — 2018. — Т. 27, № 06. — С. 1841010. — arXiv: [1802.04678 \[astro-ph.HE\]](#).
- D17. *Belotsky K. M.* [и др.]. Indirect effects of dark matter // International Journal of Modern Physics D. — 2019. — Т. 28, № 13. — С. 1941011–272. — arXiv: [1909.04735 \[hep-ph\]](#).
- D18. *Belotsky K. M.* [и др.]. Clusters of primordial black holes and reionization problems // Phys. of Atom. Nucl. — 2015. — Т. 78. — С. 229.
- D19. *Belotsky K. M., Kirillov A. A.* Primordial black holes with mass $10^{16} - 10^{17}$ g and reionization of the Universe // JCAP. — 2015. — Т. 1501, № 01. — С. 041. — arXiv: [1409.8601 \[astro-ph.CO\]](#).
- D20. *Belotsky K. M.* [и др.]. Signatures of primordial black hole dark matter // Mod. Phys. Lett. A. — 2014. — Т. 29. — С. 1440005. — arXiv: [1410.0203](#).
- D21. *Belotsky K. M.* [и др.]. Primordial black holes and the observable features of the universe // International Journal of Modern Physics D. — 2014. — Т. 24, № 13. — С. 1545005.

- D22. *Belotsky K. M.* [и др.]. Reionization effect enhancement due to primordial black holes // *Int. J. Mod. Phys.* — 2017. — Т. D26, № 09. — С. 1750102. — arXiv: [1702.06338 \[astro-ph.CO\]](#).
- D23. *Belotsky K. M.* [и др.]. Clusters of Primordial Black Holes // *European Physical Journal C.* — 2019. — Т. 79, № 3. — С. 246. — arXiv: [1807.06590 \[astro-ph.CO\]](#).

Список использованных источников

1. *Moore B.* Evidence against dissipationless dark matter from observations of galaxy haloes // *Nature.* — 1994. — Т. 370. — С. 629.
2. *Blennow M.* [и др.]. Self-interacting inelastic dark matter: A viable solution to the small scale structure problems // *JCAP.* — 2017. — Т. 284, № 03. — С. 048. — arXiv: [arXiv:1612.06681 \[hep-ph\]](#).
3. *Foot R.* Resolution of the small scale structure issues with dissipative dark matter from multiple standard model sectors // *Physical Review D.* — 2018. — Т. 98, № 12. — ISSN 2470-0029.
4. *Tulin S., Yu H.-B.* Dark Matter Self-interactions and Small Scale Structure. — 2017. — arXiv: [arXiv:1705.02358 \[hep-ph\]](#).
5. *Spergel D. N., Steinhardt P. J.* Observational evidence for self-interacting cold dark matter // *Phys. Rev. Lett.* — 2000. — Т. 84. — С. 3760—3763. — arXiv: [arXiv:astro-ph/9909386 \[astro-ph\]](#).
6. *Gondolo P., Silk J.* Dark matter annihilation at the galactic center // *Phys. Rev. Lett.* — 1999. — Т. 83. — С. 1719—1722. — arXiv: [arXiv:astro-ph/9906391 \[astro-ph\]](#).
7. *Foot R.* Dissipative dark matter explains rotation curves // *Phys. Rev. D.* — 2015. — Т. 91, № 12. — С. 123543. — arXiv: [1502.07817 \[astro-ph.GA\]](#).
8. *Kamada A.* [и др.]. Self-Interacting Dark Matter Can Explain Diverse Galactic Rotation Curves // *Phys. Rev. Lett.* — 2017. — Т. 119, № 11. — С. 111102. — arXiv: [1611.02716 \[astro-ph.GA\]](#).
9. *Pollack J.* [и др.]. Supermassive Black Holes from Ultra-Strongly Self-Interacting Dark Matter // *Astrophys. J.* — 2015. — Т. 804, № 2. — С. 131. — arXiv: [arXiv:1501.00017 \[astro-ph.CO\]](#).

10. *Randall L., Scholtz J.* Dissipative Dark Matter and the Andromeda Plane of Satellites // JCAP. — 2015. — T. 1509, № 09. — C. 057. — arXiv: [arXiv:1412.1839 \[astro-ph.GA\]](#).
11. *Massey R.* [и др.]. The behaviour of dark matter associated with four bright cluster galaxies in the 10 kpc core of Abell 3827 // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2015. — T. 449. — C. 3393–3406. — arXiv: [arXiv:1504.03388 \[astro-ph.CO\]](#).
12. *Adriani O.* [и др.]. An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1.5–100 GeV // Nature. — 2009. — T. 458. — C. 607–609. — arXiv: [arXiv:0810.4995 \[astro-ph\]](#).
13. *Aguilar M.* [и др.]. 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. — T. 110. — C. 141102.
14. *Ackermann M.* [и др.]. Measurement of separate cosmic-ray electron and positron spectra with the Fermi Large Area Telescope // Phys. Rev. Lett. — 2012. — T. 108. — C. 011103. — arXiv: [arXiv:1109.0521 \[astro-ph.HE\]](#).
15. *Belotsky K. M., other.* Sakharov’s enhancement in the effect of 4th generation neutrino // Grav. Cosmol. Suppl. — 2000. — T. 6. — C. 140–143.
16. *Arkani-Hamed N., other.* A Theory of Dark Matter // Phys. Rev. — 2009. — T. D79. — C. 015014. — arXiv: [arXiv:0810.0713 \[hep-ph\]](#).
17. *Chen C.-H.* [и др.]. Dark matter for excess of AMS-02 positrons and antiprotons // Phys. Lett. — 2015. — T. B747. — C. 495–499. — arXiv: [arXiv:1504.07848 \[hep-ph\]](#).
18. *Huang X.-J.* [и др.]. Antiprotons from dark matter annihilation through light mediators and a possible excess in AMS-02 $\bar{p}/p$ data // Phys. Rev. — 2017. — T. D95, № 6. — C. 063021. — arXiv: [arXiv:1611.01983 \[hep-ph\]](#).
19. *Khlopov M. Y.* Dark matter reflection of particle symmetry // Mod. Phys. Lett. — 2017. — T. A32. — C. 1740001. — arXiv: [arXiv:1704.06506 \[hep-ph\]](#).
20. *Khlopov M. Y.* 10 years of dark atoms of composite dark matter // Proceedings, 18th Workshop on What Comes Beyond the Standard Models?: Bled, Slovenia, July 11–19, 2015. — 2015. — C. 71–77. — arXiv: [arXiv:1512.01081 \[hep-ph\]](#).

21. *Arbey A.* [и др.]. Fundamental Composite Electroweak Dynamics: Status at the LHC // *Phys. Rev.* — 2017. — Т. D95, № 1. — С. 015028. — arXiv: [arXiv:1502.04718 \[hep-ph\]](#).
22. *Zeldovich Y. B., Khlopov M. Y.* On the Concentration of Relic Magnetic Monopoles in the Universe // *Phys. Lett.* — 1978. — Т. 79B. — С. 239–241.
23. *Barkana R., Loeb A.* In the beginning: the first sources of light and the reionization of the universe // *Phys. Rept.* — 2001. — Т. 349. — С. 125–238. — eprint: [arXiv:astro-ph/0010468](#).
24. *Kouvaris C.* Dark Majorana Particles from the Minimal Walking Technicolor // *Phys. Rev.* — 2007. — Т. D76. — С. 015011. — arXiv: [arXiv:hep-ph/0703266 \[HEP-PH\]](#).
25. *Kainulainen K.* [и др.]. The WIMP of a Minimal Technicolor Theory // *Phys. Rev.* — 2007. — Т. D75. — С. 085003. — arXiv: [arXiv:hep-ph/0612247 \[hep-ph\]](#).
26. *Blennow M.* [и др.]. Neutrinos from WIMP annihilations using a full three-flavor Monte Carlo // *JCAP.* — 2008. — Т. 0801. — С. 021. — arXiv: [arXiv:0709.3898 \[hep-ph\]](#).
27. *Ackermann M.* [и др.]. Dark matter constraints from observations of 25 Milky Way satellite galaxies with the Fermi Large Area Telescope // *Phys. Rev.* — 2014. — Т. D89. — С. 042001. — arXiv: [arXiv:1310.0828 \[astro-ph.HE\]](#).
28. *Ackermann M.* [и др.]. Constraints on the Galactic Halo Dark Matter from Fermi-LAT Diffuse Measurements // *Astrophys. J.* — 2012. — Т. 761. — С. 91. — arXiv: [arXiv:1205.6474 \[astro-ph.CO\]](#).
29. *Buckley J.* [и др.]. Working Group Report: WIMP Dark Matter Indirect Detection // *Proceedings, 2013 Community Summer Study on the Future of U.S. Particle Physics: Snowmass on the Mississippi (CSS2013): Minneapolis, MN, USA, July 29-August 6, 2013.* — 2013. — arXiv: [arXiv:1310.7040 \[astro-ph.HE\]](#).
30. *Ibarra A.* [и др.]. Indirect Searches for Decaying Dark Matter // *Int. J. Mod. Phys.* — 2013. — Т. A28. — С. 1330040. — arXiv: [arXiv:1307.6434 \[hep-ph\]](#).
31. *Cirelli M.* [и др.]. Spectra of neutrinos from dark matter annihilations // *Nucl. Phys.* — 2005. — Т. B727. — С. 99–138. — arXiv: [arXiv:hep-ph/0506298 \[hep-ph\]](#) ; — [Erratum: *Nucl. Phys.*B790,338(2008)].

32. *Ackermann M.* [и др.]. Fermi LAT Search for Dark Matter in Gamma-ray Lines and the Inclusive Photon Spectrum // *Phys. Rev.* — 2012. — T. D86. — C. 022002. — arXiv: [arXiv:1205.2739v1 \[astro-ph.HE\]](#).
33. *Cirelli M.* Status of Indirect (and Direct) Dark Matter searches. — 2015. — arXiv: [arXiv:1511.02031 \[astro-ph.HE\]](#).
34. *Belotsky K.* [и др.]. The DAMPE excess and gamma-ray constraints // *Physics of the Dark Universe.* — 2019. — T. 26. — C. 100333. — arXiv: [1904.02456 \[astro-ph.HE\]](#).
35. *Belotsky K. M.* [и др.]. Cosmic Gamma Ray Constraints on the Indirect Effects of Dark Matter // *arXiv e-prints.* — 2020. — arXiv:2004.05165. — arXiv: [2004.05165 \[hep-ph\]](#).
36. *Belotsky K. M., Kamaletdinov A. K.* Consideration of a loop decay of dark matter particle into electron-positron from point of view of possible FSR suppression // *arXiv e-prints.* — 2020. — arXiv:2011.12283. — arXiv: [2011.12283 \[hep-ph\]](#).
37. *Accardo L.* [и др.]. High Statistics Measurement of the Positron Fraction in Primary Cosmic Rays of 0.5–500 GeV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station // *Phys. Rev. Lett.* — 2014. — T. 113. — C. 121101.
38. *Ackermann M.* [и др.]. The spectrum of isotropic diffuse gamma-ray emission between 100 MeV and 820 GeV // *Astrophys. J.* — 2015. — T. 799. — C. 86. — arXiv: [arXiv:1410.3696 \[astro-ph.HE\]](#).
39. *Elyutin P. V.* Classical recombination cross section // *Theoretical and Mathematical Physics.* — 1978. — T. 34, № 2. — C. 112–115.
40. *Khlopov M. Y.* Composite dark matter from the fourth generation // *JETP Lett.* — 2006. — T. 83. — C. 1–4.