

*На правах рукописи*

**Ерошенко  
Юрий Николаевич**

**Нелинейные гравитационно-связанные  
структуры в ранней Вселенной**

01.04.02 – теоретическая физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва — 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

**Официальные оппоненты:**

**Зыбин Кирилл Петрович**, доктор физико-математических наук, член-корреспондент Российской академии наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Отделение теоретической физики им. И.Е. Тамма, Лаборатория проблем физики космоса, главный научный сотрудник

**Захаров Александр Федорович**, доктор физико-математических наук, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный научный центр Российской Федерации — Институт Теоретической и Экспериментальной Физики, Лаборатория 230, ведущий научный сотрудник

**Бронников Кирилл Александрович**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы», Центр гравитации и фундаментальной метрологии, главный научный сотрудник

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук.

Защита состоится \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 002.119.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук, адрес: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте [www.inr.ru](http://www.inr.ru).

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.119.01

доктор физико-математических наук

С. В. Троицкий

## Общая характеристика диссертации

Диссертационная работа посвящена теоретическому исследованию образования во Вселенной гравитационно-связанных объектов различного типа в ранние догалактические эпохи. Центральной темой являются мелкомасштабные сгустки темной материи (ТМ) с массами, меньшими масс звезд. Согласно теории инфляции, спектр первичных возмущений продолжается в гораздо меньшие масштабы, чем масштабы галактик. Это означает, что еще до образования галактик при больших красных смещениях могли образовываться сгустки темной материи (СТМ) с малыми массами. В стандартном наиболее консервативном сценарии СТМ образуются на пылевидной стадии эволюции Вселенной. В других сценариях СТМ могут рождаться раньше – на радиационно-доминированной стадии при наличии дополнительных локальных максимумов в спектре космологических возмущений плотности, либо вокруг первичных черных дыр (ЧД) или топологических дефектов. В диссертации рассматривается проблема выживания СТМ в процессах их приливного гравитационного взаимодействия со звездами.

Первичные черные дыры (ПЧД) рассмотрены в диссертации в различных аспектах: как возможный компонент ТМ и как затравки для образования ранних галактик или квазаров. Кроме того, исследованы гравитационные всплески от столкновений ПЧД в скоплениях. Также в диссертации рассмотрены нелинейные гравитационные объекты, структура которых определяется релятивистской теорией гравитации, и которые могли рождаться во Вселенной на ранней стадии ее эволюции.

Несмотря на то, что рассматриваемые в диссертации объекты, в основном, догалактические, они могли сохраниться до наших дней (в том числе, в нашей Галактике), и иметь наблюдательные проявления. Поиск этих проявлений дает возможность проверки предлагаемых моделей. Прежде всего, наиболее перспективным направлением является поиск сигналов от аннигиляции частиц ТМ в плотных СТМ. Рассчитанные в диссертации аннигиляционные сигналы сравниваются с наблюдаемым гамма-фоном. Из условия того, что рассчитанный сигнал не превышает фон,

находятся совместные ограничения на свойства СТМ и свойства частиц ТМ.

Одним из наблюдательных проявлений ПЧД могут быть гравитационно-волновые сигналы от столкновений ПЧД в скоплениях. В диссертации рассчитан ожидаемый темп гравитационных всплесков. Эта модель может быть проверена с помощью следующего поколения детекторов гравитационных волн. Также образовавшиеся рано ПЧД могли принимать участие в процессе формирования, по крайней мере, части сверхмассивных ЧД в ядрах галактик. При этом вокруг центральных ЧД должен нарастать пик плотности ТМ, характеристики которого зависят от эволюционной истории ЧД. В диссертации рассмотрен метод измерения массы ТМ в центре Галактики на основе прецессии звезд. Этот метод в будущем может помочь реконструировать историю образования центральной ЧД, в том числе, в модели слияний менее массивных ПЧД.

Диссертационная работа основана на результатах, полученных, в основном, в 2001-2016 гг. По теме диссертации опубликованы три обзора на русском языке в журнале Успехи физических наук. Среди всех публикаций по теме диссертации [1]-[39] основными публикациями являются [1, 3, 6, 7, 9, 10, 12, 13, 16, 18, 24, 27, 29, 31, 34, 35, 39].

## Методы

Результаты, представленные в диссертации, получены путем аналитических и численных расчетов. При исследовании нелинейных структур в ранней Вселенной применялись методы гравитационной динамики как в ньютоновском приближении, так и в рамках общей теории относительности и конформной теории гравитации. Для получения ограничений на параметры моделей применяется метод сравнения рассчитанных величин с верхними наблюдательными пределами по гамма-фону, полученными на гамма-телескопах. При разработке теоретических моделей требовалась их непротиворечивость и согласие со всем массивом астрофизических и космологических данных, известных из наблюдений, а также, где это возможно, выделялись эффекты, на основе которых в будущем можно выполнить

наблюдательную проверку моделей.

## Цель диссертации

Основными целями диссертационной работы является:

а) Исследование процессов образования и разрушения мелкомасштабных СТМ. Расчет начальной функции масс СТМ и трансформированной функции масс СТМ, избежавших приливного разрушения при столкновениях со звездами. Расчет усиления сигнала от аннигиляции ТМ в СТМ по сравнению с сигналом в диффузно распределенной ТМ (без СТМ).

б) Обоснование возможности образования СТМ из адиабатических возмущений плотности на радиационно-доминированной стадии эволюции Вселенной. Исследование нарастания несферичности формирующегося объекта и ее влияния на число образующихся СТМ. Исследование возможных наблюдательных проявлений сверхплотных СТМ, образовавшихся на стадии радиационного доминирования.

в) Исследование моделей, в которых ПЧД служат затравками для образования плотных пиков плотности ТМ или гало ТМ. Для маломассивных ПЧД эти пики плотности могут являться источниками аннигиляционного сигнала, поэтому производился расчет возможных сигналов и сравнение их с имеющимися ограничениями по гамма-фону. В моделях со скоплениями ПЧД рассчитан темп гравитационных всплесков от столкновений ПЧД в скоплениях.

г) Исследование свойств гравитационных нелинейных структур в ранней Вселенной. В том числе, изучаются их свойства в конформной теории гравитации, которая может предшествовать общей теории относительности. Исследование некоторых аспектов аккреции излучения на ПЧД, имевшей место на радиационно-доминированной стадии. Исследование ПЧД с зарядами на внутренних орбиталях и возможности их образований в ранней Вселенной.

## Актуальность диссертации

Хотя ТМ составляет примерно 27% от полной плотности вещества во Вселенной, ее природа до сих пор остается неизвестной. Среди предложенных вариантов наиболее популярной является модель новых элементарных частиц. Поэтому в настоящее время очень актуальны и привлекают большое внимание проблемы прямой и непрямой регистрации частиц ТМ. В некоторых экспериментах уже сообщалось о возможной регистрации частиц ТМ, в том числе, о наблюдении сезонных вариаций отсчетов детекторов, которые могут объясняться изменением направления движения Земли в течение года. Однако сообщения различных групп пока не согласуются между собой или не подтверждаются в независимых экспериментах. Частицы ТМ не удалось пока получить и идентифицировать на Большом адронном коллайдере или на других ускорителях, поэтому остается актуальной попытка их непрямой регистрации. Разработка новых подходов к непрямой регистрации частиц ТМ может сыграть принципиальную роль в выяснении природы ТМ и поэтому в ближайшие годы будет оставаться одной из наиболее актуальных проблем астрофизики. Обнаружение продуктов аннигиляции частиц ТМ (фотонов, нейтрино или заряженных частиц) может в будущем дать важную информацию о свойствах частиц ТМ и разрешить противоречия в данных по прямой регистрации, в связи с чем научная значимость данной проблемы весьма велика.

Ключ к пониманию природы ТМ может дать изучение нелинейных самогравитирующих структур в ранней Вселенной, таких как СТМ, ПЧД и др. Эти структуры могут как сами представлять ТМ, так и влиять на ее распределение, создавая вокруг себя плотные сгущения. В этих сгущениях эффективность аннигиляции частиц ТМ выше, чем в среднем, если ТМ состоит из аннигилирующих частиц. Теоретические расчеты усиления потоков излучения от аннигиляции частиц в СТМ являются одним из главных результатов диссертации.

В последние годы было обнаружено несколько квазаров на больших красных смещениях  $z > 6$ , высокая светимость которых говорит о на-

личии ЧД большой массы. Раннюю квазарную активность трудно объяснить в рамках обычных астрофизических сценариев, поскольку они требуют достаточно большого времени. В связи с этим, разработка новых теорий образования сверхмассивных ЧД на больших красных смещениях и их наблюдательная проверка являются актуальными задачами. Представляются перспективными модели с сильно нелинейными структурами – ПЧД и их скоплениями, которые могут образовываться еще на стадии доминирования во Вселенной излучения по различным механизмам и рано эволюционировать в сверхмассивные ЧД.

Другой актуальной проблемой астрофизики является необходимость объяснения наблюдаемого из центра Галактики избытка гамма-излучения. Аннигиляция частиц ТМ может решить эту проблему, и в рамках данной диссертационной работы выполнены исследования по этой теме. Рассмотрены особенности распределения ТМ, обусловленные наличием в центре Галактики сверхмассивной ЧД. Здесь в единой физической ситуации сочетаются как проблема ТМ и ее аннигиляция, так и вопрос о происхождении сверхмассивных ЧД.

Исследование ПЧД приобрело особую актуальность в связи с регистрацией всплесков гравитационных волн гравитационно-волновым интерферометром LIGO. Наличие гравитационных волн еще раз подтвердило справедливость общей теории относительности в слабых полях, а их источник – слияние ЧД в двойной системе обосновывает существование ЧД и дает проверку теории гравитации в сильных полях. ПЧД, наряду с ЧД звездного происхождения, могут быть непосредственным источником этого сигнала, поскольку они могут формироваться связанными парами или в скоплениях.

## **Научная новизна и практическая значимость**

*Научная новизна* диссертации заключается в разработке новых подходов и методов исследования и в получении с их помощью ряда новых физических результатов. По теме аннигиляции частиц ТМ были сформулированы и решены ряд оригинальных задач. А именно, впервые были

рассмотрены процессы формирования функции масс мелкомасштабных СТМ в процессах раннего иерархического сгущения ТМ с учетом приливных разрушений, и исследована трансформация функции масс СТМ при их последующих столкновениях со звездами в Галактике. Впервые поставлен и решен вопрос о возможности выживания плотных центральных сердцевин СТМ в процессе приливных разрушений внешних частей СТМ. С использованием этих результатов вычислено усиление аннигиляционных сигналов и исследована их анизотропия. Эти результаты могут оказаться полезными для непрямого поиска частиц ТМ. Обоснована модель образования сверхплотных СТМ и найдены их возможные свойства. Установлена связь параметров СТМ с ПЧД при их совместном образовании из единого спектра адиабатических возмущений плотности. Впервые исследована аннигиляция частиц в сверхплотных СТМ. Исследовано образование и выполнен расчет параметров гало из ТМ вокруг ПЧД. Впервые была рассмотрена динамика кластеров ПЧД совместно с динамикой ТМ. Исследованы физические приложения этого сценария для раннего формирования галактик и квазаров, а также выполнен расчет темпа гравитационных всплесков от слияния ПЧД в скоплениях. Исследовано возможное влияние гало ТМ вокруг ЧД в центре Галактики на прецессию звезд, и получены новые аналитические выражения для угла прецессии. Впервые рассмотрены свойства ряда нелинейных гравитационных структур (гравитационных пузырей, ЧД с зарядами на внутренних орбиталях и др.), которые могли образовываться в ранней Вселенной.

*Практическая значимость* диссертации состоит, во-первых, в том, что разработанные модели и методы могут применяться в последующих работах для расчета свойств СТМ, для изучения процессов их разрушения и для предсказания аннигиляционных сигналов, что, в свою очередь, может помочь в прямом и косвенном методах регистрации частиц ТМ. Полученные результаты могут помочь в интерпретации данных наблюдений, выполняемых в настоящее время на космических гамма-телескопах. Во-вторых, если будет подтверждено существование мелкомасштабных СТМ (через наблюдения аннигиляции частиц ТМ или другими методами), то на основе свойств СТМ можно будет судить о форме спектра возмуще-

ний в малых масштабах и о процессах на стадии инфляции, ответственных за генерацию соответствующих возмущений. В частности, можно будет фиксировать параметры в лагранжианах конкретных полевых моделей инфляции. В-третьих, сделанные предсказания о структуре ранних объектов во Вселенной могут помочь в поиске и возможной идентификации этих объектов по данным астрономических наблюдений. В том числе, сделаны конкретные предсказания о всплесках гравитационных волн от столкновений ЧД в скоплениях и о профилях плотности ранних галактик. В-четвертых, расчет угла прецессии звезд может помочь в выявлении распределенной массы вокруг центральной ЧД в центре Галактики. В-пятых, выполненное исследование нелинейных гравитационных структур представляет интерес также с точки зрения разработанных в этой части работы математических методов, которые могут найти применение в других работах.

## Положения, выносимые на защиту

1. На ранней иерархической стадии формирования структур в процессах приливного гравитационного разрушения выживают 0.1 – 0.5 % СТМ в каждом логарифмическом интервале масс  $\Delta M/M \sim 1$ . Внешние слои СТМ, не разрушившихся на иерархической стадии, затем эффективно разрушаются при гравитационном взаимодействии со звездами гало и диском Галактики. В итоге, доля массы гало Галактики в форме СТМ с массами  $\leq 10^2 M_{\odot}$  составляет  $\sim 3\%$ . Однако в галактической окрестности Солнца выживает доля  $P \sim 1$  центральных сердцевин СТМ. Эти избежавшие разрушения сердцевинны могут являться основными источниками аннигиляционного сигнала. Усиление аннигиляционного сигнала (по сравнению с моделями без СТМ) зависит от спектра первичных космологических возмущений плотности и может достигать примерно одного порядка величины. Данный эффект делает более жесткими ограничения на сечение аннигиляции, следующие из сравнения вычисленного и наблюдаемого гамма-фона.

2. На космологической стадии доминирования излучения возможно формирование сверхплотных СТМ при наличии на малых масштабах локального максимума в спектре возмущений. В случае адиабатических возмущений плотности принципиальную роль в формировании СТМ играет несферичность начальных возмущений. Рост несферичности приводит к дезинтеграции большинства СТМ на стадии их образования. Выживают лишь СТМ, образующиеся из возмущений, форма которых изначально была близка к сферически-симметричной. Однако даже в небольшом количестве СТМ, которые смогли сформироваться, плотность столь велика, что эти объекты могут на несколько порядков усилить аннигиляционный сигнал. Сверхплотные СТМ могут образовываться также вокруг замкнутых петель космических струн и ПЧД. Сравнение с наблюдаемым Fermi-LAT гамма-фоном дают совместное ограничение на свойства частиц ТМ и на источники начальных возмущений плотности. В случае ТМ в форме нейтралитона с массами  $m \sim 100 \text{ ГэВ}/c^2$  сравнение расчетов с данными Fermi-LAT допускает сечение аннигиляции  $\langle\sigma v\rangle \simeq 10^{-26} \text{ см}^3\text{с}^{-1}$  при пороге рождения ПЧД  $\delta_{\text{th}} \geq 1/3$ . При величине сечения аннигиляции  $\langle\sigma v\rangle \simeq 10^{-26} \text{ см}^3\text{с}^{-1}$  исключается диапазон  $0.05 < G\mu/(10^{-8}c^2) < 0.51$  для массового параметра  $\mu$  космических струн.
  
3. На догалактической стадии вокруг ПЧД и их скоплений возможно формирование плотных пиков и гало из ТМ. Пики плотности могут являться яркими источниками аннигиляционного гамма-излучения. Сравнение рассчитанного сигнала с данными Fermi-LAT ограничивает сверху современный космологический параметр плотности ПЧД с массами  $M_{\text{ВН}} \geq 10^{-8}M_{\odot}$  величинами от  $\Omega_{\text{ВН}} \leq 1$  до  $\Omega_{\text{ВН}} \leq 10^{-8}$ , в зависимости от массы ПЧД  $M_{\text{ВН}}$ . Гало вокруг больших ПЧД и их скоплений могут представлять особый класс плотных галактик и ранних квазаров на красных смещениях  $z > 6$ . В этой модели также можно объяснить наблюдаемые корреляции между массами центральных сверхмассивных ЧД и дисперсией скоростей в балджах галактик. Слияние ПЧД в скоплениях сопровождается

всплесками гравитационных волн, поиск таких сигналов дает принципиальную возможность проверки предлагаемых моделей на будущих детекторах гравитационных волн.

4. Исследование свойств нелинейных гравитационных структур различных типов. Если существовал период, когда действовала конформная гравитация, могли рождаться “гравитационные пузыри” и другие объекты, описываемые найденными точными сферически-симметричными решениями уравнений конформной гравитации. В ранней Вселенной могли образовываться заряженные ЧД с электронами на внутренних (под горизонтом Коши) квантовых уровнях. Эти системы могут представлять новый тип частиц-кандидатов ТМ. Исследована глобальная структура пространства-времени в задаче Вайдья.

## Личный вклад автора

Автору в большинстве основных работ по теме диссертации принадлежит постановка задач и выполнение основного объема математических вычислений. Автор разработал программы на языке Си++, в пакетах Mathematica и Maxima, предназначенные для численного решения задач, вычисления различных выражений и построения графиков. Автором выполнены все расчеты по теме пиков плотности вокруг ПЧД. Вместе с соавторами проводились расчеты взаимодействия нейтралино с фермионами, аккреции вещества на ЧД, прецессии звезд вокруг ЧД, и изучались нелинейные гравитационные структуры.

В частности, вклад автора является определяющим в следующих совместных работах:

- Вывод и решение кинетического уравнения для исследования процессов кинетического отщепления, свободного разлета нейтралино и вычисления минимальной массы СТМ.
- Постановка задач и расчет процессов приливного разрушения СТМ в иерархических структурах и при взаимодействиях со звездами в

Галактике. Автор выдвинул основную идею и выполнил расчеты по теме анизотропии аннигиляционного сигнала.

- Обоснование возможности образования СТМ из адиабатических возмущений плотности на космологической стадии радиационного доминирования. Формулировка начальных условий из линейной теории роста возмущений для уравнения нелинейной эволюции и численное решение соответствующих уравнений. Вывод ограничений по ПЧД на параметры сверхплотных СТМ.
- Разработка формализма, позволяющего учесть нарастание несферичности при эволюции сверхплотных СТМ на радиационно-доминированной стадии (важность учета этого эффекта была указана автору А.Г. Дорошкевичем во время доклада автора на научной конференции).
- Разработка методов расчета совместной гравитационной динамики скопления ПЧД и окружающего его гало ТМ и вычисление профилей плотности получающихся объектов. Расчет темпа всплесков гравитационных волн от столкновений ПЧД в скоплениях.
- Постановка задачи о возможности наличия квантовых орбиталей для заряженных частиц внутри ЧД. Исследование стационарных решений уравнения Дирака в метрике заряженной ЧД Рейснера–Нордстрема. Автором также была предложена идея рассматривать эти ЧД с внутренними зарядами как возможные кандидаты в частицы ТМ.

## Апробация

Полученные в диссертационной работе основные результаты представлены на международных и российских конференциях, в частности, на конференциях:

1. Berezinsky V., Dokuchaev V., Eroshenko Yu. Neutralino annihilation in

- small-scale galactic halo clumps // 11-я Ломоносовская конференция по физике элементарных частиц, Москва, МГУ, 21-27 августа 2003 г.
2. Berezhinsky V., Dokuchaev V., Eroshenko Yu. Small-scale clustering in the galactic halo // Albert Einstein Century International Conference. Palais de l'Unesco, Paris, France, 18-23 July, 2005.
  3. Березинский В. С., Докучаев В. И. и Ерошенко Ю. Н. Аннигиляция темной материи в гало Галактики // Всероссийская астрофизическая конф. "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра 2005 (HEA-2005)", Москва, ИКИ РАН, 26-28 дек. 2005 г.
  4. Berezhinsky V. S., Dokuchaev V. I. and Eroshenko Yu. N. Dark matter distribution in Galaxy // QUARKS-2006. 14th Intern. Seminar on High Energy Physics St. Petersburg, Russia, 19-25 May, 2006.
  5. Berezhinsky V. S., Dokuchaev V. I., Eroshenko Yu. N. Anisotropy of dark matter annihilation with respect to the Galactic plane // 13-я Ломоносовская конференция по физике элементарных частиц, 23–29 августа 2007 г., Москва, МГУ.
  6. Berezhinsky V., Dokuchaev V., Eroshenko Yu. Destruction of dark matter clumps in Galaxy // 15th Intern. Seminar on High Energy Physics QUARKS-2008 Sergiev Posad, Russia, May 23-29, 2008.
  7. Березинский В. С., Докучаев В. И. и Ерошенко Ю. Н. Наблюдательные следствия мелкомасштабной кластеризации темной материи // Всероссийская астрофизическая конференции "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра - 2008", ИКИ РАН, Москва 24-26 декабря 2008 г.
  8. Dokuchaev V., Berezhinsky V., Eroshenko Yu. Dark matter annihilation in the Galaxy // 14th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Particle Physics on the eve of LHC, 19-25 August, 2009, Moscow State University, Moscow.

9. Ерошенко Ю. Н. Аннигиляция темной материи в пиках плотности вокруг первичных черных дыр // XXXIII конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии», 19-22 апреля 2016 г., Пушчинская радиоастрономическая обсерватория, г. Пушино.
10. Berezhinsky V., Dokuchaev V., Eroshenko Yu. Superdense dark matter clumps from superheavy particles // 16th International Seminar on High Energy Physics QUARKS-2010, Kolomna, Russia, 6-12 June, 2010.
11. Berezhinsky V., Dokuchaev V., Eroshenko Yu. Superdense dark matter clumps from nonstandard perturbations // 15th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Moscow State University, 18–24 August, 2011.
12. Березинский В. С., Докучаев В. И., Ерошенко Ю. Н. Влияние несферичности начальных возмущений на эволюцию сгустков темной материи // XXX конференция “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, Пушчинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН, Пушино, 8-11 апреля 2013 г.
13. Березинский В. С., Докучаев В. И., Ерошенко Ю. Н. Мелкомасштабные сгустки темной материи: механизмы формирования и возможные наблюдательные проявления // Доклад на Всероссийской астрономической конференции «Многоликая Вселенная» (ВАК-2013), 23-27 сентября 2013 г., Park Inn Pulkovskaya, Санкт-Петербург.
14. Ерошенко Ю. Н. Аннигиляция темной материи в пиках плотности вокруг первичных черных дыр // XXXIII конференция “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, Пушчинская Радиоастрономическая обсерватория, 19 – 22 апреля 2016 г.
15. Eroshenko Yu. N. Annihilation of dark matter in the density spikes around primordial black holes // DAWN – 2016. Dark Ages and White Nights (Spectroscopy of the CMB), Saint Petersburg, 20-24 June, 2016.

Семинары с докладами автора проводились в ИЯИ РАН, ФИАНе и в Институте прикладной астрономии РАН.

## Благодарности

Автор выражает глубокую признательность Докучаеву В. И. за многолетнее сотрудничество и всестороннюю помощь. Автор благодарен Бабичеву Е. О., Березинскому В. С., Березину В. А., Дубровичу В. К., Лукашу В. Н. и Рубину С. Г. за совместную работу и многочисленные обсуждения, а также ИЯИ РАН – за создание благоприятных условий для научной деятельности.

## Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из Введения, четырех основных глав, Заключения и списка литературы, включающего 429 наименований.

## Содержание работы

**Во Введении** приведена общая характеристика диссертации, ее цель, актуальность, научная новизна. Перечислены положения, выносимые на защиту, описан личный вклад автора в полученные результаты, описана апробация и перечислены публикации по теме диссертационной работы в рецензируемых журналах и материалах конференций. Также во Введении дан краткий обзор области исследования. Выполненное в диссертации исследование затрагивает ряд аспектов современной астрофизики и космологии, введением в которые могут служить монографии [40–44]. Значительная часть результатов диссертации изложена в обзорной статье [9].

**В 1-й главе** рассмотрены процессы образования и разрушения мелкомасштабных СТМ в случае их происхождения из стандартного спектра космологических возмущений плотности, нормированного на данные по анизотропии реликтового излучения, а также рассчитано усиление и степень анизотропии сигнала от аннигиляции частиц ТМ в таких СТМ.

**В разделе 1.1** исследовано обрезание спектра возмущений. Решалось кинетическое уравнение с интегралом столкновения в форме Фок-

кера-Планка [45]

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{p_i}{ma^2} \frac{\partial f}{\partial x_i} - m \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial p_i} = D_p(t) \frac{\partial}{\partial p_i} \left( \frac{p_i}{mT a^2} f + \frac{\partial f}{\partial p_i} \right), \quad (1)$$

где  $f(x, p, t)$  – функция распределения частиц по сопутствующим координатам и импульсам,  $\phi$  – гравитационный потенциал,  $T(t)$  – температура окружающей плазмы,  $D_p(t)$  – коэффициент диффузии в пространстве импульсов. Выполнен расчет времени  $t_d$  и температуры  $T_d$  кинетического отщепления частиц ТМ от космической плазмы и найдена минимальная масса СТМ  $M_{\min}$ . Масса  $M_{\min}$  зависит от свойств частиц ТМ. Получено, что выход нейтралино из кинетического равновесия (отщепление) происходит экспоненциально быстро. По этой причине оправдано рассмотрение диффузии отдельно от свободного разлета. Полученная минимальная масса равна

$$M_{\min} = \frac{\pi^{1/4}}{2^{19/4} 3^{1/4}} \frac{\rho_{\text{eq}}^{1/4} t_d^{3/2}}{G^{3/4}} \left( \frac{T_d}{m} \right)^{3/2} \ln^3 \left\{ \frac{24}{\pi G \rho_{\text{eq}} t_d^2} \right\}. \quad (2)$$

Численно  $M_{\min} \simeq 3 \times 10^{-7} M_{\odot}$  при параметре суперсимметрии  $\tilde{M} = 0.2$  ГэВ и массе частиц  $m = 70$  ГэВ. В этом же разделе выполнено сравнение полученных результатов с результатами других исследований.

Формирование СТМ минимальных масс происходит не за счет слияний меньших объектов, а из обособленных флуктуаций плотности. Такие СТМ относятся к классу СТМ, к которым применима аналитическая модель Гуревича–Зыбина [46–49].

**В разделе 1.2** исследовано формирование функции масс СТМ в процессах раннего иерархического сгущивания с учетом их приливных гравитационных разрушений [50]. В малых масштабах спектр возмущений плотности близок к плоскому спектру, что ведет к быстрому вхождению СТМ в состав больших СТМ. Сохранение адиабатических инвариантов не препятствует разрушению ядер СТМ на этой стадии, т.к. недостаточно времени для формирования сингулярного профиля плотности в СТМ. Распределение СТМ с учетом данных процессов получено в виде

$$\xi \frac{dM}{M} d\nu \simeq \frac{\nu d\nu}{\sqrt{2\pi}} e^{-\nu^2/2} f_1(\gamma) \frac{d \log \sigma_{\text{eq}}(M)}{dM} dM, \quad (3)$$

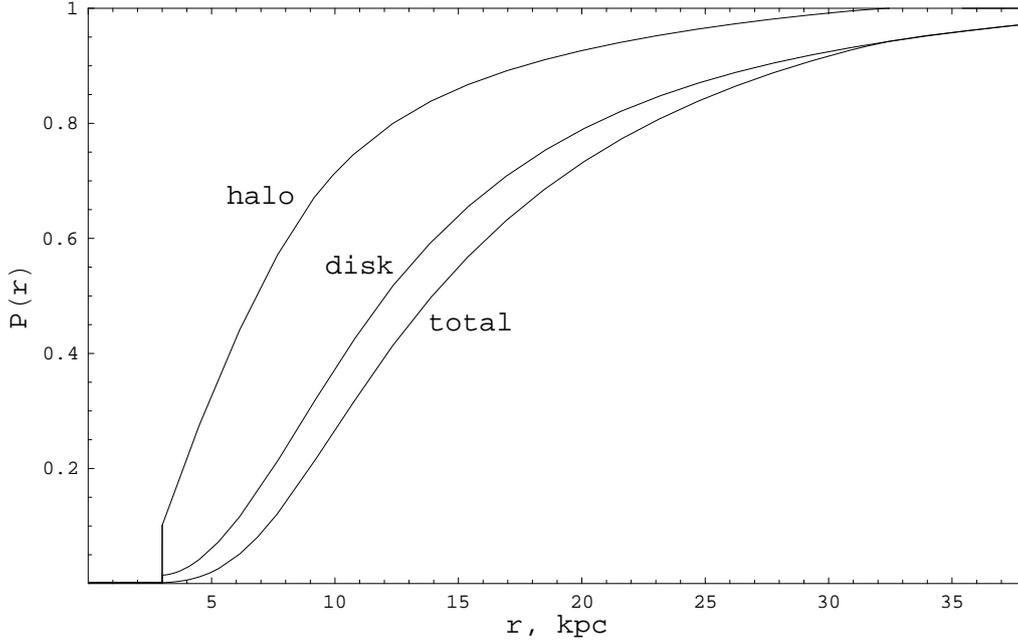


Рис. 1. Доля СТМ с массами  $M = 10^{-6}M_{\odot}$ , выживших в приливных разрушениях диском Галактики  $P_d$ , звездами гало Галактики  $P_H$  и суммарная доля  $P_{\text{tot}} = P_H P_d$  как функция расстояния от центра Галактики. Завал при  $r < 3$  кпк обусловлен разрушением СТМ в балдже.

где  $f_1(\gamma) \simeq 0.2 - 0.3$ ,  $\sigma_{\text{eq}}(M)$  – среднеквадратичная величина возмущений в масштабе массы  $M$  в момент  $t_{\text{eq}}$  перехода на пылевидную стадию. Это распределение хорошо согласуется с результатами численного моделирования как малых СТМ [51], так и больших СТМ с  $M \geq 10^6 M_{\odot}$ .

**В разделе 1.3** исследованы процессы разрушения СТМ в Галактике под действием приливных гравитационных взаимодействий [50] со звездами и найдена вероятность выживания центральных сердцевин (ядер) СТМ. Показано, что значительная доля СТМ или их остатков может сохраниться в течение времени существования Галактики, если радиусы их ядер  $R_c$  достаточно малы. Поскольку основной вклад в аннигиляционный поток дает самая внутренняя область СТМ вблизи ядра, то разрушение внешних слоев СТМ слабо влияет на аннигиляцию, и выжившие в приливных разрушениях ядра СТМ дают основной вклад в аннигиляционный сигнал в Галактике. Во многих работах использовался упрощенный

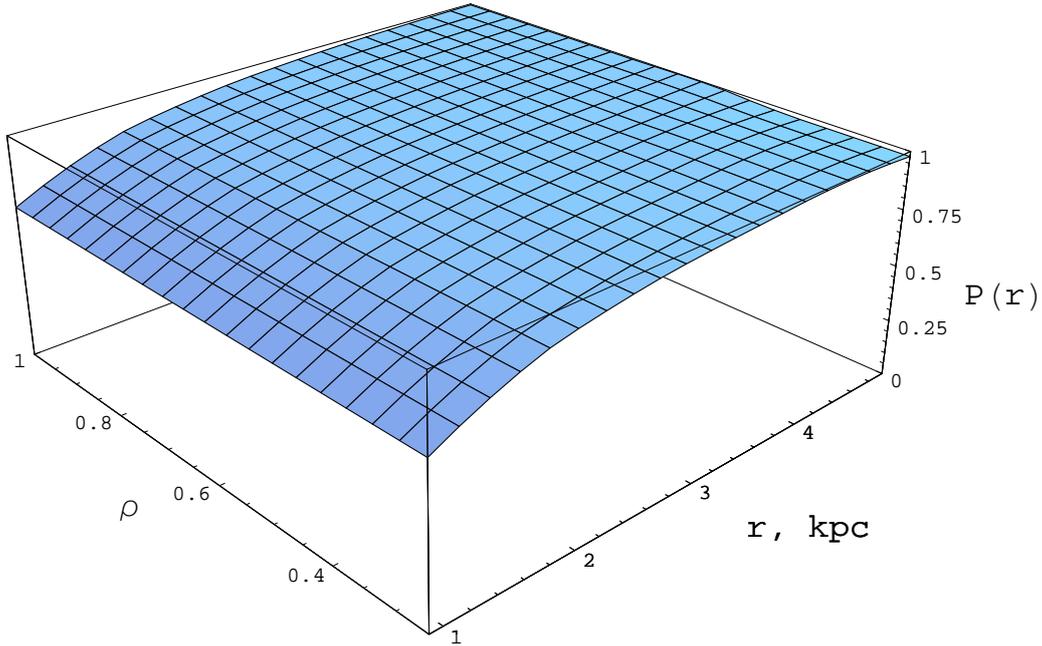


Рис. 2. Вероятность выживания ядер сгустков  $P(r, \rho)$  как функция расстояния от центра Галактики  $r$  и средней внутренней плотности СТМ  $\rho$ . Плотность выражена в единицах  $7 \times 10^{-23} \text{ г см}^{-3}$ .

критерий приливного разрушения СТМ через приращения их внутренней энергии

$$\sum_j (\Delta E)_j \sim |E|, \quad (4)$$

где суммирование идет по последовательным приливным взаимодействиям. Более точный подход требует учета постепенной потери массы при каждом столкновении [52], в частности, для мелкомасштабных СТМ это было отмечено в работе [53]. Пересечение диска Галактики сопровождается гравитационным ударом, воздействующим на структуру СТМ, что в большинстве случаев является главным фактором потери им массы. Также приливные силы и разрушение вызывают взаимодействия со звездами в балдже и в гало. Результаты расчетов приливного разрушения СТМ различными подсистемами Галактики с использованием критерия разрушения (4) суммированы на Рис. 1. Итоговая доля выживших СТМ

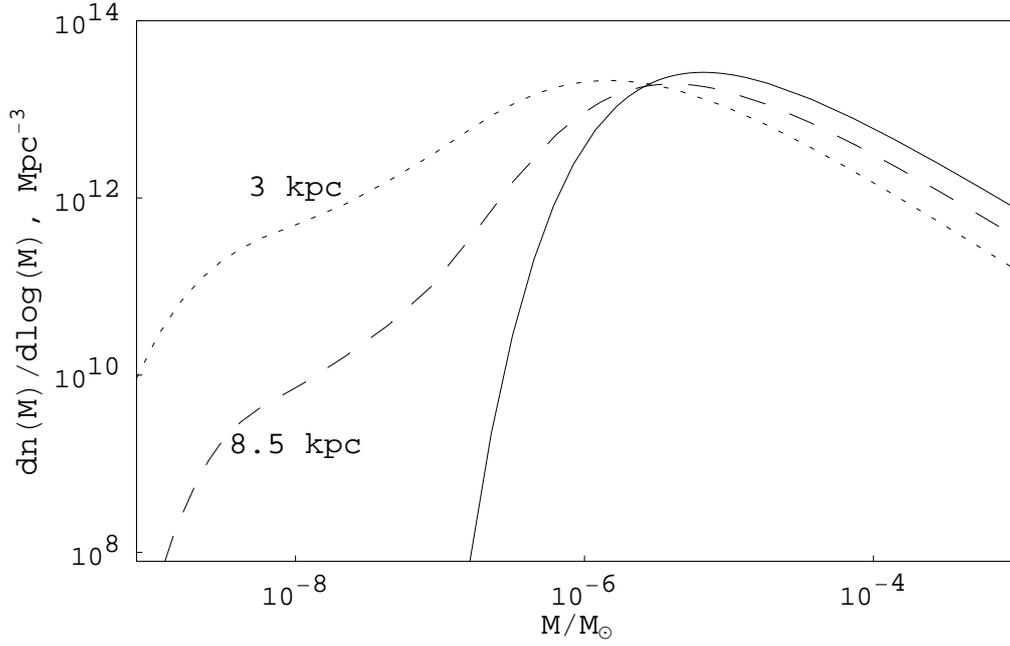


Рис. 3. Модифицированная функция масс остатков СТМ на галактоцентрических расстояниях 3 и 8.5 кпк. Сплошная кривая показывает начальную функцию масс из [51].

(сохранивших большую часть своей массы) с учетом диска и гало  $P(r_\odot) = P_H(r_\odot)P_d(r_\odot)$  равна 21%, 17% и 10%, для масс СТМ  $M = 2 \times 10^{-8}M_\odot$ ,  $M = 10^{-6}M_\odot$  и  $M = 10^{-3}M_\odot$ , соответственно.

Рассмотрен эффект постепенной потери массы (обдирание внешних слоев) СТМ под действием многих приливных взаимодействий. Процессы разрушения диском, балджем и гало были объединены в едином уравнении

$$\frac{dM}{dt} = \left(\frac{dM}{dt}\right)_d + \left(\frac{dM}{dt}\right)_s. \quad (5)$$

которое решалось численно, начиная с момента формирования Галактики и до настоящего времени. При этом использовалось распределение СТМ по орбитальным параметрам в гало Галактики, соответствующим профилю Наварро-Френка-Уайта. Вероятность выживания ядер СТМ в случае относительного радиуса ядра  $x_c = R_c/R \sim 0.05$ , где  $R$  – вириальный радиус СТМ, показана на Рис. 2. Для СТМ с  $x_c \ll 0.05$  на всех расстояниях от центра Галактики  $P \sim 1$ . Даже внутри балджа имеются неразрушен-

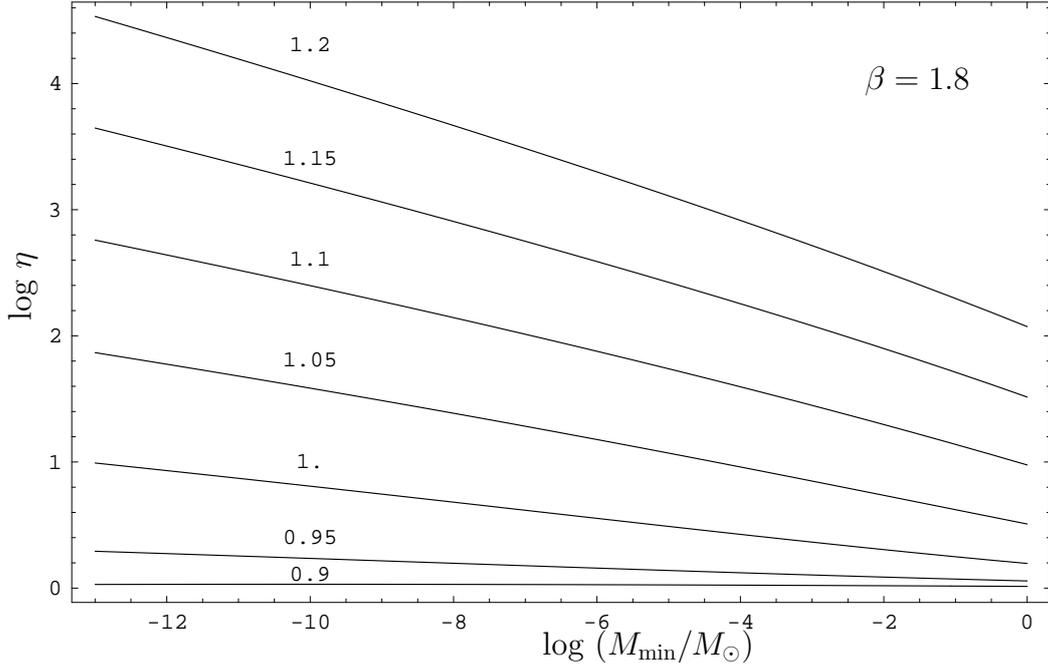


Рис. 4. Усиление аннигиляционного сигнала для степенного профиля плотности СТМ с показателем степени  $\beta = 1.8$  и различных показателях степени  $n_p = 0.9 - 1.2$  первичного спектра возмущений плотности.

ные СТМ, которые проводят внутри балджа лишь малую часть своего орбитального периода. Это означает, что остатки СТМ преимущественно выживают в приливных взаимодействиях в Галактике. Заметное уменьшение  $P(x, \alpha) < 1$  рядом с центром Галактики имеется лишь для СТМ с  $x_c > 0.05$ .

**В разделе 1.3.4** была исследована модификация функции масс СТМ в Галактике с учетом постепенной потери массы СТМ, см. Рис. 3. В балдже остатки СТМ более многочисленны из-за интенсивного разрушения СТС в области большой концентрации звезд по сравнению с разреженным звездным гало.

**В разделе 1.4** Обсуждаются механизмы формирования профиля плотности СТМ и ограничение на максимальную плотность в центре СТМ, следующее из теоремы Лиувилля, причем в расчетах учитывались не только тепловые скорости частиц ТМ, но и их пекулярные скорости. Максимальная плотность важна для расчетов аннигиляции частиц ТМ.

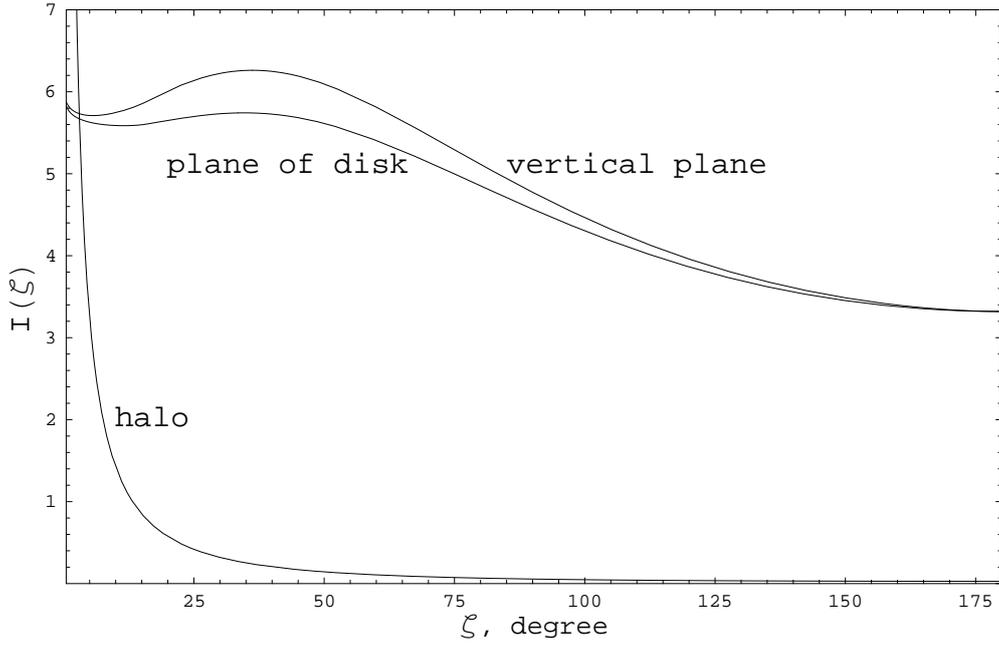


Рис. 5. Аннигиляционный сигнал в плоскости диска галактики и в вертикальной плоскости как функция угла  $\zeta$  между лучом зрения и направлением на центр Галактики. Для сравнения также показан аннигиляционный сигнал от гало Галактики без СТМ. Нормировка по оси ординат условна.

**В разделе 1.5** вычислено усиление аннигиляционного сигнала и найдена величина его анизотропия по отношению к диску Галактики.

Локальный темп аннигиляции пропорционален квадрату концентрации частиц ТМ. Концентрация частиц в СТМ намного больше концентрации в диффузной (некластеризованной) компоненты ТМ. По этой причине аннигиляционный сигнал от СТМ в большинстве случаев доминирует над сигналом от диффузной компоненты. Зависимость интегрального коэффициента усиления (буст-фактора) от минимальной массы и показателя степени первичного спектра возмущений продемонстрирована на Рис. 4. Также была исследована анизотропия аннигиляции в гало. Процесс приливного разрушения СТМ в общем случае анизотропен, он зависит от наклона орбиты СТМ по отношению к плоскости диска. Соответственно, аннигиляция ТМ в гало (в выживших СТМ) также анизотропна. Результаты расчетов показаны на Рис. 5. Отличие сигналов в двух

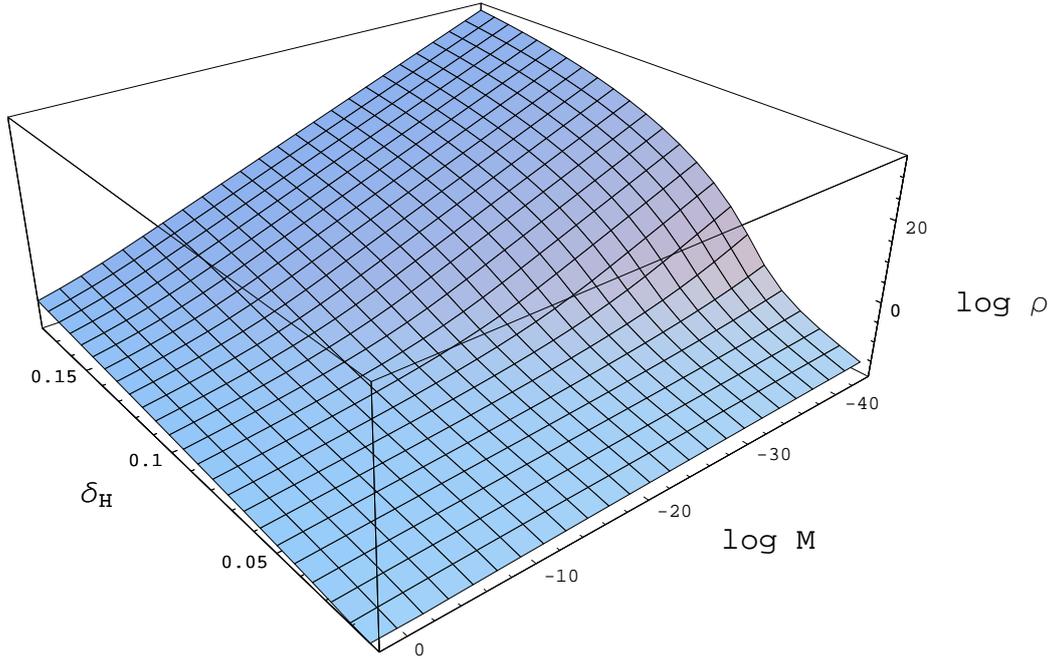


Рис. 6. Средняя плотность СТМ  $\rho$  (в  $\text{г см}^{-3}$ ) в зависимости от их массы  $M$  (в единицах  $M_{\odot}$ ) и величины возмущения  $\delta_{\text{H}}$  на масштабе горизонта.

ортогональных плоскостях имеет максимальное относительное значение  $\delta \simeq 0.09$ . Неизвестная величина несферичности гало является основным источником неопределенности в вычислении анизотропии. Данные наблюдений Fermi-LAT при дальнейшем наборе статистики, вероятно, помогут выделить анизотропный аннигиляционный сигнал над уровнем фона.

Результаты 1-й главы опубликованы в работах [1]-[9].

**В главе 2** рассматриваются сверхплотные СТМ, которые могут образовываться на космологической стадии радиационного доминирования при условии наличия максимума в спектре возмущений. Модель эволюции сферических энтропийных возмущений, развитая в [54], обобщена на случай адиабатических возмущений эллипсоидальной формы. Чтобы рассмотреть эволюцию адиабатических возмущений на стадии радиационного доминирования необходимо выбирать начальные условия из соответствия с известным [41], [42] линейным решением на масштабах меньше

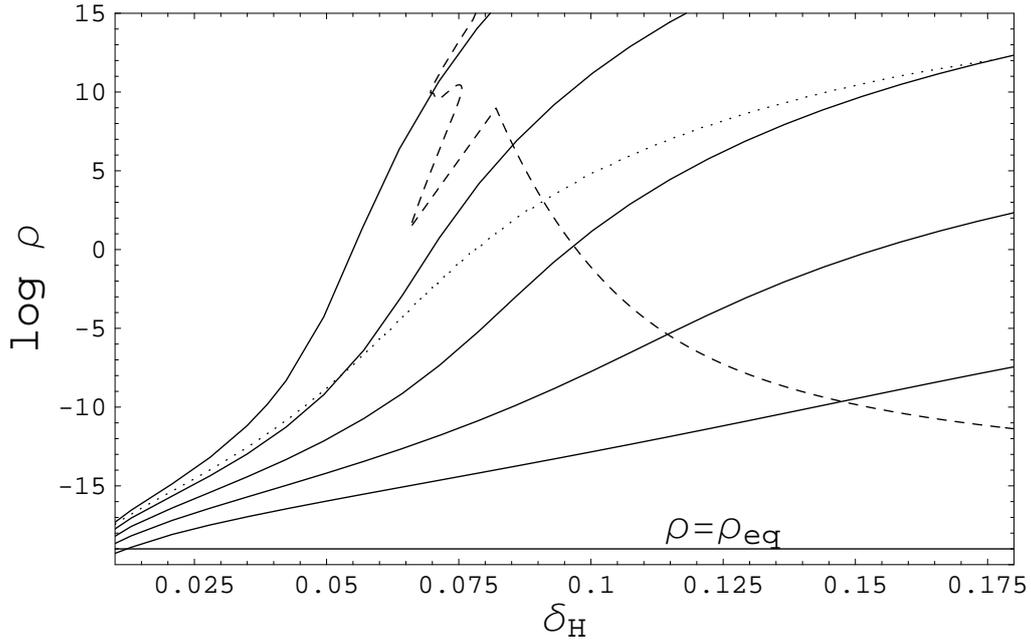


Рис. 7. Средняя плотность  $\rho$  (в  $\text{г см}^{-3}$ ) СТМ в зависимости от возмущения в масштабе горизонта  $\delta_H$ ; сплошные кривые сверху вниз соответствуют массам СТМ  $M = 10^{-10}, 1, 10^{10}, 10^{20}, 10^{30}$  г. Штрихованная кривая отмечает ограничение на плотность СТМ на основе эффекта перепроизводства ПЧД с порогом их образования  $\delta_c = 0.7$ . Время двухчастичной гравитационной релаксации внутри ядра СТМ меньше возраста Вселенной для СТМ над точечной кривой в случае, когда масса частиц ТМ составляет  $m \geq 10^{11}$  ГэВ..

горизонта. При этом был выполнен переход от эйлерова способа описания эволюции возмущений к лагранжеву описанию. В [10] эта модель использовалась для описания некомпактных объектов ТМ, предположительно наблюдавшихся в микролинзированиях [49]. В рамках этого формализма, мы находим плотность СТМ, см. Рис. 6, Рис. 7.

Новой особенностью нелинейной эволюции СТМ на стадии доминирования излучения является дезинтеграция и распад очень нерегулярных протогало. В диссертации сформулированы начальные условия для эллипсоидального возмущения на радиационно-доминированной стадии эволюции Вселенной в конформной ньютоновской системе отсчета. Путем решения уравнений эволюции показано, что из-за роста несферичности фор-

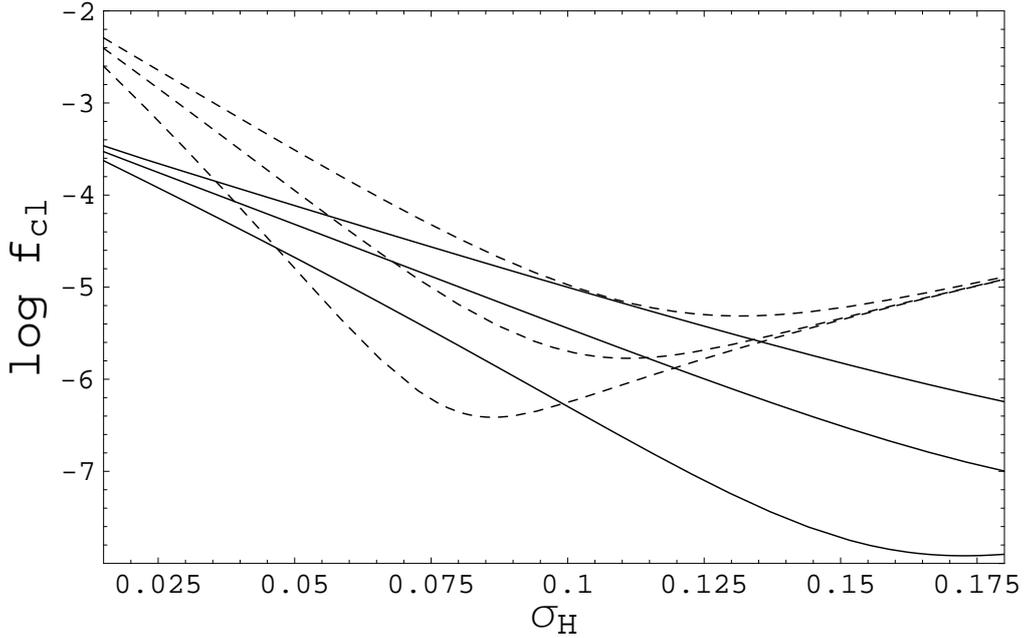


Рис. 8. Доля СТМ  $f_{cl}$ , которые формируются, удовлетворяя ограничению по несферичности, для масс СТМ  $M = 10^2, 10^{-1}, 10^{-6} M_{\odot}$  (сверху вниз). Сплошные и штрихованные кривые соответствуют высоте пиков  $\nu = 1$  и  $\nu = 2$ , соответственно.

мирование большинства СТМ оказывается невозможным из-за их распада. Но благодаря большой плотности даже небольшое число образующихся СТМ может приводить к усилению аннигиляционного сигнала. Было рассмотрено статистическое распределение возмущений по их начальным несферичностям [55] и найдена доля СТМ, которая может формироваться с учетом эффекта несферичности. Эта доля показана на Рис. 8.

**В разделе 2.3** были рассмотрены ограничения на параметры СТМ по эффекту перепроизводства ПЧД (см. штрихованную кривую на Рис. 7).

**В разделе 2.6** рассмотрен процесс вторичной аккреции ТМ и формирования гало вокруг сверхплотных СТМ. Был сформулирован критерий окончания аккреции и найдены итоговые характеристики гало. Масса индуцированного гало останавливает рост благодаря силам гравитации со стороны соседних возмущений. Итоговая масса гало примерно на два порядка превышает центральную компактную массу.

**В разделе 2.7** исследована аннигиляция темной материи в сверх-

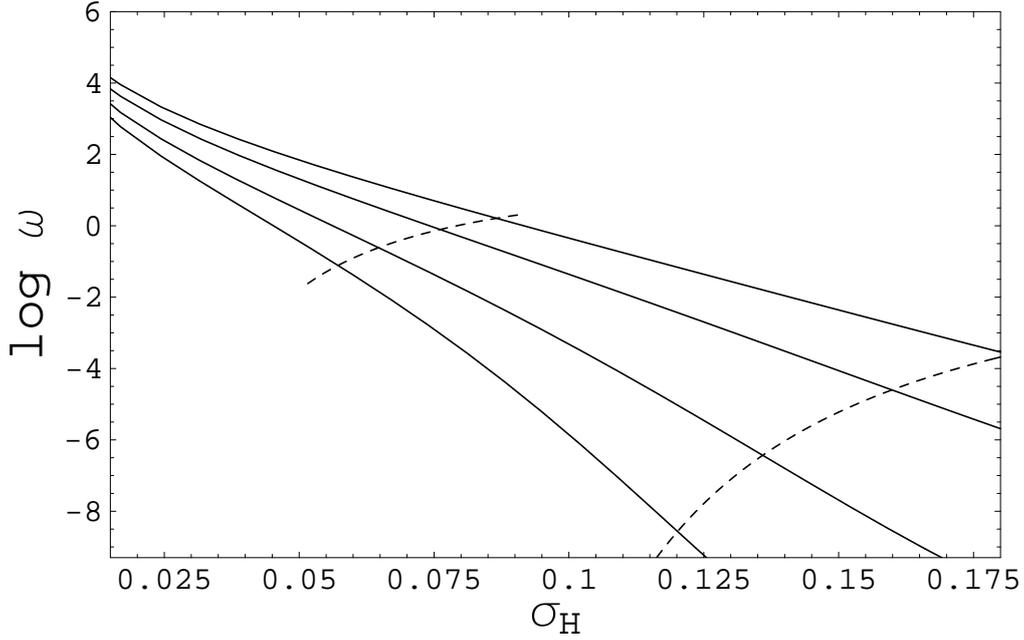


Рис. 9. Сплошные линии показывают верхние пределы на величину  $\omega$ , определяемую выражением (6) в зависимости от среднеквадратичной величины возмущения в масштабе горизонта  $\sigma_H$  для масс СТМ  $M = 10^2, 10^{-1}, 10^{-6}M_\odot$  и  $10^{-11}M_\odot$  (сверху вниз). Ограничение по ПЧД с порогами образования  $\delta_{\text{th}} = 1/3$  и  $\delta_{\text{th}} = 0.7$  показаны, соответственно, левой и правой штрихованными кривыми.

плотных сгустках. Аннигиляционный сигнал в модели с нейтралينو с массами  $m \sim 100$  ГэВ в направлении на антицентр Галактики сопоставлен с диффузным фоном, измеренным Fermi-LAT, и получены ограничения на следующую комбинацию параметров

$$\omega = \left(\frac{\eta_{\pi^0}}{10}\right) \left(\frac{m}{100 \text{ ГэВ}}\right) \left(\frac{\langle\sigma v\rangle}{10^{-26} \text{ см}^3\text{с}^{-1}}\right) \left(\frac{f_{\text{cl}}}{10^{-5}}\right) S, \quad (6)$$

где  $\eta_{\pi^0}$  – множественность рождения пионов,  $f_{\text{cl}}$  – доля ТМ в форме сгустков. Эти ограничения показаны Рис. 9.

**В разделах 2.7.3-2.7.5** исследован эффект “гравитермической катастрофы” в ядре СТМ для сверхтяжелых частиц и изучена их аннигиляция. Если сверхтяжелые частицы ТМ являются фермионами, то максимальную плотность в ядре СТМ определяет давление вырожденного ферми-газа. Имеется диапазон параметров, при которых эта модель мо-

жет соответствовать данным наблюдений, хотя в настоящее время модель с аннигиляцией сверхтяжелых частиц ограничена экспериментальными пределами на долю фотонов в составе космических лучей сверхвысоких энергий [56].

**В разделе 2.8** исследована возможность образования СТМ вокруг замкнутых петель космических струн. Количество образующихся СТМ сильно подавлено из-за наличия у большинства петель больших начальных скоростей, однако большая плотность образующихся СТМ приводит к сильному аннигиляционному сигналу. Рассматривались две аппроксимации для эволюции струны: непрерывное испарение и быстрый распад. Расчеты аннигиляционного сигнала сопоставлены с диффузным фоном, измеренным Fermi-LAT, и получены совместные ограничения на параметры струн и сечение аннигиляции частиц ТМ, см. Рис. 10. В случае теплового сечения аннигиляции  $\langle\sigma v\rangle \simeq 3 \times 10^{-26} \text{ см}^3\text{с}^{-1}$  ограничение исключает диапазон параметров  $0.05 < \mu_{-8} < 0.51$  линейной массы струны  $\mu$  ( $\mu_{-8} = G\mu/(10^{-8}c^2)$ ) в приближении быстрого распада и  $0.1 < \mu_{-8} < 1.16$  в приближении непрерывного испарения.

Результаты 2-й главы опубликованы в работах [10]-[17].

**В 3-й главе** рассматривается круг вопросов, посвященных совместным эффектам, обусловленным распределением ТМ и ЧД.

**В разделе 3.2** исследовано накопление ТМ вокруг ПЧД в пиках плотности и выполнено сравнение гамма-излучения от аннигиляции частиц ТМ в пиках с данными наблюдений. Плотные пики из ТМ формируются благодаря тому, что в тепловом распределении частиц имеются частицы с малыми скоростями, которые после кинетического отщепления остаются на финитных орбитах вокруг ЧД и не участвуют в дальнейшем космологическом расширении. Итоговую плотность  $\rho(r)$  можно выразить через начальную плотность ТМ  $\rho_i(r_i)$  и распределение частиц ТМ по скоростям  $f(v)$  в виде соотношения

$$\rho(r)4\pi r^2 dr = \int 4\pi r_i^2 dr_i \rho_i(r_i) \int d^3v f(v) \frac{2(dt/dr)}{T_{\text{orb}}} dr, \quad (7)$$

где  $dt/dr$  находится из уравнения движения частицы по орбите,  $T_{\text{orb}}$  – орбитальный период. В центральных областях пиков плотность ТМ оказы-

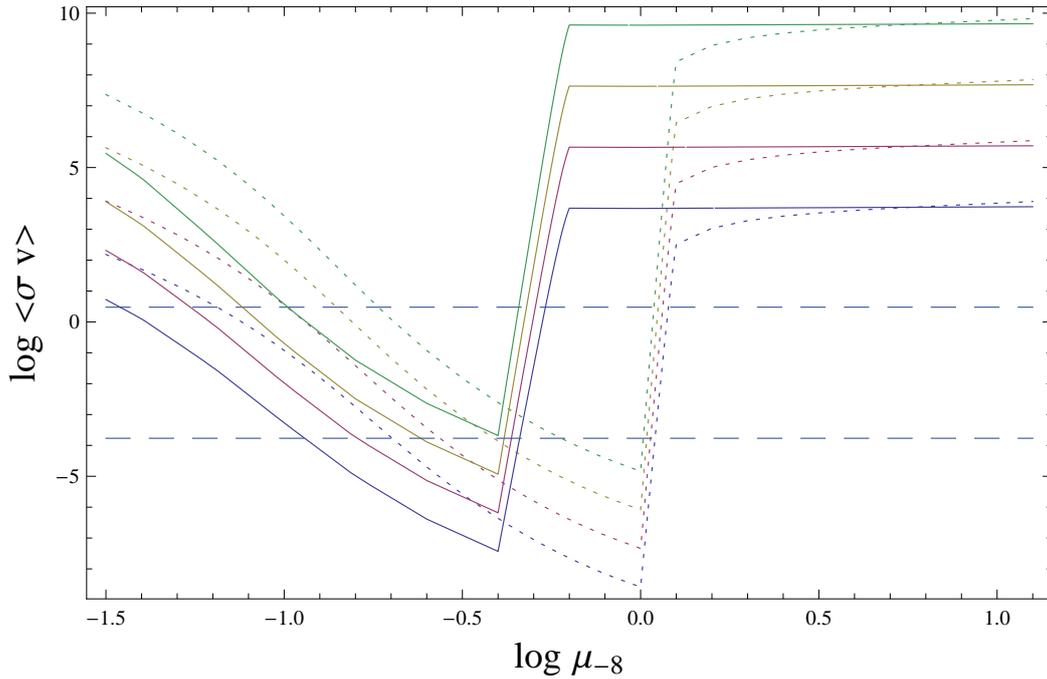


Рис. 10. Сплошными линиями показаны верхние пределы на  $\langle\sigma v\rangle$  (в единицах  $10^{-26} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ ) в зависимости от параметра  $\mu_{-8} = G\mu/(10^{-8}c^2)$  для масс нейтралино (сверху вниз)  $m = 10 \text{ ТэВ}$ ,  $1 \text{ ТэВ}$ ,  $100 \text{ ГэВ}$  и  $10 \text{ ГэВ}$  в приближении быстрого распада. Верхняя и нижняя горизонтальные линии показывают, соответственно, типичное и минимально возможное сечение аннигиляции нейтралино. Точечные кривые показывают аналогичные верхние пределы в приближении непрерывного испарения.

важется столь велика, что к настоящему времени частицы ТМ успели уже проаннигилировать (в модели нейтралино). ТМ, остающаяся на больших расстояниях, может продолжать аннигилировать и в настоящее время. Сравнение рассчитанных потоков излучения с данными наблюдений телескопа Fermi-LAT позволяет получить ограничения на количество ПЧД во Вселенной. Рассчитанный гамма-сигнал из направления на антицентр Галактики сопоставлен с данными телескопа Fermi-LAT по диффузному гамма-фону  $J^{\text{obs}}(E > m_{\pi^0}/2) = 1.8 \times 10^{-5} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ . Условие  $J_\gamma < J^{\text{obs}}$  ограничивает сверху величину  $\Omega_{\text{ВН}}$ , что показано на Рис. 11 вместе с рядом других известных ограничений на ПЧД [57]. Из Рис. 11 видно, что предел по аннигиляции при  $M_{\text{ВН}} \geq 10^{-8} M_\odot$  дает ограничения на количество ПЧД на несколько порядков более сильные, чем другие известные

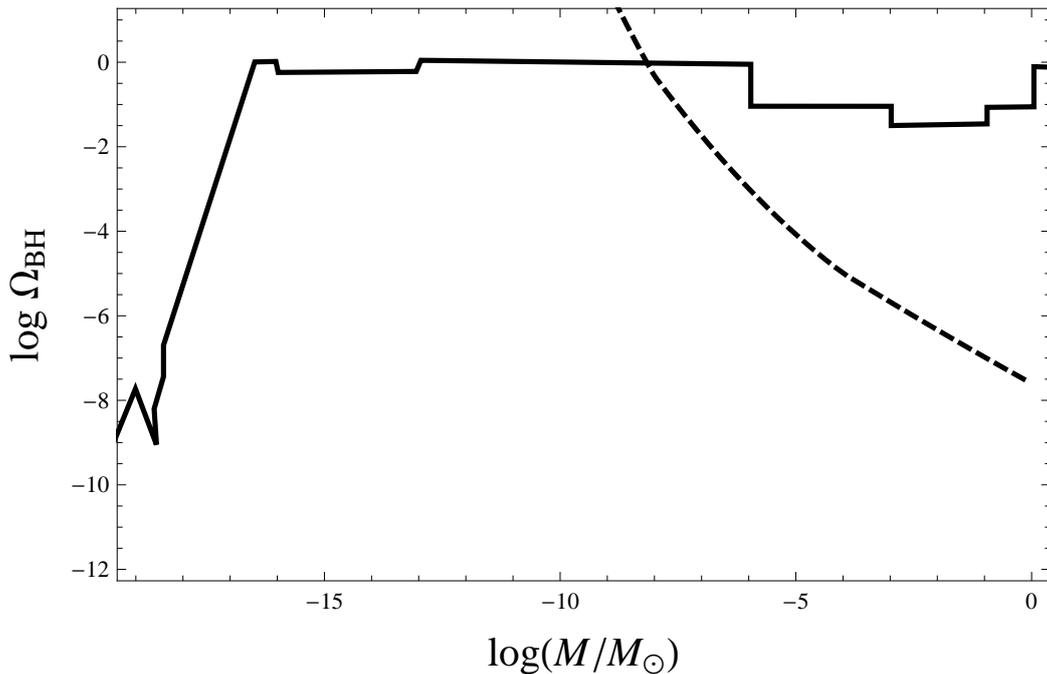


Рис. 11. Сплошная кривая показывает известные ограничения сверху на космологический параметр плотности ПЧД  $\Omega_{\text{DM}}$ , приведенные в [57]. Штрихованной кривой показаны новые ограничения на основе эффекта аннигиляции частиц ТМ, полученные в диссертации.

ограничения.

**В разделах 3.3-3.4** рассмотрена модель образования отдельного класса галактик и ранних квазаров вокруг ПЧД и их скоплений, возникших в процессе коллапса замкнутых доменных стенок [58]. Скопление ПЧД динамически эволюционирует вместе с окружающим его гало ТМ. В диссертации рассчитана итоговая структура гало. Показано, что данная модель действительно может объяснить появление сверхмассивных черных дыр в наблюдаемых квазарах на больших красных смещениях  $z > 6$ . В моделях со скоплениями ПЧД рассчитан темп гравитационных всплесков от столкновений ПЧД в скоплениях, который может помочь в наблюдательной проверке этого класса моделей. На Рис. 12 показано распределение гравитационных всплесков по красным смещениям  $z$  в сравнении с результатами работы [59], в которой рассматриваются слияния ЧД, образующихся по обычному астрофизическому сценарию. Можно от-

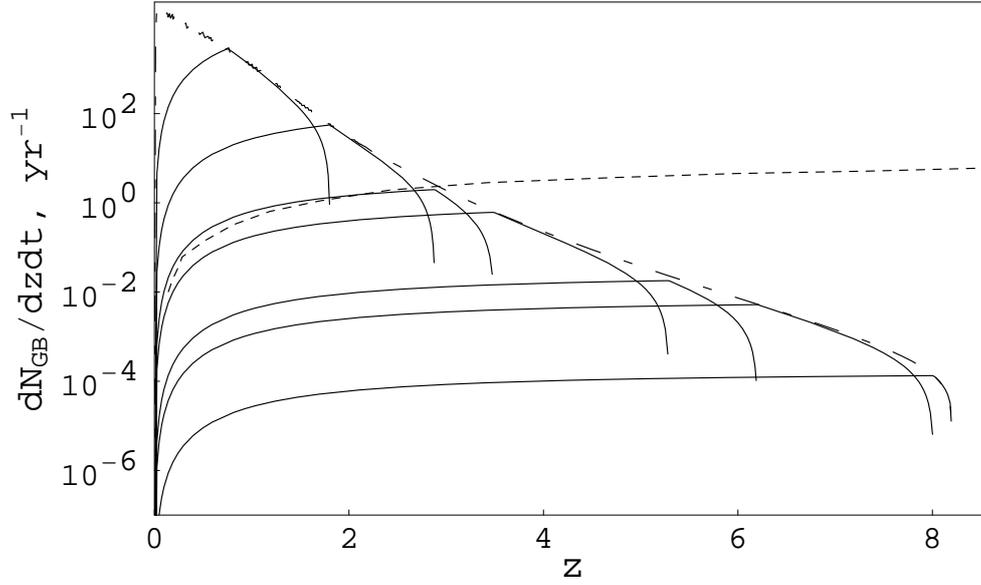


Рис. 12. Распределение гравитационных всплесков в зависимости от красного смещения  $z$ , на котором находятся источники сигнала - скопления ПЧД. Сплошные кривые соответствуют суммарным темпам слияний для ПЧД из интервалов масс  $M = 10^2 - 5 \times 10^2 M_\odot$ ,  $5 \times 10^2 - 10^3 M_\odot$ ,  $10^3 - 5 \times 10^3 M_\odot$ ,  $5 \times 10^3 - 10^4 M_\odot$ ,  $10^4 - 5 \times 10^4 M_\odot$  и  $5 \times 10^4 - 10^5 M_\odot$  (сверху вниз). Величина  $z$  на правых границах кривых равна максимальному красному смещению, с которого будет возможна регистрация детектором LISA в случае его запуска. Огибающая штрих-пунктирная кривая — суммарный темп всплесков от слияний ЧД с массами в интервале  $10^{-1} - 10^5 M_\odot$ . Для сравнения штрихованной линией показан результат расчетов из работы [59] для слияний ЧД, образовавшихся при коллапсах газовых облаков.

метить отличие от сценария [59], в которой темп слияний ЧД растет со временем, тогда как в нашей модели темп слияний убывает.

**В разделе 3.5** исследована прецессия звезд, обусловленная наличием распределенной ТМ вокруг центральной сверхмассивной ЧД в центре Галактики и исследована аннигиляция ТМ вокруг центральной ЧД. Выяснить историю образования сверхмассивных ЧД может помочь профиль плотности ТМ вокруг ЧД, поскольку профиль формируется эволюционно вместе с ЧД. Не исключено, что ЧД в центре Галактики также имеет первичное происхождение. В диссертации рассматривается один из подходов

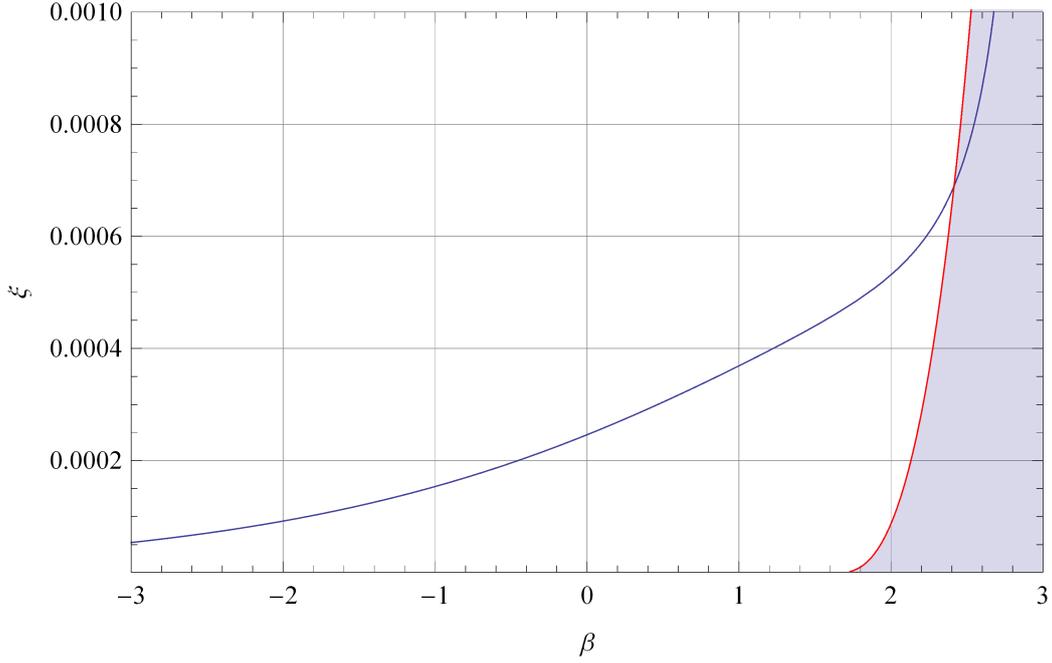


Рис. 13. Массовая доля ТМ  $\xi$  в зависимости от показателя степени  $\beta$  в профиле плотности при угле прецессии  $\delta\phi = 0.01$ . Заштрихована область, исключаемая ограничениями по аннигиляции ТМ.

к проблеме определения профиля плотности ТМ – исследование прецессии S0 звезд, движущихся по близким орбитам вокруг центральной ЧД SgrA\*, когда ТМ создает возмущающий потенциал [60]. В случае степенного профиля  $\rho(r) = \rho_0(r/r_0)^{-\beta}$  получена величина угла нерелятивистской прецессии орбиты звезды за один оборот вокруг ЧД, выражаемая через гипергеометрическую функцию  ${}_2F_1(a, b, c, z)$ ,

$$\delta\phi = -\frac{4\pi^2\rho_0r_0^\beta p^{3-\beta}}{(1-e)^{4-\beta}M_{\text{ВН}}} {}_2F_1\left(4-\beta, \frac{3}{2}; 3; -\frac{2e}{1-e}\right), \quad (8)$$

где  $e$  и  $p$  – эксцентриситет и параметр орбиты. Результат расчетов, выраженный в терминах массовой доли ТМ, показан на Рис. 13 вместе с ограничением по аннигиляции частиц ТМ. В настоящее время точности наблюдений все еще недостаточно для измерения угла прецессии быстрых S0 звезд, но требуемая точность может быть достигнута уже в ближайшие годы.

Результаты 3-й главы опубликованы в работах [18]-[32].

**В главе 4** исследованы нелинейные гравитационные структуры различных типов, которые могли рождаться в ранней Вселенной, и структура которых определяется релятивистской теорией гравитации.

**В разделе 4.1** в рамках конформной теории гравитации (которая в ранние эпохи может предшествовать общей теории относительности) с действием  $S = -\alpha_0 \int C^{\mu\nu\lambda\sigma} C_{\mu\nu\lambda\sigma} \sqrt{-g} d^4x$ , где  $C^{\mu\nu\lambda\sigma}$  тензор Вейля, методом  $2 + 2$ -разложения исследованы решения типа “гравитационные пузыри”, а также решения с переменным скаляром кривизны. Найден полный набор вакуумных решений, состоящий из двух классов. Первый класс содержит решения с положительным двумерным скаляром кривизны, а представителем класса является метрика Фридмана–Робертсона–Уоккера. Одно из этих решений мы назвали “гравитационным пузырем”. Таким образом, в конформной гравитации получено чисто вакуумное решение для метрики пространства-времени (без материальных источников), что было невозможно в общей теории относительности. Представитель второго класса решений с переменным скаляром кривизны найден в виде однопараметрического семейства. Оказалось, что он может быть конформно покрыт трехпараметрическим решением Маннхейма–Казанаса.

**В разделе 4.2** рассмотрены черные дыры с зарядами на внутренних квантовых орбиталях. Для их изучения решалось уравнение Дирака  $(i\gamma^\mu D_\mu - m)\psi = 0$  в гравитационном поле заряженной ЧД, и было установлено, что внутри ЧД могут существовать стационарные электронные уровни. Показано, что есть только одно стационарное регулярное состояние вне горизонта событий ЧД и только одно стационарное регулярное состояние под горизонтом Коши. В случае экстремальной ЧД нормировочный интеграл волновых функций конечен, и стационарное регулярное решение является физически самосогласованным. Частным случаем этих решений являются заряженные ЧД с компенсацией их заряда зарядами противоположного знака на внутренних орбиталях. Эти решения интересны тем, что такие системы могли эффективно рождаться в ранней Вселенной при испарении ПЧД и представлять собой частицы ТМ.

**В разделе 4.3** исследована аккреция излучения на ПЧД, а имен-

но, задача Вайдья рассмотрена в диагональных координатах и построена глобальная геометрия решений [39]. Пространство-время на построенных диаграммах геодезически не полно, т. к. мы наложили физическое условие неотрицательности массовой функции  $m \geq 0$ , но в данной физической постановке задачи полученное построение является максимально возможным

Основные результаты 4-й главы опубликованы в работах [33]-[39].

В конце диссертации дано краткое **Заключение** и приведен **Список литературы**, использовавшейся в работе.

## Список публикаций

1. Berezhinsky V. S., Dokuchaev V. I. and Eroshenko Yu. N. Small-scale clumps in the galactic halo and dark matter annihilation // Phys. Rev. D. 2003. Vol. 68. P. 103003. arXiv:astro-ph/0301551.
2. Berezhinsky V. S., Dokuchaev V. I. and Eroshenko Yu. N. Dark Matter Annihilation in Small-Scale Clumps in the Galactic Halo // Ядерная физика. 2004. Т. 67. С. 1217–1219.
3. Berezhinsky V., Dokuchaev V. and Eroshenko Yu. Destruction of small-scale in the hierarchical structures and galaxies // Phys. Rev. D. 2006. Vol. 73. P. 063504. arXiv:astro-ph/0511494.
4. Berezhinsky V. S., Dokuchaev V. I. and Eroshenko Yu. N. Dark matter annihilation in the Galaxy // Physics of Atomic Nuclei. 2006. Vol. 69. P. 2068-2077.
5. Березинский В. С., Докучаев В. И. и Ерошенко Ю. Н. Аннигиляция темной материи в Галактике // Известия РАН. Серия физическая. 2007. Т. 71. С. 936-937.
6. Berezhinsky V. S., Dokuchaev V. I. and Eroshenko Yu. N. Anisotropy of dark matter annihilation with respect to the Galactic plane // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. 2007. Vol. 07. P. 011. arXiv:astro-ph/0612733.
7. Berezhinsky V., Dokuchaev V., Eroshenko Yu. Remnants of dark matter

- clumps // Phys. Rev. D. 2008. Vol. 77. P. 083519. arXiv:0712.3499 [astro-ph].
8. Berezhinsky V. S., Dokuchaev V. I. and Eroshenko Yu. N. Small-scale clumps in the Galactic halo // Ядерная физика. 2010. Vol. 73. P. 183-194.
  9. Березинский В. С., Докучаев В. И. и Ерошенко Ю. Н. Мелкомасштабные сгустки тёмной материи // УФН. 2014. Т. 184. С. 3–42. arXiv:1405.2204 [astro-ph.HE]. [обзорная статья].
  10. Докучаев В. И., Ерошенко Ю. Н. О едином происхождении нейтральных звезд и сверхмассивных черных дыр // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2002. Т. 121, С. 5-13. arXiv:astro-ph/0202021.
  11. Berezhinsky V. S., Dokuchaev V. I. and Eroshenko Yu. N., Kachelries M., and Solberg M. Aa. Superdense cosmological dark matter clumps // Phys. Rev. D. 2010. Vol. 81. P. 103529. arXiv:1002.3444 [astro-ph.CO].
  12. Berezhinsky V. S., Dokuchaev V. I. and Eroshenko Yu. N., Kachelries M., and Solberg M. Aa. Annihilations of superheavy dark matter in superdense clumps // Phys. Rev. D. 2010. Vol. 81. P. 103530. arXiv:1002.3445 [astro-ph.GA].
  13. Berezhinsky V. S., Dokuchaev V. I. and Eroshenko Yu. N. Dense DM clumps seeded by cosmic string loops and DM annihilation // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. 2011. Vol. 12. P. 007. arXiv:1107.2751 [astro-ph.HE].
  14. Березинский В. С., Докучаев В. И. и Ерошенко Ю. Н., Кахелрис М., Сольберг М. О. Сверхплотные сгустки темной материи из сверхтяжелых частиц // Теоретическая и математическая физика. 2012. Т. 170. С. 102-109.
  15. Berezhinsky V. S., Dokuchaev V. I. and Eroshenko Yu. N. Formation of Superdense Dark Matter Lumps at the Radiation-Dominated Cosmological Stage // Gravitation and Cosmology. 2012. Vol. 18. P. 57–60.
  16. Berezhinsky V. S., Dokuchaev V. I. and Eroshenko Yu. N. Formation and internal structure of superdense dark matter clumps and ultracompact minihaloes // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. 2013. Vol.

11. P. 059. arXiv:1308.6742 [astro-ph.CO].
17. Березинский В. С., Докучаев В. И. и Ерошенко Ю. Н. Формирование сверхплотных сгустков темной материи // Ядерная физика и инжиниринг. 2013. Т. 4. С. 922–925.
18. Babichev E. O., Dokuchaev V. I. and Eroshenko Yu. N. Black Hole Mass Decreasing due to Phantom Energy Accretion // Phys. Rev. Lett. 2004. Vol. 93. P. 021102. arXiv:gr-qc/0402089.
19. Бабичев Е. О., Докучаев В. И. и Ерошенко Ю. Н. Аккреция темной энергии на черную дыру // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2005. Т. 127. С. 597–609. arXiv:astro-ph/0505618.
20. Dokuchaev V. I. and Eroshenko Yu. N. Accretion with back reaction // Phys. Rev. D. 2011. Vol. 84. P. 124022. arXiv:1107.3322 [gr-qc].
21. E. Babichev, V. Dokuchaev and Yu. Eroshenko. Backreaction of accreting matter onto a black hole in the Eddington–Finkelstein coordinates // Classical and Quantum Gravity. 2012. Vol. 29. P. 115002. arXiv:1202.2836 [gr-qc].
22. Бабичев Е. О., Докучаев В. И. и Ерошенко Ю. Н. Чёрные дыры в присутствии тёмной энергии // УФН. 2013. Т. 183. С. 1257–1280. arXiv:1406.0841 [gr-qc]. [обзорная статья].
23. Dokuchaev V. I. and Eroshenko Yu. N. Non-orientable wormholes as portals to the mirror world // Phys. Rev. D. 2014. Vol. 90. P. 024056. arXiv:1308.0896 [gr-qc].
24. Ерошенко Ю. Н. Пики плотности темной материи вокруг первичных черных дыр // Письма в Астрономический журнал. 2016. Т. 42. С. 389-398.
25. Докучаев В. И., Ерошенко Ю. Н. Стохастическая модель корреляций между массами центральных черных дыр и дисперсией скоростей в балджах // Письма в Астрономический журнал. 2001. Т. 27. С. 883-889. arXiv:astro-ph/0202019.
26. Dokuchaev V. I. and Eroshenko Yu. N. Origin of Correlations between Central Black Holes Masses and Galactic Bulge Velocity Dispersions // Astronomical and Astrophysical Transactions. 2003. Vol. 22. P. 727-730. arXiv:astro-ph/0209324.

27. Dokuchaev V., Eroshenko Yu., Rubin S. Quasars formation around clusters of primordial black holes // Grav. Cosmol. 2005. Vol. 11. P. 99-104. arXiv:astro-ph/0412418.
28. Докучаев В. И., Ерошенко Ю. Н., Рубин С. Г. Раннее формирование галактик, инициированное скоплениями черных дыр // Астрономический журнал. 2008. Т. 85. С. 867-878. arXiv:0801.0885 [astro-ph].
29. Докучаев В. И., Ерошенко Ю. Н. и Рубин С. Г. Всплески гравитационных волн от столкновений черных дыр в скоплениях // Письма в Астрономический журнал. 2009. Т. 35. С. 163-170. arXiv:1003.4158 [astro-ph.CO].
30. Докучаев В. И., Ерошенко Ю. Н., Рубин С. Г. Самарченко Д. А. Механизм подавления черных дыр промежуточных масс // Письма в Астрономический журнал. 2010. Т. 36, С. 816–822. arXiv:1010.5325 [astro-ph.CO].
31. Докучаев В. И., Ерошенко Ю. Н. Взвешивание темной материи в центре Галактики // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 101. С. 875-880. arXiv:1508.05725 [astro-ph.HE].
32. Докучаев В. И., Ерошенко Ю. Н. Физическая лаборатория в центре Галактики // УФН. 2015. Т. 185. С. 829–843. arXiv:1512.02943 [astro-ph.HE]. [обзорная статья].
33. Berezin V. A., Dokuchaev V. I., and Eroshenko Yu. N. Conformal gravity and gravitational bubbles // Int. J. Mod. Phys. A. 2016. Vol. 31. P. 1641004. arXiv:1509.00212 [gr-qc].
34. Berezin V. A., Dokuchaev V. I., and Eroshenko Yu. N. Spherically symmetric conformal gravity and gravitational bubbles // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. 2016. Vol. 01. P. 019. arXiv:1412.2917 [gr-qc].
35. Докучаев В. И., Ерошенко Ю. Н. Стационарные решения уравнения Дирака в гравитационном поле заряженной черной дыры // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2013. Т. 144. С. 85-91. arXiv:1308.5927 [gr-qc].
36. Dokuchaev V. I. and Eroshenko Yu. N. Black Hole Atom as a Dark Matter Particle Candidate // Advances in High Energy Physics. 2014. Vol. 2014.

- P. 434539. arXiv:1403.1375 [astro-ph.CO].
37. Докучаев В. И., Ерошенко Ю. Н. Квантовые уровни электрона в поле заряженной черной дыры // Ядерная физика и инжиниринг. 2014. Т. 5. С. 810–812.
38. Dokuchaev V. I. and Eroshenko Yu. N. Quantum electron levels in the field of a charged black hole // Physics of Atomic Nuclei. 2015. Vol. 78. P. 1520-1522.
39. Berezin V. A., Dokuchaev V. I., and Eroshenko Yu. N. On maximal analytical extension of the Vaidya metric // Class. Quantum Grav. 2016. Vol. 33 P. 145003. arXiv:1603.00849 [gr-qc].

## Цитированная литература

40. Горбунов Д. С., Рубаков В. А. Введение в теорию ранней Вселенной: Теория горячего Большого взрыва. Москва: URSS, 2008.
41. Горбунов Д. С., Рубаков В. А. Введение в теорию ранней Вселенной: Космологические возмущения. Инфляционная теория. Москва: URSS, 2010.
42. Вайнберг С. Космология. Москва: URSS, 2012.
43. Лукаш В. Н., Михеева Е. В. Физическая космология. Москва: Физматлит, 2010.
44. Бронников К. А., Рубин С. Г. Лекции по гравитации и космологии. Москва: МИФИ, 2008.
45. Zybin K. P., Vysotsky M. I., and Gurevich A. V. The fluctuation spectrum cut-off in a neutralino dark matter scenario // Phys. Lett. A. 1999. Vol. 260. P. 262-268.
46. Гуревич А. В., Зыбин К. П. Nondissipative gravitational turbulence // ЖЭТФ. 1988. Т. 94. С. 3-25.
47. Гуревич А. В., Зыбин К. П. Nondissipative gravitational turbulence in an expanding universe // ЖЭТФ. 1988. Т. 94(4). С. 5-15.
48. Гуревич А. В., Зыбин К. П. Крупномасштабная структура Вселенной. Аналитическая теория // УФН. 1995. Т. 165. С. 723–758.
49. Гуревич А. В., Зыбин К. П., Сирота В. А. Мелкомасштабная структура темной материи и микролинзирование // Успехи физ. наук. 1997.

- T. 167. C. 913–943.
50. Gnedin O. Y., Hernquist L., and Ostriker J. P. Tidal Shocking by Extended Mass Distributions // *Astrophys. J.* 1999. Vol. 514. P. 109-118.
  51. Diemand J., Moore B., Stadel J. Earth-mass dark-matter haloes as the first structures in the early Universe // *Nature*. 2005. Vol. 433. P. 389-391. arXiv:astro-ph/0501589.
  52. Gnedin O. Y., Ostriker J. P. On the Self-consistent Response of Stellar Systems to Gravitational Shocks // *Astrophys. J.* 1999. Vol. 513. P. 626-637. arXiv:astro-ph/9902326.
  53. Goerdt T. et al. The survival and disruption of cold dark matter microhaloes: implications for direct and indirect detection experiments // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*. 2007. Vol. 375. P. 191-198. arXiv:astro-ph/0608495.
  54. Kolb E. W. and Tkachev I. I. Large Amplitude Isothermal Fluctuations And High Density Dark Matter Clumps // *Phys. Rev. D.* 1994. Vol. 50. P. 769. [arXiv:astro-ph/9403011].
  55. Дорошкевич А. Г. Пространственная структура возмущений и происхождение вращения галактик во флуктуационной теории // *Астрофизика*. 1970. Т. 6. С. 581-600.
  56. Rubtsov G. I. et al. Upper limit on the ultra-high-energy photon flux from AGASA and Yakutsk data // *Phys. Rev. D.* 2006. Vol. 73. P. 063009. [arXiv:astro-ph/0601449]
  57. Carr B. J., Kohri K., Sendouda Y., Yokoyama J. New cosmological constraints on primordial black holes // *Phys. Rev. D.* 2010. Vol. 81. P. 104019. arXiv:0912.5297 [astro-ph.CO].
  58. Khlopov M. Yu., Rubin S. G. and Sakharov A. S. Primordial Structure of Massive Black Hole Clusters // *Astroparticle Physics*. 2005. Vol. 23. P. 265-277. arXiv:astro-ph/0401532.
  59. Sesana A. et al. The Gravitational Wave Signal from Massive Black Hole Binaries and Its Contribution to the LISA Data Stream // *Astrophys. J.* 2005. Vol. 623. P. 23-30. arXiv:astro-ph/0409255.
  60. Zakharov A. F. et al. Apoastron shift constraints on dark matter distribution at the Galactic Center // *Phys. Rev. D.* 2007. Vol. 76. P.

062001. arXiv:0707.4423 [astro-ph].

Ерошенко Юрий Николаевич  
Нелинейные гравитационно-связанные  
структуры в ранней Вселенной

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Ф-т 60х84/16 Уч.-изд.л. 1,6 Зак. № 22399 Тираж 100 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Издательский отдел

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а