

На правах рукописи

Ткачев Максим Вячеславович

**Моделирование наблюдательных проявлений
темной материи**

Специальность 01.03.02 —
«Астрофизика, радиоастрономия»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2022

Работа выполнена в в Физическом институте имени П. Н. Лебедева Российской академии наук.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник ФИАН
Пилипенко Сергей Владимирович

Официальные оппоненты: **Баушев Антон Николаевич**,
доктор физико-математических наук,
Объединенный институт ядерных исследований
(ОИЯИ), г. Дубна,
ведущий научный сотрудник

Белоцкий Константин Михайлович,
кандидат физико-математических наук,
Национальный исследовательский ядерный уни-
верситет МИФИ (НИЯУ МИФИ), г. Москва,
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Московский государственный университет им.
М.В. Ломоносова (Государственный астрономиче-
ский институт им. П.К. Штернберга)

Защита состоится 25 мая 2022 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета
Д002.023.01 Физического института им. П. Н. Лебедева РАН по адресу: г.
Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, подъезд А2, зал семинаров – к. 707.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Физиче-
ского института имени П. Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, г. Москва,
Ленинский проспект, д. 53. и на сайтах ФИАН <https://www.lebedev.ru/> и
<https://asc-lebedev.ru/> в разделе "Диссертационный совет".

Автореферат разослан 21 марта 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Д002.023.01,

кандидат физико-математических
наук

Шахворостова Н. Н.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В последние годы космология продемонстрировала значительный успех в определении средних параметров Вселенной. По результатам обработки данных об анизотропии реликтового излучения, полученных спутниками WMAP и Planck, в комбинации с данными по сверхновым Ia и барионным акустическим осцилляциям в каталогах галактик, с хорошей точностью определен состав Вселенной и скорость её расширения [1; 2], [3; 4]. Таким образом, в космологии разработана “стандартная модель” Вселенной, включающая в себя барионное вещество, холодную тёмную материю и тёмную энергию.

Подавляющее большинство обычного вещества во Вселенной невидимо, поскольку видимые звезды и газ внутри галактик и скоплений составляют менее 10% вклада обычного вещества в плотность массы-энергии Вселенной [5]. По этой причине принято считать, что во Вселенной в изобилии присутствует Темная Материя (ТМ) и что она оказала и до сих пор оказывает сильное влияние на ее структуру и эволюцию. Основное свидетельство возможного существования ТМ было получено из расчетов, показывающих, что многие галактики разлетелись бы или что они не сформировались бы или не двигались бы так, как они это делают, если бы они не содержали большого количества невидимой материи. Другие доказательства включают наблюдения явлений гравитационного линзирования [6] и наблюдения космического микроволнового фона (СМВ)¹ или «реликтового излучения», наряду с астрономическими наблюдениями текущей структуры наблюдаемой Вселенной, образования и эволюции галактик, положения масс во время галактических столкновений и движения галактик в скоплениях.

В марте 2016 года, через месяц после объявления об обнаружении гравитационных волн группой LIGO / VIRGO [7], излучаемых при слиянии двух черных дыр массой 30 солнечных масс (около 6×10^{31} кг), три группы исследователей независимо друг от друга предположили, что обнаруженные черные дыры могут иметь первичное происхождение [8–10]. Если это так, то такие объекты могут составлять некоторую или даже значительную долю темной материи. **Первичные черные дыры (ПЧД)** - это гипотетический тип черных дыр, образовавшийся вскоре после Большого взрыва. В

¹СМВ – Cosmic Microwave Background – космический микроволновый фон

этих условиях простые колебания плотности материи могли быть достаточно значительными, чтобы способствовать возникновению чёрных дыр. Я.Б. Зельдович и И.Д. Новиков в 1966 году впервые высказали предположение о существовании таких черных дыр [11]. Теория, лежащая в основе их происхождения, была впервые подробно изучена Стивенем Хокингом в 1971 г [12]. С тех пор ПЧД неоднократно предлагались в качестве возможного кандидата на роль ТМ (см. например [13–15]). Две группы обнаружили, что скорости слияния, полученные с помощью LIGO, согласуются со сценарием, в котором вся темная материя состоит из ПЧД [8; 9], если значимая их часть каким-то образом сгруппирована в гало, таких как тусклые карликовые галактики или шаровые скопления, как и ожидалось в стандартной теории образования крупномасштабной структуры. Третья группа утверждала, что эти скорости слияния несовместимы со сценарием, при котором вся темная материя состоит из ПЧД, и что ПЧД могут составлять менее одного процента от общей темной материи [10].

Одним из важных инструментов, применяемых в современной космологии, является численное моделирование распределения ТМ во Вселенной. Первая попытка численно решить проблему образования и эволюции космологических структур в расширяющейся Вселенной была представлена в известной статье, опубликованной в 1974 году Уильямом Прессом и Полом Шехтером [16]. Первые трехмерные симуляции холодной темной материи были выполнены Марком Дэвисом, Джорджем Эфстатиу, Карлосом Френком и Саймоном Уайтом, которые опубликовали свои результаты в 1985 году [17]. А так же ранее в двумерных расчетах, выполненных А. Г. Дорошкевичем и др. в 1980 году, было продемонстрировано образование ячеистой крупномасштабной структуры [18]. Сходство смоделированного распределения гало темной материи с галактиками в обзоре CfA было очевидным, что еще больше повысило статус холодной темной материи в космологическом сообществе.

Десять лет спустя предсказания космологического моделирования сместились с распределения холодных гало темной материи на формы этих гало. В 1996 году Хулио Наварро, Карлос Френк и Саймон Уайт опубликовали результат, основанный на анализе гало, образовавшихся при моделировании холодной темной материи с высоким разрешением [19]. Выведенная авторами простая эмпирическая формула для аппроксимации радиального

профиля плотности гало получила название профиля Наварро-Френка-Уайта (см. Главу 1). Эта параметризация все еще широко используется сегодня и представляет собой основной критерий для большинства исследований по обнаружению темной материи, несмотря на то, что ожидается, что она будет неточной во внутренних областях галактик, где барионное вещество вносит доминирующий вклад в гравитационный потенциал.

В последние годы область космологического моделирования сосредоточилась на реализации барионной физики, включая гидродинамическую эволюцию газа в астрофизических структурах, звездообразование и обратную связь от взрывов сверхновых и черных дыр. Современные модели все еще не в состоянии разрешить все соответствующие масштабы - которые варьируются от субпарсековых расстояний для звездообразования до масштабов Гигапарсек для космологических структур, - но реализуют барионную физику путем введения подходящих параметров «подсетки», которые пытаются имитировать совокупное поведение большого количества газа и звезд [20]. Такие параметры обычно настраиваются в соответствии с наблюдаемыми величинами, такими как функция масс галактики и соотношение масс галактики и центральной черной дыры, как, например, в недавнем наборе симуляций Eagle [21].

Одним из самых ранних и важных результатов, полученных из космологического моделирования N тел является наличие так называемого «каспа»² в симулируемых гало из холодной ТМ. Под «каспом» подразумевается резкий пик в распределении плотности гало темной материи в центральных областях, где плотность значительно увеличивается на малых радиусах. А под связанной с этим термином «проблемой каспов» [22–24]) понимается несоответствие между предполагаемыми профилями плотности темной материи маломассивных галактик и профилями плотности, предсказанными космологическим моделированием N тел. Почти все моделируемые гало холодной ТМ имеют «остроконечные» распределения темной материи с крутым увеличением плотности на малых радиусах, в то время как кривые вращения большинства наблюдаемых карликовых галактик предполагают, что они имеют плоские центральные профили плотности темной материи (т.н. «ядра») [19; 25–29].

²англ. «cusp» — пик

Было предложено несколько возможных решений проблемы каспов [30–32]. Многие недавние исследования (см, например, [33–35]), показали, что включение барионной обратной связи (особенно обратной связи от сверхновых звезд и активных ядер галактик) может «сгладить» профиль ядра из темной материи, поскольку потоки газа, вызванные обратной связью, создают изменяющийся во времени гравитационный потенциал, который передает энергию бесстолкновительным частицам темной материи [36–38].

Также А.Г. Дорошкевичем, В.Н. Лукашом и Е.В. Михеевой в статьях [27; 39] был рассмотрен так называемый «энтропийный» метод описания вирialized систем ТМ, который позволил аналитически исследовать эти сложные нелинейные структуры и связать внутренние профили плотности ТМ с характеристиками как начального мелкомасштабного поля неоднородностей плотности, так и нелинейной крупномасштабной релаксацией гравитационно-сжатого вещества. Авторами был сделан вывод о том, что космологические случайные движения вещества "подогревают" частицы ТМ в коллапсирующих протогало, и было показано, что учёт этого эффекта: может приводить к подавлению каспоподобных профилей распределения плотности внутри формирующихся гало и образованию «ядер» ТМ в галактиках.

Для предсказаний возможностей новых телескопов также очень важна задача моделирования наблюдений большого числа галактик. Например, для будущей обсерватории «Миллиметрон»³ ([40; 41]) необходимы моделирование наблюдений в дальнем инфракрасном (ИК) диапазоне. Космическое ИК-излучение (или ИК-фон) обычно вызвано межзвездной пылью. Пыль нагревается светом звезд до температуры не более нескольких десятков кельвинов и излучает тепловым образом. Пыль имеется в нашей Галактике, однако ее суммарное излучение сравнительно слабое, около 10^{-4} от ее полной оптической светимости. Есть галактики, в которых пыли так много, что почти все излучение звезд в них перехватывается и переизлучается пылью в дальнем ИК-диапазоне. Такие галактики называют субмиллиметровыми, так как их максимум светимости приходится на длины волн меньше миллиметра [42]. При угловом разрешении, которым обычно обладают одиночные телескопы, предназначенные для наблюдений в дальнем ИК-диапазоне, ИК-фон не разрешается полностью на отдельные источники и состоит из пятен разной ярко-

³<http://millimetron.ru>

сти. Пространственные флуктуации ИК-фона создают так называемую «проблему путаницы», когда слабые точечные источники не могут быть отделены от пятен, созданных многими далекими галактиками. Данный эффект ограничивает чувствительность фотометрических исследований в дальнем ИК- и субмиллиметровом диапазонах. В то же время, для удаленных галактик должны проявляться эффекты гравитационного линзирования, которые будут приводить к искажению наблюдаемой формы этих галактик и потока излучения от них. Поэтому для предсказания влияния эффекта путаницы для будущих наблюдений необходимо создание модели с учетом гравитационного линзирования, способной экстраполировать текущие представления об ИК-фоне в область более высокого разрешения и чувствительности.

Цель данной работы состоит исследовании того, как свойства темной материи проявляются в строении и распределении галактик, а также в сигналах, полученных с гравитационно-волновых детекторов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследовать и проверить энтропийный подход к проблеме образования гало темной материи и развить идею «энтропийной модели» [27; 39] (**Глава 1**).
2. Разработать метод, позволяющий измерить начальную энтропию темного гало в численных моделях и сравнить ее с предсказаниями теории (**Глава 1**).
3. Построить модель фона созданного далекими галактиками, излучающими в дальнем инфракрасном (ИК) диапазоне (**Глава 2**).
4. Оценить на основе численных моделей образования гало как предсказания модели ИК-фона согласуются с существующими данными о подсчетах источников (**Глава 2**).
5. Проанализировать процессы образования и разрушения гравитационно-связанных пар ПЧД при взаимодействии большого числа ПЧД, а также слияния как связанных, так и несвязанных пар, и оценить вероятность таких событий (**Глава 3**).
6. Оценить влияние численных эффектов моделирования на результат и определить основной фактор разрушения гравитационно-связанных пар (**Глава 3**).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Путем проведения численных экспериментов образования гало темной материи показано, что касп в гало возникает из областей начального распределения материи, имеющих энтропию на порядок ниже, чем в среднем по Вселенной для случайно выбранной сферы с массой каспа. (**Глава 1**).
2. Построена модель ИК-фона далеких галактик, учитывающая крупномасштабную структуру Вселенной и усиление потоков за счет гравитационного линзирования на галактиках и скоплениях галактик. Модель воспроизводит двумерный спектр мощности карт ИК-фона, измеренный космической обсерваторией Herschel. (**Глава 2**).
3. С использованием серии космологических численных моделей N-тел, которые включали как частицы обычной темной материи, так и переменную долю частиц темной материи (f_{PBH}), состоящей из первичных черных дыр (ПЧД), в диапазоне от $f_{PBH} = 10^{-4}$ до $f_{PBH} = 1.0$ получены оценки темпов формирования, разрушения и слияния пар ПЧД. Показано, что эти оценки хорошо согласуются с ограничениями на содержание ПЧД, полученными другими исследовательскими группами на основе данных LIGO, и соответствуют скорости слияния приблизительно $10^2 \text{ Гпк}^{-3} \cdot \text{год}^{-1}$ для доли ПЧД $f_{PBH} = 10^{-3}$ (**Глава 3**).
4. Обнаружено, что стабильность пар ПЧД, являясь основным фактором, определяющим скорость слияния пар, в значительной степени зависит от процессов образования гало темной материи и кластеризации. Показано, что в гравитационно-связанных объектах пары ПЧД разрушаются быстрее, чем происходит их слияние. Количество гравитационно-связанных образований из ПЧД сильно зависит от доли ПЧД в составе темной материи. (**Глава 3**).

Научная новизна:

1. Был разработан оригинальный способ оценки «фоновой» энтропии и оценено ее влияние на формирование внутренней структуры гало темной материи. Впервые было показано, что касп в гало возникает из областей начального распределения материи, имеющих

энтропию на порядок ниже, чем в среднем по Вселенной (внутри случайно выбранной сферы с массой каспа) Описание метода, а также последовательность его применения описаны в статье **A1**.

2. Впервые при построении полуаналитической модели ИК-фона неба, были учтены данные космологического расчета крупномасштабной структуры Вселенной, а также получены модельные карты ИК-фона, к которым можно применять различные алгоритмы поиска источников. Данная модель может быть использована для определения предела путаницы для будущих космических телескопов дальнего ИК-диапазона 10-метрового класса, а также для сравнения кластеризации пиков интенсивности фона с реальной крупномасштабной структурой.

Описание модели и метод построения модельных карт приведены в статье **A2**.

3. Впервые получены оценки темпов формирования, слияния и разрушения пар ПЧД, учитывающие взаимодействие с другими ПЧД и образовавшимися из них структурами. Также впервые было показано, что основным фактором, ответственным за процессы формирования, разрушения и слияния пар ПЧД, является возникновение гравитационно-связанных структур при красных смещениях, примерно соответствующих эпохе равномерного излучения и вещества. В свою очередь, оценки влияния численных эффектов могут оказаться полезными для будущих исследований выполненных данным методом.

Результаты исследования опубликованы в статье **A3**.

Все результаты, представленные в диссертации, выполнены впервые, полученные данные ранее не публиковались и могут быть использованы в перспективе для дальнейших научных исследований.

Достоверность

Научные положения и выводы диссертационной работы обоснованы, достоверны и получили признание в научной литературе и на различных конференциях.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на:

1. XXXII конференции “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”
(20.04.2015, г. Пущино, ПРАО АКЦ ФИАН).
Тема: “Эволюция массы и других характеристик гало темной материи.”(М.В. Ткачев, С.В. Пилипенко).
Стендовый доклад.
2. Семинаре отдела теоретической астрофизики АКЦ ФИАН
(22.10.2015, г. Москва, АКЦ ФИАН).
Тема: “Методы моделирования гало темной материи” (М.В. Ткачев, С.В. Пилипенко).
Устный доклад.
3. XXXIII конференции “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”
(21.04.2016, г. Пущино, ПРАО АКЦ ФИАН).
Тема: “Моделирование гало темной материи: вариации начальных условий” (М.В. Ткачев, С.В. Пилипенко). Устный доклад.
4. Конференции “Cosmic Clues from the Near Field Universe”
(05.06.2016, г. Хайфа, Израиль, университет “Технион”)
Тема: “Variances of the small scale part of the pertrubation spectrum”
(М. Tkachev, S. Pilipenko).
Устный доклад.
5. Конференции “Galaxy Clusters 2017”
(03.07.2017, г. Сантандер, Испания).
Тема: “Dark matter halo simulations: verifying entropy approach to the core-cusp problem” (М. Tkachev, S. Pilipenko).
Устный доклад.
6. Конференции “Statistical Challenges in 21-st Century Cosmology”
(22.05.2018, г. Валенсия, Испания).
Тема: “Dark matter halo simulations: verifying entropy approach to the core-cusp problem” (М. Tkachev, S. Pilipenko).
Стендовый доклад.

7. XXXVI конференции “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”
(21.04.2019, г. Пущино, ПРАО АКЦ ФИАН).
Тема: “Симуляции темной материи: первичные черные дыры в ранней Вселенной.” (М.В. Ткачев, С.В. Пилипенко).
Устный доклад.
8. Семинаре отдела теоретической астрофизики АКЦ ФИАН
(11.03.2021, г. Москва, АКЦ ФИАН).
Тема: “Dark matter simulations: primordial black holes in the early universe.” (М.В. Ткачев, С.В. Пилипенко).
Устный доклад.

Публикации.

Основные результаты по теме диссертации изложены в 3 статьях, опубликованных в журналах, рекомендованных ВАК, в том числе одна статья опубликована в высокорейтинговом зарубежном журнале (MNRAS):

1. **A1:** Ткачев М.В., Пилипенко С.В., Карлеси Э.
“Моделирование гало темной материи: проверка энтропийного подхода к проблеме каспов”
“Астрономический журнал”, т. 96, №5, стр 374-379, 2019
2. **A2:** С. В. Пилипенко, М. В. Ткачев, А. А. Ермаш, Т. И. Ларченкова, Е. В. Михеева, В. Н. Лукаш
“Модель инфракрасного фона неба, созданного далекими галактиками”
“Письма в Астрономический Журнал”, т. 43, №10, стр.715-726, 2017
3. **A3:** Tkachev M. V., Pilipenko S. V., Yepes G.
"Dark matter simulations with primordial black holes in the early Universe
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society т. 499, № 4. стр. 4854—4862, 2020

Все статьи, лежащие в основе настоящей работы, написаны в соавторстве, причем вклад диссертанта в работы **A1** и **A3** являлся определяющим. Автор диссертации лично провел следующие работы:

- В работе **A1** автор подготовил начальные условия и выполнил численный расчет образования гало темной материи при помощи ин-

- струментов космологического численного моделирования **GADGET-2** [43] и **ginnungagap**. При помощи инструментов для обработки результатов численного моделирования (**ANF**, а также собственных оригинальных кодов на языках **C** и **Python**) автор оценил фоновую энтропию гало темной материи и сравнил результаты с теоретической моделью. Также автор подготовил основной текст данной статьи.
- В работе **A2** автор разработал и описал на языке **C** модель гравитационного линзирования галактик, а также занимался определением функции светимости модельных галактик и сравнением параметров модельного обзора с моделью пуассоновского распределения источников. Также автор подготовил текст соответствующих глав в данной статье.
 - В работе **A3** автор самостоятельно на языке **C** выполнил несколько модификаций общедоступного кода для космологического численного моделирования **GADGET-2** [43], самостоятельно подготовил начальные условия (**Python**) и выполнил численный расчет пар первичных черных дыр на суперкомпьютере **MareNostrum**. Автор также занимался обработкой результатов численного моделирования и на языке **Python** разработал собственную модель для учета излучения гравитационных волн в тесных парах первичных черных дыр. Также автор подготовил основной текст данной статьи.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Полный объем диссертации **115** страниц текста с **18** рисунками и **6** таблицами. Список литературы содержит **209** наименований.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В первой главе предлагается оригинальный способ проверки так называемого «энтропийного подхода» к проблеме образования гало темной материи, предложенного А.Г. Дорошкевичем, В.Н. Лукашом и Е.В. Михеевой [27; 39] и предназначенного для исследования структуры гало.

В этом подходе используется понятие функции энтропии, являющейся, фактически, мерой дисперсии скорости частиц, входящих в гало. Полная энтропия гало вводится по аналогии со случаем идеального газа и может быть условно разделена на две составляющие:

1. «Фоновая» энтропия, характеризующая мелкомасштабные начальные неоднородности в распределении материи,
2. «Приобретенная» энтропия, характеризующая бесстолкновительную иерархическую релаксацию материи на нелинейной стадии формирования гало.

Чтобы измерить фоновую часть энтропии, мы выполняем два численных расчета образования гало, в которых мелкомасштабные фазы возмущений различаются — это приводит к различиям в фоновой энтропии для каждого гало, а крупномасштабные фазы возмущений одинаковы, благодаря чему история образования гало тоже одинакова, а значит, и приобретенная часть энтропии не должна значительно отличаться. Попарное сравнение «гало-двойников» из двух расчетов и усреднение по ансамблю гало позволило нам извлечь величину фоновой энтропии.

В соответствии с выкладками, приведенными в статье [27], получена теоретическая оценка фоновой энтропии. Значение фоновой энтропии, полученное из численного счета на основе описанной модели отличается от него почти на порядок. При этом расхождение остается практически неизменным при увеличении разрешения симуляции. Иными словами, касп в гало возникает из областей начального распределения материи, имеющих энтропию на порядок ниже, чем в среднем по Вселенной (внутри сферы с массой каспа).

Во второй главе построена полуаналитическая модель ИК фона неба, новым элементом которой является учет данных космологического расчета крупномасштабной структуры Вселенной, а также получение модельных карт ИК-фона, к которым можно применять различные алгоритмы поиска источников. Разработанная модель показывает хорошее согласие с известными данными о подсчетах источников и спектре мощности пространственной

анизотропии ИК фона в диапазоне длин волн от 100 мкм до 2 мм. Эта модель была использована для определения предела путаницы для будущих космических телескопов дальнего ИК диапазона 10-метрового класса, а также для сравнения кластеризации пиков интенсивности фона с реальной крупномасштабной структурой.

На основе полученных данных о подсчете источников для оценки предела путаницы были использованы критерий плотности источников и фотометрический критерий. Полученные с помощью этих критериев величины предела путаницы сравнивались между собой, а также с величиной предела путаницы, полученной непосредственно из карты ИК фона с помощью критерия полноты. Важно отметить, что полученные с помощью критерия полноты из модельной карты пределы путаницы для 3.5-метрового телескопа оказались близки к найденным по наблюдениям телескопа Herschel. Из чего можно сделать вывод, что при апертуре телескопа 3-10 м оценочные критерии хорошо работают на сравнительно длинных волнах, $\lambda \geq 300$ мкм, и плохо на коротких.

При длинах волн около 100 мкм из карт, полученных в режиме широкополосной фотометрии с 10-метрового телескопа, можно будет выделять компактные источники с плотностью потока от 10 мкЯн, что более чем на порядок лучше, чем для телескопа с диаметром зеркала 3.5 м. Для длины волны 300 мкм, на которую приходится максимум интенсивности ИК фона, предел путаницы составит около 0.6 мЯн, что также на порядок ниже предела путаницы, измеренного в ходе работы телескопа Herschel. Для длины волны 1 мм 10-метровый телескоп даст четырехкратный выигрыш по пределу путаницы, достигнув 1 мЯн.

В третьей главе была проведена серия космологических симуляций в кубе с периодическими граничными условиями, где либо вся темная материя, либо переменная доля f_{RVN} представлена первичными черными дырами (ПЧД) с массами $30 M_{\odot}$. Предполагается, что «нормальная» темная материя представляет собой однородную жидкость без флуктуаций плотности, которая участвует только в оценке функции Хаббла. Было показано, что это предположение разумно для $z \geq 10$.

Для того, чтобы учесть стадию расширения Вселенной с преобладанием радиации, используется модифицированная версия общедоступного кода

для расчета задачи N тел **GADGET-2** [43]. Параметры данного кода специально подобраны для расчета орбитальных характеристик формирующихся пар ПЧД с высокой точностью. Это позволяет отслеживать их орбиты пока они не сольются или не будут разрушены из-за взаимодействия со своими соседями. Вдобавок, был сделан вывод, что количество захватов двойных во время близких гиперболических пролетов из-за эффектов ОТО ничтожно мало по сравнению с количеством чисто ньютоновских захватов.

Было показано, что зарегистрированное разрушение пары не вызвано внутренними численными ошибками, сопряженными с вычислениями орбит N тел. В результате было показано, что основным фактором, ответственным за процессы образования, разрушения и слияния пар ПЧД, является возникновение гравитационно-связанных структур при красных смещениях $z \approx 3000$, что примерно соответствует эпохе равномерного излучения и вещества.

Описываются результаты по скорости слияния пар ПЧД, включая гиперболические слияния, которые составляют 0,77% от общего числа слияний по всем 6 численным моделям. В свою очередь, значение скорости слияния для доли ПЧД, равной $f_{PBH} = 10^{-3}$ было оценено в $r_m \approx 10^2 \text{ Гпк}^{-3} \cdot \text{год}^{-1}$, что довольно точно соответствует скорости слияния, оцененной коллаборацией LIGO [44] и другими группами [45; 46].

В **заключении** сформулированы результаты диссертации, и обсуждаются перспективы дальнейших исследований.

Список литературы

1. SEVEN-YEAR WILKINSON MICROWAVE ANISOTROPY PROBE (WMAP) OBSERVATIONS: SKY MAPS, SYSTEMATIC ERRORS, AND BASIC RESULTS / N. Jarosik [и др.] // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 2011. — янв. — т. 192, № 2. — с. 14. — DOI: 10.1088/0067-0049/192/2/14. — URL: <https://doi.org/10.1088/0067-0049/192/2/14>.
2. NINE-YEAR WILKINSON MICROWAVE ANISOTROPY PROBE (WMAP) OBSERVATIONS: FINAL MAPS AND RESULTS / C. L. Bennett [и др.] // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 2013. — сент. —

- т. 208, № 2. — с. 20. — DOI: 10.1088/0067-0049/208/2/20. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0067-0049/208/2/20>.
3. Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters / Planck Collaboration [и др.] // *Astronomy & Astrophysics*. — 2014. — нояб. — т. 571. — A16. — DOI: 10.1051/0004-6361/201321591. — arXiv: 1303.5076 [astro-ph.CO].
 4. Planck 2018 results / N. Aghanim [и др.] // *Astronomy & Astrophysics*. — 2020. — сент. — т. 641. — A6. — DOI: 10.1051/0004-6361/201833910. — URL: <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201833910>.
 5. *Persic M., Salucci P.* The baryon content of the Universe // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1992. — сент. — т. 258, № 1. — 14P—18P. — DOI: 10.1093/mnras/258.1.14p. — URL: <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/258.1.14p>.
 6. *Trimble V.* Existence and Nature of Dark Matter in the Universe // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. — 1987. — т. 25, № 1. — с. 425—472. — DOI: 10.1146/annurev.aa.25.090187.002233.
 7. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger / B. P. Abbott [и др.] // *Physical Review Letters*. — 2016. — февр. — т. 116, № 6. — с. 061102. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102. — arXiv: 1602.03837 [gr-qc].
 8. Did LIGO Detect Dark Matter? / S. Bird [и др.] // *Physical Review Letters*. — 2016. — май. — т. 116, № 20. — DOI: 10.1103/physrevlett.116.201301. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.201301>.
 9. *Clesse S., García-Bellido J.* The clustering of massive Primordial Black Holes as Dark Matter: Measuring their mass distribution with advanced LIGO // *Physics of the Dark Universe*. — 2017. — март. — т. 15. — с. 142—147. — DOI: 10.1016/j.dark.2016.10.002. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dark.2016.10.002>.
 10. Primordial Black Hole Scenario for the Gravitational-Wave Event GW150914 / M. Sasaki [и др.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2016. — авг. — т.

- 117, ВЫП. 6. — с. 061101. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.061101. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.117.061101>.
11. *Zel'dovich Y. B., Novikov I. D.* The Hypothesis of Cores Retarded during Expansion and the Hot Cosmological Model // *Astronomicheskii Zhurnal*. — 1966. — т. 43. — с. 758.
 12. *Hawking S.* Gravitationally Collapsed Objects of Very Low Mass // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1971. — апр. — т. 152, № 1. — с. 75—78. — DOI: 10.1093/mnras/152.1.75. — eprint: <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/152/1/75/9360899/mnras152-0075.pdf>. — URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/152.1.75>.
 13. *Ivanov P., Naselsky P., Novikov I.* Inflation and primordial black holes as dark matter // *Phys. Rev. D*. — 1994. — дек. — т. 50, вып. 12. — с. 7173—7178. — DOI: 10.1103/PhysRevD.50.7173. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.50.7173>.
 14. *Lacki B. C., Beacom J. F.* PRIMORDIAL BLACK HOLES AS DARK MATTER: ALMOST ALL OR ALMOST NOTHING // *The Astrophysical Journal*. — 2010. — авг. — т. 720, № 1. — с. L67—L71. — DOI: 10.1088/2041-8205/720/1/167. — URL: <https://doi.org/10.1088%5C%2F2041-8205%5C%2F720%5C%2F1%5C%2F167>.
 15. Signatures of primordial black hole dark matter / К. М. Belotsky [и др.] // *Modern Physics Letters A*. — 2014. — дек. — т. 29, № 37. — с. 1440005. — DOI: 10.1142/s0217732314400057. — URL: <http://dx.doi.org/10.1142/S0217732314400057>.
 16. *Press W. H., Schechter P.* Formation of Galaxies and Clusters of Galaxies by Self-Similar Gravitational Condensation // *Astrophysical Journal*. — 1974. — февр. — т. 187. — с. 425—438. — DOI: 10.1086/152650.
 17. The evolution of large-scale structure in a universe dominated by cold dark matter / М. Davis [и др.] // *Astrophysical Journal*. — 1985. — май. — т. 292. — с. 371—394. — DOI: 10.1086/163168.
 18. Two-dimensional simulation of the gravitational system dynamics and formation of the large-scale structure of the Universe / А. Г. Doroshkevich [и др.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1980. —

- сент. — т. 192, № 2. — с. 321—337. — DOI: 10.1093/mnras/192.2.321. — URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/192.2.321>.
19. *Navarro J. F., Frenk C. S., White S. D. M.* The Structure of Cold Dark Matter Halos // *The Astrophysical Journal*. — 1996. — май. — т. 462. — с. 563. — DOI: 10.1086/177173. — URL: <http://dx.doi.org/10.1086/177173>.
 20. Properties of galaxies reproduced by a hydrodynamic simulation / M. Vogelsberger [и др.] // *Nature*. — 2014. — май. — т. 509, № 7499. — с. 177—182. — DOI: 10.1038/nature13316. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/nature13316>.
 21. The EAGLE project: simulating the evolution and assembly of galaxies and their environments / J. Schaye [и др.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2014. — нояб. — т. 446, № 1. — с. 521—554. — DOI: 10.1093/mnras/stu2058. — URL: <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stu2058>.
 22. Mass Density Profiles of Low Surface Brightness Galaxies / W. J. G. de Blok [и др.] // *The Astrophysical Journal*. — 2001. — май. — т. 552, № 1. — с. L23—L26. — DOI: 10.1086/320262. — URL: <https://doi.org/10.1086/320262>.
 23. *Walker M. G., Peñarrubia J.* A METHOD FOR MEASURING (SLOPES OF) THE MASS PROFILES OF DWARF SPHEROIDAL GALAXIES // *The Astrophysical Journal*. — 2011. — нояб. — т. 742, № 1. — с. 20. — DOI: 10.1088/0004-637x/742/1/20. — URL: <https://doi.org/10.1088/0004-637x/742/1/20>.
 24. Does the Fornax dwarf spheroidal have a central cusp or core? / T. Goerdt [и др.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2006. — апр. — т. 368, № 3. — с. 1073—1077. — DOI: 10.1111/j.1365-2966.2006.10182.x. — eprint: <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/368/3/1073/18665310/mnras0368-1073.pdf>. — URL: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10182.x>.
 25. *Moore B.* Evidence against dissipation-less dark matter from observations of galaxy haloes // *Nature*. — 1994. — авг. — т. 370, № 6491. — с. 629—631. — DOI: 10.1038/370629a0.

26. HIGH-RESOLUTION MASS MODELS OF DWARF GALAXIES FROM LITTLE THINGS / S.-H. Oh [и др.] // *The Astronomical Journal*. — 2015. — май. — т. 149, № 6. — с. 180. — DOI: 10.1088/0004-6256/149/6/180. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0004-6256/149/6/180>.
27. *Дорошкевич А. Г., Лукаш В. Н., Михеева Е. В.* К решению проблем каспов и кривых вращения в гало тёмной материи в космологической стандартной модели // *Усп. физ. наук*. — 2012. — т. 182, № 1. — с. 3—18. — DOI: 10.3367/UFNr.0182.201201a.0003. — URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2012/1/b/>.
28. Quantifying the heart of darkness with GHALO – a multibillion particle simulation of a galactic halo / J. Stadel [и др.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*. — 2009. — сент. — т. 398, № 1. — с. L21–L25. — DOI: 10.1111/j.1745-3933.2009.00699.x. — URL: <https://doi.org/10.1111/j.1745-3933.2009.00699.x>.
29. Empirical Models for Dark Matter Halos. I. Nonparametric Construction of Density Profiles and Comparison with Parametric Models / D. Merritt [и др.] // *The Astronomical Journal*. — 2006. — янв. — т. 132, № 6. — с. 2685–2700. — DOI: 10.1086/508988. — URL: <http://dx.doi.org/10.1086/508988>.
30. The dependence of dark matter profiles on the stellar-to-halo mass ratio: a prediction for cusps versus cores / A. Di Cintio [и др.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2013. — нояб. — т. 437, № 1. — с. 415–423. — DOI: 10.1093/mnras/stt1891. — eprint: <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/437/1/415/18452732/stt1891.pdf>. — URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stt1891>.
31. *Read J. I., Agertz O., Collins M. L. M.* Dark matter cores all the way down // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2016. — март. — т. 459, № 3. — с. 2573–2590. — DOI: 10.1093/mnras/stw713. — eprint: <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/459/3/2573/8105757/stw713.pdf>. — URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stw713>.

32. *Demiański M., Doroshkevich A.* The patch like model of galaxies formation: the virial paradox, core-cusp and missing satellite problems // arXiv: Cosmology and Nongalactic Astrophysics. — 2020.
33. Cuspy no more: how outflows affect the central dark matter and baryon distribution in Λ cold dark matter galaxies / F. Governato [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2012. — апр. — т. 422, № 2. — с. 1231—1240. — DOI: 10.1111/j.1365-2966.2012.20696.x. — URL: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20696.x>.
34. NIHAO IX: the role of gas inflows and outflows in driving the contraction and expansion of cold dark matter haloes / A. A. Dutton [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2016. — июль. — т. 461, № 3. — с. 2658—2675. — DOI: 10.1093/mnras/stw1537. — eprint: <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/461/3/2658/8112214/stw1537.pdf>. — URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stw1537>.
35. A dark matter profile to model diverse feedback-induced core sizes of Λ CDM haloes / A. Lazar [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2020. — июль. — т. 497, № 2. — с. 2393—2417. — DOI: 10.1093/mnras/staa2101. — eprint: <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/497/2/2393/33571817/staa2101.pdf>. — URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/staa2101>.
36. *Navarro J. F., Eke V. R., Frenk C. S.* The cores of dwarf galaxy haloes // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 1996. — дек. — т. 283, № 3. — с. L72—L78. — DOI: 10.1093/mnras/283.3.172. — URL: <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/283.3.L72>.
37. *Pontzen A., Governato F.* How supernova feedback turns dark matter cusps into cores // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2012. — март. — т. 421, № 4. — с. 3464—3471. — DOI: 10.1111/j.1365-2966.2012.20571.x. — URL: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20571.x>.
38. NIHAO-XXIII. Dark matter density shaped by black hole feedback / A. V. Macciò [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters. — 2020. — апр. — т. 495, № 1. — с. L46—L50. — DOI: 10.1093/mnrasl/slaa058. — eprint: <https://academic.oup.com/mnrasl/>

article-pdf/495/1/L46/33097484/slaa058.pdf. — URL: <https://doi.org/10.1093/mnrasl/slaa058>.

39. *Mikheeva E., Doroshkevich A., Lukash V.* A solution of the cusp problem in relaxed halos of dark matter // *Nuovo Cim. B.* — 2007. — т. 122. — с. 1393—1398. — DOI: 10.1393/ncb/i2008-10503-1. — arXiv: 0712.1688 [astro-ph].
40. Space mission Millimetron for terahertz astronomy / A. V. Smirnov [и др.] // *Space Telescopes and Instrumentation 2012: Optical, Infrared, and Millimeter Wave.* т. 8442 / под ред. М. С. Clampin [и др.]. — 09.2012. — с. 84424C. — (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series). — DOI: 10.1117/12.927184.
41. Review of scientific topics for the Millimetron space observatory / N. S. Kardashev [и др.] // *Physics Uspekhi.* — 2014. — дек. — т. 57, № 12. — с. 1199—1228. — DOI: 10.3367/UFNe.0184.201412c.1319. — arXiv: 1502.06071 [astro-ph.IM].
42. *Пулипенко С. В.* Космический инфракрасный фон: как его смоделировать и как разобраться в путанице // *Физика Космоса: труды 47-й Международной студенческой научной конференции.*—Екатеринбург, 2018. — Издательство Уральского университета. 2018. — с. 83—94.
43. *Springel V.* The cosmological simulation code GADGET-2 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2005. — дек. — т. 364. — с. 1105—1134. — DOI: 10.1111/j.1365-2966.2005.09655.x. — eprint: astro-ph/0505010.
44. Astrophysical Implications of the Binary Black-hole Merger GW150914 / B. P. Abbott [и др.] // *The Astrophysical Journal.* — 2016. — февр. — т. 818, № 2. — с. L22. — DOI: 10.3847/2041-8205/818/2/L22. — arXiv: 1602.03846 [astro-ph.HE].
45. *Ali-Haïmoud Y.* Correlation Function of High-Threshold Regions and Application to the Initial Small-Scale Clustering of Primordial Black Holes // *Physical Review Letters.* — 2018. — авг. — т. 121, № 8. — с. 081304. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.081304. — arXiv: 1805.05912 [astro-ph.CO].

46. Formation and evolution of primordial black hole binaries in the early universe / M. Raidal [и др.] // Journal of Cosmology and Astro-Particle Physics. — 2019. — февр. — т. 2019, № 2. — с. 018. — DOI: 10.1088/1475-7516/2019/02/018. — arXiv: 1812.01930 [astro-ph.CO].