

«УТВЕРЖДАЮ»:

Проректор МГУ имени М.В. Ломоносова,
доктор физико-математических наук,
профессор А.А. Федянин

«_____» _____ 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

(Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1) на диссертационную работу ТКАЧЕВА Максима Вячеславовича на тему «Моделирование наблюдательных проявлений темной материи» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия»

Основное содержание диссертационной работы

Диссертационная работа Ткачева Максима Вячеславовича «Моделирование наблюдательных проявлений темной материи» состоит из Введения, трех глав, Заключения и списка цитируемой литературы, включающей 209 научных работ, а также списка сокращений и условных обозначений, списков терминов, рисунков и таблиц. Общий объем диссертации составляет 115 страниц, 6 таблиц и 18 рисунков.

Диссертация посвящена исследованию проявления свойств темной материи в строении и распределении галактик, а также в сигналах, полученных с гравитационно-волновых детекторов.

В диссертационной работе была проведена проверка энтропийного подхода к проблеме образования гало темной материи с помощью численных расчетов, получена оценка фоновой энтропии, характеризующей мелкомасштабные начальные неоднородности в распределении материи. Кроме того была построена полуаналитическая модель фона, созданного далекими галактиками, излучающими в дальнем инфракрасном (ИК)

диапазоне с учетом данных космологического расчета крупномасштабной структуры Вселенной. Разработанная модель показывает хорошее согласие с известными данными о подсчетах источников и спектре мощности пространственной анизотропии ИК фона. Отдельное внимание в работе уделено анализу процесса образования и разрушения гравитационно-связанных пар первичных черных дыр (ПЧД) – гипотетического типа черных дыр, образовавшийся вскоре после Большого взрыва, из которых частично может состоять темная материя.

Во **Введении** диссертации обосновывается актуальность работы, перечисляются косвенные наблюдаемые проявления темной материи, кандидаты в холодную темную материю. Также во введении формулируются цели и задачи исследования, приводятся основные положения, выносимые на защиту, апробация результатов, научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Дается общая характеристика диссертации с указанием ее краткого содержания.

Первая глава посвящена проверке энтропийного подхода к проблеме “каспов” темной материи. В этой главе приводятся формулы радиальных профилей плотности гало темной материи, описывается проблема несоответствия между результатами моделирования и наблюдениями – так называемая проблема “каспа”. Далее описывается энтропийный подход. Делается утверждение, что функцию энтропии гало можно представить в виде суммы вкладов фоновой энтропии, заданной начальными мелкомасштабными течениями и неоднородностями материи в протогало, и приобретённой энтропии, генерируемой в ходе бесстолкновительной и иерархической релаксации материи на нелинейной стадии формирования гало. Далее описывается оригинальный способ оценки фоновой энтропии с помощью численных расчетов образования гало из похожих начальных условий. Описывается численный эксперимент для проверки работоспособности и выяснения точности энтропийного метода, и представлены результаты оценки фоновой энтропии. Делается вывод, что

“касп” в гало возникает из областей начального распределения материи, имеющих энтропию на порядок ниже, чем в среднем по Вселенной (внутри сферы с массой каспа).

Вторая глава посвящена теме моделирования ИК фона неба. В главе объясняется, что подразумевается под космическим ИК фоном (ИКФ), описывается проблема путаницы, когда слабые точечные источники не могут быть отделены от фона, создаваемого многими далекими галактиками. Диссертант объясняет необходимость создания модели фона неба для экстраполяции текущих представлений об ИКФ в область более высокого разрешения и чувствительности. В главе приводится классификация моделей ИКФ и обосновывается необходимость учета эффектов сильного гравитационного линзирования. Диссертант приводит подробное описание создаваемой полуаналитической модели фона неба, включающее требования к модели, а также основные этапы и детали ее построения. В главе описывается способ учета эффекта гравитационного линзирования. Отдельное внимание уделяется сравнению предсказаний модели с результатами наблюдений. Также в главе приводится оценка пределов путаницы. При этом пределы путаницы, полученные с помощью критерия полноты из модельной карты для 3.5-метрового телескопа оказываются близки к найденным по наблюдениям телескопа Herschel. Делается вывод, что крупномасштабная структура Вселенной, проявляющаяся в модели, не оказывает заметного влияния на предел путаницы, найденный из модельных карт.

Третья глава посвящена проблеме ПЧД, которые могли образоваться на ранних стадиях эволюции Вселенной, и которые могут входить в состав темной материи. В главе представлена численная модель, описывающая эволюцию ПЧД с массами порядка 30 солнечных масс. При этом рассмотрено несколько вероятных долей ПЧД в темной материи. В главе подробно описана численная модель. Представлены оценки вероятности образования пар ПЧД, а также скорости слияния ПЧД в зависимости от их

доли в темной материи. Отдельное внимание уделяется оценке возможности «искусственного» разрушения пар из-за численных ошибок. 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 распределения излучения и вещества.

В **Заключении** приводятся выводы и перечисляются основные результаты, полученные в этой диссертации

Актуальность выполненной работы не вызывает сомнений. В настоящее время общепринятой считается точка зрения, что во Вселенной содержится значительная доля темной материи. Темная материя влияет на эволюцию видимого вещества и косвенно проявляется в наблюдениях. Модель холодного темного вещества хорошо согласуется с крупномасштабной структурой Вселенной. А вот на галактических масштабах наблюдаются расхождения между предсказаниями космологического моделирования и наблюдениями. В частности, во многих галактиках в центральных частях не наблюдаются предсказанные в моделях пики плотности гало темной материи (каспы), а наоборот, – наблюдается более пологий ход радиального распределения плотности – ядро. Диссертант проверил так называемый «энтропийный» подход к проблеме каспа, разработанный Дорошкевичем и др. и пришел к выводу, что предположение о том, что симуляции высокого разрешения сами по себе способны решить проблему каспов, скорее всего не соответствует действительности.

Темная материя может отчасти состоять из теоретически предсказанных первичных черных дыр. О том, что такие объекты могут существовать, косвенно свидетельствует обнаружение гравитационных волн, излучаемых при слиянии двух черных дыр массой 30 солнечных масс, объявленное группой LIGO/VIRGO. Для надежной оценки сигнатур гравитационных волн (ГВ) от слияний пар ПЧД требуется хорошее

понимание процесса образования пар ПЧД и их последующего взаимодействия с окружающей средой; важные шаги в этом направлении были проделаны диссертантов в главе 3.

Кроме того, для предсказания возможностей будущих телескопов, и в частности, для будущей обсерватории «Миллиметрон» очень актуально моделирование наблюдений большого числа галактик, проделанное диссертантом.

Наиболее важные и новые результаты. По теме диссертации опубликовано 3 научные статьи в журналах, рекомендованных ВАК, в том числе одна статья – в высокорейтинговом журнале MNRAS. Основные результаты исследований были доложены на международных и всероссийских конференциях, а также семинарах отдела теоретической астрофизики АКЦ ФИАН. Результаты работы получили признание как в научной литературе, так и на конференциях, что подтверждает **достоверность** положений и выводов диссертационной работы. Представлены новые результаты диссертации:

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).
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.
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 распределения излучения и вещества.

Научное значение полученных результатов работы определяются, в том числе, ее вкладом в исследование проблемы Каспа, что важно для внегалактической астрономии. Построенная диссертантом модельная карта ИК фона, созданного далекими галактиками, излучающими в дальнем ИК-диапазоне, необходима для наблюдательной астрономии – для планирования и предсказания возможностей новых ИК телескопов.

Практическое значение полученных результатов состоит в том, что разработанные в процессе ее выполнения методы и модели могут быть использованы другими авторами. В частности, полуаналитическая модель ИК фона неба 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. Оценки влияния численных эффектов в модели формирования, разрушения и слияния пар ПЧД могут оказаться полезными для будущих исследований, выполненных данным методом.

Замечания по содержанию диссертации.

1. Введение: «Рукава спиральных галактик вращаются вокруг галактического центра.» – следует различать вращение спиральных рукавов и диска галактики. В данном случае речь должна идти о вращении диска.

2. Введение: «Если законы Кеплера верны, то очевидный способ устранить это несоответствие - сделать вывод, что распределение массы в спиральных галактиках не похоже на распределение массы в Солнечной системе – в частности, на окраинах галактики много несветящейся материи

(темной материи).» – плоские кривые вращения можно было бы объяснить и не прибегая к темной материи, если предположить, к примеру, что поверхностная плотность видимого вещества уменьшается от центра к краю по закону $\sim 1/R$. Основное расхождение заключается в том, что оценки плотности звезд и газа дают совершенно иной закон распределения плотности – экспоненциальное убывание в случае диска. И в случае экспоненциального диска, действительно получается падение скорости к краю, которое не согласуется с наблюдениями.

3. Введение: «Такие параметры обычно настраиваются в соответствии с наблюдаемыми величинами, такими как функция масс галактики и соотношение масс галактики и центральной черной дыры» – в данном контексте следует писать функция масс звезд галактики.

4. Введение: «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») [58; 65—69].» – проблема каспа возникает не только для карликовых галактик, но и для всех дисковых галактик в целом (см, например, Dehghani и др. 2020 и ссылки в этой работе).

5. Глава 1, введение: «Гало темной материи — компонент галактик, окружающий галактический диск и простирающийся далеко за пределы видимой части галактики.» – данное определение не совсем корректно - гало темной материи есть не только в дисковых галактиках, кроме того, слово окружающий создает впечатление, что в области диска гало ТМ нет, а это не так.

6. Глава 1, рисунок 1.5 (панель по левую руку). Расчеты фоновой энтропии на суперкомпьютере Ломоносов-2 (серые кресты), почему-то раздваиваются или имеют значительно больший разброс по сравнению с

расчетами для модели Местной группы (черные точки). Это никак не объясняется в тексте.

7. Глава 2, пункт 2.3.2: что подразумевается под размером основания конуса? Его радиус? Если да, то для $z=6.2$ получается примерно в два раза больший радиус, чем указан в диссертации.

8. Глава 2, пункт 2.4.1: утверждается, что модель успешно воспроизводит спектр анизотропии фона в пределах ошибок измерения, полученные из наблюдений на телескопе Herschel, что продемонстрировано на рисунке 2.4. При этом, поскольку на рисунке не показаны ошибки для наблюдений на телескопе Herschel, это утверждение плохо иллюстрируется рисунком. Исходя из рисунка, создается впечатление плохого согласия между моделью и наблюдениями для больших длин волн.

9. В диссертации встречаются опечатки и стилистические неточности.

Перечисленные замечания не умаляют научной ценности выполненных диссертантом исследовательских работ.

Заключение ведущей организации по диссертации

Диссертация М.В. Ткачева представляет значительный вклад во внегалактическую астрономию, в том числе, может быть использована для предсказания возможностей новых ИК телескопов. Диссертант провел численный расчет образования гало темной материи при помощи инструментов космологического численного моделирования, а также выполнил несколько модификаций общедоступного кода GADGET-2. При помощи инструментов для обработки результатов численного моделирования, включающих оригинальные коды на языках C и Python, автор оценил фоновую энтропию гало. Диссертант разработал и описал на языке C модель гравитационного линзирования галактик. Автор также на языке Python разработал собственную модель для учета излучения гравитационных волн в тесных парах первичных черных дыр. Результаты

диссертации опубликованы в статьях в международных рецензируемых журналах и имеют на данный момент 10 цитирований, что указывает на научный и практический интерес в астрономическом мире.

Автореферат диссертации правильно и адекватно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа М.В. Ткачева «Моделирование наблюдательных проявлений темной материи» соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия».

Отзыв принят на заседании Координационного Совета по астрофизике Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ имени М.В. Ломоносова. На заседании присутствовало 22 члена Совета из 30. Результаты голосования: «за» – 22; «против» – 0; «воздержалось» – 0. Протокол № 11 от «13» апреля 2022 г.

Отзыв составила старший научный сотрудник Отдела внегалактической астрономии ГАИШ МГУ кандидат физико-математических наук А.С. Сабурова.

Председатель Координационного совета
по астрофизике ГАИШ МГУ
доктор физико-математических наук

А.С. Гусев

Директор ГАИШ МГУ
доктор физико-математических наук, профессор

К.А. Постнов