

На правах рукописи

Баушев Антон Николаевич

Тёмная материя: проблемы и решения

Специальность: 01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Дубна — 2017

1 Общая характеристика работы

1.1 Актуальность темы исследований

Задача о физической природе ТМ чрезвычайно важна. Дело в том, что, несмотря на весьма значительные затраченные усилия, к настоящему моменту нет никаких экспериментальных подтверждений того, что существует какая-либо элементарная физика за пределами Стандартной Модели. На Большом Адронном Коллайдере (БАК) никаких указаний на новую физику элементарных частиц не обнаружено. Предел возможностей БАК пока не достигнут, но уже недалек, а строительство существенно превосходящей его установки в обозримом будущем не планируется. Однако в общепринятой сейчас Стандартной Модели приемлемого кандидата на роль частицы (или частиц) темной материи нет. Таким образом, наличие темной материи — один из сильнейших доводов (и практически единственный в настоящее время прямой экспериментальный аргумент) в пользу того, что физика частиц не ограничивается Стандартной Моделью.

Есть веские аргументы утверждать, что ТМ не была горячей ($v \ll c$) в эпоху, когда сформировалось реликтовое излучение [24]. Однако она могла быть теплой (т.е. на момент формирования первых структур $z \sim 20$ средняя дисперсия скоростей ЧТМ была нерелятивистской, но все-таки могла оказать некоторое влияние на образование структур, то есть была ~ 10 км/сек) или холодной (дисперсией скоростей которой можно полностью пренебречь). В большинстве сценариев (в частности, для всех видов вимпов) ТМ должна быть холодной, хотя есть и сценарии с теплой ТМ (стерильное нейтрино небольшой массы и т.д.). Теоретически, отличить эти два случая можно, исследуя мелкомасштабные структуры во Вселенной.

В последние годы появились факты, будто бы указывающие на то, что либо темная материя является теплой, либо ЧТМ взаимодействуют друг с другом негравитационным образом: противоречие между результатами моделирования профилей плотности темной материи в центрах галактик и наблюдениями стало несомненным. В то время, как при моделировании профили всегда получаются примерно одинаковыми и с острым пиком плотности в центре гало, большинство наблюдений говорят о большом разнообразии профилей, к тому же с плоским плато в центре¹. В принципе, противоречие между наблюдениями и результатами численного моделирования может указывать на неприменимость стандартной Λ CDM космологии и в этом смысле пролить свет на физическую природу темной

¹В англоязычной литературе используемым в этой диссертации терминам "пик" и "плато" соответствуют 'cusp' и 'core', соответственно.

материи. Можно было бы предположить, что ТМ не является холодной, либо имеется негравитационное взаимодействие между частицами. Однако прежде, чем сделать столь сильные выводы о природе темной материи, нужно быть уверенным, что результаты моделирования объективны и свободны от численных эффектов. Именно рассмотрение этой важнейшей задачи является главным предметом данной диссертации и изложено в ее первой главе.

Вторым способом выяснения физической природы темной материи является ее так называемый прямой поиск или прямое детектирование. Метод полностью основан на предположении, что частицей ТМ является вимп, а его суть заключается в детектировании возможных столкновений вимпов с атомными ядрами [25]. Сечение рассеяния вимпа на нуклоне очень мало, а скорость вимпов в Галактике ~ 300 км/сек, поэтому столкновения являются низкоэнергичными (характерная энергия измеряется десятками КэВ) и весьма редкими событиями, поэтому для их наблюдения требуется низкий фон (что предполагает подземную лабораторию), очень высокая радиационная чистота и изощренная техника эксперимента. Прямой поиск весьма чувствителен к распределению ЧТМ по скоростям, которое нельзя измерить непосредственно, и теоретические представления о котором довольно туманны. Именно этим вопросам посвящена вторая глава диссертации.

Помимо исследования формирования структур и прямого поиска, для выявления физической природы темной материи широко применяется непрямой поиск, т.е., поиск вторичных частиц, порождаемых темной материей. Этот метод более универсален, чем прямое детектирование, и применим далеко не только к вимпам, хотя и он совершенно не способен обнаружить многих кандидатов на роль ЧТМ. Как мы уже отмечали, ТМ с высокой вероятностью является смесью частиц и античастиц (в качестве частного случая, ЧТМ может быть тождественна своей античастице, например, легчайшая суперсимметричная частица – нейтралино), и поэтому везде, где она есть, должна наблюдаться ее аннигиляция. Интенсивность аннигиляции пропорциональна ρ^2 , и поэтому особый интерес в этом случае представляют области с высокой плотностью ТМ.

Менее вероятный, но тоже возможный сценарий состоит в том, что ЧТМ являются долгоживущими, но все же нестабильными. В этом случае сигнал пропорционален просто количеству ТМ, и ее высокая плотность не дает особых преимуществ. Предпринимаются попытки наблюдать самые разнообразные продукты аннигиляции или распада ТМ: позитроны, нейтрино, антипротоны и т.д. Однако особенно выгодны для непрямого поиска фотоны: их легко детектировать (по сравнению с нейтрино), и они

не отклоняются космическими магнитными полями и прямо указывают на свой источник (в отличие от заряженных частиц). Некоторым важным вопросам непрямого детектирования посвящена третья глава. Основную трудность для прямого поиска представляет существование множества конкурирующих астрофизических источников жесткого излучения с самыми разными свойствами. Рассмотрению некоторых из них посвящена четвертая глава.

Актуальность решаемых в диссертации задач проявляется и в том, что большинство из них выполнены с учетом особенностей конкретных экспериментов и могут применяться при анализе наблюдательных данных. С другой стороны, развитые в диссертации методы и общие результаты находят применение при решении вновь возникающих задач.

1.2 Цели и методы исследования

В диссертации решаются следующие основные задачи.

- 1) Развитие метода умеренной релаксации и его применение к формированию структур во Вселенной. Выявление следствий модели умеренной релаксации, которые могут быть проверены наблюдательно.
- 2) Проверка надежности существующих методов проверки сходимости космологических симуляций. Разработка путей улучшения этих методов.
- 3) Анализ распределения и выживаемости подструктур темной материи на основе подхода умеренной релаксации. Оценка возможного фактора усиления сигнала от аннигиляции темной материи.
- 4) Оценка плотности внегалактической ТМ и распределения по скоростям ее частиц.
- 5) Получение распределения по скоростям частиц темной материи, соответствующего "изотермическому" профилю плотности $\rho \propto r^{-2}$, в предельно анизотропном случае.
- 6) Рассмотрение взаимодействия потока газа с подструктурами темной материи через их мелкомасштабное гравитационное поле. Анализ возможности частичного увлечения ТМ вслед за барионной при формировании Галактики с образованием т.н. толстого диска темной материи.
- 7) Расчет аннигиляции темной материи в гравитационном поле шварцшильдовой черной дыры, точно учитывающий угловое распределение продуктов реакции и все эффекты ОТО.
- 8) Нахождение верхних пределов на сечение аннигиляции ЧТМ в различных каналах на основании наблюдений карликового сфероида Segue 1 гамма-обсерваторией Fermi.
- 9) Рассмотрение аннигиляции ТМ в ранней Вселенной ($z \sim 300$) и расчет

потока и спектра фотонов от нее, которое может измерить земной наблюдатель.

10) Моделирование некоторых астрофизических источников жесткого излучения, сигнал от которых может конкурировать с сигналом аннигиляции темной материи.

Основным методом, применяемым в диссертации, является аналитический подход, позволяющий лучше понять фундаментальную физику проблемы и зависимость решения задачи от сделанных начальных предположений. Помимо этого, при проведении анализа наблюдений гамма-обсерваторией Fermi использовались стандартные хорошо известные методы обработки наблюдений. Для решения ряда задач применялись также хорошо разработанные методы численного моделирования. Однако особенностью диссертации является применение простых аналитических моделей для описания весьма сложных явлений, а хорошее согласие полученных результатов с наблюдательными данными (в ряде случаев, гораздо лучшее, чем у сложного численного моделирования) доказывает не только применимость этих моделей, но и правильность выбора начальных предположений при их создании.

1.3 Научная новизна и значимость

Основные результаты диссертации, выносимые на защиту, являются новыми и важными для развития современной физики темной материи. Приоритет автора в получении решения основных задач диссертации признается мировым сообществом, что подтверждается цитированием и использованием его результатов в дальнейших исследованиях другими учеными как в нашей стране, так и за рубежом.

В диссертации существенно развита теория образования структур во Вселенной. С помощью предположения об умеренной энергетической релаксации соискателю удалось объяснить четыре особенности галактических гало темной материи, которые были давно известны, но не находили убедительного объяснения в рамках стандартной теории образования структур: наличие плато, а не пика, в центре гало; поведение профиля плотности в области плато как профиля Эйнаста с малым индексом ($n \sim 0.5$); обширная область с $\rho \propto r^{-2}$; постоянство произведения центральной плотности гало на радиус плато. Более того, с помощью анализа сходимости компьютерных симуляций, применяемых для моделирования формирования структур во Вселенной, соискатель сумел указать на уязвимость общепринятых критериев сходимости и предложить решение широко известного противоречия между предсказываемыми симуляциями пиками и наблюдаемыми плато профилей плотности ТМ в центрах галак-

тических гало. До этого в литературе доминировала точка зрения, что противоречие указывает на физические свойства темной материи, т.е. что она либо не была холодной, либо вступает в какие-то негравитационные взаимодействия сама с собой или с барионным веществом [26]. Будь это так — мы бы получили ценнейшую информацию о природе темной материи. Большое внимание, уделяемое этому вопросу в международной научной литературе, неудивительно. В настоящее время существование ТМ является, по сути, единственным прямым экспериментальным аргументом в пользу существования физики, выходящей за пределы Стандартной Модели: поиск на БАК и других установках пока положительных результатов не дал. Ничего не дали и прямые и косвенные поиски ТМ. В таких условиях любая достоверная информация о физической природе ТМ чрезвычайно ценна. К сожалению, соискателю удалось показать, что острые пики плотности в центре гало, наблюдаемые при моделировании и рассматриваемые в настоящее время как сильный аргумент против модели холодной темной материи, наиболее вероятно, являются не более чем вычислительным артефактом.

Большой практический интерес представляют и результаты предпринятых А. Н. Баушевым исследований распределения ЧТМ по скоростям в окрестностях Земли (вторая глава диссертации). В настоящее время в мире одновременно работают порядка десяти экспериментов по прямому поиску темной материи, и их результаты противоречивы. Например, DAMA [27] уже давно наблюдает сигнал, который можно интерпретировать как ЧТМ с массой ~ 10 ГэВ, а наблюдения других установок, в частности, XENON [28], исключают существование такой частицы. Т.к. результаты прямого детектирования очень чувствительны к распределению ЧТМ по скоростям, реалистичные модели этого распределения имеют большую практическую значимость.

Обсуждение наиболее перспективных источников для непрямого поиска, и потенциальных трудностей при интерпретации полученного сигнала, вызванных наличием астрофизических источников жесткого излучения, по своим свойствам похожего на сигнал аннигиляции ТМ (третья и четвертая главы диссертации), также весьма актуально.

1.4 Основные результаты, выносимые на защиту

1. Разработан энергетический подход к формированию структур темной материи. Доказано, что гораздо лучшее согласие с результатами наблюдений может быть получено, если сделать единственное предположение, что релаксация в ходе формирования гало была *умеренной* в следующем смысле: конечная полная удельная энергия ϵ_f для большинства частиц

отличается от начальной ϵ_i не более, чем в $k \leq c_{vir}/4$ раз. При этом естественное объяснение получают четыре особенности, наблюдаемые в центрах галактических гало темной материи: наличие плато, а не пика, в центре гало; поведение профиля плотности в области плато как профиля Эйнаста с малым индексом ($n \sim 0.5$); обширная область с $\rho \propto r^{-2}$; постоянство произведения центральной плотности гало на радиус плато.

2. Раскрыты противоречия критериев сходимости космологических компьютерных симуляций, повсеместно применяемых в настоящее время. Использован метод Фоккера-Планка в центре гало и показано, что острые пики плотности в центре гало, наблюдаемые при моделировании и рассматриваемые в настоящее время как сильный аргумент против модели холодной ТМ, вероятно, являются не более, чем вычислительным артефактом. Предложены несколько существенно более надежных и научно обоснованных методов независимой проверки сходимости космологических компьютерных симуляций, которые могут быть применены даже в реальном времени в процессе моделирования.

3. Использован предложенный в диссертации энергетический подход к образованию подструктур темной материи для выяснения их распределения в различных астрономических объектах в настоящий момент. Показано, что подструктуры, расположенные дальше 50 кпс от центра Галактики, выживают даже при самых пессимистических предположениях об их устойчивости. Наличие подструктур приводит к возникновению своеобразного "трения" между темной материей и барионным веществом, и, как следствие, может приводить к формированию так называемого "толстого диска" Млечного Пути.

4. Изучены физические явления, влияющие на распределение ЧТМ по скоростям. Раскрыта значительная доля внегалактической ТМ в окрестностях Солнечной Системы, доказано ее изотропное распределение по скоростям. Изложены весоные аргументы в пользу того, что распределение по скоростям галактической компоненты ТМ, напротив, является весьма анизотропным.

5. Определены наиболее перспективные источники для наблюдательного поиска аннигиляции темной материи. Изучены особенности аннигиляционного сигнала для трех перспективных видов источников: черных дыр, карликовых сфероидов и аннигиляции ТМ, происходящей в ранней Вселенной ($z \simeq 300$). Изучены некоторые источники космического излучения высоких энергий, сходного с образующимся при аннигиляции ТМ. Исходя из этого, представлены рекомендации по выбору наиболее перспективных источников для непрямого поиска темной материи.

1.5 Достоверность результатов

Вычисления, проделанные в диссертации, основываются на использовании стандартных методов теоретической механики, динамики звездных систем и теоретической физики. Все новые результаты проверялись на предмет соответствия известным классическим достижениям в данной области теоретической физики. Применение при получении результатов, главным образом, аналитических преобразований давало возможность сравнительно легкой их проверки, что далеко не всегда просто сделать при использовании численного моделирования. Во многих случаях оригинальные результаты диссертации в дальнейшем проверялись и воспроизводились другими исследователями (см., например, [2, 9]). Кроме того, работы, положенные в основу этой диссертации, прошли весьма строгое рецензирование в первоклассных научных журналах, что тоже в некоторой степени удостоверяет их достоверность.

1.6 Апробация

Результаты данной работы неоднократно докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ (Дубна), Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (Москва), АстроКосмического Центра РАН (Москва), Института Ядерных Исследований (Москва), Института Космических Исследований (Москва), на теоретических семинарах зарубежных научных центров: DESY (Цойтен, Германия), DESY (Гамбург, Германия), MPI (Мюнхен, Германия), Университет Хельсинки (Финляндия), LARTH (Анси, Франция), Университет Карлсруе (Германия), Католическом университете (Сантьяго, Чили), Университете Чили (Сантьяго, Чили); на ряде международных конференций:

- 2009, 1—5 июля, Рим, Италия, 11th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2009)
- 2011, 17—18 марта, Модан, Франция, 3rd Workshop on directional detection of Dark Matter (CYGNUS 2011)
- 2011, 5—9 сентября, Мюнхен, Германия, 12th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2011)
- 2012, 6—8 июня, Мёдон, Париж, Франция, Workshop 2012 "Warm Dark Matter Galaxy Formation in Agreement with Observations"
- 2012, 18—23 ноября, Бад Либенцель, Германия, Workshop on Data Analysis and Detector Technologies
- 2013, 24—25 января, Карлсруе, Германия, HAP Advanced Technologies Workshop

- 2013, 17—20 февраля, Мюнстер, Германия, Конференция HAP Dark Matter
- 2013, Тренто, Италия, 18—22 марта, конференция "The mass profile of galaxy clusters from the core to the outskirts: the need for a multi-wavelength approach"
- 2014, 21—25 июля, Инсбрук, Австрия, Alpine Cosmology Workshop 2014
- 2015, 23—30 июля, Дубна, Международная конференция "Theory challenges for LHC physics" (CALC 2015)

1.7 Публикации и личный вклад автора

Основные результаты диссертации опубликованы в виде 19 статей в ведущих российских и зарубежных физических журналах, входящих в Перечень ВАК [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19]. Из этих работ 14 выполнены без соавторов [1, 2, 4, 5, 6, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 17, 18, 19]. Помимо этого, по материалам диссертации опубликованы 2 работы в трудах конференций и рабочих совещаний [20, 21]. Кроме того, в двух препринтах [22, 23], которые доступны в электронных базах данных, содержатся некоторые дополнительные материалы. Основные работы по диссертации имеют высокую цитируемость и хорошо известны специалистам.

Вклад автора во все полученные результаты является определяющим. Автором осуществлялись: формулировка задач, разработка путей и методов их решения, развитие необходимого математического аппарата, подготовка текстов публикаций, а также переписка с редакциями научных журналов и рецензентами.

В работе [3] вклад А.Н. Баушева является полностью определяющим, соавтор участвовал лишь в постановке задачи и частично в обсуждении полученных результатов. Статья [9] имеет трех авторов, однако вклад соискателя доминирует: им осуществлялась постановка задачи, все теоретические расчеты, расчеты пространственного и спектрального распределения источников, обсуждение полученных результатов, подготовка текста публикации и переписка с редакциями научных журналов и рецензентами. В работе [7] А.Н. Баушеву принадлежит основной вклад в проведение аналитических вычислений, обсуждение полученных результатов, подготовку текста публикации и переписку с редакциями научных журналов и рецензентами, тогда как численные результаты были получены соавтором данной работы М.В. Барковым. Публикации [15, 16] являются результатом сотрудничества А.Н. Баушева с коллаборацией СТА, и в их написание вложен труд большого коллектива ученых.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

I. Статьи в рецензируемых журналах

- [1] А. Н. Баушев 2009, *Зависимость спектральных свойств двойного рентгеновского источника 4U0115+63 от фазы: результаты наблюдений спутника Верро-Sax*, *Астрономический Журнал*, 86, 76
- [2] Baushev, A. 2009, *Dark Matter Annihilation in the Gravitational Field of a Black Hole*, *International Journal of Modern Physics D*, 18, 1195
- [3] Baushev, A., & Chardonnet, P. 2009, *Electric Charge Estimation of a Newborn Black Hole*, *International Journal of Modern Physics D*, 18, 2035
- [4] Baushev, A. N. 2009, *Dark matter annihilation at cosmological redshifts: possible relic signal from annihilation of weakly interacting massive particles*, *MNRAS*, 398, 783
- [5] Baushev, A. N. 2010, *Phantom dark energy and cosmological solutions without the Big Bang singularity*, *Physics Letters B*, 684, 69
- [6] Baushev, A. N. 2012, *Interaction of clumpy dark matter with interstellar medium in astrophysical systems*, *MNRAS*, 420, 590
- [7] Barkov, M. V., & Baushev, A. N. 2011, *Accretion of a massive magnetized torus on a rotating black hole*, *New Astronomy*, 16, 46
- [8] Baushev, A. N. 2011, *Principal properties of the velocity distribution of dark matter particles on the outskirts of the Solar system*, *MNRAS*, 417, L83
- [9] Baushev, A. N., Federici, S., & Pohl, M. 2012, *Spectral analysis of the gamma-ray background near the dwarf Milky Way satellite Segue 1: Improved limits on the cross section of neutralino dark matter annihilation*, *Phys. Rev. D*, 86, 063521
- [10] Baushev, A. N. 2015, *The real and apparent convergence of N-body simulations of the dark matter structures: Is the Navarro-Frenk-White profile real?*, *Astroparticle Physics*, 62, 47
- [11] Baushev, A. N. 2013, *Extragalactic Dark Matter and Direct Detection Experiments*, *ApJ*, 771, 117

- [12] Baushev, A. N. 2014, *Galaxy Halo Formation in the Absence of Violent Relaxation and a Universal Density Profile of the Halo Center*, ApJ, 786, 65
- [13] Baushev, A. N. 2014, *Relaxation of dark matter halos: how to match observational data?*, A&A, 569, A114
- [14] Baushev, A. N. 2016, *Can the dark matter annihilation signal be significantly boosted by substructures?*, JCAP, 1, 018
- [15] Acharya, B. S., Aramo, C., Babic, A., et al. 2015, *The Cherenkov Telescope Array potential for the study of young supernova remnants*, Astroparticle Physics, 62, 152
- [16] Acharya, B. S., Actis, M., Aghajani, T., et al. 2013, *Introducing the CTA concept*, Astroparticle Physics, 43, 3
- [17] Baushev, A. N. 2012, *Principal properties of the velocity distribution of dark matter particles near the Solar System*, Journal of Physics Conference Series, 375, 012048
- [18] Baushev, A. N. 2010, *Phantom dark energy and the steady state 'on the average' universe*, Journal of Physics Conference Series, 203, 012055
- [19] Baushev, A. N. 2010, *Relic signal produced by the annihilation of dark matter particles*, Journal of Physics Conference Series, Journal of Physics Conference Series, 203, 012047

II. Материалы конференций

- [20] Baushev, A. 2010, *Dark matter annihilation in the vicinity of a black hole*, American Institute of Physics Conference Series, 1206, 277
- [21] La Barbera, A., Baushev, A., Ferrigno, C., et al. 2004, *A Study of Cen X-3 as Seen by INTEGRAL*, 5th INTEGRAL Workshop on the INTEGRAL Universe, 552, 337

III. Неопубликованные препринты

- [22] A. N. Baushev 2016, *Galaxy collisions as a mechanism of formation of ultra diffuse galaxies (UDG)*, ArXiv e-prints: 1608.04356.
- [23] A. N. Baushev, L. del Valle, L. E. Campusano, A. Escala, R. R. Muñoz, G. A. Palma 2016, *Cusps in the center of galaxies: a real conflict with*

observations or a numerical artefact of cosmological simulations?, ArXiv e-prints:1606.02835.

Наиболее важные результаты диссертации опубликованы в работах [1]-[19].

1.8 Структура, объем работы и использованные сокращения

Диссертация состоит из Введения, четырех Глав, Заключения и Списка литературы. Материал изложен на 239 страницах, включает 47 иллюстраций, 8 таблиц, 247 библиографических ссылок.

В диссертации использованы следующие сокращения и нестандартные термины: ТМ — темная материя, ЧТМ — частица (или частицы) темной материи, НФВ (профиль, концентрация, потенциал) — (профиль, концентрация, потенциал) Наварро-Френка-Вайта [29], УПП — Универсальный Профиль Плотности, используемым в этой диссертации терминам "пик" и "плато" в англоязычной литературе соответствуют 'cusp' и 'core', соответственно. Термином "вимп" (от англ. WIMP) мы называем массивные частицы, вступающие в слабое взаимодействие, термином "кламп" (от англ. 'clump') — относительно маломассивные гало или другую подструктуру, неоднородность темной материи.

2 Краткое содержание работы

2.1 Введение

Здесь обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются основная цель и задачи, возникающие при ее решении, обсуждается научная новизна представленных исследований. Представляется обзор литературы в данной области исследований.

2.2 Глава 1: Умеренная релаксация и формирование структур во Вселенной

Весьма сложная, нелинейная проблема формирования структур во Вселенной по-прежнему далека от решения. Одним из многообещающих подходов к данной задаче является моделирование методом N тел. Однако результаты подобного моделирования до некоторой степени совпадают с результатами наблюдений только в случае скоплений галактик [30], а в

случае менее массивных структур возникают явные противоречия. Моделирование формирования структур в холодной темной материи приводит к формированию гало универсальной формы (гало различной массы имеют одинаковый профиль плотности, с точностью до преобразования подобия). Мы будем называть этот профиль Универсальный Профиль Плотности (УПП). Моделирование предсказывает, что УПП имеет острый пик плотности в центре. Ранее предлагался профиль Наварро-Френка-Вайта [29] (далее НФВ)

$$\rho = \frac{\rho_s r_s^3}{r(r + r_s)^2}, \quad (1)$$

ведущий себя в центре как $\rho \propto r^{-1}$. Концентрация гало определяется как $c_{vir} = r_s/R_{vir}$. В последнее время профиль Эйнасто [31]

$$\rho = \rho_s \exp \left[-2n \left\{ \left(\frac{r}{r_s} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right\} \right] \quad (2)$$

оказался предпочтительнее [32, 33, 34, 35]. Он имеет конечную плотность в центре; однако полученные значения его показателя оказались столь высоки ($n \simeq 5 - 6$), что профиль по-прежнему является пикообразным.

Напротив, многочисленные наблюдения (например, [36, 37, 38, 39]) свидетельствуют в пользу платообразного профиля в центре темных гало (т.е., плотность темной материи по мере приближения к центру растет лишь до определенного предела, а в самом центре имеется участок с почти постоянной плотностью). [40] моделировали профили плотности темной материи большого массива спиральных галактик профилем Эйнасто, рассматривая показатель n как свободный параметр. Оказалось, что Эйнасто подгоняет наблюдательные данные заметно лучше, чем НФВ или псевдоизотермальный с плато. Однако найденное значение показателя n оказалось очень малым ($n \simeq 0.5 - 1$), что соответствует платообразному профилю [41, 42].

В течение довольно долгого времени была популярна версия, что противоречие между предсказываемым пиком и наблюдаемым плато исчезнет, когда моделирование начнет учитывать наличие барионной материи [43]. Эта версия с самого начала вызывала определенные сомнения. Главным источником недоумения был тот факт, что наилучшее согласие между наблюдениями и пикообразными профилями, получаемыми при моделировании, наблюдалось как раз у объектов, содержащих значительную долю барионной материи, например, у скоплений галактик [30], а наибольшее расхождение [44] возникает у карликовых галактик, которые иногда содержат менее 10^{-6} барионной материи, и трудно поверить, что столь ни-

чтожное количество вещества достаточно для разрушения центрального пика.

Наконец были выполнены симуляции, учитывающие наличие барионов, и их результаты практически похоронили надежды разрешить противоречие таким путем [26]. Действительно, наличие барионов влияло на профили образующихся гало, и, подбирая параметры, в принципе, оказалось возможным неплохо подогнать многие реальные гало. Фундаментальная трудность заключается в том, что для каждого конкретного выбора параметров симуляций все гало оказываются подобными, т.е. УПП сохраняется, хотя и отличается от УПП для чистой темной материи. Однако свойства наблюдаемых гало весьма разнообразны, среди них встречаются объекты как с пикообразным, так и с платообразным профилем ТМ, и наблюдаемое разнообразие галактик явно невозможно описать одним УПП, каким бы он ни был: удачный подгон профилей одних галактик вариацией параметров моделирования неизбежно приведет к резкому расхождению для других галактик.

В принципе, противоречие между наблюдениями и результатами численного моделирования может указывать на неприменимость стандартной Λ CDM космологии и в этом смысле пролить свет на физическую природу темной материи. Можно было бы предположить, что ТМ не является холодной, либо имеется негравитационное взаимодействие между частицами. Однако прежде, чем сделать столь сильные выводы о природе темной материи, нужно быть уверенным, что результаты моделирования объективны и свободны от численных эффектов.

Как показано в [12, 13], энергетическая эволюция системы играет определяющую роль в образовании центрального пика: если энергетическая эволюция системы умеренная, в центре неизбежно формируется плато, а для формирования пика энергообмен должен быть интенсивным. Поэтому верное моделирование энергообмена между частицами при образовании темного исключительно важно: его переоценка вследствие численных эффектов приведет к формированию ложного пика.

Хотя ТМ и предполагается бесстолкновительной, механизм энергетической релаксации у нее есть. Это так называемая интенсивная релаксация [45]. Суть данного механизма проста: в процессе нелинейного коллапса гало в нем должны возникать значительные неоднородности плотности. Эти неоднородности создают мелкомасштабное гравитационное поле, которое интенсивно перераспределяет энергию между частицами. Аналитические расчеты показывают, что данный механизм может быть весьма эффективным в центре гало. Однако интенсивная релаксация "работает" только во время коллапса гало: уже сформировавшееся гало имеет стационарное

гравитационное поле. Более того, данный механизм эффективен только в центре гало, а при удалении от центра он быстро слабеет [45].

В численных моделировании, однако, возникает еще один, совершенно нефизический механизм релаксации: столкновение тестовых частиц. Точный учет его влияния представляет собой довольно сложную задачу и требует учета распределения частиц в пространстве и по скоростям. Есть, однако, простой и довольно точный метод оценить это влияние, связанный с введением усредненных "характерных" величин для скорости v и радиусов частиц r [46, eqn. 1.32]. Подставив в это выражение динамическое время $\tau_d \sim r/v$, мы получим:

$$\frac{\langle \Delta v \rangle}{\delta t} \simeq 0 \quad \frac{\langle \Delta v^2 \rangle}{\delta t} \simeq \frac{8v^2 \ln \Lambda}{N(r)} \cdot \frac{v}{r} \quad (3)$$

Здесь $N(r)$ — число частиц внутри радиуса r , $\ln \Lambda$ — кулоновский логарифм.

Время столкновительной релаксации τ_r может быть определено как момент, когда $\Delta v^2 \simeq v^2$, и мы получаем из (3)

$$\tau_r = \frac{N(r)}{8 \ln \Lambda} \cdot \frac{r}{v} \quad (4)$$

Т.к. реальные гало содержат $\sim 10^{65}$ частиц, столкновительная релаксация в них ничтожна. В симуляциях, однако, число тел сравнительно невелико, и релаксация (как мы видели, отсутствующая в реальных системах и потому являющаяся чистым численным эффектом), может быть существенной за вычислительное время t_0 .

Главная цель тестов сходимости для симуляций — найти t_0/τ_r , при котором профиль плотности еще не искажен численными эффектами, в частности, влиянием столкновений тестовых частиц. τ_r быстро растет с радиусом: влияние столкновений может быть пренебрежимым на краях гало, но уже недопустимо большим в центре. Можно ввести радиус сходимости r_{conv} для гало для заданной длительности симуляций t_0 , так что влияние столкновений уже существенно внутри r_{conv} , но им еще можно пренебречь для $r > r_{conv}$.

Конечно, существует обширная литература, посвященная данной тематике. Однако, в силу отсутствия надежных теоретических предсказаний поведения темной материи вблизи центра гало, основным и, по сути, единственным методом проверки сходимости симуляций является стабильность профиля и его независимость от параметров симуляции (впрочем, обычно изменяемых в небольших пределах). Это делается следующим образом: проводятся космологические симуляции, из них выделяется отдельное гало, определяется его профиль. После этого, гало "пересобирается"

(в англоязычной литературе эта операция называется *resampling*) с изменением параметров: радиуса сглаживания или числа частиц (но, конечно, с сохранением профиля). Если после этого профиль остается стабильным - считается, что влияние численных эффектов невелико.

Главной целью первой главы является подробное рассмотрение формирования профиля плотности в центре гало. Во-первых, показано, что предположение об умеренной релаксации гало темной материи в ходе его формирования автоматически приводит к профилю плотности, который хорошо соответствует наблюдаемым в центральных областях галактик. Профиль нечувствителен к начальным условиям. Он имеет центральное плато; в области плато профиль плотности ведет себя как профиль Эйншто с малым индексом ($n \sim 0.5$). На больших расстояниях профиль имеет обширную область с $\rho \propto r^{-2}$. Произведение центральной плотности гало на радиус плато практически не зависит от массы гало.

Во-вторых, раскрыты противоречия в критериях сходимости космологических симуляций, применяемых в настоящее время. Методом Фоккера-Планка исследуется поведение вычислительных схем и показано, что между частицами в симуляциях происходят столкновения, что ставит под сомнение надежность определения как функции распределения скоростей, так и профиля плотности в центре гало. По-видимому, острые пики плотности в центре гало, наблюдаемые при моделировании и рассматриваемые в настоящее время как сильный аргумент против модели холодной темной материи, являются не более чем вычислительным артефактом.

Кроме того, рассматриваются малые подструктуры (клампы), возможно, присутствующие в крупных гало темной материи (масса этих структур простирается до $10^{-6} M_{\odot}$ или даже ниже). Данный вопрос очень важен для непрямого поиска темной материи, т.к., несмотря на то, что подструктуры, вообще говоря, являются довольно рыхлыми и неустойчивыми образованиями, в стандартных космологических сценариях именно они должны давать основной вклад в аннигиляцию темной материи, при условии, что они сохранились до настоящего времени. Последний параграф первой Главы посвящен выживаемости клампов в сценарии умеренной релаксации. В отличие от стандартного сценария с НФВ-клампами, подструктуры ТМ должны были полностью разрушены в радиусе ~ 20 кпс от центра Млечного Пути. Карликовые спутники Местной Группы также не должны содержать подструктур ТМ. С другой стороны, показано, что даже при самых пессимистических предположениях о структуре клампов они не могут быть разрушены в Млечном Пути на расстоянии, превышающем 50 кпс от центра, а также в космических структурах с низкой плотностью, и там они значительно усиливают аннигиляцию темной материи. Показа-

но, что по крайней мере 70% подструктур, доживших до момента $z = 10$, до сих пор благополучно существуют неповрежденными и в современной Вселенной.

2.3 Глава 2: Распределение ЧТМ по скоростями и прямое детектирование

Вторая глава посвящена распределению частиц темной материи по скоростям, которое весьма существенно для экспериментов по прямому поиску темной материи.

В первом параграфе получено распределение по скоростям ЧТМ в Солнечной Системе. Предлагается определить его, используя надежно установленные в наблюдениях свойства самого старого населения гало Млечного Пути. Действительно, самые старые звезды гало и шаровые скопления, как и частицы темной материи, образуют бесстолкновительную систему и эволюционируют в том же самом гравитационном поле. Если разумно применить эту аналогию, можно показать, что распределение скоростей ЧТМ должно быть очень анизотропными и имеют резкий максимум вблизи $v \sim 500$ км/сек. Нормированное распределение ЧТМ по скоростям вблизи Солнечной системы можно хорошо аппроксимировать как

$$f(v) = \frac{\exp\left(-\frac{v_\rho^2}{2\sigma_0^2}\right)}{2\pi^2\sigma_0^2\sqrt{v_{max}^2 - v_r^2}} \quad (5)$$

где v_r и $v_\rho \equiv \sqrt{v_\phi^2 + v_\theta^2}$ — радиальная и тангенциальная компоненты скорости ЧТМ, $v_r \in [-v_{max}; v_{max}]$, $v_{max} = 562$ км/сек, $\sigma_0 = 80$ км/сек — дисперсия тангенциальных скоростей ЧТМ. Распределение (5) совершенно отличается от максвелловского, сильно анизотропно и фактически представляет собой два встречных потока ЧТМ.

Анализируется влияние функции распределения на результаты экспериментов по прямому детектированию темной материи. Сигнал детектора, грубо говоря, может быть представлен, как произведение некоторой части, которая практически не зависит от распределения ЧТМ по скоростям, и интеграла [25]

$$I(v) = \int_{v_{min}}^{\infty} \frac{\tilde{f}(v)}{v} d\vec{v} \quad (6)$$

Здесь v_{min} — минимальная скорость ЧТМ, при которой детектор ее еще зафиксирует, $\tilde{f}(v)$ — распределение ЧТМ по скоростям в системе отсчета Земли, полученное из (5) преобразованием Галилея (см. подробности в

[47], параграф 3.3). Из-за орбитального движения Земли вокруг Солнца I меняется в течение года, и наблюдения этой модуляции могут подтвердить ТМ-природу сигнала, а в эксперименте вообще ДАМА наблюдают именно их, а не абсолютную величину сигнала.

Установлено, что этот сигнал должен заметно отличаться от того, который рассчитывается с помощью распределения Максвелла с $\langle v \rangle \simeq 220$ км/сек и обычно используется для оценки ожидаемого сигнала в экспериментах по прямому поиску ТМ (отношение ожидаемых сигналов для анизотропной и максвелловской моделей зависит от свойств детектора и, как правило, меняется в диапазоне от 6 до 0.2). Кроме того, резкое отличие распределения от максвелловского может быть также очень важно для наблюдений аннигиляции ТМ.

Последние астрономические данные убедительно свидетельствуют о том, что значительная часть темной материи, составляющей Местную Группу галактик и сверхскопление галактик в Деве, не включена в галактические гало и формирует обширные диффузионные оболочки этих скоплений. Часть ЧТМ из этих оболочек может проникать внутрь Млечного Пути и давать внегалактический вклад в общее содержание темной материи нашей Галактики. Во втором параграфе второй Главы показано, что частицы диффузионной составляющей Местной Группы могут вносить $\sim 12\%$ в полную плотность ТМ вблизи Земли. Частицы внегалактической темной материи выделяются своей высокой скоростью (~ 600 км/сек), то есть их энергия гораздо выше, чем у частиц галактической ТМ. Частицы внегалактической ТМ имеют изотропное (вероятно, в отличие от галактической темной материи) и очень узкое (~ 20 км/сек) распределение по скоростям. Внегалактическая темная материя должна давать существенный вклад в сигнал прямого поиска ТМ. Если детектор чувствителен только к быстрым частицам ($v > 450$ км/сек), внегалактический сигнал может даже доминировать. Плотность других возможных типов внегалактической темной материи (например, диффузионной составляющей сверхскопления галактик в Деве) должна быть относительно небольшой и сравнимой со средней плотностью ТМ во Вселенной. Однако эти частицы могут давать столкновения аномально высоких энергий в детекторах прямого поиска темной материи.

Эксперименты по прямому детектированию ТМ [48] налагают весьма жесткие ограничения сверху на сечение взаимодействия ЧТМ с нуклонами. Таким образом, на первый взгляд, наличие ТМ в нашей Галактике не влияет на движение барионной материи сквозь нее; ТМ лишь вносит свой вклад в общую массу Галактики и, следовательно, в крупномасштабное гравитационное поле Млечного Пути. Этот вывод, однако, справедлив

только если распределение темной материи является однородным. Согласно современным космологическим концепциям темная материя, вероятно, содержит большое количество клампов самых разных масс, и тогда их гравитационное поле оказывает дополнительное влияние на барионное вещество. Например, если поток газа проходит через неоднородную ТМ, гравитационное притяжение клампов возмущает поток. Это приводит к обмену импульсом между потоком газа и темной материей и частичному преобразованию кинетической энергии потока в тепловую. В третьем параграфе второй главы проведен подробный анализ этого эффекта и его, основанный на иерархической модели формирования структур ТМ и НФВ-профиле плотности.

Рассматривались темные гало различных масс, от самых малых до самых крупных $M \geq 10^9 M_{\odot}$. Было обнаружено, что в любом случае эффект возрастает с массой гало: возрастает не только сила \mathfrak{F} , действующая на гало, но и его ускорение $w = \mathfrak{F}/M$. Механизм оказалось неэффективным в случае столкновений галактик или скоплений галактик. С другой стороны, он сыграл важную роль в процессе формирования галактик. Под его влиянием неоднородности ТМ в гало в некоторой степени увлекались газом, и темная материя могла сформировать более компактную, сплюснутую и быстрее вращающуюся подструктуру в гало нашей Галактики: толстый диск. Оказывается, темная материя в этом диске должна быть более неоднородна, чем гало в целом. Этот факт очень важен для экспериментов по непрямому поиску ТМ, поскольку именно клампы дают основной вклад в сигнал аннигиляции. Расчеты показывают, что механизм обмена импульсом между темным и барионным веществом неэффективен на окраине галактического гало. Это означает, что клампы отсюда (в отличие от остального гало) не могли быть увлечены газом в толстый диск, и поэтому внешнее гало должно иметь более высокую объемную концентрацию подструктур, чем гало в среднем.

2.4 Глава 3: Непрямое детектирование

В этой Главе рассматривается аннигиляция ТМ: в окрестностях черных дыр, в карликовых галактиках-спутниках, входящих в Местную Группу и в ранней Вселенной ($z \sim 300$); а также возможность ее наблюдения с Земли.

Первый параграф посвящен аннигиляции темной материи в гравитационном поле шварцшильдовой черной дыры. Получена точная функция распределения падающих частиц темной материи с учетом всех эффектов общей теории относительности. Удобно ввести количество $\mathfrak{N}(\theta)$ ЧТМ в единице объема, движущихся под углом θ и в единицу телесного угла.

Перейдя в систему единиц, где $c = 1$, $r_g = 1$, получаем

$$\varkappa = \begin{cases} \frac{n_\infty}{4\pi v_\infty} \frac{r}{(\sqrt{r-1})^3}, & \cos \theta \geq \frac{\sqrt{r^2 - 4(r-1)}}{r} \Xi(2-r) \\ 0, & \cos \theta < \frac{\sqrt{r^2 - 4(r-1)}}{r} \Xi(2-r) \end{cases} \quad (7)$$

где n_∞ и v_∞ — концентрация и скорость ЧТМ на бесконечности, а

$$\Xi(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$$

Видно, что плотность ТМ значительно возрастает вблизи черной дыры.

Энергия столкновения ЧТМ вблизи черной дыры становится очень высокой, влияя на относительные сечения различных каналов аннигиляции, но несмотря на то, что скорости частиц в шварцшильдовом поле неограниченно приближаются к скорости света, максимальная энергия столкновения ЧТМ остается вполне конечной. В работе показано, что сумма энергий частиц в системе центра масс равна:

$$E = 2m \frac{\sqrt{1 - v^2 \cos^2 \beta}}{\sqrt{1 - v^2}} = 2m \frac{\sqrt{r - \cos^2 \beta}}{\sqrt{r - 1}} \quad (8)$$

где m — масса ЧТМ, 2β — угол между скоростями частиц. Наименьший радиус, на котором еще возможны лобовые столкновения ($\beta = \pi/2$) — это $r = 2$. Ему соответствует энергия столкновения $2\sqrt{2}m$. По мере приближения точки столкновения к горизонту событий энергии частиц продолжают расти, но максимально возможный угол β быстро уменьшается (т.к. скорости падающих частиц становятся почти параллельными). Если $r < 2$, он определяется формулой

$$\cos \theta \geq \frac{\sqrt{r^2 - 4(r-1)}}{r}, \quad (9)$$

и мы получаем:

$$\begin{aligned} E_{max} &= 2m\sqrt{r^2 + 4} \\ \lim_{r \rightarrow 1} E_{max} &= 2\sqrt{5} m \end{aligned} \quad (10)$$

Таким образом, несмотря на то, что энергии частиц в шварцшильдовом поле растут неограниченно, максимальная энергия столкновения частиц не превосходит $2\sqrt{5} m$. Поэтому, если порог некоторого канала аннигиляции превышает $2\sqrt{5} m$, этот процесс останется невозможным даже в

окрестности черной дыры. Впрочем, даже для 40 ГэВных частиц этот предел превышает 170 ГэВ. , Вычислен результирующий поток и спектр гамма-лучей. Обсуждаются возможные наблюдательные следствия всех этих эффектов.

Непрямое обнаружение темной материи требует отличить продукты аннигиляции темной материи от частиц астрофизического происхождения. Во втором параграфе третьей Главы представлены результаты обработки результатов наблюдений гамма-излучения известного спутника Млечного Пути - карликового сфероида Segue 1 в ГэВ-диапазоне. Для этого источника теория предсказывает максимальное отношение аннигиляционного сигнала к астрофизическому фону. В отличие от предыдущих аналогичных работ, была явно учтена угловая протяженность источника. Кроме того, в параграфе обсуждаются полученные ограничения на сечение аннигиляции ТМ и значение этих ограничений для выяснения физической природы темной материи.

Наконец, в третьем параграфе обсуждается возможность наблюдать продукты аннигиляции темной материи, происходившей в ранней Вселенной. Из всех частиц, которые могут образовываться в этом процессе, мы рассматриваем только фотоны, так как они не заряжены, и, вместе с тем, их легко наблюдать, в отличие от нейтрино. Чем моложе была Вселенная, тем выше были концентрация темной материи n и скорость ее аннигиляции, пропорциональная n^2 . Однако излучение из очень ранней Вселенной не может достичь нас из-за непрозрачности. Главную часть возможного аннигиляционного сигнала должна возникнуть в момент, когда Вселенная только что стала прозрачной для фотонов, порождаемых аннигиляцией. Таким образом, аннигиляция ТМ в ранней Вселенной должна была создать своего рода реликтовое излучение. В последнем параграфе третьей Главы мы получаем формулу для числа фотонов Q , которые приходят к земному наблюдателю из единицы телесного угла в единицу времени на единицу площади и в единичный энергетический интервал:

$$Q = \frac{\langle\sigma v\rangle n_0^2 c}{8\pi H_0 \sqrt{\Omega_m}} \frac{\beta\sqrt{\beta}}{\varepsilon^2 \sqrt{\varepsilon}} \exp\left(-\frac{2}{3}\wp \frac{\beta\sqrt{\beta}}{\varepsilon\sqrt{\varepsilon}}\right) \quad (11)$$

где ε и β — энергия фотона, зарегистрированная наблюдателем, и начальная энергия фотона; H_0 , Ω_m — постоянная Хаббла и доля темной материи, n_0 , n_0^b — средняя концентрация ЧТМ и барионов в современной Вселенной, соответственно; \aleph — усредненное сечение взаимодействия фотонов, порождаемых аннигиляцией, с барионной материей; и

$$\wp = \frac{\aleph c n_0^b}{H_0 \sqrt{\Omega_m}} \quad (12)$$

Показано, что если темная материя состоит из слабо взаимодействующих массивных частиц, вимпов, можно ожидать абсолютно изотропного внегалактического гамма-излучения в диапазоне энергий 0.5 - 20 МэВ с максимумом вблизи 8 МэВ. Показано, что экспериментально наблюдаемый избыток в фоне внегалактического гамма-излучения на энергиях 0.5 - 20 МэВ может возникать вследствие аннигиляции вимпов, однако только при условии, что первые структуры темной материи во Вселенной возникли очень рано ($z \simeq 300$). Обсуждаются физические условия, при которых возможна интерпретация наблюдаемого избытка на энергиях 0.5 - 20 МэВ как следов аннигиляции вимпов в ранней Вселенной.

2.5 Глава 4: Астрофизические конкуренты

Помимо обсуждаемой в предыдущей главе аннигиляции темной материи, жесткое космическое излучение может порождаться и целым рядом чисто астрономических источников. Обсуждению некоторых из них посвящена эта глава. Чем лучше мы будем понимать спектральные свойства компактных астрономических источников космического излучения - тем легче нам будет обнаружить аномалии, связанные с аннигиляцией ТМ, или, в случае отсутствия сигнала, хотя бы поставить лучшие верхние пределы на сечение этого процесса.

Первый параграф четвертой Главы диссертации посвящен численному моделированию осесимметричной аккреции массивного замагниченного плазменного тора на вращающуюся черную дыру. При этом используется реалистичное уравнение состояния, которое учитывает нейтринное охлаждение и потери энергии на диссоциацию ядер. Расчет выполняется в приближении идеальной релятивистской магнитогидродинамики с использованием консервативной схемы, основанной на линейном римановом решателе, и метода ограниченного переноса для расчета магнитного поля. Гравитационное притяжение черной дыры вводится с помощью метрики Керра в координатах Керра-Шилда. Моделировались различные конфигурации магнитного поля и плазменного тора, как оптически толстые, так и оптически тонкие для нейтрино.

Удалось обнаружить эффект чередования ориентации магнитного поля в ультрарелятивистском джете, образующемся в результате коллапса. Симуляции указывают на нагрев ветра, окружающего коллапсар, ударными волнами, возникающими на границе джет-ветер. Показано, что нейтринное охлаждение не изменяет значительно ни структуру аккреционного потока, ни общее выделение энергии системы. Момент импульса аккрецирующего вещества определяет временной масштаб аккреции. Т.к. магнитное динамо в приведенных расчетах отсутствует, начальная сила

и топология магнитного поля определяет формирование джета и общий выход энергии. Полученная оценка суммарной энергии джетов на уровне 1.3×10^{52} эрг оказывается достаточной для объяснения гиперновых GRB 980425 или GRB 030329.

Во втором параграфе представлены результаты изучения зависимости спектральных свойств рентгеновского источника 4U0115+63 от его фазы, основанные на наблюдениях рентгеновской обсерватории *Верро-Сакс*. В спектре присутствует заметная особенность, часто интерпретируемая как циклотронная абсорбция. Глубокие линии трех первых порядков наблюдаются всегда; линия четвертого порядка обнаружена лишь при некоторых значениях фазы. Параметры циклотронной особенности сильно зависят от фазы источника, в то время как остальной спектр меняется относительно слабо. Циклотронные линии разных порядков существенно неэквидистантны, а линия второго порядка почти всегда глубже первой. Обсуждаются физические условия в активной области источника, при которых может возникать подобный спектр.

2.6 Заключение.

Здесь кратко суммируются основные научные результаты, представленные в диссертационной работе, формулируются положения, выносимые на защиту. Приводится неполный список семинаров и научных конференций, где докладывались и обсуждались основные результаты диссертации.

Список литературы

- [24] D. S. Gorbunov and V. A. Rubakov, *Introduction to the Theory of the Early Universe: Hot Big Bang Theory* (World Scientific Publishing Co, 2011).
- [25] G. Bélanger, E. Nezri, and A. Pukhov, *Phys. Rev. D* **79**, 015008 (2009), 0810.1362.
- [26] K. A. Oman, J. F. Navarro, A. Fattahi, C. S. Frenk, T. Sawala, S. D. M. White, R. Bower, R. A. Crain, M. Furlong, M. Schaller, et al., *MNRAS* **452**, 3650 (2015), 1504.01437.
- [27] R. Bernabei, P. Belli, F. Montecchia, F. Nozzoli, F. Cappella, A. D'Angelo, A. Incicchitti, D. Prospero, R. Cerulli, C. J. Dai, et al., in *Particle Physics at the Year of Astronomy*, edited by H. Fritzsche, K. K.

- Phua, c.-e. B. E. Baaquie, A. H. Chan, N.-P. Chang, S. A. Cheong, L. C. Kwek, and C. H. Oh (2011), pp. 207–215.
- [28] E. Aprile, K. Arisaka, F. Arneodo, A. Askin, L. Baudis, A. Behrens, K. Bokeloh, E. Brown, T. Bruch, G. Bruno, et al., *Physical Review Letters* **107**, 131302 (2011), 1104.2549.
- [29] J. F. Navarro, C. S. Frenk, and S. D. M. White, *ApJ* **490**, 493 (1997), astro-ph/9611107.
- [30] N. Okabe, Y.-Y. Zhang, A. Finoguenov, M. Takada, G. P. Smith, K. Umetsu, and T. Futamase, *ApJ* **721**, 875 (2010), 1007.3816.
- [31] J. Einasto, *Trudy Inst. Astroz. Alma-Ata* **51**, 87 (1965).
- [32] L. Gao, J. F. Navarro, S. Cole, C. S. Frenk, S. D. M. White, V. Springel, A. Jenkins, and A. F. Neto, *MNRAS* **387**, 536 (2008), 0711.0746.
- [33] J. Diemand, M. Kuhlen, P. Madau, M. Zemp, B. Moore, D. Potter, and J. Stadel, *Nature* **454**, 735 (2008), 0805.1244.
- [34] J. Stadel, D. Potter, B. Moore, J. Diemand, P. Madau, M. Zemp, M. Kuhlen, and V. Quilis, *MNRAS* **398**, L21 (2009), 0808.2981.
- [35] J. F. Navarro, A. Ludlow, V. Springel, J. Wang, M. Vogelsberger, S. D. M. White, A. Jenkins, C. S. Frenk, and A. Helmi, *MNRAS* **402**, 21 (2010), 0810.1522.
- [36] W. J. G. de Blok, S. S. McGaugh, and V. C. Rubin, *AJ* **122**, 2396 (2001).
- [37] W. J. G. de Blok and A. Bosma, *A&A* **385**, 816 (2002), arXiv:astro-ph/0201276.
- [38] D. Marchesini, E. D’Onghia, G. Chincarini, C. Firmani, P. Conconi, E. Molinari, and A. Zacchei, *ApJ* **575**, 801 (2002), arXiv:astro-ph/0202075.
- [39] G. Gentile, P. Salucci, U. Klein, and G. L. Granato, *MNRAS* **375**, 199 (2007), arXiv:astro-ph/0611355.
- [40] L. Chemin, W. J. G. de Blok, and G. A. Mamon, *AJ* **142**, 109 (2011), 1109.4247.
- [41] S.-H. Oh, W. J. G. de Blok, E. Brinks, F. Walter, and R. C. Kennicutt, Jr., *AJ* **141**, 193 (2011), 1011.0899.

- [42] F. Governato, A. Zolotov, A. Pontzen, C. Christensen, S. H. Oh, A. M. Brooks, T. Quinn, S. Shen, and J. Wadsley, MNRAS **422**, 1231 (2012), 1202.0554.
- [43] A. Pontzen and F. Governato, MNRAS **421**, 3464 (2012), 1106.0499.
- [44] S. Garrison-Kimmel, M. Rocha, M. Boylan-Kolchin, J. S. Bullock, and J. Lally, MNRAS **433**, 3539 (2013), 1301.3137.
- [45] D. Lynden-Bell, MNRAS **136**, 101 (1967).
- [46] J. Binney and S. Tremaine, *Galactic Dynamics: Second Edition* (Princeton University Press, 2008).
- [47] D. G. Cerdeño and A. M. Green, *Direct detection of WIMPs* (Cambridge University Press, 2010), p. 347.
- [48] G. Bertone, D. Hooper, and J. Silk, Phys. Rep. **405**, 279 (2005), hep-ph/0404175.