

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Хмельницкий Андрей Александрович

Модели теплой темной материи в физике
частиц и космологии

01.04.02 — теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт ядерных исследований Российской академии наук и Университете Людвиг–Максимилиана в Мюнхене.

Научные руководители:

доктор физико-математических наук, профессор *В. А. Рубаков*
кандидат физико-математических наук *Д. С. Горбунов*

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук, профессор *К. А. Постнов* (ГАИШ)
доктор физ.-мат. наук, профессор *М. И. Высоцкий* (ИТЭФ)

Ведущая организация:

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова

Защита состоится « _____ » _____ 2014 г. в _____ часов на заседании Диссертационного совета Д 002.119.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312, г. Москва, проспект 60-летия Октября, дом 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института ядерных исследований Российской академии наук.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2013 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 002.119.01

кандидат физико-математических наук *Б. А. Тулунов*

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Последние два десятилетия были ознаменованы значительным прогрессом в области космологии. Это стало возможно благодаря ряду экспериментов, наблюдения которых превратили космологию в точную науку. Многие предсказания космологических моделей в настоящее время проверены с процентной точностью, чего невозможно было представить двадцать лет назад. Эти наблюдения также привели к формированию стандартной модели космологии с холодной темной материей и космологической постоянной Λ CDM. Инфляционная теория, предложенная в начале 1980-х разрешила основные трудности теории большого взрыва, а также предложила механизм генерации первичных флуктуаций плотности. В 1989 с помощью спектрометра, установленного на спутнике COBE (COsmic Background Explorer satellite), был измерен спектр реликтового излучения, что подтвердило его тепловую форму и позволило определить современную температуру Вселенной с высокой точностью (Дж. Матер и др., 1991). Несколько позже, в 1992 с помощью другого инструмента спутника COBE была обнаружена анизотропия реликтового излучения амплитудой 10^{-5} (Дж. Смут и др., 1992). Анизотропия такой амплитуды незадолго до этого была предсказана в модели холодной темной материи (Дж. Блюменталь и др., 1984). Вычисление распространенности химических элементов во вселенной, произведенных в результате первичного нуклеосинтеза, в частности отношение дейтерия к водороду, позволило установить, что плотность

барионов во Вселенной составляет одну пятую часть от плотности частиц темной материи (Дж. Лински и др., 1993). Открытие ускоренного расширения Вселенной с использованием наблюдений красных смещений сверхновых типа Ia в 1998 окончательно установило наличие ненулевой космологической постоянной (А. Рис, С. Перлмутер и др., 1998). Дальнейшее точное определение космологических параметров стало возможным благодаря измерениям углового спектра анизотропии реликтового излучения экспериментом WMAP, а также новым глубоким обзором галактик 2dFGRS и SDSS, позволившим наблюдать барионные акустические осцилляции и более точно определить спектр мощности возмущений темной материи. Эти измерения подтвердили существующие представления о составе Вселенной и привели к представлению о стандартной космологической модели.

Стандартной моделью космологии является модель Λ CDM, согласно которой Вселенная является пространственно плоской и в её современную плотность основной вклад $\Omega_\Lambda \approx 73\%$ дает космологическая постоянная. Остальная плотность разделена между темной материей $\Omega_{DM} \approx 23\%$, барионами $\Omega_b \approx 5\%$, а также незначительными вкладами нейтрино и реликтовых фотонов. В данной работе нас будут интересовать, в основном, особенности происхождения и формирования структур во Вселенной и их зависимость от свойств частиц темной материи. Последняя составляет основную часть массы большинства наблюдаемых компактных объектов. В соответствии с этим считается, что изначально космические структуры образовывались в результате гравитационного коллапса неоднородностей в плотности темной материи. Существование

изначальных неоднородностей плотности находит свое объяснение в инфляционной теории, которая также предсказывает масштабно инвариантную форму спектра начальных неоднородностей. Все время, пока Вселенная расширялась с замедлением, эти неоднородности плотности в холодной темной материи испытывали рост. Этот рост начиная с инфляционной эпохи их генерации и вплоть до начала гравитационного коллапса описывается теорией космологических возмущений. Предсказания этой теории, вместе с предположением о масштабной инвариантности спектра начальных флуктуаций, хорошо описывают наблюдаемую крупномасштабную структуру Вселенной.

Таким образом, существует большой набор наблюдательных данных, указывающих на то, что темная материя во Вселенной ведет себя как холодная на всех релевантных масштабах длин. Теоретически концепция холодной темной материи соответствует приближению, в котором предполагается, что возмущения всех, сколь угодно коротких, длин волн испытывают рост. Темная материя, состоящая из любых реальных частиц имеет конечный минимальный масштаб длин, на которых она может эффективно кластеризоваться. Поэтому холодной темной материей с точки зрения образования структур является темная материя, в которой этот минимальный масштаб длин намного короче любого масштаба, наблюдаемого в космических структурах.

Несмотря на успех предсказаний с холодной темной материей в описании космологических данных и наблюдений крупномасштабной структуры Вселенной предсказания теории формирования структур на масштабах масс $10^8 M_{\odot}$ и меньше находятся в противоречии с рядом

современных наблюдений. При этом важно, что все эти расхождения с наблюдениями, являясь независимыми, связаны с одной и той же характерной особенностью холодной темной материи, предсказанием большого количества мелкомасштабной структуры, на указанных масштабах масс (Дж. Примак, 2009, 2012).

Одной из основных проблем холодной темной материи на малых масштабах является так называемая проблема *недостатка спутников*, введенная Г. Кауфманн и др. в 1993 г. Суть проблемы заключается в том, что численное моделирование процессов образования галактик во Вселенной, заполненной холодной темной материей, предсказывает образование огромного количества гало малых масс. В частности каждая крупная галактика размером с Млечный Путь (с массой порядка $10^{11} - 10^{12} M_{\odot}$), получаемая в симуляциях, содержит внутри себя в среднем около пятисот гало-спутников массой $10^7 - 10^9 M_{\odot}$ (Ю. Диманд и др., 2007). В то же время, в нашей Галактике обнаружено только около сорока таких спутников. Большинство спутников представляют из себя карликовые сферические галактики, светимость самых компактных из которых, сравнима со светимостью шаровых звездных скоплений. Они являются далеко не самыми тусклыми из наблюдаемых объектов, и поэтому не ожидается, что будущие наблюдения приведут к открытию большого числа таких объектов. Таким образом наблюдается на порядок меньшее число таких галактик, чем предсказывается в модели холодной темной материи. Важной особенностью этой проблемы является то, что карликовые галактики являются наименьшими из обнаруженных компактных объектов, содержащими значительное количество

темной материи. Более компактные объекты, обнаруженные во Вселенной темной материи практически не содержат. Это позволяет сделать предположение, что масштаб карликовых галактик сравним с минимальным масштабом кластеризации темной материи, что может объяснить недостаток спутников. Кроме сформулированной выше классической проблемы недостатка спутниковых галактик, недавно были обнаружены другие потенциальные расхождения предсказываемого в численных симуляциях числа карликовых галактик. В частности, обнаруживается явный недостаток карликовых галактик также и за пределами больших гало, в космических пустотах (войдах) (П. Пиблс, 2001). Кроме того, современное моделирование процесса образования галактики типа Млечного Пути в холодной темной материи Aquarius, учитывающее влияние барионов, предсказало наличие около сотни гало с большими максимальными скоростями вращения звезд $v_{max} > 25$ км/с (М. Бойлан-Колчин и др., 2011). В наблюдаемых спутниках нашей Галактики максимальная скорость вращения никогда не превосходит этой величины, что значительно обостряет проблему недостатка галактик-спутников.

Другой потенциальной проблемой теории холодной темной материи на малых масштабах является проблема формы профиля распределения плотности массы в центральных областях гало. Гало холодной темной материи, образуемые в численных симуляциях, имеют универсальный профиль распределения плотности, форма которого практически не зависит от масштаба гало. Характерной особенностью этого профиля является быстрый рост плотности в центральной области $\rho(r) \propto 1/r$. Профили плотности реальных галактик, извлеченные из наблюдений

кинематики звезд и газа в различных гало, практически не зависят от радиуса в центральных областях и не показывают значительного роста плотности. Такого рода поведение профиля плотности не удается воспроизвести в симуляциях холодной темной материи даже с учетом барионной физики. Присутствие области практически постоянной плотности конечного размера в галактических гало также можно связать с неспособностью темной материи кластеризоваться на произвольно малых масштабах. Однако, стоит отметить, что в отличие от проблемы недостатка спутников не существует одного масштаба областей постоянной плотности, наблюдаемого во всех типах галактик.

Имеющиеся расхождения предсказаний модели холодной темной материи с наблюдениями на малых масштабах мотивируют рассмотрение моделей, в которых образование структур на таких масштабах является подавленным. Кроме того, так как предсказания теории холодной темной материи хорошо согласуются с большим набором данных космологических наблюдений и наблюдений космических структур с массами больше $10^{10} M_{\odot}$, то особый интерес представляют модели темной материи, поведение которых на больших масштабах не отличается от холодной темной материи. Такую темную материю, эффективность образования объектов в которой подавлена по сравнению с холодной темной материей только на масштабах наблюдаемых расхождений, принято называть *теплой темной материей*.

Стандартным инструментом исследования зависимости интенсивности образования структур от их масштаба является изучение спектра мощности флуктуаций плотности темной материи. С этой точки зрения

теплая темная материя характеризуется тем, что её спектр является подавленным по сравнению со спектром холодной темной материи на масштабах длин меньших чем масштаб карликовых галактик. В данной диссертации мы, однако, использовали другое описание, основанное на свойствах плотности распределения частиц темной материи в фазовом пространстве, и исследовали с его помощью несколько космологических сценариев с теплой темной материей. В качестве главного инструмента в нашем исследовании применяются ограничения на первичную фазовую плотность частиц темной материи, которые мы обобщили для применения к любому космологическому сценарию. Выполнение этих ограничений для модели теплой темной материи гарантирует то, что соответствующее подавление производства структур на малых масштабах не является чрезмерным, и данная модель способна описать формирование наблюдаемых структур. Эти ограничения тривиально выполняются для моделей холодной темной материи. В соответствии с этим, реалистичными и феноменологически интересными моделями теплой темной материи мы будем считать модели, которые находятся на грани выполнения ограничений на фазовую плотность.

Цель работы состоит в изучении феноменологически приемлемых моделей теплой темной материи и разработке новых методов исследования процессов образования компактных объектов во Вселенной на нелинейной стадии.

Научная новизна и практическая ценность.

В диссертации представлены ограничения на фазовую плотность

частиц тёмной материи. Ограничения, предложенные С. Тремэйном и Дж. Ганном в 1979 г. для частиц с тепловым распределением, впервые обобщены на случай произвольной функции распределения. Для неограниченных сверху функций распределения предложено статистическое обобщение предложенного ограничения. Рассмотрены методы оценки величины фазовой плотности из данных астрономических наблюдений, и представлены современные оценки максимальной наблюдаемой фазовой плотности частиц темной материи, основанные на исследовании динамики сверхкомпактных карликовых галактик.

В диссертационной работе изучены сценарии со стерильными нейтрино в роли частиц тёплой тёмной материи. Рассмотрены механизмы производства стерильных нейтрино в ранней Вселенной. Впервые подробно исследованы механизмы производства стерильных нейтрино темной материи в рассеяниях и распадах тяжелых частиц, получены функции распределения нейтрино по импульсам. Для обоих механизмов поставлены ограничения на фазовую плотность, которые привели к ограничениям на параметры данных сценариев. Впервые получены ограничения на параметры модели, следующие из ограничения на фазовую плотность для нейтрино, произведённых в нерезонансных осцилляциях в первичной плазме.

Диссертация содержит исследование сценариев с лёгкими гравитино в роли частиц тёплой тёмной материи. Рассмотрены механизмы производства легких гравитино в ранней Вселенной. Впервые поставлены ограничения на фазовую плотность гравитино как частиц тёмной материи. Впервые подробно изучены феноменологически приемлемые

космологические сценарии с легкими ($m \sim 1 - 10$ кэВ) гравитино в роли частиц темной материи. Рассмотрены существующие ограничения на параметры таких суперсимметричных расширений Стандартной Модели, следующие из данных ускорительных экспериментов.

Рассмотрено сверхлёгкое скалярное поле в роли тёмной материи. Изучено гравитационное поле, создаваемое такой тёмной материей в галактических гало. Впервые показано, что гравитационный потенциал таких гало содержит осциллирующую во времени компоненту, и рассмотрены возможности обнаружения такой компоненты в современных и планируемых наблюдениях по хронометрированию пульсаров.

Апробация диссертации. Основные результаты, полученные в диссертации, были доложены на научных семинарах ИЯИ РАН и НИИ-ЯФ МГУ, международном семинаре «Кварки-2008» (Сергиев Посад), международной конференции 44th Rencontres de Moriond «Very High Energy Phenomena in the Universe» (Аоста, Италия, 2009), на семинаре в Скандинавского института теоретической физики (NORDITA, Стокгольм, Швеция, 2009) и международной конференции «COSMO 2013» (Кембридж, Великобритания, 2013). По результатам диссертации опубликовано три работы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из Введения, пяти глав основного текста и Заключения, содержит 141 страницу машинописного текста, в том числе 9 рисунков и список литературы из 133 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обсуждается стандартная модель космологии с холодной темной материей и космологической постоянной Λ CDM, успешно описывающая эволюцию Вселенной и ее наблюдаемые свойства на больших масштабах. Показывается, что предсказания теории формирования структур на масштабах масс $10^8 M_{\odot}$ и меньше находятся в противоречии с рядом современных наблюдений. Вводится понятие *теплой темной материи*, в которой эффективность образования объектов подавлена по сравнению с холодной темной материей только на масштабах наблюдаемых расхождений. Также описываются методы исследования моделей с теплой темной материей, используемые в диссертации.

В Главе 1 обсуждается происхождение и формирование крупномасштабной структуры Вселенной в стандартной космологической модели. Все наблюдаемое многообразие компактных объектов во Вселенной образовалось в результате гравитационного коллапса неоднородностей в плотности распределения материи. Аналитическое исследование этого сложного нелинейного процесса, в значительной мере ограничено рамками применимости теории возмущений. Замечательно, однако, что рассмотрение лишь линейной теории позволяет оценить массовый спектр структур образуемых в конечном итоге. Сравнение массового спектра с наблюдениями приводит к существенным ограничениям на свойства различных компонент плотности материи, свойства первичных возмущений и историю эволюции Вселенной.

В разделе 1.1 описывается линейная теория эволюция флуктуаций плотности. Ее применение к известному спектру первичных возмущений

плотности предсказывает, что только неоднородности с современными длинами волн меньше порядка 30 Мпк выросли достаточно, чтобы перейти на нелинейную стадию эволюции к настоящему времени. Эти неоднородности соответствуют компактным объектам с массами меньше порядка $10^{15} M_{\odot}$. Таким образом, современная Вселенная должна быть практически однородна на масштабах более сотни мегапарсек и не содержать гравитационно связанных объектов с массами больше $10^{16} M_{\odot}$. Кроме того, линейная теория предсказывает, что неоднородности меньших масштабов выходили на нелинейный режим раньше, что соответствует картине иерархического образования структур: объекты большей массы образуются позже из объектов меньшей массы. Эта картина качественно согласуется с наблюдениями крупномасштабной структуры Вселенной.

Раздел 1.2 посвящен нелинейной эволюции неоднородностей плотности. Наиболее результативным методом в этой области являются космологические симуляции с помощью метода многих тел (N-body simulations). При этом вместо решения полной нелинейной системы уравнений для возмущений плотности рассматривается гравитационная динамика большого числа частиц в расширяющейся Вселенной. Результаты симуляций в космологических моделях с холодной невзаимодействующей темной материей и темной энергией достаточно хорошо согласуются с наблюдательными данными на масштабах крупных галактик и выше. Однако, как упоминалось выше, существует ряд расхождений, так или иначе связанных со кластеризацией темной материи на малых масштабах. Наиболее существенными из них являются

недостаток галактик-спутников наблюдаемых в гало Галактики, отсутствие роста плотности темной материи в центре галактических гало и сложности с образованием спиральных галактик.

Во всех случаях расхождения наблюдений структуры Вселенной с предсказаниями моделей с холодной темной материей состоят в том, что холодная темная материя слишком хорошо кластеризуется на малых масштабах. Наивно, это связано с тем, что в отсутствие давления масштаб Джинсовской неустойчивости равен нулю — возмущения плотности темной материи со сколь угодно короткой длиной волны испытывают рост. Ситуация меняется, если в темной материи имеется ненулевое давление, или, что то же самое, частицы темной материи имеют ненулевые скорости. Этот случай соответствует теплой темной материи. Наличие ненулевых скоростей у частиц темной материи приводит к эффективному обрезанию спектра неоднородностей плотности на масштабах длин меньших определенного критического масштаба. Критический масштаб соответствует расстоянию, пролетаемому частицами темной материи за хаббловское время, оцененное во время перехода на пылевидную стадию эволюции Вселенной. Данный эффект аналогичен эффекту затухания Ландау в физике плазмы. Особенности эволюции возмущений плотности теплой темной материи посвящен раздел 1.3. Развитие неоднородностей в теплой темной материи можно исследовать методами линейной теории космологических возмущений. Полученный современный спектр возмущений плотности темной материи позволяет оценить распределение гравитационно связанных объектов по массам используя формализм Пресса–Шехтера. Особенности этого распределения

определяются микроскопическими свойствами темной материи, такими как масса частиц и их скорости. Сравнение спектра масс компактных объектов с наблюдениями распространенности структур различных масштабов во Вселенной дает ограничения на параметры моделей теплой темной материи.

Глава 2 посвящена ограничениям на фазовую плотность и обзору современных наблюдений фазовой плотности в галактических гало. Эти ограничения основаны на особенности эволюции функции распределения частиц темной материи в фазовом пространстве. Они независимы от анализа распределения структур по массам и позволяют поставить ограничения на параметры теплой темной материи, используя наблюдения гало отдельных галактик.

Образование и динамика галактических гало, состоящих из невзаимодействующих частиц темной материи, описывается бесстолкновительным уравнением Больцмана в самосогласованном поле. Обоснование применения данного метода приведено в разделе 2.1. Основным объектом, описывающим состояние галактического гало в статистической механике, является функция распределения частиц гало в фазовом пространстве. Эволюция функции распределения удовлетворяет теореме Лиувилля о сохранении фазовой плотности вдоль динамических траекторий частиц. Начальная фазовая плотность в галактическом гало не меняется с течением времени, что позволяет связать свойства конечного стационарного состояния гало с начальной функцией распределения частиц темной материи.

Функция распределения частиц темной материи до начала нели-

нейной стадии образования компактных объектов весьма регулярна — большинство частиц достаточно однородно распределено в одной компактной области импульсов. В ходе эволюции система занимает новые области фазового пространства, имеющие весьма нерегулярную форму на все более малых масштабах. Во всех практических приложениях интерес представляет величина фазовой плотности, усредненная по областям фазового пространства, включающим большое число частиц (coarse grained). Из-за нерегулярности функции распределения на малых масштабах усреднение по конечным областям приводит к тому, что усредненная функция распределения значительно уменьшается в областях, где фазовая плотность была изначально велика и увеличивается в областях, где изначально было мало частиц. Используя данные наблюдений фазовой плотности в гало галактик можно поставить ограничения на исходную фазовую плотность частиц темной материи, которые подробно рассмотрены в разделе 2.2.

Одним из следствий особенности эволюции усредненной функции распределения является невозрастание её максимума. Этот факт использовался в первом ограничении на фазовую плотность частиц темной материи, предложенном С. Тремейном и Дж. Ганном. Они предположили, что темная материя состоит из массивных нейтрино, отщепившихся от первичной плазмы имея тепловую функцию распределения Ферми–Дирака. Таким образом, наблюдаемая фазовая плотность в галактиках, где основную массу составляет темная материя не должна превышать максимума теплового распределения. Ограничение на начальную фазовую плотность приводит к ограничению на массу частиц темной

материи. В оригинальной работе ограничение на массу нейтрино составило $m_\nu \gtrsim 20$ эВ и позволило исключить массивные активные нейтрино как основную компоненту темной материи.

В разделе 2.3 обсуждаются способы оценки фазовой плотности в компактных объектах на основе имеющихся наблюдательных данных о плотности массы в центральных областях галактических гало и индивидуальные скорости звезд. Для галактик, основную массу которых составляет темная материя, центральная плотность материи фактически представляет плотность темной материи ρ , а распределение скоростей звезд совпадает с распределением скоростей частиц темной материи. Стандартное отклонение скоростей частиц темной материи $\sqrt{\langle v^2 \rangle}$ характеризует ширину распределения частиц по скоростям и, как следствие, размер области, занимаемой системой, в пространстве скоростей. Поэтому для оценки фазовой плотности в гало галактик в астрофизике используется величина $Q = \rho / \langle v^2 \rangle^{3/2}$. Для нерелятивистских частиц импульс связан со скоростью как $p = mv$, и для оценки значений функции распределения, то есть плотности числа частиц в фазовом пространстве координат и импульсов, можно использовать величину Q/m^4 , где m – масса частиц темной материи. Поэтому, нижнее ограничение на первичную фазовую плотность приводит к нижнему ограничению на массу частиц темной материи. При этом, чем более высокая наблюдаемая фазовая плотность используется, тем сильнее получится ограничение.

Объектами, обладающими самой высокой фазовой плотностью, являются *карликовые сферические галактики* (dSph). Они находятся в самых малых гало темной материи из когда-либо наблюдаемых, с масса-

ми $10^6 - 10^8 M_{\odot}$. Раздел 2.3 также содержит обзор современных данных наблюдения галактик типа dSph в гало нашей Галактики и соседней Андромеды. Наблюдаемые максимальные значения фазовой плотности в карликовых галактиках позволили нам поставить ограничение на массу частиц темной материи $m \gtrsim 1$ кэВ, что в 50 раз превышает оригинальное ограничение Тремейна–Ганна.

В Главах 3 и 4 описываются конкретные модели теплой темной материи, к которым нами были впервые систематически применены ограничения на фазовую плотность. **Глава 3** посвящена различным сценариям со стерильными нейтрино в роли частиц темной материи. Стерильными нейтрино называют гипотетические частицы, которые нейтральны по отношению к калибровочным взаимодействиям Стандартной Модели, и смешиваются с обычными нейтрино за счет общего массового члена. В частности, на стерильных нейтрино основан так называемый *механизм качелей* (*see-saw*), позволяющий объяснить малость масс активных нейтрино за счет смешивания со стерильными нейтрино в рамках перенормируемой теории.

В разделе 3.1 содержится краткая мотивация и обзор моделей со стерильными нейтрино в качестве частиц темной материи, а также рассматриваются возможные механизмы производства таких стерильных нейтрино в ранней Вселенной. Так как определяющей характеристикой стерильных нейтрино является их смешивание с активными нейтрино, то естественно предположить, что это взаимодействие ответственно за их генерацию. В этом простейшем случае масса и угол смешивания стерильных нейтрино связаны соотношением, гарантирующим коррект-

ную современную плотность темной материи. Производство стерильных нейтрино за счет смешивания с активными нейтрино может быть достаточно сложным процессом, если имеются нескольких сортов стерильных нейтрино и/или ранняя Вселенная обладала ненулевой лептонной асимметрией. В последнем случае производство нейтрино называется резонансным, и современная концентрация и распределение нейтрино по импульсам существенно зависят от соотношения между массами стерильных нейтрино и величиной лептонной асимметрии. Кроме того, сектор стерильных нейтрино может включать другие тяжелые частицы, которые могли присутствовать в первичной плазме. В таких случаях производство стерильных нейтрино возможно во процессах рассеяния и/или распадах этих частиц.

Применение ограничений на начальную фазовую плотность к стерильным нейтрино в качестве частиц темной материи описано в разделе 3.2. Для стерильных нейтрино, произведенных за счет осцилляций активных нейтрино в отсутствие лептонной асимметрии (так называемое *нерезонансное производство*), форма современного распределения по импульсам может быть приближена тепловым распределением Ферми–Дирака. Если предположить, что стерильные нейтрино составляют всю наблюдаемую темную материю, то ограничение на фазовую плотность приводит к нижнему ограничению на массу нейтрино порядка $m_\nu \gtrsim 5.7$ кэВ.

При наличии в первичной плазме лептонной асимметрии конверсия активных нейтрино в стерильные усилена за счет эффекта Михеева–Смирнова–Вольфенштейна. Для стерильных нейтрино определенной

энергии, производство происходит резонансным образом в узком диапазоне температур. Эффективность этого процесса также сильно зависит от энергии нейтрино, поэтому конечное распределение нейтрино по импульсам имеет существенно нетепловой характер. Оно зависит от параметров нейтринного сектора и лептонной асимметрии. Нами было установлено, что ограничению на фазовую плотность удовлетворяют стерильные нейтрино с массами $m_\nu \gtrsim 3$ кэВ.

В моделях, где сектор стерильных нейтрино содержит другие частицы, возможно производство нейтрино в процессах рассеяния и распада этих частиц в первичной плазме. Стерильные нейтрино в таких сценариях не входят в тепловое равновесие. Если произведенные частицы составляют большую часть наблюдаемой темной материи, то найденное ограничение на фазовую плотность буквально совпадает с ограничением на нерезонансно произведенные нейтрино: $m_\nu \gtrsim 5.7$ кэВ, независимо от свойств рассеивающихся частиц.

В случае стерильных нейтрино, произведенных в процессах распада, ситуация несколько сложнее, и сильно зависит от характеристик распадающихся частиц. Мы рассмотрели два типичных частных случая, соответствующих распадам термализованных релятивистских частиц и распадам холодных тяжелых нерелятивистских частиц вне теплового равновесия. В первом случае применение нами статистического ограничения на фазовую плотность привело к условию для массы нейтрино $m_\nu \gtrsim 1$ кэВ. В случае распадов нерелятивистских частиц вне равновесия мы нашли, что ограничение на массу нейтрино зависит от параметров распадающихся частиц — их массы M и полной ширины распада

Γ : $m_\nu \gtrsim 2.5 \text{ кэВ} \left(\frac{M^2}{M_{\text{Pl}}\Gamma} \right)$. Это ограничение может быть гораздо выше традиционных для теплой темной материи нескольких кэВ в случае тяжелых, практически стабильных, распадающихся частиц.

В разделе 3.3 обсуждаются другие экспериментальные ограничения на стерильные нейтрино как частицы темной материи: наблюдения коротковолновой части спектра флуктуаций плотности с помощью Лайман- α леса (Lyman- α forest), и поиск сигналов распада стерильных нейтрино в рентгеновском излучении гало галактик. Последнее оказывается несовместным с найденным нами ограничением из фазовой плотности, что позволяет исключить нерезонансное производство стерильных нейтрино как механизм генерации темной материи.

В Главе 4 представлено наше исследование модели с легкими гравитино в качестве частиц теплой темной материи. Гравитино присутствует в теориях супергравитации — суперсимметричных теориях, включающих гравитацию. Оно является суперпартнером гравитона и имеет спин $3/2$. В феноменологически приемлемых теориях при низких энергиях суперсимметрия нарушена. В таких теориях гравитино имеют массу, которая появляется за счет механизма, являющегося суперсимметризованным аналогом механизма Хиггса. В итоге, масса гравитино может принимать широкий спектр значений $m_{\tilde{G}} \sim 1 \text{ эВ} - 100 \text{ ТэВ}$, в зависимости от механизма нарушения суперсимметрии. Обзору основных свойств гравитино посвящен раздел 4.1.

В разделе 4.2 рассматривается космология гравитино. В теориях с сохраняющейся R -четностью легчайшая из суперчастиц абсолютно стабильна, и достаточно легкое гравитино может быть таковой. В этом

случае гравитино может рассматриваться как кандидат на роль частицы темной материи. Способ производства гравитино в ранней Вселенной существенно зависит от его массы. Очень легкие гравитино достаточно сильно взаимодействуют с остальными суперчастицами, чтобы самим войти в тепловое равновесие при температурах, которые могли реализовываться во Вселенной. Так, гравитино с массами порядка 1 кэВ термализуются при температурах около 1 ТэВ. Современная плотность термализованных частиц таких масс превышала бы наблюдаемую плотность темной материи, поэтому стоит рассматривать только сценарии, где гравитино не входит в тепловое равновесие. В таких сценариях производство гравитино может происходить за счет двух процессов: рассеяния суперчастиц, термализованных в первичной плазме, и распадов более тяжелых суперпартнеров. Первый процесс наиболее эффективно происходит при высоких температурах, и количество произведенных гравитино определяется наивысшей температурой, достигавшейся в ранней Вселенной — температурой разогрева. Требование, чтобы современная плотность произведенных гравитино не превышала плотность темной материи, приводит к верхнему ограничению на температуру разогрева. Для интересующих нас гравитино с массами порядка десяти кэВ температура разогрева не должна превышать нескольких ТэВ, что является весьма специфической характеристикой сценария с гравитино в роли теплой темной материи. Если гравитино является легчайшей из суперчастиц, то важный дополнительный вклад в современную плотность гравитино вносят распады остальных суперпартнеров. Для тяжелых гравитино характерное время распада может быть до-

статочно велико, чтобы распады происходили после эпохи первичного нуклеосинтеза и повлияли на распространенность первичных легких элементов. В силу успеха стандартной теории первичного нуклеосинтеза такие сценарии сильно ограничены. Для легких гравитино, которые могут составлять теплую темную материю, распады более тяжелых суперпартнеров происходят задолго до эпохи первичного нуклеосинтеза и полностью совместны с наблюдениями распространенности первичных ядер.

Раздел 4.3 посвящен применению ограничений на фазовую плотность к моделям с легкими гравитино в роли частиц темной материи. Этот интересующий нас случай уже достаточно сильно ограничен другими космологическими требованиями. Как обсуждалось ранее в рамках линейной теории космологических возмущений, для того чтобы рост возмущений плотности в темной материи был модифицирован на масштабах карликовых галактик, частицы темной материи должны иметь массы порядка нескольких кэВ. На этот же диапазон масс указывают и ограничения из фазовой плотности для частиц с более-менее регулярным распределением по импульсам. Гравитино таких масс взаимодействуют с остальными суперпартнерами достаточно сильно и, в случае, когда последние находились в тепловом равновесии, активно производились в процессах их рассеяния. Для того, чтобы избежать перепроизводства гравитино в таких моделях, необходимо, чтобы температура разогрева не превышала нескольких ТэВ, и массы суперпартнеров были достаточно низки — сотни ГэВ. Данные современных ускорительных экспериментов сильно ограничивает существование таких легких суперчастиц. В

особенности, это касается частиц, несущих цветной заряд, скварков и глюино. Поэтому мы отдельно рассмотрели суперсимметричные расширения Стандартной модели, в которых массы таких частиц превышают массы остальных суперпартнеров и температуру разогрева. В этих моделях в производстве гравитино участвует существенно меньшее число типов частиц, что позволяет несколько ослабить ограничения на массу суперпартнеров и температуру разогрева. Применение ограничений на фазовую плотность к данным сценариям указывает на то, что гравитино может играть роль частиц теплой темной материи, если их масса удовлетворяет условию $m_{\tilde{G}} \gtrsim 1 - 3 \text{ кэВ}$, в зависимости от параметров модели.

Глава 5 посвящена модели со сверхлегким скалярным полем в роли темной материи. На космологических масштабах скалярное поле ведет себя как нерелятивистская пыль с нулевым давлением и представляет из себя модель холодной темной материи. Однако, на малых масштабах рост возмущений плотности в скалярном поле существенно подавлен по сравнению со случаем пылевидной материи. В частности, если масса скалярного поля m очень мала и составляет величину порядка $10^{-23} \text{ эВ} - 10^{-22} \text{ эВ}$, эти масштабы соответствуют размерам неоднородностей, из которых впоследствии образуются объекты с массами $10^8 M_{\odot} - 10^9 M_{\odot}$. Таким образом, проблемы холодной темной материи на малых масштабах могут быть также решены в случае, если темная материя является сверхлегким скалярным полем. Мы показали, что наличие ненулевого давления у скалярного поля приводит к наблюдаемым последствиям. Если гало нашей Галактики состоит из такой

скалярной темной материи, то давление скалярного поля в гало имеет осциллирующую во времени компоненту. Осцилляции происходят на частоте равной удвоенной массе скалярного поля. Такое осциллирующее давление приводит к малым осцилляциям гравитационного потенциала в гало на уровне 10^{-15} . Для рассматриваемого диапазона масс частота осцилляций составляет десятые доли наногерц, что как раз совпадает с диапазоном чувствительности экспериментов по хронометрированию пульсаров. Хотя хронометрирование пульсаров изначально было предложено как способ регистрации гравитационных волн, эти наблюдения также чувствительны к изменяющемуся во времени гравитационному потенциалу. В разделе 5.2 рассматривается эффект, производимый осцилляциями скалярного поля как темной материи на времена прибытия радиоимпульсов миллисекундных пульсаров. Мы показали, что в диапазоне масс, интересном с точки зрения решения проблем стандартной холодной темной материи, сигнал от темной материи может быть обнаружен с помощью следующего поколения экспериментов по хронометрированию пульсаров.

В Заключении перечислены основные результаты исследований, представленных в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для защиты выдвигаются следующие результаты:

1. Разработано статистическое обобщение ограничения на начальную фазовую плотность частиц темной материи, применимое к произвольной функции распределения. Такое ограничение можно

использовать в случаях, когда начальная функция распределения частиц темной материи не ограничена, и стандартное ограничение Трёмейна–Ганна оказывается неприменимым. В случае функций распределения с быстро спадающей в области максимума полученное ограничение является более сильным, чем оригинальное ограничение на максимум фазовой плотности.

2. Получено ограничение на массу стерильных нейтрино в качестве частиц темной материи в случае их производства методом Доделсона–Уидроу в нерезонансных осцилляциях в первичной плазме. Ограничение $m_\nu \gtrsim 5.7$ кэВ оказывается несовместимым с верхним ограничением на массу стерильных нейтрино в данном сценарии, следующим из поисков сигнала распада стерильных нейтрино в галактических гало в рентгеновском диапазоне. Это позволило исключить подобный механизм производства стерильных нейтрино как основной компоненты темной материи. Численно близкое ограничение было недавно получено с помощью независимого метода — наблюдения множественных линий поглощения Лайман- α в спектре далеких квазаров. Это подтверждает наше исключение нерезонансно произведенных стерильных нейтрино из числа кандидатов на роль частицы темной материи.
3. Применено ограничение Трёмейна–Ганна к доступным в литературе функциям распределения стерильных нейтрино темной материи, произведенных резонансным образом в присутствии в ранней Вселенной лептонной асимметрии. Для легкого стерильного нейтрино в расширении Стандартной Модели ν MSM показано,

что в случае массы стерильного нейтрино равной нескольким кэВ такое стерильное нейтрино может составлять теплую темную материю в широком диапазоне величины лептонной асимметрии.

4. Изучено производство стерильных нейтрино в распадах тяжелых частиц в ранней Вселенной в двух частных случаях: в распадах ультрарелятивистских частиц в тепловом равновесии в первичной плазме и в распадах нерелятивистских частиц, имеющих некоторую остаточную концентрацию вне равновесия. В обоих случаях имеется доступная область параметров, в которых нейтрино имеют правильную современную плотность и удовлетворяют ограничению Тремейна–Ганна. Для распадов частиц в равновесии нейтрино должны удовлетворять условиям:

$$m \gtrsim 1 \text{ кэВ}$$

$$m \frac{M^2}{\Gamma} \simeq 10^{13} \text{ ГэВ}^2.$$

Здесь m — масса нейтрино, M и Γ — масса и ширина распада распадающихся частиц. Стерильные нейтрино массой несколько кэВ в таком сценарии могут играть роль теплой темной материи. В случае распадов нерелятивистских частиц их исходная концентрация может быть подобрана так, чтобы произведенные нейтрино составляли всю темную материю. Ограничение Тремейна–Ганна в этом сценарии имеет вид

$$m \gtrsim \max \left[145 \text{ эВ} \cdot \left(\frac{M^2}{M_{\text{Pl}}^* \Gamma} \right)^{1/2}, \quad 1 \text{ кэВ} \right].$$

В отличие от всех известных моделей стерильные нейтрино, произведенные таким способом, могут быть теплой темной материей имея практически сколь угодно большую массу в случае достаточно тяжелых и медленно распадающихся производящих частиц.

5. Исследовано производство легких гравитино в ранней Вселенной. Показано, что для того, чтобы гравитино могло играть роль теплой темной материи, необходимо чтобы суперчастицы, присутствующие в равновесии в ранней Вселенной были достаточно легкими $M \lesssim 350$ ГэВ и температура разогрева была достаточно низкой $T_R \lesssim 5$ ТэВ. В свете современных данных поиска суперсимметричных частиц на Большом Адронном Коллайдере сценарий с гравитино в роли теплой темной материи возможен только при специальном выборе спектра масс суперчастиц и подстройке температуры разогрева в согласии с ним. В частности, предложен сценарий, когда массы скварков первых двух поколений и глюино больше температуры разогрева и они эффективно отсутствуют в первичной плазме. Для этого сценария вычислена современная концентрация гравитино, произведенных в процессах рассеяния суперчастиц.
6. С применением разработанного статистического обобщения получены ограничения Трёмейна–Ганна для гравитино в роли частиц теплой темной материи. Показано, что при условии, что удается получить правильную современную концентрацию гравитино,

гравитино может быть теплой темной материей в диапазоне масс

$$1.5 \text{ кэВ} \lesssim m_{\tilde{G}} \lesssim 20 \text{ кэВ}.$$

7. В сценарии со скалярным полем в роли тёмной материи обнаружен осциллирующий вклад в гравитационный потенциал галактических гало. Найдена величина индуцируемой задержки во времени прибытия импульсов от близлежащих миллисекундных пульсаров. Показано, что в области параметров, интересной с точки зрения модификации свойств компактных объектов на субгалактических масштабах, сигнал от скалярной тёмной материи может быть обнаружен в следующем поколении экспериментов по хронометрированию пульсаров.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Gorbunov D., Khmelnitsky A., Rubakov V. Constraining sterile neutrino dark matter by phase-space density observations // JCAP. 2008. Vol. 0810. P. 041.
2. Gorbunov D., Khmelnitsky A., Rubakov V. Is gravitino still a warm dark matter candidate? // JHEP. 2008. Vol. 0812. P. 055.
3. Khmelnitsky A., Rubakov V. Pulsar timing signal from ultralight scalar dark matter // ArXiv e-prints. 2013. — September. arXiv:1309.5888