

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА РАН

СТЕНОГРАММА
ЗАСЕДАНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА
Д002.023.01

25 мая 2022 года

Защита диссертации
Ткачева Максима Вячеславовича
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.03.02 “Астрофизика и звездная астрономия”
“Моделирование наблюдательных проявлений темной материи”

Присутствовали члены диссертационного совета:

Ковалев Ю.Ю., д.ф.-м.н., член-корр. РАН, 01.03.02, физ.-мат. науки, заместитель председателя диссертационного совета

Шахворостова Н.Н., к.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки, ученый секретарь диссертационного совета

Богачев С.А., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки

Дагкесаманский Р.Д., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки

Дорошкевич А.Г., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки (*присутствует в удаленном режиме*)

Иванов П.Б., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки

Каленский С.В., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки

Ларионов М.Г., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки (*присутствует в удаленном режиме*)

Лихачев С.Ф., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки

Лукаш В.Н., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки

Малофеев В.М., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки (*присутствует в удаленном режиме*)

Попов М.В., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки (*присутствует в удаленном режиме*)

Троицкий С.В., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки

Тюльбашев С.А., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки (*присутствует в удаленном режиме*)

Чашей И.В., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки (*присутствует в удаленном режиме*)

Щекинов Ю.А., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки

Председатель заседания – доктор физико-математических наук, заместитель председателя диссертационного совета Ю.Ю. Ковалев (письменное поручение председателя диссертационного совета – в приложении №1 к стенограмме).

Секретарь заседания – кандидат физико-математических наук, ученый секретарь диссертационного совета Н.Н. Шахворостова.

Заседание проводится с участием членов диссертационного совета и оппонентов в удаленном интерактивном режиме. Распорядительный акт директора ФИАН Колачевского Н.Н. о проведении заседания диссертационного совета с участниками в удаленном интерактивном режиме находится в приложении №2 к стенограмме.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Начинаем. У нас есть кворум. Первое заседание у нас сегодня -- защита диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук Ткачевым Максимом Вячеславовичем. Я прошу ученого секретаря стартовать.

СЕКРЕТАРЬ: Здравствуйте! Я уточню что заседание проводится в удалённом режиме. Часть членов диссовета присутствует по Zoom – 6 человек присутствует онлайн, 10 человек лично, всего 16 человек. Кворум есть. В деле присутствуют все документы: диплом о высшем образовании, заявление, справка о сдаче кандидатского минимума, положительное заключение организации, все в порядке, все документы соответствуют требованиям ВАК.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Название диссертации “Моделирование наблюдательных проявлений тёмной материи”. Специальность 01.03.02, физико-математические науки, кандидатская. Диссертация выполнена в Физическом институте имени Лебедева, ведущая организация ГАИШ МГУ, оппоненты Антон Николаевич Баушев, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Объединенного института ядерных исследований, Дубна. Антон Николаевич присутствует здесь по zoom. Константин Михайлович Белоцкий, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник МИФИ. Константин Николаевич присутствует здесь в зале. Все документы оглашены, я торжественно передаю слово соискателю для доклада по диссертации. Прошу Вас.

(Начинается демонстрация презентации на экране в зале заседаний и на экране в zoom для участников в удаленном режиме).

ДОКЛАД СОИСКАТЕЛЯ

СОИСКАТЕЛЬ: *(Выступает с докладом. В докладе демонстрирует и комментирует слайды 1-30, номера которых даны в начале соответствующих строк ниже. Слайды к докладу приведены в Приложении №3 к стенограмме и приложены к аттестационному делу в бумажной и электронной форме).*

Слайд 1

Спасибо! Название диссертации уже произносили. Я сразу перейду к введению.

Слайд 2.

Диссертация посвящена тёмной материи. Мы знаем, что тёмная материя – это такая субстанция, которая напрямую не наблюдается. Но при этом существует достаточно много косвенных проявлений тёмной материи — это всем известные кривые вращения галактик, гравитационное линзирование сильное, реликтовое излучение, излучение грав.волн. Излучение грав.волн в прямом смысле не является свидетельством темной материи. Однако, если предположить, что хотя бы некоторые из событий, которые наблюдала гравитационная обсерватория LIGO – это первичные чёрные дыры, то тогда можно предположить, что излучение гравитационных волн тоже является косвенным свидетельством тёмной материи. В диссертации три главы. В первой главе обсуждается проблема каспов в тёмной материи, во второй главе строится модель инфракрасного фона с учётом крупномасштабной структуры Вселенной и с учетом сильного гравитационного линзирования. В третьей главе обсуждается тёмная материя, состоящая из первичных чёрных дыр.

Слайд 3.

Переходим к целям. Цели я зачитаю.

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

Слайд 4.

Я перехожу к первой главе. Это “Моделирование гало тёмной материи: проверка энтропийного подхода к проблеме каспов”.

Слайд 5.

Всем известно, что численные модели на сегодня являются одним из основных инструментов исследования гало темной материи. Однако, с численными моделями не всё так гладко: существуют свои проблемы. Одна из широко известных проблем -- это проблема каспов. Справа показаны профили плотности для наблюдаемых карликовых галактик из обзора Things. Пунктирной линией показана аппроксимация НФУ, которая является одной из самых широко используемых аппроксимаций профилей плотности численных моделей. На рисунке видно несоответствие между наблюдениями и симуляциями.

Слайд 6.

В 1966 году Линден-Беллом для бесстолкновительных неравновесных систем был предложен энтропийный подход. Он показал, что грубая фазовая плотность f не возрастает для замкнутых изолированных систем. По физическому смыслу фазовую плотность можно представить просто как число частиц в единице фазового объёма. В измеряемых величинах она оценивается как плотность, деленная на дисперсию скоростей частиц в кубе. Соответственно, с энтропией она связана просто в степени $-2/3$. Далее этот подход был много кем развит, в том числе нашими коллегами. В 2012 году в УФН вышла статья Дорошкевича, Лукаша и Михеевой, где обсуждался энтропийный подход в контексте проблемы каспов. Рассматривалась полная энтропия как совокупность всех неравновесных процессов, протекающих в гало за время его формирования. Также можно представить энтропию как фоновую и приобретённую. Фоновая энтропия характеризуется мелкомасштабными начальным неоднородностями в распределении материи. А приобретённая характеризуется бесстолкновительной иерархической релаксацией материи на нелинейной стадии формирования гало. То, что мы хотели проверить в контексте этого подхода, -- было сделано одно из основных утверждений, что симуляции высокого разрешения способны вносить добавочную фоновую энтропию и таким образом решить проблему каспов. Мы это утверждение хотели проверить, как оно хотя бы для симуляции выполняется.

Слайд 7.

Для этого мы взяли два численных расчёта образования гало из похожих

начальных условий. Начальные условия имеют одинаковую фазу возмущений плотности и скорости на масштабе порядка размера гало, а на меньших масштабах фазы разные, и это видно на рисунке. На рисунке это самая крайняя правая часть спектра, голубым показана. Если мы таким образом задаём начальные условия, это нам гарантирует то, что эволюция двух гало будет идти примерно одинаково, по крайней мере крупные структуры будут друг на друга похожи. И в таком случае разница между двумя симуляциями будет целиком определяться фоновой энтропией. И это дает нам возможность ее посчитать.

Слайд 8.

Соответственно, для каждого гало был построен профиль функции энтропии для сферы радиуса R ограниченных полной массы M . Для пар гало из разных симуляций профили энтропии вычитались друг из друга. Для каждого значения массы была посчитана дисперсия разницы функции энтропии по ансамблю всех используемых гало. Предполагая, что фоновая энтропия распределена по Гауссу около некоторой средней величины, мы можем легко посчитать фоновую энтропию. На рисунке показана серыми крестами фоновая энтропия, оцененная нашим методом в зависимости от массы, сосредоточенной внутри радиуса R . Чёрными точками показана очень похожая симуляция, но просто большего масштаба. А красной линией показана теоретическая оценка фоновой энтропии из работы УФН 12-го года. Видно, что не сходится.

Слайд 9.

Мы пытались понять, почему получается такое несоответствие. Мы взяли группу частиц, из которых на $z=0$ образуется касп, и посмотрели как она себя ведёт на больших Z . Мы посчитали энтропию, она оказалась очень маленькой, и мы хотели оценить, как она выглядит пространственно. На картинке изображено число частиц в сферических бинах в зависимости от радиуса. Оранжевым показано для идеальной сферы, где частицы распределены равномерно. Синим показана группа частиц, из которых потом на $z=0$ образовался касп. Видно, что эта группа частиц очень далека от сферической, и на самом деле похожа скорее на амёбу. Из этого мы делаем вывод, что такое различие с теорией у нас получается из-за предположения о сферичности гало в теоретической модели.

Слайд 10.

Я перехожу к заключению. Зачитаю выводы по граве 1.

1. Значение фоновой энтропии, полученное из численного счета на основе данной модели отличается от него почти на порядок от теоретической оценки фоновой энтропии, как для симуляции на Lomonosov-2, так и для симуляции CLUES.
2. Касп в гало возникает из областей начального распределения материи, имеющих энтропию на порядок ниже, чем в среднем по Вселенной (внутри с массой каспа).
3. Поэтому предположение о том, что симуляции высокого разрешения способны вносить добавочную фоновую энтропию и, таким образом, решить проблему каспов, скорее всего не соответствует действительности.
4. Мы предполагаем, что такое расхождение связано в первую очередь с предположением о сферичности гало в теоретической модели.

Слайд 11.

Перехожу ко второй главе “Модель инфракрасного фона неба созданного далекими галактиками”.

Слайд 12.

Фон неба, как известно, содержит много компонентов. В первую очередь галактическую и не-галактическую компоненты. Эти компоненты можно увидеть на среднем рисунке. Нам в первую очередь интересен инфракрасный фон неба, он показан на третьем рисунке (миссия COBE). Модели фона неба нужны в первую очередь для предсказания возможностей будущих телескопов (таких как “Миллиметр”). А также в этом контексте очень интересна проблема путаницы. Она проиллюстрирована на картинке справа вверху. Это карта наблюдений миссии Herschel. Путаница в общем смысле – это невозможность отличить на ярком фоне далеких галактик интересующие нас источники. Такие модели, конечно, много кто пытался делать до нас. Однако современные модели не учитывают крупномасштабных неоднородностей в распределении материи во Вселенной. Наша учитывает.

Слайд 13.

Для того чтобы сделать такую модель, мы представили каталог гало в виде заполненного конуса (COSMOSIM, учет нелинейной крупномасштабной структуры Вселенной). Присвоили каждому гало светимости с учетом сильного грав. линзирования. Потом рассчитали потоки от каждой галактики для заданной длины волны (спектрального окна). Получили карты неба с помощью интерполяции, а затем свернули полученные карты с диаграммой направленности

телескопа.

Слайд 14.

Гравитационное линзирование считается с учётом модели сферической линзы и точечной линзы. В работу вошла только модель точечной линзы. Берётся произвольный источник и смотрится его окружение (по угловому расстоянию). Если в это окружение попадает другой источник, то мы смотрим, находится ли он ближе или дальше, и определяем может ли он являться линзой для данного источника. И затем считаем усиление.

Слайд 15.

Затем мы считаем светимости галактик с учётом линзирования, используя одно из наиболее часто применяемых соотношений массы и светимости для галактик. На самом деле оценка упрощённая — у реальных галактик светимость зависит не только от массы. Нам много кто об этом говорил. На картинке показан подсчет числа источников в модели с учетом эффектов гравитационного линзирования (сплошные линии), без учета гравитационного линзирования (пунктирная линия) и в широко известной модели Betermin (A&A, 2011) (штриховая линия) на 70, 250, 500 и 1200 мкм. Видно, что модель сходится, если учитывать сильное гравитационное линзирование.

Слайд 16.

Далее обсуждается практическое применение модели. На рисунке изображен пример участка карты модельного фона неба размером 100 на 100 угловых секунд на длине волны 300 мкм. Слева крестами показаны пики интенсивности, найденные с помощью вторых производных (самые массивные галактики). Справа точками показаны модельные галактики. Размер точки пропорционален логарифму потока от галактики. Самые массивные галактики можно выделить таким образом.

Слайд 17.

Заключение по второй главе. Построена модель ИК-фона далеких галактик, учитывающая крупномасштабную структуру Вселенной и усиление потоков за счет гравитационного линзирования на галактиках и скоплениях галактик. Модель воспроизводит измеренный двумерный спектр мощности карт ИК фона, измеренный космической обсерваторией Herschel. Данная модель может быть

использована для определения предела путаницы для будущих космических телескопов дальнего ИК диапазона 10-метрового класса, а также для сравнения кластеризации пиков интенсивности фона с реальной крупномасштабной структурой.

Слайд 18.

Перехожу к третьей главе “Первичные чёрные дыры в ранней Вселенной: симуляции тёмной материи”.

Слайд 19.

Как известно, в 2015 году LIGO впервые пронаблюдали гравитационные волны, которые получились в результате слияния чёрных дыр. С тех пор было много исследований на эту тему, и одно из предположений было, что LIGO обнаружил при слиянии первичные чёрные дыры, которые являются отличным кандидатом в тёмную материю. Эта идея развивалась с 90-х годов, а когда LIGO обнаружили чёрную дыру с массой 85 солнечных масс, то они и сами про это заговорили.

Слайд 20.

Также необходимо сказать про ограничение на присутствие первичных черных дыр в темной материи. Обсуждения начались активно с 2017 года и до сих пор продолжаются. Консенсус такой, что в диапазоне масс LIGO (т.е. звездные массы) ограничения очень слабые, т.е. до десятков процентов, а то и все 100% темной материи могут состоять из ПЧД.

Слайд 21.

Про ПЧД в качестве темной материи многие говорили и многие оценивали аналитически частоту слияний, при условии, что сливаются первичные чёрные дыры. Но до нас никто не пытался сделать это численно. Мы используем модификацию космологического кода GADGET-2 с учётом радиационно-доминированной стадии – то есть те красные смещения, на которых должны образовываться первичные чёрные дыры. А также у нас есть модификация которая позволяет учитывать первичные чёрные дыры как фракцию тёмной материи. Всего 6 симуляций с разными фракциями, включая фракцию 1, когда вся тёмная материя представлена ПЧД.

Слайд 22.

Мы заметили, что у нас число пар первичных чёрных дыр имеет вот такое

интересное распределение от красного смещения, и что после какого-то красного смещения число пар начинает резко падать. Связанные с этим процессы тоже начинают затухать. Возник вопрос не вызван ли этот спад какими-то численными эффектами.

Слайд 23.

Мы посвятили довольно большое количество времени учёту численных эффектов, таких как зависимость точности от шага по времени. На рисунке показано как изменяется большая полуось отдельной пары в зависимости от количества оборотов – разными цветами показаны разные шаги по времени. А также мы оценили как точность зависит от длины сглаживания. Конечно, чем меньше длина сглаживания и шаги по времени, тем точность выше, но тем дольше время счета. Мы старались прийти к компромиссу, и мы к нему пришли.

Слайд 24.

Далее мы пришли к выводу, что это затухание связано с вириализацией материи. Мы оценили число вириализованных структур при помощи кода ANF и обнаружили, что ПЧД для фракций 0.1 и 1 начинают образовывать гало, начиная с $z \sim 3000$, и начиная с $z \sim 10$ большая часть ПЧД уже находится в вириализованных структурах, в которых и разрушаются пары. На картинке красным показана вероятность у пары разрушиться, когда она находится внутри гало из ПЧД, а оранжевым – вероятность распасться вне гало. Первая почти в 2 раза больше второй.

Слайд 25.

Далее переходим к результатам. Разными цветами показаны число гравитационно связанных пар для разных фракций в зависимости от красного смещения. Видно, что для меньших фракций такое затухание уже практически несущественно. Тут получается интересный косвенный результат, что число формирующихся пар линейно зависит от фракции ПЧД в темной материи.

Слайд 26.

Далее переходим к частоте слияния пар ПЧД в зависимости от фракции. Статистика лучше всего для фракции 0.0001, потому что там больше всего частиц, но частота слишком маленькая. Наилучшее схождение с результатами LIGO (100 событий в год на кубический гигапарсек) наблюдается для фракции 0.001, что

соответствует оценкам других исследователей, в том числе LIGO.

Слайд 27.

Перехожу к заключению по третьей главе. Формирование крупномасштабной структуры (гало) сильно влияет на поведение пар ПЧД. Учет гиперболических пролетов не очень влияет на результат (0.77% от всех слияний). Для фракции 0.001 частота слияний примерно соответствует 100 событий в год на кубический Гпк на красном смещении $z=3$, что соответствует оценкам других исследователей. Требуется разработка более детальных численных моделей, например, обычная темная материя в качестве N-body частиц.

Слайд 28.

Основные положения, выносимые на защиту. Я зачитаю.

1. Путем проведения численных экспериментов образования гало темной материи показано, что касп в гало возникает из областей начального распределения материи, имеющих энтропию на порядок ниже, чем в среднем по Вселенной для случайно выбранной сферы с массой каспа.

2. Построена модель ИК-фона далеких галактик, учитывающая крупномасштабную структуру Вселенной и усиление потоков за счет гравитационного линзирования на галактиках и скоплениях галактик. Модель воспроизводит двумерный спектр мощности карт ИК-фона, измеренный космической обсерваторией Herschel.

3. С использованием серии космологических численных моделей N-тел, которые включали как частицы обычной темной материи, так и переменную долю частиц темной материи, состоящей из первичных черных дыр, в диапазоне от 0.0001 до 1.0 получены оценки темпов формирования, разрушения и слияния пар ПЧД. Показано, что эти оценки хорошо согласуются с ограничениями на содержание ПЧД, полученными другими исследовательскими группами на основе данных LIGO, и соответствуют скорости слияния приблизительно $100 \text{ Гпк}^{-3} \cdot \text{год}^{-1}$ для доли ПЧД 0.001.

4. Обнаружено, что стабильность пар ПЧД, являясь основным фактором, определяющим скорость слияния пар, в значительной степени зависит от процессов образования гало темной материи и кластеризации. Показано, что в гравитационно-связанных объектах пары ПЧД разрушаются быстрее, чем происходит их слияние. Количество гравитационно-связанных образований из ПЧД сильно зависит от доли ПЧД в составе темной материи. У меня все.

(Демонстрируется слайд со списком публикаций и апробацией работы).

ВОПРОСЫ ПОСЛЕ ДОКЛАДА СОИСКАТЕЛЯ

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Дорогие коллеги, Максим Вячеславович закончил доклад, приступаем к вопросам. Коллеги из Zoom: если у вас есть вопросы, можете нажать кнопку поднятия руки, можете поднять руку вживую, можете просто включить микрофон и говорить. Пока активности не вижу, поэтому перейдем к вопросам из зала. Прошу вас.

ЛУКАШ В.Н. По первой главе. По сути это ничем не отличается от того, что было в статье Уайта. Там тоже получались каспы. Вы, по сути, подтверждаете то, что он говорил. Вопрос: у вас лучше разрешение? Когда он это сказал, к нему было много вопросов. Вы учитывали?

СОИСКАТЕЛЬ. Да, конечно, в этом и была суть.

ЛУКАШ В.Н. То есть вы подтвердили вывод Уайта и проблема, по сути, остается, да?

СОИСКАТЕЛЬ. Да, проблема остается, все так.

ЛУКАШ В.Н. Спасибо, понятно.

ИВАНОВ П.Б. У меня скорее комментарий. Максим сказал в конце, что необходим учет темной материи. На самом деле у него уже принята статья в Phys.Rev. Там авторы Максим, я и Сергей (*руководитель Ткачева М.А.*). Мы это дело уже учли.

СОИСКАТЕЛЬ: Я про это скажу потом в ответах на вопросы.

ЛУКАШ В.Н. А что это меняет?

ИВАНОВ П.Б. Это меняет то, что фракции там меньше, чем должны быть.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Спасибо за комментарии, дорогие коллеги! Еще вопросы, прошу.

ТРОИЦКИЙ С.В. У меня вопрос по поводу главы 2. Я просто по другим совершенно делам. Построение модели фонового излучения в этом диапазоне очень важно для совершенно иных задач, связанных с распространением высокоэнергичного излучения во Вселенной. Это ТэВная астрономия, поиск аксионо-подобных частиц. В связи с этим вопрос к Вашим симуляциям: эта структура пятен, это размытие -- это результат линзирования, или вы заложили еще какую-то ошибку прибора?

СОИСКАТЕЛЬ. Нет, размытие – это просто результат сложения потоков.

ТРОИЦКИЙ С.В. А, то есть так получается просто? Там нет размытия Гершеля? Это настоящий фон так выглядит?

СОИСКАТЕЛЬ. Модельный фон, да.

ТРОИЦКИЙ С.В. Т.е. без учета погрешности прибора. Это очень интересно! Это мы еще тогда обсудим. Спасибо!

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Спасибо коллеги! Не вижу вопросов или комментариев из Zoom или из зала, тогда я спрошу. Не могли бы вы по 3-ей главе рассказать поподробнее как формируются и образуются пары ПЧД?

СОИСКАТЕЛЬ. (*Демонстрирует слайд*). Происходит отделение частиц от хаббловского потока, и дальше они просто друг на друга падают. Падают почти по радиальным траекториям, с очень большим эксцентриситетом, т.к. начальные скорости практически нулевые, особенно в случае малых фракций. То есть им ничего не мешает друг на друга падать. Далее, мы считаем, что если при проходе перицентра пара излучает больше энергии в виде грав.волн, чем полная энергия самой пары, то мы считаем, что такая пара слилась.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Но это вы говорите про слияние. А что нужно для того, чтобы сформировалась пара какие условия нужны?

СОИСКАТЕЛЬ. Ну.. У нас есть хаббловское расширение. ПЧД убегают друг от друга с хаббловскими скоростями. Затем со временем эти скорости начинают уменьшаться. И в какой-то момент образуются гравитационно-связанные пары.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. То есть вы утверждаете, что это абсолютно случайный процесс?

СОИСКАТЕЛЬ. Ну, конечно он чисто случайный. Какие-то частицы окажутся ближе друг к другу, какие-то дальше.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Это я и хотел услышать. Так получилось, что сегодня утром я участвовал в защите дипломной работы в МГУ, и там как раз этот вопрос обсуждался. У них для того, чтобы слилась пара первичных черных дыр, нужен обязательно какой-то третий объект. Вы считаете, что третий объект не нужен?

СОИСКАТЕЛЬ. Нет, конечно! Он наоборот только помешает скорее.

ИВАНОВ П.Б. Условие формирования пары это просто расстояние меньше среднего. Третий объект нужен только для того, чтобы оценить угловой момент пары.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Спасибо, коллеги! Пожалуйста, есть ли еще вопросы или комментарии? Не вижу рук. Тогда двигаемся дальше. Большое спасибо, Максим Вячеславович, за ответы на вопросы. Далее, отзыв научного руководителя. Прошу Вас. Сергей Владимирович Пилипенко, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФИАН.

ВЫСТУПЛЕНИЕ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

ПИЛИПЕНКО С.В. Я хочу отметить несколько моментов. Во-первых, Максим Вячеславович, придя к нам в Астрокосмический центр, сразу заинтересовался темой, которая в нашей стране развита довольно мало, но очень популярна за рубежом. Это численное моделирование в космологии. Я это желание активно поддерживал, результатом чего и стала работа над диссертацией. В ходе этой работы мы с ним прошли весь цикл каких-то подзадач, которые нужны для выполнения научных исследований с помощью численных моделей. Это было и

получение времени на суперкомпьютерах, подготовка начальных условий, запуск симуляций, сопровождение их на суперкомпьютере, и последующая обработка данных и написание статей. Поэтому я считаю, что Максим успешно прошел этот путь и стал хорошим специалистом по численному моделированию в космологии. А его работа заслуживает поддержки и присвоения ему степени кандидата физико-математических наук.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Спасибо, Сергей Владимирович! А сейчас мы передаем слово ученому секретарю. Сейчас нам зачитают заключение организации ФИАН, где выполнена работа и отзыв ведущей организации и других поступивших отзывов, если такие имеются.

СЕКРЕТАРЬ: *Зачитывает заключение организации, где выполнена работа – Физического института имени Лебедева РАН. Отзыв положительный, прилагается.*

СЕКРЕТАРЬ. *Зачитывает отзыв ведущей организации – Государственного института имени Штернберга Московского государственного университета. Отзыв положительный, прилагается.*

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Спасибо, Надежда Николаевна. Есть ли у нас дополнительные отзывы на диссертацию или автореферат?

СЕКРЕТАРЬ. Нет, дополнительных отзывов не поступило.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Принято, спасибо. Максим Вячеславович, Вы предпочитаете ответить на все замечания разом или по каждому пункту, после выступления каждого оппонента?

СОИСКАТЕЛЬ. Давайте сразу на все вместе замечания.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Хорошо. Тогда двигаемся дальше, первый оппонент Антон Николаевич Баушев. Ведущий научный сотрудник Объединенного института ядерных исследований, Дубна. Антон Николаевич, здравствуйте.

ВЫСТУПЛЕНИЕ ПЕРВОГО ОППОНЕНТА

БАУШЕВ А.Н. (Официальный оппонент. Присутствует на заседании в удаленном режиме). Здравствуйте! Я зачитаю свой отзыв в несколько сокращенном варианте. (Зачитывает отзыв. Отзыв положительный, прилагается.)

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Большое спасибо, Антон Николаевич. Мы услышали Ваш отзыв. У нас есть предпочтение соискателя, чтобы на замечания отвечать сразу. Мы движемся к оппоненту Константину Михайловичу Белоцкому, кандидату физико-математических наук, Москва, МИФИ. Константин Михайлович присутствует здесь в зале.

ВЫСТУПЛЕНИЕ ВТОРОГО ОППОНЕНТА

БЕЛОЦКИЙ К.М. (Официальный оппонент. Присутствует на заседании лично. Выступает с отзывом. Отзыв положительный, прилагается).

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Большое спасибо, Константин Михайлович. Переходим к ответам на замечания.

ОТВЕТЫ НА ЗАМЕЧАНИЯ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ И ОППОНЕНТОВ

(Демонстрируются слайды 31-33 с ответами на замечания).

СОИСКАТЕЛЬ: Я начну с самого популярного вопроса – по первой главе. Про применимость термодинамического подхода к бесстолкновительным системам – само-собой, он не применяется. Но можно применить аналог, и этим занялся Линден-Белл в 1966. Он доказал, что фазовая плотность не возрастает для замкнутой изолированной системы и провел, таким образом, аналогию с энтропией. У Антона Николаевича было замечание, что на линейной стадии наш аналог энтропии уменьшается на линейной стадии расширения Вселенной. Это не так, потому что дисперсия скорости меняется пропорционально масштабному фактору, а плотность обратно пропорционально кубу м.ф. То есть энтропия растет, причем быстро. Есть еще картинка в нижнем левом углу. На ней цветами изображены разные массовые оболочки от $2e8$ до $2e10$ солнечных масс, 10 бинов по массе. Показана зависимость энтропии от красного смещения для разных

массовых оболочек. Для центральных оболочек на больших z энтропия практически не меняется, а на малых z начинает расти. Она не убывает совершенно точно. Также выполняется Теорема Пригожина. В стационарном состоянии производство энтропии внутри неравновесной термодинамической системы при неизменных внешних параметрах является минимальным и постоянным. На рисунке видно, что на больших z производство энтропии вообще практически нулевое. На малых z – с периферии долетают мини-гало, которые и привносят большую часть массы в касп.

Следующий слайд. Еще одно свойство – сформировавшееся стационарное гало соответствует максимуму энтропии. См. рисунок — посчитана энтропия для центрального самого массивного гало, а так же для окружения этого гало в радиусе 5 радиусов гало. Из рисунка видно, что энтропия самого массивного гало всюду выше, чем энтропия окружения. Про аксионы и вимпы – виноваты, погорячились. С Антоном Николаевичем не будем спорить, согласен. Аналогия была только в том, что и те, и другие являются кандидатами в холодную темную материю. Про физический механизм образования пар уже было сказано. Подробно это обсуждалось во многих работах, например, в работе Sasaki, это аналитика.

Про отзыв Константина Михайловича – про мотивацию применения энтропийного подхода. Мотивация применения «энтропийного» подхода к описанию формирования гало скрытой массы. Утверждалось, что симуляции высокого разрешения способны вносить добавочную фоновую энтропию и, таким образом, решить проблему каспов (см. статью Дорошкевич, Лукаш, Михеева; УФН 2012). Мы хотели проверить это утверждение. У нас была симуляция относительно высокого разрешения, и при этом мы все равно столкнулись с трудностями. Про то, что не учитываются какие-либо динамические эффекты скрытой массы в образовании, разрушении и слиянии ПЧД: смотрите нашу свежую работу: arXiv 2205.10792.

Про отзыв вед. организации...

Я, разумеется, отвечаю не на все подряд, а только на основные моменты.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. А про остальные моменты что?

СОИСКАТЕЛЬ. Ну, про остальные говорим, что да, извините, виноваты.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Ага, вы просто пока не произнесли эту фразу, поэтому хочется понять вы их игнорируете или с ними согласны?

СОИСКАТЕЛЬ. Согласен, конечно. То, что я не упоминаю, это по умолчанию считается как “согласен, будем стараться лучше”.

Да, ну и про отзыв ведущей организации. Вопрос про расчет фоновой энтропии. Расчеты фоновой энтропии (серым), имеют значительно больший разброс по сравнению с расчетами для модели Местной группы (черным). На самом деле это ошибки кросс-идентификации гало малых масс, а модель *MareNostrum* имеет гораздо более высокое разрешение. Прежде чем выполнить нашу аналитику, нам нужно удостовериться, что гало из разных симуляций соответствуют друг другу. Малые гало соответствуют не очень хорошо.

Вопрос про размеры основания конуса: на самом деле это не конус, а пирамида с квадратным основанием. А так все отлично сходится.

Вопрос про спектр анизотропии фона (имеется в виду третья панель на нижнем рисунке). Согласие между моделью и наблюдениями для больших длин волн: может быть много причин: например, слишком малый размер куба (т.е. плохая статистика, нужен ~ 1 ГПк), или возможны ошибки в наблюдениях.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Вы закончили, Максим Вячеславович? Итак, отзывы на замечания оппонентов и ведущей организации прозвучали, переходим к дискуссии. Все желающие могут высказываться.

ОБЩАЯ ДИСКУССИЯ

БАУШЕВ А.Н. (*первый оппонент*) Я хотел бы ответить на ответ соискателя. Я действительно ошибся в отзыве. Действительно на линейной стадии энтропия растет, но соискателя это не спасает, потому что на линейной стадии эволюция возмущений обратима, и потому энтропия не должна меняться. Главное, что вы обнаружили, что это максимум окружения. Но дело в другом. Имеется в виду, что у вас есть гало и по мере его коллапса энтропия его растет, и ваша растет. Но если бы мы рассматривали настоящую энтропию, то момент равновесия замкнутой системы -- это максимум энтропии. Ваша энтропия тоже растет по мере формирования гало, а потом она прекращает рост, а это явно не максимум. Если вы включите взаимодействия между частицами, будет образовываться очень плотное ядро в центре, а часть частиц будет сбрасываться. Вы будете наблюдать, что энтропия прекращает расти по необъяснимым причинам. А собственно нам и интересна форма стационарного гало, которое образует темная материя, а она определяется моментом, когда релаксация прекращается. А с точки зрения этой

псевдоэнтропии это не максимум. А так в принципе я удовлетворен ответом.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Так, спасибо, дальше комментарии. Ага, Константин Михайлович включается.

БЕЛОЦКИЙ К.М. Я хотел сказать про другое. Когда мы говорим о проблеме перепроизводства слияний ПЧД. Когда мы достигаем большой плотности ПЧД, рост частоты слияний начинает уменьшаться. Проблема каспов параллельна этой проблеме. ЧД – пример взаимодействующей скрытой массы, которая в свою очередь является одним из возможных решений проблемы каспов. Просто хотел провести вот такую параллель.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Константин Михайлович, спасибо! Вот тут Андрей Георгиевич включается.

ДОРОШКЕВИЧ А.Г. Меня немного удивила эта длинная дискуссия про энтропию. Вопрос того не стоит. Со времен Линден-Белла опубликованы десятки работ о природе “этой” энтропии. Есть понятие фазовой плотности, которое отвечает на все вопросы. На самом деле решается вопрос о происхождении частиц каспа. Заранее ответ на этот вопрос совсем не очевиден. Диссертант на этот вопрос ответил. Количественного ответа на этот вопрос пока нельзя дать. Тут еще остается много вопросов.

ИВАНОВ П.Б. У меня комментарий на комментарий Андрея Георгиевича. Линден-Белл не рассматривал в своей работе 1968 года вырожденный ферми-газ, а абсолютно классическую систему. Свойства ферми газа в простейшем, подчеркиваю, случае появлялись в его статистике в силу теоремы Лиувилля. Все.

ДОРОШКЕВИЧ А.Г. У него была функция распределения в виде прямоугольника, это и есть вырожденный ферми-газ.

ИВАНОВ П.Б. Там ферми статистика получается не из принципа запрета Паули, а совершенно из других соображений. Просто из теоремы Лиувилля.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Спасибо. Мне казалось, что Сергей Троицкий хотел дать комментарий.

ТРОИЦКИЙ С.В. Да, на самом деле я уже все сказал. Результаты 2-ой главы могут быть применены гораздо шире в разностороннем круге задач на стыке наук, и это, мне кажется, очень интересно.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Спасибо, Сергей Вадимович! Есть ли еще желание выступить?

ЛУКАШ В.Н. Очень горячая тема, не зря обсуждение переходит в семинар. Особенно численный счет. *(Предлагает поддержать работу)*.

БАУШЕВ А.Н. *(Тожe соглашается с “горячестью” темы и предлагает поддержать)*.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. *(Говорит про живость темы и интересное прохождение защиты, тожe рекомендует голосовать ЗА. Завершает общую дискуссию)*.

СОИСКАТЕЛЬ. Выступает с заключительным словом, в котором благодарит всех присутствующих.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Я передаю слово ученому секретарю Надежде Николаевне, которая нам расскажет про детали тайного электронного голосования.

СЕКРЕТАРЬ. Спасибо. Мы не первый раз по этой системе голосуем. У нас тайное голосование с помощью электронной системы Криптовече. Всем членам совета, присутствующим на заседании, уже высланы на их адреса электронной почты индивидуальные ссылки для голосования. Поэтому во время перерыва, который будет объявлен на голосование, все либо воспользуются своими устройствами (ноутбуки, компьютеры, смартфоны), либо можно воспользоваться ноутбуком, который у нас в зале заседаний специально для этой цели стоит. Все могут проголосовать через свои личные кабинеты в системе Криптовече. Я еще раз напомню, что у нас на повестке голосование за присуждение степени кандидата физико-математических наук Ткачеву Максиму Вячеславовичу. Нужно выбрать одну опцию ЗА или ПРОТИВ. В случае если вы выбираете обе опции, или не выбираете ни одной, то такой бюллетень будет учтен как недействительный. Вы имеете право испортить бюллетень. Такая возможность в системе существует.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Коллеги, объявляется перерыв для проведения тайного голосования по присуждению степени кандидата физико-математических наук Ткачеву М.В. Мы возвращаемся через 15 минут в 14:15. Перерыв.

Перерыв на голосование. Все члены диссовета голосуют со своих устройств с помощью системы для электронного тайного голосования “КриптоВече”.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Дорогие коллеги, все 16 членов совета, которые участвуют в заседании, вернулись. Я объявляю завершение перерыва и продолжение нашего заседания по защите диссертации Ткачева М.В. Результаты вы видите на экране (*На экране демонстрируются результаты голосования с помощью системы Криповече*). У нас присутствовало на защите 16 членов диссовета. Все 16 проголосовали, ЗА – 16, ПРОТИВ – 0, недействительных бюллетеней – 0. Прошу вас поднятием руки вверх утвердить результаты голосования. (*Все голосуют поднятием руки*). Принято единогласно.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Теперь мы переходим к заключению диссертационного совета. Заключение было вам разослано по электронной почте. Мы собрали замечания от нашего совета, эти замечания учтены. Если есть еще предложения, комментарии?

СЕКРЕТАРЬ. Я могу добавить, что все комментарии от коллег были учтены в тексте, который сейчас у вас есть.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Да, спасибо. Я прошу снова проголосовать поднятием руки за утверждение данного текста заключения нашего диссертационного совета. Спасибо. Кто против? Нет. Кто воздержался? Нет. Единогласно. Заключение диссовета утверждено. Теперь мы с полным правом поздравляем Максима Вячеславовича с успешной защитой. (*Аплодисменты*). Этим мы закрываем заседание по защите диссертации Ткачева М.В.

Председатель заседания, заместитель
председателя диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Ю.Ю. Ковалев

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

Н.Н. Шахворостова

25 мая 2022 года.