

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. П.Н. ЛЕБЕДЕВА РАН
АСТРОКОСМИЧЕСКИЙ ЦЕНТР

На правах рукописи

Пилипенко Сергей Владимирович

**ЭВОЛЮЦИЯ КРУПНОМАСШТАБНОЙ СТРУКТУРЫ И
ГАЛО ТЕМНОЙ МАТЕРИИ ВО ВСЕЛЕННОЙ**

01.03.02 — Астрофизика и звездная астрономия

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2011

Работа выполнена в Астрокосмическом центре Учреждения Российской академии наук Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН.

Научный руководитель

доктор физ.-мат. наук Дорошкевич Андрей Георгиевич, АКЦ ФИАН

Официальные оппоненты

доктор физ.-мат. наук, проф. Бисноватый-Коган Геннадий Семенович, ИКИ РАН

кандидат физ.-мат. наук Макаров Дмитрий Игоревич, САО РАН

Ведущая организация

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ (ГАИШ)

Защита состоится «26» сентября 2011 года в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д002.023.01 Учреждении Российской академии наук Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН) в конференц-зале Института Космических Исследований РАН (ИКИ РАН) по адресу: г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, ИКИ РАН, подъезд 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53.

Отзывы направлять по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, ФИАН (АКЦ), диссертационный совет Д002.023.01.

Автореферат разослан «25» августа 2011 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

Ю.А. Ковалев

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Считается, что Вселенная приближенно однородна на масштабах в сотни Мпк, а все неоднородности развились из первичных флуктуаций, возникших на очень ранней стадии эволюции Вселенной, возможно, в эпоху инфляции [1]. Возмущения на масштабах звезд — малых по космологическим меркам — эволюционировали довольно сложным путем с участием большого количества физических и химических процессов (связанных с барионной составляющей вещества), поэтому проследить по конечным объектам свойства начальных возмущений крайне трудно и на современном этапе развития науки представляется невозможным.

Флуктуации больших масштабов, порядка 10-100 Мпк (размеры элементов крупномасштабной структуры (КМС), наблюдаемой в пространственном распределении галактик), после эпохи рекомбинации развивались практически только под действием гравитации (при малости скорости звука по сравнению со скоростью света любая материя может считаться пылевидной). Движение тел под действием одной только гравитации происходит детерминистически, поэтому в крупномасштабном распределении вещества должен остаться отпечаток начальных флуктуаций. Эти флуктуации случайные, считается что их распределение гауссово, и поэтому флуктуации удобно описывать в терминах спектра мощности.

В последние годы достигнуты значительные успехи в определении средних параметров Вселенной (плотности темной и барионной материи, постоянной Хаббла, величины Λ -члена), а также спектра начальных флуктуаций [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]. Таким образом, космологическая модель считается хорошо установленной и принято говорить о стандартной космологической модели (СКМ) Λ CDM.

Однако некоторые важные подробности эволюции Вселенной остаются непонятыми. Перечислим основные из них:

- Неизвестно, какие источники вызвали вторичную ионизацию Вселенной при красном смещении порядка 10.
- Неясно, как образовались и какими характеристиками обладали первые звезды, состоящие из первичной материи, не обогащенной металлами.
- Отсутствует приемлемая теория, объясняющая образование сверхмассивных черных дыр с массой более $10^9 M_{\odot}$ за первый миллиард лет жизни Вселенной [24].

- Отсутствует объяснение некоторых свойств “леса Ly- α ” — частоты линий поглощения нейтрального водорода в спектрах далеких квазаров [22, 23].
- Не объяснена причина исчезновения ярких квазаров в современную эпоху.
- Отсутствует общепринятая количественная теория, объясняющая наблюдаемое разнообразие морфологических типов галактик: спиральные, эллиптические, карликовые и т.д.

Перечисленные вопросы составляют основные задачи современной космологии. Кроме этих вопросов имеется также ряд несоответствий между предсказаниями теории и результатами наблюдений, которые могут являться следствиями отклонений реальной Вселенной от СКМ, либо отражением недостаточного понимания процессов образования объектов во Вселенной, либо неправильной интерпретации наблюдений. Перечислим эти проблемы:

- Проблема “каспов” — наблюдаемые радиальные профили плотности в центрах некоторых галактических гало темной материи не соответствуют тем, что получаются в численных моделях, основанных на СКМ. Плотность в центрах наблюдаемых галактических гало оказывается существенно ниже, чем предсказываемая численными моделями [10, 11, 12, 13, 14]. Эта проблема, однако, связана со специфическим классом галактик с низкой поверхностной яркостью, у которых, как считается, темное гало преобладает по массе над барионным веществом даже в центре галактики.
- Профили плотности гало скоплений галактик также, возможно, отличаются от предсказаний моделирования, но в другую сторону: плотность в центрах скоплений слишком высокая [15, 16, 17, 18].
- Количество наблюдаемых в пустотах карликовых галактик мало по сравнению с предсказаниями СКМ по данным нескольких исследований [19, 20, 21].
- Проблема “крупномасштабных потоков” — однонаправленного движения галактик в масштабах сотен Мпк, что не согласуется с предсказаниями СКМ [25, 26, 27].
- Проблема уменьшения размеров эллиптических галактик с возрастом (downsizing) [28, 29, 30], которое трудно объяснить в рамках стандартной парадигмы иерархического сгущивания.

Однако, стоит отметить, что не все группы исследователей подтверждают указанные несоответствия.

Данная диссертация посвящена исследованию эволюции крупномасштабной структуры Вселенной на большом отрезке времени. Рассматриваются четыре задачи, в ходе решения которых свойства наблюдаемой в очень больших масштабах структуры в распределении квазаров сравниваются с предсказаниями теории, анализируются свойства облаков темной материи, связанных с лесом L_u - α , исследуется проблема каспов и предлагается новый метод изучения крупномасштабной структуры по собственным движениям галактик.

Цель работы

1. Выяснить, насколько значимо элементы крупномасштабной структуры (стенки, филаменты, пустоты) проявляются в распределении квазаров в каталогах SDSS и 2dF. Определить параметры крупномасштабной структуры: расстояние между стенками, амплитуду флуктуаций, размерность пространственного распределения, зависимость этих свойств от красного смещения.
2. Изучить, используя существующие численные модели, маломассивные (не многосвязные) и не очень плотные элементы крупномасштабной структуры (облака), состоящие из темной материи. Проверить, насколько хорошо приближенная теория Зельдовича описывает эволюцию этих облаков. Изучить влияние параметров численных моделей и параметров выборки на свойства облаков.
3. Разработать методику для детального изучения внутреннего строения гало темной материи (ТМ), получаемых в численных моделях. Данная методика предназначена для изучения разброса параметров, характеризующих гало, в зависимости от их массы, истории образования и крупномасштабного окружения. Провести анализ численной модели с помощью данной методики.
4. Продемонстрировать возможность восстановления трехмерных пекулярных скоростей галактик из результатов измерения собственных движений галактик по небесной сфере. Оценить точность такого восстановления.

Научная новизна

1. Впервые по распределению квазаров в пространстве найдено расстояние между элементами КМС — стенками. Найдено 18 новых больших групп квазаров и определены их параметры.

2. Впервые проведено исследование облаков ТМ, выделенных методом минимального покрывающего дерева из данных численного моделирования: определены их средние характеристики и их функции распределения.
3. Разработана оригинальная методика анализа внутреннего строения гало ТМ. Основной акцент сделан на детальном статистическом изучении профиля гало в крупной представительной выборке гало. Предложен оригинальный метод поиска изолированных гало и галактик.
4. Впервые предложен метод восстановления трехмерных peculiar скоростей галактик по их собственным движениям.

Достоверность научных результатов

Достоверность характеристик КМС, найденных по распределению квазаров, подтверждает использование однородных и полных каталогов SDSS и 2dF и апробированного метода минимального покрывающего дерева. Результаты измерения корреляционной функции квазаров близки к полученным другими авторами с использованием других методов. В исследуемой области неба ранее было известно две большие группы квазаров и их удалось найти используемым методом.

Достоверность результатов исследования КМС в численных моделях обеспечивается использованием нескольких численных моделей и хорошим согласием эволюции основных характеристик облаков с предсказаниями теории.

Достоверность результатов изучения внутреннего строения гало ТМ подтверждается соответствием с результатами других авторов.

Достоверность проверки возможности восстановления трехмерных peculiar скоростей по двумерной проекции обеспечивается использованием проверенной ранее другими методами численной модели.

Научная и практическая ценность работы

Измеренные характеристики КМС по пространственному распределению квазаров согласуются с выводами, полученными из теории Зельдовича в рамках космологической стандартной модели Λ CDM. Это косвенно подтверждает справедливость современных теоретических представлений об эволюции крупномасштабной структуры при красных смещениях $z < 2-3$. Найденные большие группы квазаров представляют интерес для изучения формирования сверхскоплений и для исследования влияния неоднородности УФ фона Вселенной на эволюцию галактик и других объектов. В частности, особенно интересно было бы изучить свойства галактик и межгалактической среды в больших группах квазаров.

Результаты изучения КМС в численных моделях важны для построения модели леса Лу- α . Такая модель позволит измерить космологический спектр мощности на малых масштабах (до 10 кпк), изучить состояние межгалактической среды при красных смещениях $z \sim 2 - 4$. Кроме того, полученные результаты важны для понимания процессов образования различных объектов КМС и для понимания ограничений космологических численных моделей.

Предложенная методика исследования внутренней структуры гало ТМ в численных моделях позволит продвинуться в изучении одной из важнейших проблем космологии — проблемы каспов (несоответствия профилей плотности наблюдаемых и модельных гало). Необходимо применить данную методику к новым численным моделям высокого разрешения.

Результаты исследования возможности восстановления трехмерных пекулярных скоростей галактик по собственным движениям могут использоваться для подготовки нового космологического эксперимента. Получаемое в таком эксперименте поле пекулярных скоростей галактик очень информативно: оно содержит данные о распределении массы, о начальных флуктуациях, позволяет восстановить историю космических тел и предвидеть их будущее.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Подтверждена крупномасштабная структура в распределении квазаров в каталогах SDSS и 2dF. Найдено 20 больших групп квазаров в каталоге 2dF (из них 18 — впервые), состоящих из 6-19 квазаров с размерами 60-200 Мпк. Показано, что параметры структуры соответствуют предсказаниям теории.
2. Установлено, что параметры облаков ТМ, образующихся в космологических численных моделях N-тел, соответствуют предсказаниям теории Зельдовича: их эволюция происходит автомодельным образом, распределение размеров облаков имеет экспоненциальный вид, момент импульса, скорости и доля массы облаков эволюционируют по предсказанным теорией законам.
3. Разработана новая методика обработки данных численных моделей, предназначенная для изучения внутреннего строения гало, и новый метод поиска изолированных гало и галактик в структуре Вселенной.
4. Предложен новый алгоритм для восстановления трехмерного поля скоростей по измерениям собственных движений галактик на небесной сфере. С помощью численного моделирования показано, что точность восстановления пекулярных скоростей не хуже 10%.

Публикации по теме диссертации и личный вклад автора

Основные результаты диссертации получены в 2007-2011 годах и изложены в 8 печатных работах (включая 7 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК). В скобках указан личный вклад диссертанта.

1. Пилипенко С.В. О пространственном распределении квазаров // Астрономич. Журн., 84, с. 910-919, 2007. (проведение исследования наблюдательных каталогов, анализ результатов, подготовка статьи к публикации)
2. Комберг Б.В., Пилипенко С.В. Возможное решение парадокса Арпа-Бербиджа // Астрон. Журн., **85**, 579-588, 2008. (участие в проведении исследований)
3. Pilipenko S.V., Demianski M., Doroshkevich A.G., Gottloeber S. Simulated evolution of the dark-matter large-scale structure // *Il Nuovo Cimento*, Vol. 122 B, N 12, p. 1459-1462, 2008. (участие в проведении исследований, анализ результатов и подготовка статьи к публикации)
Demianski M., Doroshkevich A.G., Pilipenko S., Gottlöber S. Simulated evolution of the dark matter large-scale structure // *MNRAS* (в печати), *tmp.807D*, 2011, arXiv astro-ph/1102.2951. (участие в проведении исследований и анализ результатов)
4. Пилипенко С.В., Дорошкевич А.Г., Готтлөбер С. Эволюция гало темной материи в численных моделях // Астрон. Журн., 86, 1050-1061, 2009. (участие в постановке задачи, проведении исследований, анализ результатов и подготовка статьи к публикации)
5. Пилипенко С.В., Дорошкевич А.Г. Эволюция гало темной материи в численных моделях // *Кратк. сообщ. по физике*, т. 37, N9, с. 19-23, 2010. (участие в постановке задачи, проведении исследований, анализ результатов и подготовка статьи к публикации)
6. Pilipenko S.V., Doroshkevich A.G. Isolated galaxies in simulations and observations, *ASPC*, 421, 278, 2010. (участие в постановке задачи, проведении исследований, анализ результатов и подготовка статьи к публикации)
7. Лукаш В.Н., Пилипенко С.В. Абсолютная шкала космологических расстояний и поле пекулярных скоростей по собственным движениям галактик // Астрон. Журн., 88, N7, с. 611-616, 2011. (участие в постановке задачи, проведении исследований, анализ результатов и подготовка статьи к публикации)

8. Дорошкевич А.Г., Пилипенко С.В. Возможные наблюдения периода вторичной ионизации // Астрон. Журн., 88, N7, с. 617-627, 2011. (участие в проведении исследований)

Апробация работы

Представленные результаты докладывались на 11 российских и 4 международных конференциях:

1. С.В. Пилипенко, А.Г. Дорошкевич, Ш. Готтлөбер Эволюция внутренней структуры гало из темной материи // 24-я конференции “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, 24-26 апреля 2007, Пущино.
2. Pilipenko S.V., Demianski M., Doroshkevich A.G., Gottloeber S. Simulated evolution of DM LSS // A Century of Cosmology, 27-31 августа 2007, Италия, Венеция.
3. Пилипенко С.В., Дорошкевич А.Г., Лукаш В.Н. О распределении квазаров в пространстве // 50-я научная конференция МФТИ, 23-27 ноября 2007, Москва, Долгопрудный.
4. Пилипенко С.В., Дорошкевич А.Г., Готтлөбер Ш. Обнаружение автомодельности в эволюции структур во Вселенной по результатам наблюдений и численного моделирования // Учебно-научная конференция -конкурс УНК 2007 года по физике, 3-4 декабря 2007, Москва.
5. С.В. Пилипенко, А.Г. Дорошкевич, Ш. Готтлөбер Эволюция внутренней структуры гало из темной материи // 25-я конференция “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, 22-24 апреля 2008, Пущино.
6. V.V. Komberg, S.V. Pilipenko. Possible explanation of the Arp-Burbidge paradox // "Problems of Practical Cosmology 23-27 июня 2008, Санкт-Петербург, Россия
7. Пилипенко С.В., Дорошкевич А.Г., Эволюция гало темной материи // XII Школа молодых ученых “Актуальные проблемы физики”, 23-27 ноября 2008, Москва.
8. С.В. Пилипенко, А.Г. Дорошкевич Изолированные галактики в наблюдениях и моделировании // “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, 21-23 апреля 2009, Пущино.
9. Pilipenko S.V., Doroshkevich A.G., Isolated galaxies in observations and simulations // “Galaxies in isolation”, 12-15 мая 2009, Испания, Гранада.

10. Пилипенко С.В., Дорошкевич А.Г. Изолированные галактики в наблюдениях и моделировании // II Российская школа по гравитации и космологии и международный семинар по современным проблемам теории гравитации и космологии, 24-29 августа 2009г, Казань-Яльчик.
11. Пилипенко С.В., Дорошкевич А.Г., Эволюция гало темной материи в численных моделях // 3 Всероссийская молодежная школа-семинар с международным участием “Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики”, 25-30 октября 2009, Москва.
12. Pilipenko S.V., Doroshkevich A.G., Isolated galaxies in observations and simulations // “International Intradisciplinary conference on the frontiers of Astronomy ICFA-2009”, 28-30 декабря 2009, Индия, Мадикери.
13. Pilipenko S.V., Lukash V.N. Peculiar velocity field and cosmological scales from proper motions of galaxies // Science with Millimetron Workshop, 14-18 июня 2010, Италия, Палермо.
14. Pilipenko S.V., Doroshkevich A.G. Internal structure of dark matter halos // Petrov 2010 Anniversary Symposium On General Relativity and Gravitation, 1-6 ноября 2010, Россия, Казань.
15. С.В. Пилипенко, В.Н. Лукаш Космография местной Вселенной по собственным движениям галактик // “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, 19-21 апреля 2011, Пущино.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 145 страниц печатного текста, из них 3 страницы — содержание, 18 страниц — введение и заключение, 7 страниц — 2 приложения, 12 страниц — список литературы, включающий 217 наименований. Диссертация содержит 19 рисунков и 8 таблиц.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации сформулированы цели и задачи работы, обоснована актуальность работы, новизна и достоверность результатов, приведены положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** выполнено исследование крупномасштабной структуры в каталогах квазаров 2dF и SDSS.

После введения (параграф 1.1) и описания используемых каталогов и методики обработки данных (параграф 1.2), в параграфе 1.3 количественно

описаны проявления крупномасштабной структуры в двух каталогах квазаров. Структура анализировалась по трехмерному распределению квазаров методом минимального покрывающего дерева. Эти проявления состоят в том, что в наблюдательных каталогах имеется существенно больше пар квазаров с размерами несколько десятков Мпк, чем в искусственных случайных каталогах. Кроме того, в более глубоком каталоге 2dF обнаружено 20 больших групп квазаров с размерами 60-200 Мпк и включающих в себя 6-19 квазаров. Такие группы представляют собой одни из самых больших крупномасштабных образований во Вселенной. Ранее было известно 17 таких групп, из них 2 попадают в область обзора 2dF и эти две группы были подтверждены, таким образом 18 групп найдено впервые и общее число известных групп достигает 35.

В то же время данным методом не обнаружено существенных отклонений в двумерном распределении квазаров на небесной сфере от случайного.

В параграфе 1.4 показано, что средние параметры, характеризующие найденную структуру, весьма слабо меняются со временем. Сравнение с теоретическими предсказаниями (параграф 1.5) показало, что свойства обнаруженной крупномасштабной структуры не противоречат ожидаемым для стандартной космологической модели Λ CDM.

В **главе 2** крупномасштабная структура изучается в распределении темной материи в численных моделях решения задачи N-тел. Результаты сравниваются с предсказаниями аналитической теории и известными наблюдательными данными о лесе $L\gamma$ - α .

Постановка задачи описана во вступительном параграфе 2.1. Исследовались элементы крупномасштабной структуры (облака темной материи) с массами $10^{12} - 10^{14} M_{\odot}$ и размерами несколько Мпк, их плотность немного выше средней и существенно ниже плотности гало. В параграфе 2.2 описаны три используемые численные модели, анализ двух из них выполнен автором. Основные характеристики облаков приведены в параграфе 2.4. Наблюдается автомодельная эволюция структуры: такие характеристики как средние размеры облаков, дисперсия скорости частиц внутри них, угловой момент, средняя масса слабо меняются со временем, в то время как их функции распределения (относительно средних значений) стабильны (см. рисунок 1).

Большое внимание уделяется исследованию зависимости результатов от параметров численного моделирования и метода анализа. В параграфе 2.3 проведено количественное сравнение доли массы, вошедшей в КМС и скоростей облаков как целого в численных моделях с предсказаниями теории, что позволило заключить о достоверности используемых численных моделей и методов. Основные результаты, представленные в параграфе 2.4, получены с помощью метода минимального покрывающего дерева. В параграфе 2.5 применяется другой метод — одномерный анализ. Оба ме-

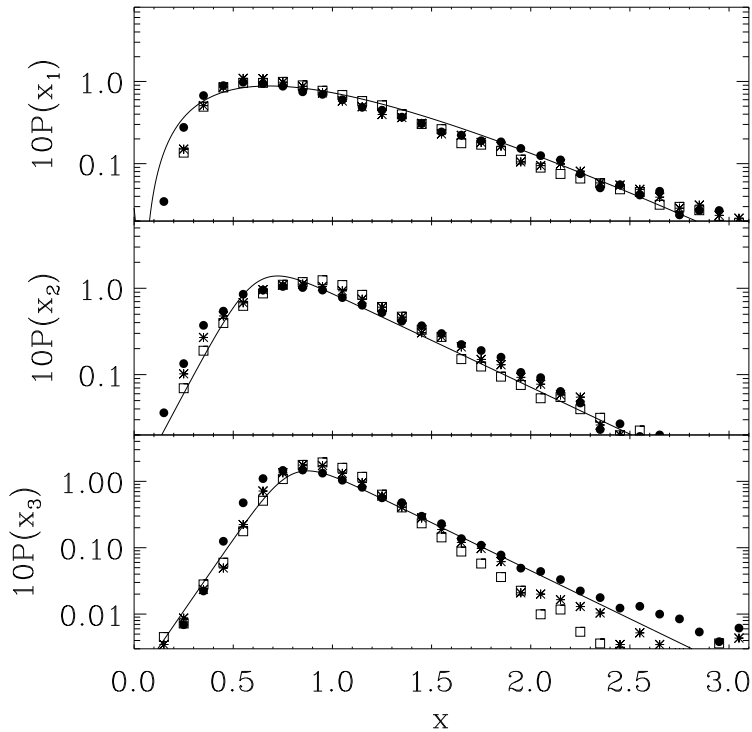


Рис. 1: Функции распределения приведенной дисперсии скорости, $c_{1,2,3}$, для облаков темной материи из численной модели вдоль наибольшей, средней и наименьшей осей тензора инерции (вверху, по центру и внизу) для красных смещений $z = 1, 2 \& 3$ (точки, звездочки, квадраты). Здесь $x_k = c_k / \langle c_k \rangle$, $k = 1, 2, 3$.

тогда в применении к различным численным моделям дают качественно схожие результаты. В то же время сравнение этих результатов позволило сформировать требования на параметры численной модели для проведения подобных исследований в будущем, например, для другого диапазона масс облаков.

Наблюдаемая автомодельность предсказана теорией и является следствием того, что спектр начальных возмущений имеет вид, близкий к степенному. Также соответствует ожидаемому виду функций распределения для массы облака, размеров, дисперсии скоростей частиц внутри облака и для скорости движения облака как целого. Полученные результаты также напоминают известные свойства леса Ly- α из работы [22]: для него тоже наблюдается автомодельная эволюция характеристик отдельных линий, форма функции распределения температуры линий похожа на функцию распределения дисперсии скорости, представленную в параграфе 2.4.

В параграфе 2.6 оценена возможность наблюдения теплового излучения от отдельного облака ионизованного газа (приведена оценка потока излучения).

В главе 3 исследуются более плотные образования из темной материи — гало. Основной задачей являлось решение проблемы каспов профилей плотности гало. Предложенная оригинальная методика анализа численных моделей кратко описана во вступительном параграфе 3.1. Данная методика основывается на статистическом анализе формы профиля плотности гало разных масс, с различным окружением и историей образования. Такой подход необходим, т.к. основные известные результаты о профиле гало были получены для небольшого числа наиболее массивных гало, находящихся в плотном окружении, в то время как наблюдаемые галактики с гало без каспа имеют малые массы и расположены в пустотах [10]. Для отработки методики использовалась численная модель среднего разрешения. Разрешения этой модели достаточно для воспроизведения свойств хорошо изученных массивных гало ($M > 10^{12} M_{\odot}$), но не достаточно для исследования наиболее интересных маломассивных гало с массами $M \sim 10^{8-10} M_{\odot}$.

В параграфе 3.2 описан способ сравнения профилей плотности разных гало и требования на выборку гало. Проведен анализ выборки из около 1000 гало, выделенных из численной модели. Результаты исследования продемонстрировали существенный разброс формы профиля в центральной части гало, однако из около 1000 исследованных гало не оказалось ни одного без каспа (см. рисунок 2).

В параграфе 3.3 автором предложен способ изучения окружения гало с помощью метода минимального покрывающего дерева. Показано, что изолированные гало и группы гало, находящиеся от ближайших соседей на расстоянии 4-5 Мпк содержатся в областях с существенно пониженной крупномасштабной плотностью. Этот способ можно применять как

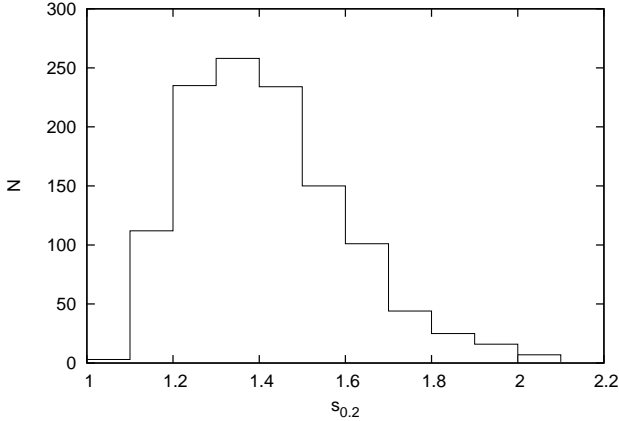


Рис. 2: Гистограмма разброса показателя наклона профиля $s_{0.2}$ в численной модели. Для стандартного профиля NFW ожидается $s_{0.2} = 1.3$, для профиля без каспа $s_{0.2} \sim 0.4$.

к каталогам гало, полученным в численных моделях, так и к каталогам наблюдаемых галактик. Важность анализа окружения связана с тем, что гало без каспа наблюдаются у галактик с низкой поверхностной яркостью, обладающих бедным окружением [10].

В параграфе 3.4 обсуждается связь результатов проведенного анализа а также известных из литературы особенностей эволюции гало с наблюдаемой картиной эволюции галактик, обсуждаются различные возможные пути решения проблемы каспов, в том числе проведены оценки для модели с распадающейся темной материей. Предлагаются новые задачи для численного моделирования.

В главе 4 предложен новый космологический тест для изучения крупномасштабной структуры в Местной Вселенной. Тест состоит в измерении собственных движений галактик по небесной сфере и последующей реконструкции их пекулярных скоростей. В данном подходе нет необходимости точно измерять расстояния до галактик для извлечения пекулярной скорости, достаточно оценки расстояния по красному смещению. Однако требуется измерение собственных движений галактик с точностью до долей микросекунды дуги в год, что может стать возможным в ближайшем будущем.

После вводного параграфа 4.1 в параграфе 4.2 описан предлагаемый алгоритм восстановления трехмерных пекулярных скоростей галактик. Данный алгоритм основан на потенциальности поля пекулярных скоростей галактик в значительной части объема Вселенной, в этом он сходен с ал-

горитмом POTENT [32], использующим радиальные пекулярные скорости для восстановления трансверсальных скоростей.

В параграфе 4.3 проведена проверка предложенного алгоритма на численной модели гало. Проверка показала, что точность восстановления скоростей составляет около 10% от дисперсии пекулярных скоростей, для проведения подобного теста требуется выборка из нескольких сотен галактик с измеренными собственными движениями.

В заключении представлены основные результаты и выводы диссертации:

1. Крупномасштабная структура наблюдается в каталогах квазаров 2dF и SDSS в виде превышения числа кластеров квазаров над ожидаемым для случайного распределения объектов в пространстве. Кроме того, найдено 20 больших групп квазаров, представляющих собой очень крупные неоднородности с размером до 200 Мпк. Параметры крупномасштабной структуры согласуются с предсказаниями теории для стандартной космологической модели.
2. Проведен анализ облаков темной материи в численных моделях решения задачи N-тел. Обнаружена автомодельность в их эволюции и хорошее качественное согласие их характеристик с предсказаниями теории Зельдовича образования слабо нелинейных объектов. Составлены методические требования для проведения подобных исследований (например, в другом диапазоне масс).
3. Разработана и опробована методика изучения внутреннего строения гало темной материи, получаемых в численных моделях. Данная методика предназначена для решения проблемы каспов и для сравнения эволюции гало и галактик. Предложен ряд задач для дальнейшего исследования с применением этой методики.
4. Разработан алгоритм восстановления трехмерных пекулярных скоростей галактик из результатов измерения их собственных движений. Подобные измерения могут быть выполнены в будущем. Полученное поле пекулярных скоростей можно использовать для исследования распределения массы в Местной Вселенной, изучения эволюции отдельных элементов крупномасштабной структуры и т.п. Работоспособность предложенного алгоритма проверена на примере численной модели.

Список литературы

- [1] В.Н. Лукаш, Е.В. Михеева, Физическая космология (М.: ФИЗМАТ-ЛИТ, 2010)

- [2] M. Tegmark, D. Eisenstein, M. Strauss, et al., arXiv:astro-ph/0608632 (2006)
- [3] W.J. Percival, W. Sutherland, J.A. Peacock, et al., MNRAS, **337**, 1068 (2002)
- [4] W.J. Percival, S. Cole, D.J. Eisenstein et al., MNRAS, 381, 1053 (2007)
- [5] Y.-S. Song, C.G. Sabiu, I. Kayo and R.C. Nichol, e-Print arXiv:1006.4630 [astro-ph] (2010)
- [6] A. Abate, P. Erdogdu, Monthly Not. Roy. Astron. Soc, **400**, 1541 (astro-ph/0905.2967) (2009)
- [7] A. Vikhlinin, A.V. Kravtsov, R.A. Burenin, et al., Astrophys. J., **692**, 1060 (2009)
- [8] L. Samushia, B. Rata, Astrophys. J., **703**, 1904 (2009)
- [9] А.М. Малиновский, В.Н. Лукаш, Е.В. Михеева, Астрон. журн., **85**, 675 (2008)
- [10] W.J.G. de Blok, Advances in Astronomy, 2010, 1 (2010)
- [11] P. Salucci, A. Burkert, Astrophys. J., 537, L9 (2000)
- [12] Burkert A., 1995, ApJ, 447, L25
- [13] С.В. Пилипенко, А.Г. Дорошкевич, С. Готтлэбер, Астрон. Журн., 86, 1050 (2009)
- [14] А.Г. Дорошкевич, В.Н. Лукаш, Е.В. Михеева, УФН (2011)
- [15] T. Broadhurst, R. Barkana, MNRAS, **390**, 1647 (2008)
- [16] M. Oguri, J.F. Hennawi, M.D. Gladders, et al., Astrophys. J., **699**, 1038 (2009)
- [17] A. Zitrin, T. Broadhurst, R. Barkana, et al., MNRAS, **410**, 1939 (2011)
- [18] J. Richard, G. P. Smith, J.-P. Kneib, et al., MNRAS, **404**, 325 (2010)
- [19] P. J. E. Peebles, Astrophys. J., **557**, 495 (2001)
- [20] A. V. Tikhonov, A. Klypin, MNRAS, **395**, 1915 (2009)
- [21] A. Klypin, S. Trujillo-Gomez, J. Primack, arXiv astro-ph/1002.3660
- [22] M. Demianski, A.G. Doroshkevich, V.I. Turchaniniv, MNRAS, **371**, 915 (2006)

- [23] T.S. Kim, S. Cristiani, S. DÓdorico, *Astron. and Astroph.*, **383**, 747
- [24] V. Bromm, N. Yoshida, arXiv astro-ph:1102.4638 (2011)
- [25] R. Watkins, H.A. Feldman and M.J. Hudson, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **392**, 743 (2009)
- [26] A. Kashlinsky, et al., *Astrophys. J.L.*, **712**, L81 (2010)
- [27] Y.-S. Song, C.G. Sabiu, I. Kayo and R.C. Nichol, e-Print arXiv:1006.4630 [astro-ph] (2010)
- [28] L. L. Cowie, A. Songaila, E. M. Hu, & J. G. Cohen, *Astron. J.*, **112**, 839
- [29] A. Cimatti, E. Daddi, A. Renzini, *Astron. & Astroph.*, **453**, L29 (2006)
- [30] M. Banerji, I. Ferraras, F.B. Abdalla et al., *MNRAS*, **402**, 2264 (2010)
- [31] C. Lopez-Sanjuan, M. Balcells, P.G. Perez-Gonzalez, et al., *Astrophys. J.*, **710**, 1170 (2010)
- [32] E. Bertchinger, A. Dekel, *Astrophys. J.*, **336**, 5 (1989)