

Первая глава посвящена разработке методики определения расстояний до близких галактик по светимости звёзд вершины ветви красных гигантов (TRGB). Соискателем был развит подход, основанный на описании наблюдаемой функции светимости звёзд методом максимального правдоподобия. Было продемонстрировано, что возможно получать достаточно надёжные оценки расстояния даже в случае слабой населённости ветви красных гигантов (RGB) и вблизи фотометрического предела наблюдений. Была проведена калибровка светимости вершины RGB от цвета и получен нуль-пункт шкалы расстояния метода TRGB. Новая калибровка светимости ярчайших звёзд RGB была получена через привязку к светимости звёзд горизонтальной ветви. Оказалось, что шкалы расстояний Цфеид и нашего метода находятся в отличном согласии: $\mu(\text{Ceph}) - \mu(\text{TRGB}) = -0.01 \pm 0.03 \text{ mag}$. Улучшение метода TRGB позволило повысить точность и надёжность измерений расстояний. Внутренняя точность метода равна 0.02 mag. Проведено уточнение расстояний для 30 галактик в рассеянной концентрации галактик в созвездии Гончих Псов. Применение новой методики позволило выделить зону хаотических движений вокруг центра системы, галактики M94. Масса-светимость для этой группы галактик $M/L = (120-159) (M/L)_{\text{sun}}$, что существенно превышает типичное отношение $M/L \sim 30$ для близких групп галактик.

В Главе 2 описана структура баз данных оценок расстояний до галактик. Базы данных были созданы в рамках исследования структуры и кинематики близкой Вселенной. Реферативный каталог внегалактических расстояний был интегрирован в базу данных HyperLEDA и является её составной частью. Все оценки расстояний приводятся в единую шкалу, основанную на аккуратной выборке измерений высокого качества. В базе данных внегалактических расстояний (EDD) воедино собраны разнообразные коллекции данных, связанные с задачей определения расстояний до галактик. Её составной частью является каталог диаграмм цвет-величина (CMD) и оценок TRGB-расстояний галактик Местного Объёма. Он содержит информацию о звёздном населении и оценках расстояния до галактик, наблюдавшихся на космическом телескопе, и имеющих достаточно глубокую CMD для обнаружения ветви красных гигантов, с последующим измерением величины TRGB. Большинство наблюдений было проведено в рамках проекта по картографированию Местного Объёма (PI: Karachentsev, Tully, Seitzer).

Глава 3 посвящена изучению галактик Местного Объёма. Отмечена важность создания репрезентативной выборки близких галактик для исследования их статистических свойств и сравнения с современными теоретическими моделями. В этой главе описывается критерий отбора кандидатов в обновленный каталог близких галактик ($D < 11 \text{ Мпк}$ или $V_{\text{LG}} < 600 \text{ км/с}$). Каталог предоставляет информацию о наблюдаемых свойствах галактик, их

физических параметрах и их окружении. Рассмотрены различные масштабные соотношения, характеризующие галактики выборки, в частности, фундаментальная плоскость в пространстве параметров {светимость - размер - амплитуда внутренних движений}. Отношение масса - светимость для галактик Местного Объёма растёт от ранних типов к поздним. Массы газа карликовых галактик в среднем в 1.3 раза превышает их звёздную массу. Следовательно, более половины массы барионов в карликовых галактиках остаётся переработанной в звёздную компоненту. Показано, что средние характеристики Местного Объёма близки к глобальным по Вселенной (плотность K α -светимости внутри Местного Объёма только в 1.4 раза превышает среднее значение во Вселенной, плотность нейтрального водорода в Местном Объёме фактически совпадает с глобальной средней плотностью). Следовательно, выборка галактик Местного Объёма достаточно хорошо воспроизводит локальную Вселенную по многим характеристикам. Показано, что это можно объяснить, учитывая окружение нашей Галактики. Кандидаты в Местный Объём, отобранные в современных космологических расчётах с учётом количества гигантских гало близкому к наблюдаемому количеству гигантских галактик в Местном Объёме, демонстрируют свойства — среднюю плотность, хаббловский поток и функцию скорости — очень близкие к глобальным характеристикам Вселенной в целом. Была построена функция скорости галактик в Местном Объёме с точностью $\sim 10\%$. Функция скорости является фундаментальной статистикой, чрезвычайно чувствительной к теоретическим предсказаниям. Найдено, что стандартная Λ CDM-модель даёт хорошее предсказание наблюдаемого обилия галактик промежуточных размеров с $V_{los} > 70$ км/с, однако кардинально расходится с наблюдениями для галактик меньших масс. Модели теплого темного вещества (WDM) также не могут объяснить наблюдения.

В четвёртой Главе рассматривается распределения вещества на шкале Местного Сверхскопления. Соискателем предложен и разработан критерий выделения малых групп галактик, требующий, чтобы члены группы образовывали гравитационно-связанную систему. Точная настройка алгоритма проводилась по близким системам из выборки галактик Местного Объёма, где членство галактик в группах известно по высокоточным измерениям расстояний. С помощью нового критерия кластеризации были построены каталоги пар, триплетов, групп, изолированных систем. Показано, что группы, выделенные предложенным алгоритмом, могут рассматриваться как динамически проэволюционировавшие системы. В группах различной кратности содержится 54% всех галактик или 82% полной светимости Местной Вселенной. В ходе работы, было обнаружено очень большое количество систем, состоящих исключительно из карликовых галактик (5%

от всех групп, однако, с учётом селекционных эффектов, общее число кратных карликовых систем должно быть как минимум в 5-6 раз больше). Группы карликов имеют высокие отношения масса-светимость, что свидетельствует о присутствии в них большого количества тёмной материи. Согласно нашим данным средняя плотность вещества в Местной Вселенной составляет $\Omega_m=0.08\pm 0.02$ внутри сферы диаметром 80-90 Мпк. Это существенно меньше глобального значения $\Omega_m=0.28-0.31$, полученного при изучении флуктуаций микроволнового фона Вселенной. Расхождение между глобальной и локальной величиной Ω_m может быть вызвано существованием компоненты тёмного вещества, не связанного с вириальными массами систем галактик.

В Заключение перечислены основные результаты диссертации.

Диссертационная работа выполнена соискателем на высоком научном уровне и представляет законченное, самостоятельное, научное исследование актуальной проблемы — распределения вещества в близкой Вселенной.

Научная новизна работы состоит в следующем. Все каталоги и базы данных, созданные в ходе работы над диссертацией являются **новыми**. Предложен и разработан новый алгоритм выделения структур в распределении галактик, основанный на требовании отрицательности полной энергии у физической группы галактик. Анализ свойств групп галактик на шкале Местного Сверхскопления показал, что средняя плотность вещества примерно в 3 раза меньше глобальной плотности Вселенной, полученной из анализа данных микроволнового фона. В ходе работы над каталогами была обнаружена интересная популяция групп, состоящая исключительно из карликовых галактик. Разработанные соискателем улучшения и новая калибровка позволили существенно улучшить точность и надёжность определения расстояний методом TRGB. С помощью этой методики были получены высокоточные оценки расстояния до 384 галактик. Впервые была построена функция скорости для галактик Местного Объёма, что позволило провести сравнение теоретических предсказаний с наблюдениями и подчеркнуть проблему избытка предсказанных галактик в поле.

Личный вклад является определяющим в работах, где диссертант является первым автором. Разработка алгоритмов, написание программ, создание каталогов групп проводились лично диссертантом. Анализ данных и обсуждение результатов проводились наравне с соавторами.

Научная и практическая значимость выражается в том, что методика определения расстояний, представленная в диссертации, применяется различными группами исследователей. Базы данных, созданные в данном проекте, активно используются как

профессиональными астрономами, так и любителями. Результаты, анализа распределения и движения вещества в близкой вселенной вызвали большой интерес в сообществе и стимулировали работы по сравнению наблюдений и теории.

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнения и подтверждена публикациями в ведущих российских и зарубежных журналах, в том числе: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, the Astronomical Journal, the Astrophysical Journal, Astronomy & Astrophysics, Письма в Астрономический журнал, Астрофизический бюллетень.

Все выводы, выносимые на защиту, тщательно аргументированы и подробно изложены в статьях диссертанта, опубликованных в рецензируемых научных журналах из списка ВАК. Результаты диссертации опубликованы в 37 статьях, из них 22 в рецензируемых журналах, и 15 - в материалах конференций. Результаты представленной работы обсуждались на 21 международной и 10 российских конференциях, на семинарах САО РАН.

Работа соответствует заявленной специальности 01.03.02 - Астрофизика и звёздная астрономия.

Учёный совет САО РАН пришел к заключению, по своей актуальности, новизне и практической значимости диссертационная работа Макарова Д.И. полностью удовлетворяет всем требованиям пункта 9 «О присуждении учёных степеней» и является завершённой научно-квалификационной работой. Работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а диссертант заслуживает присвоения ему степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Построение карты близкой Вселенной» Макарова Дмитрия Игоревича рекомендуется к защите на соискание степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 — Астрофизика и звёздная астрономия.

Заключение принято на заседании учёного совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук.

Состав ученого совета САО РАН – 21 человек, на заседании присутствовало - 14 человек. Результаты голосования: «за» - 14, «против» - 0, «воздержалось» - 0. Протокол ученого совета от 6 июля 2016 год №342.

Председатель ученого совета,
директор САО РАН,
кандидат физ.-мат. наук

Ученый секретарь САО РАН,
кандидат физ.-мат. наук



В.В. Власюк

Е.И. Кайсина