

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи  
УДК 524.7-323.3+524.82

МАКАРОВ Дмитрий Игоревич

## **Построение карты близкой Вселенной**

01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ  
на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук

Нижний Архыз – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном  
учреждении науки Специальной астрофизической обсерватории  
Российской академии наук

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Сильченко Ольга Касьяновна  
руководитель отдела  
ГАИШ МГУ

доктор физико-математических наук  
Васильев Евгений Олегович  
ведущий научный сотрудник  
“Южный федеральный университет”

доктор физико-математических наук  
Решетников Владимир Петрович  
профессор  
Санкт-Петербургский государственный университет

Ведущая организация: Астрокосмический центр  
Учреждения Российской академии наук  
Физического института имени П.Н. Лебедева  
Российской академии наук

Защита состоится 20 октября 2016 г. в 9:00 на заседании  
Диссертационного совета Д 002.203.01 при Специальной астрофи-  
зической обсерватории Российской академии наук по адресу: 369167,  
КЧР, Зеленчукский район, пос. Нижний Архыз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2016 г.

Учёный секретарь диссертационного совета  
Д 002.203.01 к.ф.-м.н.

Шолухова О.Н.

## Актуальность темы исследования

Начиная с 2000 года, в наблюдательной космологии и внегалактической астрофизике происходят фундаментальные изменения, вызванные обнаружением новых субстанций: “тёмной материи” и “тёмной энергии”. Выяснилось, что примерно 73% плотности Вселенной приходится на равномерно распределенную тёмную энергию, которая проявляет себя как универсальная сила антигравитации (так называемый “лямбда-член” в уравнениях поля Эйнштейна). Около 22% средней плотности Вселенной обусловлено наличием тёмной материи, природа которой остаётся неизвестной. Привычные формы вещества — барионы составляют всего 5% от средней космологической плотности. Однако, менее пятой части барионов проявили себя в наблюдениях в оптическом, рентгеновском и радиодиапазонах. Таким образом, современная Вселенная XXI века выглядит исключительно скрытой, где видимое, светящееся вещество звёзд в галактиках составляет ничтожную (менее 1%) компоненту. Изучение природы и эволюции тёмной Вселенной по характеристикам её малой доли в виде светлой материи является очень серьёзным вызовом для наблюдательной астрономии.

Современная стандартная космология базируется на модели образования структур и галактик из холодного тёмного вещества (CDM). Гало тёмного вещества растёт в ходе иерархических процессов поглощения и аккреции. В этой модели галактики возникают в процессе охлаждения и конденсации газа в гало тёмной материи. Стандартная  $\Lambda$ CDM-модель даёт очень точное описание эволюции Вселенной, формирования крупномасштабной структуры и галактик. Она хорошо согласуется с наблюдениями в области больших масштабов и масс. Однако, основные проблемы проявляются при сравнении теории и наблюдений как раз на малых масштабах и в области карликовых галактик. К примеру, расхождения теории и наблюдений проявляются в проблеме “потерянных спутников” вокруг гигантских галактик: современное космологическое моделирование предсказывает на один-два порядка больше гало малых масс, чем наблюдается карликовых галактик. Несмотря на значительный прогресс в современной наблюдательной и теоретической космологии, проблема

“потерянных спутников” до конца не решена.

В наблюдаемом распределении галактик закодирована динамическая история развития Вселенной под воздействием тёмной энергии, тёмной материи и обычного вещества. Как неоднократно отмечалось исследователями (см. к примеру, Peebles and Nusser 2010), репрезентативная выборка самых близких галактик является источником важных сведений о формировании и эволюции крупномасштабной структуры Вселенной. Создание больших реперных выборок галактик с хорошо известными свойствами и пространственными скоростями, с классификацией их скучивания, является весьма актуальным с точки зрения возможности сравнения разнообразных численных космологических моделей, использующих весь спектр допустимых гипотез (с холодной и/или тёплой тёмной материей, лямбда-членом или модифицированной ньютоновской динамикой) с реально наблюдаемой Вселенной. Роль таких выборок в ближайшей Вселенной ( $D = 10\text{--}40$  Мпк) особенно велика, поскольку позволяет провести сравнение предсказаний и реальных данных намного более детально, чем выборки галактик на расстояниях в сотни или тысячи Мпк. Тем самым такие выборки имеют большую ценность для проверки основных конкурирующих моделей, а также оценки основных параметров моделей, претендующих на верное описание реального мира (к примеру, Sorce et al. 2014). Выгодные стороны такой глубокой и детальной выборки являются и главными проблемами с точки зрения её создания, так как требуют очень больших наблюдательных и аналитических усилий.

До конца 90-х годов развитие наблюдательной космологии Местной Вселенной сдерживалось скудностью данных о расстояниях даже до самых близких галактик. В рамках проекта по картографированию Местного Объёма было получено более 350 орбит наблюдательного времени на космическом телескопе им. Хаббла по 10 программам (PI: Karachentsev, Tully, Seitzer). Исследование звёздного населения близких галактик позволило произвести массовые высокоточные измерения фотометрических расстояний для примерно 400 соседних галактик. Изучение непосредственных окрестностей Местной Группы на шкале до 10 Мпк позволяет исследовать множество карликовых галактик, недоступных наблю-

дениям на больших расстояниях. Эти “пробные частицы” с измеренными лучевыми скоростями и расстояниями трассируют хаббловский поток с беспрецедентно высокой точностью. Измерение расстояний и лучевых скоростей галактик в Местном Объёме радиусом 10 Мпк составляет центральную задачу коллектива лаборатории Внегалактической астрофизики и космологии Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук на протяжении последних 20 лет.

Для определения таких космологических параметров, как постоянная Хаббла, плотность барионной и тёмной материи, необходимо развивать методы определения расстояний до галактик, не зависящие от красного смещения. Под воздействием гравитации окружающего вещества наблюдаемые скорости галактик могут существенно отличаться от линейного хаббловского закона. В линейном приближении существует прямая связь между крупномасштабными неоднородностями в распределении вещества и крупномасштабным полем пекулярных скоростей. Существенное развитие за последние десятилетия методов определения расстояний до галактик независимо от красного смещения позволяет нам измерить поле пекулярных скоростей. Анализ пекулярных движений галактик является ключевым методом для решения проблемы происхождения и эволюции крупномасштабной структуры Вселенной, оценки массы групп и скоплений галактик, картографирования распределения материи на шкале 100–200 Мпк.

## **Цели и задачи диссертационной работы**

Основной целью данной работы является изучение распределения вещества в локальной Вселенной, что неразрывно связано с вопросами построения единой шкалы расстояний во Вселенной. Для решения этой задачи необходимо улучшить точность и надёжность методов массового определения расстояний, провести их калибровку и привязку друг к другу. Наиболее перспективным методом для построения трёхмерной карты Местного Объёма по наблюдениям большого числа близких галактик на космическом телескопе им. Хаббла является использование вершины ветви красных гигантов в качестве стандартной свечи. С другой стороны,

анализ иерархии распределения структур во Вселенной чрезвычайно важен для решения вопросов о формировании и эволюции галактик. Для этого требуется развитие методов кластеризации и получение надёжных оценок параметров систем. Отдельной задачей является систематизация, организации хранения и анализ большого объёма информации.

## Научная новизна

Одним из основных направлений исследований, ведущихся нашим коллективом, является изучение галактик на шкале 10 Мпк, в так называемом Местном Объёме (Karachentsev et al. 2004, 2013). В ходе этой работы был развит метод определения высокоточных фотометрических расстояний до близких, разрешаемых на звезды, галактик по вершине ветви звёзд-красных гигантов. Была проведена новая калибровка светимости вершины ветви красных гигантов. Использование метода максимального правдоподобия и оценки фотометрической точности с применением развёрнутого статистического моделирования густых звёздных полей позволило приблизить точность оценки расстояний по вершине ветви красных гигантов к 3–5%, что сопоставимо по точности с цефеидным индикатором расстояния (Makarov et al. 2006; Rizzi et al. 2007). Разработанный TRGB-метод был использован для определения расстояния до 384 галактик Местного Объёма, что является самой большой и однородной выборкой измерений высокоточных расстояний. Эти галактики наблюдались в рамках оригинальных программ исследования трёхмерного распределения близких галактик на космическом телескопе им. Хаббла.

Были созданы база данных и обновленный каталог Местного Объёма Вселенной (Kaisina et al. 2012; Karachentsev et al. 2013). На данный момент количество галактик Местного Объёма, большинство из которых являются карликовыми системами, приближается к 1000. Эта база данных является основой для изучения свойств и физических процессов в близких галактиках. В частности, было показано, что стандартная  $\Lambda$ CDM-модель чрезвычайно точно описывает функцию распределения круговой скорости галактик для массивных объектов ( $V_{\text{circ}} \gtrsim 70 \text{ км с}^{-1}$  и  $M_{\text{vir}} \gtrsim 5 \times 10^{10} M_{\odot}$ ), но завышает в 6 раз количество карликовых галак-

тик с круговыми скоростями  $V_{\text{circ}} \sim 30\text{--}40 \text{ км с}^{-1}$ . Столь большой избыток предсказанных крупных карликовых галактик с массами  $\mathcal{M}_{\text{vir}} \approx 10^{10} \mathcal{M}_{\odot}$  в поле создаёт сложную проблему: чтобы оказаться потерянными — эти галактики должны быть экстремально низкой поверхностной яркости, без звездообразования и нейтрального водорода. К настоящему моменту, не обнаружено ни одной подобной галактики.

Каталоги систем галактик различной кратности (Karachentsev and Makarov 2008; Makarov and Karachentsev 2009, 2011), созданные в рамках изучения распределения галактик в ближней Вселенной, выявили проблему “потерянной массы”: средняя плотность вещества локальной Вселенной, связанного с распределением галактик и групп, оказалась в 2.5–3 раза ниже глобального космологического значения  $\Omega_{\text{M}} = 0.28$ , полученного из космологических экспериментов по изучению реликтового фона. Это различие выходит далеко за пределы случайных погрешностей. Чтобы устранить это противоречие, необходимо предположить наличие значительных масс скрытой материи за пределами вириализованных областей групп и скоплений галактик. Такая рассредоточенная компонента тёмной материи, если она существует, превосходит в два раза суммарную массу тёмных гало, в которые погружены видимые галактики.

В ходе работы над каталогами была обнаружена интересная популяция групп, в которой отсутствуют массивные, гигантские галактики (Makarov and Uklein 2012). Подобные структуры, состоящие исключительно из галактик низкой светимости, имеют очень высокое содержание тёмной материи. Это указывает на то, что, возможно, значительная часть тёмной материи не связана со светящимся веществом и “теряется” при исследовании близких групп. Природа и происхождение таких групп остаются пока загадочными.

## Научная и практическая значимость

Представленная в диссертации методика определения положения вершины ветви красных гигантов активно применяется для определения расстояний галактик, разрешаемых на индивидуальные звезды, различ-

ными группами исследователей как в CAO РАН, так и в других учреждениях (Institute for Astronomy, University of Hawaii; University of Texas at Austin; University of Minnesota).

Полученная в работе калибровка абсолютной величины обрыва функции светимости звёзд ветви красных гигантов легла в основу массового, единообразного и однородного определения расстояний до галактик Местного Объёма, наблюдавшихся на космическом телескопе им. Хаббла. На данный момент этим методом оценено расстояние примерно для 400 галактик.

Результаты, полученные с использованием разработанной методики, являются неотъемлемой составляющей баз данных, которые были созданы и поддерживаются в рамках проекта по исследованию близкой Вселенной. База данных HyperLEDA и каталог расстояний в ней, база данных галактик Местного Объёма и база данных внегалактических расстояний (the Extragalactic Distance Database) активно используются как профессиональными астрономами, так и любителями. На основе собранных данных о галактиках проводится анализ их свойств и физических характеристик. Эти информационные ресурсы играют важную роль для изучения распределения вещества и космических потоков в ближней Вселенной. Они представляют интерес и активно используются для сравнений теории и результатов численного моделирования эволюции Вселенной с наблюдениями.

На основе баз данных были созданы каталоги групп и изолированных галактик внутри сферы диаметром 40–50 Мпк. Эти каталоги являются важными источниками данных для изучения концентраций галактик, оценки массы групп галактик, исследования населённости систем и связи свойств галактик с окружением. Каталоги могут использоваться для выделения объектов и их систем для дальнейшего, более подробного изучения. Характеристики структур местной Вселенной важны для сравнения наблюдений с численными моделями.



## Основные результаты, выносимые на защиту

1. Методика и пакет программ определения вершины ветви красных гигантов на основе анализа фотометрии звёзд в галактиках. Новая калибровка нуля-пункта шкалы расстояний TRGB и зависимости от цвета. Показано, что данный нуль-пункт TRGB находится в отличном согласии со шкалой расстояния Цефеид. Внутренняя точность метода составляет 0.02 mag, что сопоставимо с точностью определения расстояний по зависимости период-светимость Цефеид. С использованием метода на космическом телескопе им. Хаббла оценены расстояния до 384 близких галактик.
2. Фотометрические расстояния до 30 галактик в облаке Гончих Псов, оцененные по архивным данным HST. Новая методика позволила повысить точность определения расстояний, выделить зону хаотических движений вокруг центра системы, галактики M 94. Оценка отношения масса-светимость для этой группы галактик,  $\mathfrak{M}/L_B = (120\text{--}159) \mathfrak{M}_\odot/L_\odot$  существенно превышает типичное отношение  $M/L_B \sim 30$  для близких групп галактик.
3. Структура базы данных Местного Объёма. Результаты статистического анализа полноты и свойств выборки галактик Местного Объёма. Реферативный каталог внегалактических расстояний, независимых от красного смещения, интегрированный в HyperLEDA. Структура базы данных EDD и её взаимосвязь с HyperLEDA.
4. Результаты сравнения наблюдаемой функции скоростей с предсказанием стандартной  $\Lambda$ CDM-модели. Функция скорости вращения галактик в Местном Объёме построена с точностью  $\sim 10\%$  для всех типов галактик в диапазоне круговых скоростей  $V = (10\text{--}200) \text{ км с}^{-1}$ . Теория даёт хорошее описание наблюдаемого обилия галактик промежуточных размеров ( $V_{\text{los}} \gtrsim 70 \text{ км с}^{-1}$ ,  $\mathfrak{M}_{\text{vir}} \gtrsim 3 \times 10^{10} \mathfrak{M}_\odot$ ), однако, категорически расходится с функцией скорости для меньших объектов. Для галактик с  $V_{\text{max}} = 40 \text{ км с}^{-1}$  ( $M_B \approx -16$ ) теория предсказывает в 6 раз большее число гало, чем известно галактик.

5. Критерий и алгоритм выделения систем галактик, основанные на требовании отрицательности полной энергии у физической пары галактик. Калибровка метода по галактикам в близких группах с известными высокоточными оценками расстояния, что позволило надёжно идентифицировать принадлежность галактик к системам.
6. Каталоги пар, триплетов, групп, изолированных галактик, а также систем карликовых галактик, созданные по выборке галактик в объёме пространства радиусом 48 Мпк, включающим Местное Сверхскопление с его окрестностями. В системы разной кратности вошло 54% всех галактик или 82% полной светимости Местной Вселенной. Результаты исследования глобальных свойств групп галактик. Обнаружение существования большого количества систем, состоящих исключительно из карликовых галактик.
7. Оценка средней плотности вещества Местной Вселенной, заключённой внутри вириализованных областей систем галактик. Внутри сферы диаметром 80–90 Мпк она равна  $\Omega_M = 0.08 \pm 0.02$ . Это в 3–4 раза меньше глобальной космологической плотности  $\Omega_M = 0.28 \pm 0.03$  в стандартной  $\Lambda$ CDM-модели.

## Степень достоверности и апробация результатов

Методы и алгоритмы, развитые в данной работе, приводят к непротиворечивым и хорошо согласующимся результатам, полученным другими авторами с применением иных подходов. Важным свидетельством достоверности полученных результатов является их апробация на национальных и международных симпозиумах и конференциях, их публикация в ведущих астрофизических журналах.

Основные результаты диссертации докладывались соискателем на семинарах и конкурсах научных работ САО РАН; на научной сессии Общего собрания Отделения физических наук; семинарах ГАИШ МГУ, ИНАСАН и АКЦ ФИАН; семинаре Кубанского государственного университе-

та; семинарах обсерватории и университета Лиона, обсерватории Ниццы (Франция); института астрономии Гавайев (США), а также на всероссийских и международных конференциях:

- “The Zeldovich Universe: Genesis and Growth of the Cosmic Web”, IAU Symposium 308, Tallinn, Estonia, 23–28 June, 2014
- “European Week of Astronomy and Space Science”, EWASS 2014, Geneva, Switzerland, 30 June – 4 July, 2014
- “Cosmic Flows — Observations and Simulations”, Marseille, France, 3–7 June, 2013
- “Advancing the Physics of Cosmic Distances”, IAU Symposium 289, Beijing, China, 2012
- “Star Formation and Gas Reservoirs in Nearby Groups and Clusters”, Union College, USA, 8–11 July, 2012
- “Star Formation in Dwarf Galaxies”, Lowell Observatory, Flagstaff, Arizona, 9–22 June, 2012
- “Galaxy formation”, Durham, UK, 18–22 July, 2011
- “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, XXVIII конференция, Пущино, Россия, 19-21 апреля, 2011
- “Joint European and National Astronomy Meeting”, JENAM 2011, Saint-Peterburg, Russia, 4–8 June, 2011
- “A Universe of dwarf galaxies”, Lyon, France, 14–18 June, 2010
- “Nearby Dwarf Galaxies”, Nizhnij Arkhyz, Russia, 14–18 September, 2009
- “Galaxies in Isolation: Exploring Nature vs Nurture”, Granada, Spain, 12–15 May, 2009
- “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, XXVI конференция, Пущино, Россия, 21–23 апреля, 2009

- “Problems of Practical Cosmology”, St. Petersburg, Russia, 23–27 June, 2008
- “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, XXV конференция, Пущино, Россия, 22–24 апреля, 2008
- “Dark Galaxies & Lost Baryons”, Cardiff, UK, IAU Symposium 244, 25–29 June, 2007
- “Cosmic Physics”, SAO RAS, Nizhnij Arkhyz, Russia, 27–31 May, 2007
- “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, XXIV конференция, Пущино, Россия, 24–26 апреля, 2007
- “Юбилейная конференция, совмещенная с осенним заседанием Комитета по тематике больших телескопов”, SAO РАН, Россия, 9–12 октября, 2006
- “Galaxy Evolution Across the Hubble Time”, IAU Symposium 235, Prague, Czech Republic, 14–17 August, 2006
- “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, XXIII конференция, Пущино, Россия, 24–27 апреля, 2006
- “Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics”, Lyon, France, 2006
- “Nonlinear Cosmology Workshop”, Observatoire de la Cote d’Azur, Nice, 25–27 January, 2006
- “Near-fields cosmology with dwarf elliptical galaxies”, IAU Colloquium 198, Switzerland, 14–18 March, 2005
- “Stellar Content and Distances of Nearby Galaxies 2004”, Observatoire de la Cote d’Azur, Nice, France, August 23–27, 2004
- “Релятивістська астрофізика, гравітація та космологія”, 3 конференція, Київ, Україна, 21–23 мая, 2003

- “Актуальные Проблемы Внегалактической Астрономии”, 20 конференция, Пущино, Россия, 22–25 апреля, 2003
- “Peculiar velocity of nearby galaxies”, All-russian astronomical conference, Saint Petersburg, Russia, 6–12 August, 2001
- “Актуальные Проблемы Внегалактической Астрономии”, XVIII пуштинская конференция, Пущино, Россия, 23–26 апреля, 2001
- “Joint European and National Astronomical Meeting”, JENAM-2000, Moscow, Russia, 2000
- “Small Galaxy Groups”, IAU Colloquium 174, Turku, Finland, 13–18 June, 1999.

## Личный вклад автора

Основные результаты диссертации опубликованы в 37 работах общим объёмом 425 страниц, 35 работ написаны совместно с другими авторами.

Разработка методологии определения TRGB проводилась совместно с Макаровой Л.Н. Алгоритм и его реализация в виде пакета программ TRGBTOOL были созданы автором. Тестирование метода проводилось совместно с Макаровой Л.Н. и Rizzi L. Калибровка метода определения TRGB-расстояния проводилась совместно с соавторами. Определение расстояний галактик проводилось совместно с соавторами.

Разработка, создание и наполнение базы данных расстояний в HyperLEDA были сделаны полностью соискателем. Работа с данными в HyperLEDA ведётся автором, программная поддержка обеспечивается Prugniel Ph. Разработка структуры и создание EDD велись совместно с соавторами. Автором была реализована система кросс-идентификации объектов в EDD и их привязка к HyperLEDA, и взаимодействие между различными системами хранения данных в EDD. Структура базы данных галактик Местного Объёма формировалась совместно с Кайсиной Е.И. Сбор данных и их анализ производились совместно с соавторами. Построение и анализ функции скорости галактик Местного Объёма и

сравнение с теорией велось совместно с соавторами (теоретическая часть сделана Клыпиным А.А.).

Идея критерия выделения групп принадлежит Караченцеву И.Д. Развитие подхода, разработка алгоритма, его настройка по близким группам сделана автором. Для анализа окружения автором предложены параметры: приливной индекс и индекс изолированности. Выборка галактик внутри  $V_{LG} < 3500 \text{ км с}^{-1}$  и её очистка от “загрязнений” сделана автором. Создание каталогов пар, триплетов и групп проведено автором, анализ свойств систем велся совместно и Караченцевым И.Д. Список групп карликовых галактик был подготовлен совместно с Уклеиным Р.И. Список изолированных, “сиротских” галактик был создан совместно с Караченцевым И.Д.

## Статьи в рецензируемых журналах

- H. M. Courtois, R. B. Tully, D. I. Makarov, S. Mitronova, B. Koribalski, I. D. Karachentsev, and J. R. Fisher. Cosmic Flows: Green Bank Telescope and Parkes HI observations. *MNRAS*, **414**, 2005–2016, July 2011.
- B. A. Jacobs, L. Rizzi, R. B. Tully, E. J. Shaya, D. I. Makarov, and L. Makarova. The Extragalactic Distance Database: Color-Magnitude Diagrams. *AJ*, **138**, 332–337, August 2009.
- E. I. Kaisina, D. I. Makarov, I. D. Karachentsev, and S. S. Kaisin. Observational database for studies of nearby universe. *Astrophysical Bulletin*, **67**, 115–122, January 2012.
- I. D. Karachentsev and D. I. Makarov. Binary galaxies in the local supercluster and its neighborhood. *Astrophysical Bulletin*, **63**, 299–345, December 2008.
- I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, W. K. Huchtmeier, and D. I. Makarov. A Catalog of Neighboring Galaxies. *AJ*, **127**, 2031–2068, April 2004.

- I. D. Karachentsev, D. I. Makarov, V. E. Karachentseva, and O. V. Melnik. Optical identifications of 230 HIPASS radio sources. *Astronomy Letters*, **34**, 832–838, December 2008.
- I. D. Karachentsev, D. I. Makarov, V. E. Karachentseva, and O. V. Melnyk. Catalog of nearby isolated galaxies in the volume  $z < 0.01$ . *Astrophysical Bulletin*, **66**, 1–27, January 2011.
- I. D. Karachentsev, D. I. Makarov, and E. I. Kaisina. Updated Nearby Galaxy Catalog. *AJ*, **145**, 101, April 2013.
- V. E. Karachentseva, O. V. Melnyk, I. B. Vavilova, and D. I. Makarov. Virial and total masses of galaxy triplets in the Local Supercluster. *Astronomische Nachrichten*, **326**, 502–502, August 2005.
- A. Klypin, I. Karachentsev, D. Makarov, and O. Nasonova. Abundance of field galaxies. *MNRAS*, **454**, 1798–1810, December 2015.
- D. Makarov and I. Karachentsev. Galaxy groups and clouds in the local ( $z \sim 0.01$ ) Universe. *MNRAS*, **412**, 2498–2520, April 2011.
- D. Makarov, L. Makarova, L. Rizzi, R. B. Tully, A. E. Dolphin, S. Sakai, and E. J. Shaya. Tip of the Red Giant Branch Distances. I. Optimization of a Maximum Likelihood Algorithm. *AJ*, **132**, 2729–2742, December 2006.
- D. Makarov, P. Prugniel, N. Terekhova, H. Courtois, and I. Vauglin. HyperLEDA. III. The catalogue of extragalactic distances. *A&A*, **570**, A13, October 2014.
- D. I. Makarov and I. D. Karachentsev. Galaxy triplets in the local supercluster. *Astrophysical Bulletin*, **64**, 24–49, January 2009.
- D. I. Makarov and R. I. Uklein. A list of groups of dwarf galaxies in the local supercluster. *Astrophysical Bulletin*, **67**, 135–146, April 2012.
- D. I. Makarov, L. N. Makarova, and R. I. Uklein. Distances to dwarf galaxies of the Canes Venatici I cloud. *Astrophysical Bulletin*, **68**, 125–138, April 2013.

- O. V. Melnyk, V. E. Karachentseva, I. D. Karachentsev, D. I. Makarov, and I. V. Chilingarian. Search for companions of nearby isolated galaxies. *Astrophysics*, **52**, 184–191, April 2009.
- L. Rizzi, R. B. Tully, D. Makarov, L. Makarova, A. E. Dolphin, S. Sakai, and E. J. Shaya. Tip of the Red Giant Branch Distances. II. Zero-Point Calibration. *ApJ*, **661**, 815–829, June 2007.
- A. V. Tikhonov and D. I. Makarov. Correlation Properties of the Galaxies in the Local Supercluster. *Astronomy Letters*, **29**, 289–297, May 2003.
- A. V. Tikhonov, D. I. Makarov, and A. I. Kopylov. Investigation of clustering of galaxies, clusters and superclusters by the method of correlation Gamma-function. *Bulletin of the Special Astrophysics Observatory*, **50**, 39–50, 2000.
- R. B. Tully, L. Rizzi, E. J. Shaya, H. M. Courtois, D. I. Makarov, and B. A. Jacobs. The Extragalactic Distance Database. *AJ*, **138**, 323–331, August 2009.
- R. B. Tully, H. M. Courtois, A. E. Dolphin, J. R. Fisher, P. Héraudeau, B. A. Jacobs, I. D. Karachentsev, D. Makarov, L. Makarova, S. Mitronova, L. Rizzi, E. J. Shaya, J. G. Sorce, and P.-F. Wu. Cosmicflows-2: The Data. *AJ*, **146**, 86, October 2013.

## Статьи в сборниках трудов конференций

- I. D. Karachentsev, D. I. Makarov, V. E. Karachentseva, and W. K. Huchtmeier. Catalogue of Nearby Galaxies and the Local Cosmic Web. In A. P. Fairall and P. A. Woudt, editors, *Nearby Large-Scale Structures and the Zone of Avoidance*, volume 329 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, pages 255–264, June 2005.
- I. D. Karachentsev, V. Karachentseva, W. Huchtmeier, D. Makarov, S. Kaisin, M. Sharina, and L. Makarova. Mining the Local Volume. *Astrophysics and Space Science Proceedings*, **5**, 21, 2008.



- I. D. Karachentsev, D. I. Makarov, V. E. Karachentseva, and O. V. Melnyk. Properties of 513 Isolated Galaxies in the Local Supercluster. In L. Verdes-Montenegro, A. Del Olmo, and J. Sulentic, editors, *Galaxies in Isolation: Exploring Nature Versus Nurture*, volume 421 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, pages 69–72, October 2010.
- D. Makarov. Maximum-likelihood implementation of the tip-of-the-red-giant-branch method. In R. de Grijs, editor, *IAU Symposium*, volume 289 of *IAU Symposium*, pages 218–221, February 2013.
- D. Makarov and I. Karachentsev. Dark Matter Problem in the Local Supercluster. In J. I. Davies and M. J. Disney, editors, *IAU Symposium*, volume 244 of *IAU Symposium*, pages 370–371, May 2008.
- D. Makarov and I. Karachentsev. Galaxies and Groups in the Local Supercluster. In L. Verdes-Montenegro, A. Del Olmo, and J. Sulentic, editors, *Galaxies in Isolation: Exploring Nature Versus Nurture*, volume 421 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 264, October 2010.
- D. Makarov and R. Uklein. Groups of dwarfs. In *Galaxy Formation*, page P118, July 2011.
- D. Makarov, I. Karachentsev, and R. Uklein. Groups of Dwarf Galaxies in the Local Supercluster. In M. Koleva, P. Prugniel, and I. Vauglin, editors, *EAS Publications Series*, volume 48 of *EAS Publications Series*, pages 289–294, July 2011.
- D. I. Makarov. Velocity Field in the Local Volume. In Y. V. Baryshev, I. N. Taganov, and P. Teerikorpi, editors, *Problems of Practical Cosmology, Volume 1*, volume 1, pages 106–109, 2008.
- D. I. Makarov and I. D. Karachentsev. A new catalogue of multiple galaxies in the Local Supercluster. In M. J. Valtonen and C. Flynn, editors, *IAU Colloq. 174: Small Galaxy Groups*, volume 209 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, pages 40–45, 2000.

- L. Makarova and D. Makarov. The tip-of-the-red-giant-branch distance indicator and the structure of the nearest galaxy groups. In R. de Grijs, editor, IAU Symposium, volume 289 of IAU Symposium, pages 240–243, February 2013.
- L. Rizzi, R. B. Tully, D. Makarov, L. Makarova, S. Sakai, and E. J. Shaya. Optimizing the tip of the red giant branch distance estimator. In H. Jerjen and B. Binggeli, editors, IAU Colloq. 198: Near-fields cosmology with dwarf elliptical galaxies, pages 342–345, 2005.
- R. Uklein and D. Makarov. Groups of Dwarf Galaxies in the Local Supercluster. In A. M. Mickaelian, O. Y. Malkov, and N. N. Samus, editors, Fifty years of Cosmic Era: Real and Virtual Studies of the Sky. Conference of Young Scientists of CIS Countries, pages 216–220, May 2012.
- R. I. Uklein, D. I. Makarov, and S. Roychowdhury. Rendez-Vous of Dwarfs. In M. Koleva, P. Prugniel, and I. Vauglin, editors, EAS Publications Series, volume 48 of EAS Publications Series, pages 159–160, July 2011.
- I. Vauglin, P. Prugniel, H. Courtois, D. Makarov, C. Petit, G. Mamon, and G. Paturel. Capabilities of the HYPERLEDA database. In D. Barret, F. Casoli, G. Lagache, A. Lecavelier, and L. Pagani, editors, SF2A-2006: Semaine de l’Astrophysique Francaise, pages 365–366, June 2006.

## Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и двух приложений; содержит 128 иллюстраций, 13 таблиц и 6 каталогов. Список цитируемой литературы включает 413 ссылок. Общий объём диссертации 465 страниц (315 без учёта приложений). В конце каждой главы перечисляются основные результаты и приводится список статей, в которых они были представлены.

## Краткое содержание диссертации

Во **введении** обсуждается актуальность работы, цели и задачи исследования; научная новизна; научная и практическая значимость полученных результатов; формулируются положения, выносимые на защиту; а также приводится список работ, в которых опубликованы результаты данного исследования, с указанием личного вклада автора в совместных публикациях. Кратко представлено содержание диссертации.

**Глава 1** посвящена разработке методики определения расстояний до близких галактик по светимости звёзд вершины ветви красных гигантов (TRGB). В §1.1 изложена краткая история развития метода. Методология определения звёздной величины TRGB подробно описана в §1.2. Данная методика является развитием подхода, основанного на подгонке наблюдаемой функции светимости звёзд методом максимального правдоподобия. Наш алгоритм использует эмпирическое описание функции полноты, ошибок и систематики звёздной фотометрии для более качественного описания наблюдаемой функции светимости звёзд ветви красных гигантов. Для наиболее точной оценки наблюдательных эффектов используется фотометрия искусственных звёзд, которая имитирует реальные наблюдения. Интенсивное тестирование метода показало его надёжность и хорошую внутреннюю точность. Метод максимального правдоподобия даёт лучшую точность по сравнению с методами выделения границ для большинства реальных звёздных популяций и любых условий наблюдений. Метод максимального правдоподобия способен давать достаточно надёжные результаты даже в случае слабой населённости ветви красных гигантов и вблизи фотометрического предела наблюдений. Получена взаимосвязь между количеством звёзд, участвующих в анализе, точностью фотометрии звёзд в области скачка и точностью оценки положения TRGB. Раздел §1.3 посвящён калибровке метода TRGB. Боллометрическая светимость TRGB имеет сильную зависимость от металличности, даже в наиболее “удачном” *I*-фильтре существует слабая зависимость от цвета. Наклон этой зависимости был однозначно определён по CMD индивидуальных галактик, показывающих большой разброс звёздных популяций по металличности. В §1.3.2 получена новая калибровка

светимости ярчайших звёзд RGB по пяти галактикам Местной Группы (IC 1613, NGC 185, Sculptor, Fornax, M 33), расстояния до которых были оценены нами по светимости звёзд горизонтальной ветви. Это позволило получить калибровку шкалы расстояний независимо от шкалы расстояний Цефеид. В §1.5 проведено сравнение оценок расстояний пятнадцати галактик, полученных по зависимости период-светимость Цефеид и разработанной нами вариацией метода TRGB. Показано, что новый нуль-пункт метода TRGB находится в отличном согласии со шкалой расстояния Цефеид,  $\mu_{\text{Cep}} - \mu_{\text{TRGB}} = -0.01 \pm 0.03$ . В разделе §1.6 проведено уточнение расстояний для 30 галактик в рассеянной концентрации галактик в созвездии Гончих Псов. Применение новой методики повысило точность определения расстояний и позволило выделить зону хаотических движений вокруг центра системы, галактики M 94. Полученная нами оценка отношения масса-светимость для этой группы галактик  $\mathfrak{M}/L = (120 - 159) \mathfrak{M}_{\odot}/L_{\odot}$ , существенно превышает типичное отношение  $\mathfrak{M}/L \sim 30$  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 оценок расстояний до галактик, интегрированный в базу данных HyperLEDA, является её составной частью и описан в разделе §2.1.1. Все оценки расстояния приведены в единую шкалу, основанную на аккуратной выборке измерений высокого качества. В базе данных внегалактических расстояний (EDD), §2.2, воедино собраны разнообразные коллекции данных, связанные с задачей определения расстояний до галактик. Её составной частью является каталог CMD и оценок TRGB-расстояний галактик Местного Объёма, §2.3. 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.

**Глава 3** посвящена исследованию близкой Вселенной, так называемому Местному Объёму. Отмечена важность создания репрезентативной выборки близких галактик для исследования их статистических свойств и сравнения с современными теоретическими моделями. Вкратце описа-

на история создания и расширения выборки галактик Местного Объёма. В разделе §3.1 описывается критерий отбора кандидатов в обновленный каталог близких галактик. На начало 2013 года он содержал 869 близких галактик. Этот каталог охватывает все небо и содержит галактики с индивидуальными оценками расстояния менее 11 Мпк, либо лучевыми скоростями, приведёнными к центроиду Местной Группы,  $V_{LG} < 600 \text{ км с}^{-1}$ . В каталоге содержатся наблюдательные данные об угловом диаметре; видимой величине в  $FUV$ ,  $B$  и  $K_s$  фильтрах; потоке в линиях  $H\alpha$  и  $H I$ ; морфологических типах; ширине линии  $H I$ ; радиальной скорости и оценке расстояния. 108 карликовых галактик выборки до сих пор остаются без измерений лучевых скоростей. Кроме того, каталог предоставляет информацию о физических параметрах галактик и их окружении: линейном холмберговском диаметре; абсолютной величине в  $B$ -фильтре; поверхностной яркости; водородной, звёздной и индикативной массах; скорости вращения, скорректированной за наклон галактики; и трёх индикаторах, характеризующих плотность их локального окружения. Каталог создан на основе базы данных галактик Местного Объёма<sup>1</sup>. База данных содержит наиболее свежую информацию об объектах. Кроме таблиц, суммирующих наблюдательные и физические характеристики галактик, база данных предоставляет доступ к  $H\alpha$ -изображениям, полученным в ходе обзора на телескопе БТА. В разделе §3.3 кратко обсуждены распределение и движения галактик внутри LV. Галактики концентрируются вокруг хорошо известных близких групп галактик, таких как M 81, Centaurus A, M 83, IC 342, NGC 253, M 101, NGC 6946, Leo I. Примерно половину Местного Объёма занимает Местный Войд, тянущийся далеко за пределы Местного Объёма. Показано, что характер движений галактик далёк от невозмущенного хаббловского потока: галактики с большими отрицательными пекулярными скоростями располагаются вдали от сверхгалактической плоскости, а галактики, лежащие вблизи сверхгалактической плоскости, демонстрируют тенденцию “падения” в направлении скопления в Деве. В §3.4 построены различные масштабные соотношения, характеризующие галактики выборки. Галактики формируют фундаментальную плоскость в пространстве парамет-

---

<sup>1</sup><http://www.sao.ru/lv/lvgdb>

ров светимость-размер-амплитуда внутренних движений. Из диаграммы абсолютная звёздная величина-диаметр видно, что галактики в первом приближении следуют зависимости, соответствующей постоянству средней объёмной плотности светимости. Светимость, размер и амплитуда вращения различаются для галактик различных морфологических типов, образуя максимум в районе Sbc-галактик. Отмечено, что классическая морфологическая классификация Хаббла плохо подходит для описания карликовых галактик. В разделе §3.4 предложена двухпараметрическая схема, характеризующая карлики по поверхностной яркости и цвету. Отношение индикативной массы к полной светимости для галактик Местного Объёма растёт от ранних типов к поздним. Однако, при переходе от спиральных галактик (Sd, Sm) к иррегулярным (BCD, Im, Ir), заметно существенное (около 4-х раз) падение среднего отношения  $\mathfrak{M}_{26.5}/L$ . Основные HI-свойства галактик Местного Объёма обсуждаются в разделе §3.5. Выборка близких галактик демонстрирует хорошо известный эффект, что среднее отношение  $\mathfrak{M}_{\text{HI}}/L_B$  возрастает от  $\sim 0.1$  до  $\sim 0.7 \mathfrak{M}_{\odot}/L_{\odot}$  при переходе от нормальных спиральных галактик к карликовым системам с  $V_{\text{max}} < 50 \text{ км с}^{-1}$ . Эта особенность, как правило, приписывается более низкой скорости звездообразования в карликовых галактиках. Оценка среднего отношения массы газа к массе звёзд для карликовых галактик равна  $\mathfrak{M}_{\text{gas}}/\mathfrak{M}_{\text{star}} = 1.3$ . Следовательно, более половины массы барионов в карликовых галактиках, детектируемых в HI, остаётся переработанной в звёздную компоненту. Для нормальных галактик,  $V_{\text{max}} > 100 \text{ км с}^{-1}$ , медианное значение отношения массы водорода к динамической массе равно  $\mathfrak{M}_{\text{HI}}/\mathfrak{M}_{26.5} \sim 0.03$ , в то время как у карликовых галактик с  $V_{\text{max}} < 20 \text{ км с}^{-1}$  оно возрастает до  $\mathfrak{M}_{\text{HI}}/\mathfrak{M}_{26.5} \sim 1$ , в некоторых случаях достигая значения  $\mathfrak{M}_{\text{HI}}/\mathfrak{M}_{26.5} > 10$ . Индикаторы окружения — приливной индекс наиболее значимого и пяти наиболее значимых соседей, контраст средней плотности светимости внутри 1 Мпк — описаны в разделе §3.6 Максимальное значение отношения водородной массы к  $K_s$ -светимости,  $\mathfrak{M}_{\text{HI}}/L_K$ , остаётся примерно постоянным как для галактик поля, так и для членов групп. При этом, существует резкое падение минимального значения  $\mathfrak{M}_{\text{HI}}/L_K$  с повышением плотности окружения. Очевидно, что наблюдаемое увеличение дефицита HI в сто-

рону роста плотности связано с выметанием газа из галактик при их тесном взаимодействии. Отмечено, что удельный темп звездообразования практически не зависит от средней поверхностной яркости галактик на шкале примерно пяти величин. При этом содержание водорода  $\mathcal{M}_{\text{HI}}/L$  растёт в сторону слабой поверхностной яркости. В разделе §3.7 показано, что средние параметры Местного Объёма близки к глобальным средним значениям. Так, средняя плотность светимости в фильтре  $B$  превышает глобальную в 2.2 раза, средняя плотность  $K_s$ -светимости — 1.4 раза, при этом средняя плотность нейтрального водорода, как и средняя плотность скорости звездообразования, фактически совпадает с их глобальными аналогами. Следовательно, выборка галактик Местного Объёма достаточно хорошо воспроизводит локальную Вселенную по многим характеристикам. Функция светимости галактик Местного Объёма анализируется в разделе §3.8. Показано, что она хорошо согласуется с данными обзоров SDSS (Blanton et al. 2005) и 2dF (Norberg et al. 2002). Аппроксимация наблюдаемой функции светимости галактик в Местном Объёме функцией Шехтера позволяет оценить полноту данных в зависимости от светимости галактик. Можно считать, что выборка полна вплоть до светимости  $M_B = -14$ . Согласно этой аппроксимации, 90% полнота наблюдается на  $M_B = -13.5$ , которая, в среднем, соответствует  $V_{\text{los}} \approx 20 \text{ км с}^{-1}$ . Выборка недосчитывается половины галактик при  $M_B = -12$  и  $V_{\text{los}} \approx 13 \text{ км с}^{-1}$ . В разделе §3.9 показано, что близость параметров Местного Объёма к глобальным параметрам можно объяснить, наложив ограничение на количество гигантских галактик вокруг нашей Галактики внутри 10 Мпк, согласно наблюдательным данным. При этом, кандидаты в Местный Объём, отобранные в современных космологических расчётах, действительно демонстрируют свойства — среднюю плотность, хаббловский поток и функцию скорости — очень близкие к глобальным характеристикам вселенной в целом. Раздел §3.10 посвящён исследованию функции круговой скорости  $dN/dV$  галактик в Местном Объёме. Эта функция является фундаментальной статистикой, чрезвычайно чувствительной к теоретическим предсказаниям. Однако, из-за сложности её измерения согласованные оценки для различных выборок стали возможны только в последнее время (Zwaan et al. 2010; Papastergis

et al. 2011). Местный Объём позволяет оценивать функцию скорости с необходимой точностью благодаря присутствию в выборке галактик низкой светимости и всех морфологических типов. Благодаря этому удалось построить функцию скорости в Местном Объёме с точностью  $\sim 10\%$  в диапазоне скоростей  $V = (10\text{--}200)$  км с $^{-1}$ . Функция скорости имеет пологий наклон  $dN/d\log V \propto V^{-1}$  для малых круговых скоростей и относительно резкий спад для больших скоростей. Найдено, что стандартная  $\Lambda$ CDM модель даёт хорошее предсказание наблюдаемого обилия галактик промежуточных размеров с  $V_{\text{los}} \gtrsim 70$  км с $^{-1}$  и соответствующими вириальными массами  $\mathfrak{M}_{\text{vir}} \gtrsim 3 \times 10^{10} \mathfrak{M}_{\odot}$ . Однако, пологий наклон функции скорости для галактик с  $V_{\text{los}} \lesssim 40$  км с $^{-1}$  категорически расходится со стандартной  $\Lambda$ CDM моделью, которая предсказывает наклон  $\alpha = -3$  для гало и субгало тёмной материи по результатам численного моделирования. Модели тёплого тёмного вещества (WDM) также не могут объяснить наблюдения, вне зависимости от массы WDM частиц. Переизбыток галактик поля во многих аспектах отличается от более известной проблемы переизбытка спутников в Местной Группе. В отличие от Местной Группы, где проблема проявляется в обилии бедных газом сфероидальных систем с  $V \sim 10$  км с $^{-1}$  и на малых расстояниях от гигантских галактик, в поле проблема существует для богатых газом галактик со звездообразованием, со скоростями  $V \sim 30\text{--}40$  км с $^{-1}$  и на больших расстояниях от массивных соседей.

**Глава 4** посвящена изучению распределения вещества на шкале Местного Сверхскопления. Создание выборки галактик, ограниченной лучевой скоростью относительно центроида Местной Группы  $V_{\text{LG}} < 3500$  км с $^{-1}$  описано в §4.1. Она включает 10914 галактик по всему небу, за исключением зоны сильного поглощения в нашей Галактике  $|b| > 15^\circ$ , и с точностью измерения красного смещения лучше 75 км с $^{-1}$ . Основным источником информации о лучевых скоростях, видимых величинах, морфологических типах и других параметрах галактик были базы данных LEDA и NED (зафиксированные на июнь 2006 года). Особое внимание было уделено очистке выборки от астрономического “спама”: ложных объектов (к примеру, узлы и ассоциации в ярких галактиках) и данных (ошибки фотометрии и оценки красного смещения), опечаток и случаев невер-



ной идентификации. Вдобавок, было проведено независимое отождествление HI-источников из обзора HIPASS в оптике. Нами была проведена визуальная оценка звёздных величин ( $\sim 600$ ) и морфологическая классификация  $\sim 4000$  объектов, для которых эта информация отсутствовала в базах данных и обзорах. В разделе §4.2 описываются два основных подхода к выделению групп и сравниваются основные результаты, полученные с применением этих методов. Отмечено, что при кластеризации, как правило, игнорируются индивидуальные свойства галактик, которые рассматриваются как неразличимые частицы. В диссертации, §4.3, был предложен и разработан критерий выделения малых групп галактик, требующий, чтобы члены группы образовывали гравитационно-связанную систему: полная энергия физической пары галактик должна быть отрицательной и её размер не должен превышать радиуса сферы нулевой скорости. Алгоритм кластеризации использует информацию о координатах, красных смещениях и звёздных величинах объектов. Масса галактик оценивалась через светимость в  $K_s$  фильтре. Точная настройка алгоритма проводилась по близким системам из выборки галактик Местного Объёма, где членство галактик в группах известно по высокоточным измерениям расстояний. Применение критерия кластеризации к наблюдательной выборке 10914 галактик с радиальными скоростями  $V_{LG} < 3500 \text{ км с}^{-1}$  позволило выделить 509 пар галактик (§4.4), 168 тройных систем (§4.5) и 395 групп большей кратности (§4.6). Выборка групп кратностью более 4 членов характеризуется следующими медианными значениями: средний проекционный радиус  $\langle R \rangle = 268 \text{ кпк}$ , дисперсия лучевых скоростей  $\sigma_V = 74 \text{ км с}^{-1}$ , суммарная светимость в  $K_s$ -полосе  $L_K = 1.2 \times 10^{11} L_\odot$ , вириальная масса  $\mathcal{M}_{vir} = 2.4 \times 10^{12} \mathcal{M}_\odot$ . Время пересечения 97% выделенных групп не превосходит 13.7 млрд. лет, с медианой равной 3.8 млрд. лет. Следовательно, основная доля групп, выделенных нашим алгоритмом, может рассматриваться как динамически проэволюционировавшие системы. В группах различной кратности содержится 54% всех галактик или 82% полной светимости Местной Вселенной в данном объёме. Мы не накладывали каких-либо специальных условий, которые могли бы ограничивать изначальную выборку галактик, к примеру, по морфологическому типу, за исключением доступности дан-

ных о лучевых скоростях галактик. Минимальная селективность нашей выборки делает её привлекательной для анализа различных свойств систем галактик в зависимости от окружения. На основе каталога групп в Местном Сверхскоплении Makarov and Karachentsev (2011) был составлен список систем, состоящих исключительно из карликовых галактик, §4.7. В него вошли группы, ярчайшая галактика которых слабее  $M_K = -19$  в  $K_s$ -фильтре. Наиболее населённая группа содержит 6 карликовых галактик. Такие системы составляют примерно 5% всех групп в Местном Сверхскоплении. Однако, с учётом селекционных эффектов, общее число кратных карликовых систем должно быть как минимум в 5–6 раз больше. Большинство рассматриваемых систем находятся в областях пониженной плотности и эволюционируют без влияния массивных галактик. Группы характеризуются размерами 30 кпк и дисперсией скоростей  $11 \text{ км с}^{-1}$ , что существенно меньше соответствующих величин для типичных групп в Местном Сверхскоплении. Наша выборка групп карликовых галактик формирует непрерывную последовательность в распределении по светимостям и массам с ассоциациями, найденными Tully et al. (2006) по анализу трёхмерного распределения близких карликовых галактик. Группы и ассоциации карликов имеют подобные светимости, однако, группы на порядок более компактны. В целом, группы и ассоциации формируют непрерывную последовательность. Как и ассоциации, наши группы имеют высокие отношения масса-светимость, что свидетельствует о присутствии в них большого количества тёмной материи. Каталог 520 наиболее изолированных близких галактик с лучевыми скоростями  $V_{LG} < 3500 \text{ км с}^{-1}$ , охватывающий все небо, описан в §4.8. Эта популяция “космических сирот” составляет 4.8%. Половину каталога “Local Orphan Galaxies” (LOG) составляют галактики морфологических типов Sdm, Im, Ir, где отсутствуют балджи. Медианное отношение  $\mathcal{M}_{\text{gas}}/\mathcal{M}_{\text{star}}$  превышает 1. Распределение на небе галактик нашего каталога выглядит вполне равномерным с некоторыми признаками слабого сгущивания на масштабе  $\sim 0.5 \text{ Мпк}$ . Галактики LOG располагаются в областях, где средняя локальная плотность материи примерно в 50 раз ниже средней глобальной плотности. Мы отмечаем ряд галактик LOG с искажением структуры, которое может быть следствием взаимодействия изолированной галакти-

ки с массивным тёмным объектом. Таблицы каталогов приведены в приложениях к диссертации: пары галактик — В.1; триплеты — В.2; группы большей кратности,  $n \geq 4$ , — В.3; системы кратных карликов — В.4; список изолированных галактик — В.5. Оценка средней плотности вещества в Местной Вселенной приведена в §4.9. Согласно нашим данным, она составляет  $\Omega_M = 0.08 \pm 0.02$  внутри сферы диаметром 80–90 Мпк, принимая  $H_0 = 73 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ . Это существенно меньше глобального значения  $\Omega_M = 0.28\text{--}0.31$ , полученного при изучении флуктуаций микроволнового фона Вселенной. Расхождение между глобальной и локальной величиной  $\Omega_M$  может быть вызвано существованием компоненты тёмного вещества, не связанного с вириальными массами систем галактик.

В **заключении** перечислены основные результаты диссертации.

## Список литературы

- M. R. Blanton, R. H. Lupton, D. J. Schlegel, M. A. Strauss, et al. The Properties and Luminosity Function of Extremely Low Luminosity Galaxies. *ApJ*, **631**, 208–230, September 2005.
- E. I. Kaisina, D. I. Makarov, I. D. Karachentsev, and S. S. Kaisin. Observational database for studies of nearby universe. *Astrophysical Bulletin*, **67**, 115–122, January 2012.
- I. D. Karachentsev and D. I. Makarov. Binary galaxies in the local supercluster and its neighborhood. *Astrophysical Bulletin*, **63**, 299–345, December 2008.
- I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, W. K. Huchtmeier, and D. I. Makarov. A Catalog of Neighboring Galaxies. *AJ*, **127**, 2031–2068, April 2004.
- I. D. Karachentsev, D. I. Makarov, and E. I. Kaisina. Updated Nearby Galaxy Catalog. *AJ*, **145**, 101, April 2013.
- D. Makarov and I. Karachentsev. Galaxy groups and clouds in the local ( $z \sim 0.01$ ) Universe. *MNRAS*, **412**, 2498–2520, April 2011.

- D. Makarov, L. Makarova, L. Rizzi, R. B. Tully, et al. Tip of the Red Giant Branch Distances. I. Optimization of a Maximum Likelihood Algorithm. *AJ*, **132**, 2729–2742, December 2006.
- D. I. Makarov and I. D. Karachentsev. Galaxy triplets in the local supercluster. *Astrophysical Bulletin*, **64**, 24–49, January 2009.
- D. I. Makarov and R. I. Uklein. A list of groups of dwarf galaxies in the local supercluster. *Astrophysical Bulletin*, **67**, 135–146, April 2012.
- P. Norberg, S. Cole, C. M. Baugh, C. S. Frenk, et al. The 2dF Galaxy Redshift Survey: the  $b_J$ -band galaxy luminosity function and survey selection function. *MNRAS*, **336**, 907–931, November 2002.
- E. Papastergis, A. M. Martin, R. Giovanelli, and M. P. Haynes. The Velocity Width Function of Galaxies from the 40% ALFALFA Survey: Shedding Light on the Cold Dark Matter Overabundance Problem. *ApJ*, **739**, 38, September 2011.
- P. J. E. Peebles and A. Nusser. Nearby galaxies as pointers to a better theory of cosmic evolution. *Nature*, **465**, 565–569, June 2010.
- L. Rizzi, R. B. Tully, D. Makarov, L. Makarova, et al. Tip of the Red Giant Branch Distances. II. Zero-Point Calibration. *ApJ*, **661**, 815–829, June 2007.
- J. G. Sorce, H. M. Courtois, S. Gottlöber, Y. Hoffman, and R. B. Tully. Simulations of the Local Universe constrained by observational peculiar velocities. *MNRAS*, **437**, 3586–3595, February 2014.
- R. B. Tully, L. Rizzi, A. E. Dolphin, I. D. Karachentsev, et al. Associations of Dwarf Galaxies. *AJ*, **132**, 729–748, August 2006.
- M. A. Zwaan, M. J. Meyer, and L. Staveley-Smith. The velocity function of gas-rich galaxies. *MNRAS*, **403**, 1969–1977, April 2010.







Бесплатно

Макаров Дмитрий Игоревич  
Построение карты близкой Вселенной

---

Зак. № 199с      Уч. изд. л. – 2.0      Тираж 100  
Специальная астрофизическая обсерватория РАН