

На правах рукописи
УДК 524.72:520.84



УКЛЕИН Роман Иванович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГРУПП КАРЛИКОВЫХ ГАЛАКТИК
В МЕСТНОМ СВЕРХСКОПЛЕНИИ**

(01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

Нижний Архыз – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Специальной Астрофизической Обсерватории Российской Академии Наук

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Макаров Дмитрий Игоревич
(САО РАН)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор
Засов Анатолий Владимирович
(ГАИШ МГУ,
руководитель отдела Внегалактической астрономии)

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Кайсин Серафим Серафимович
(САО РАН)

Ведущая организация: Южный федеральный университет

Защита состоится 18 октября 2013 г. в ____ часов на открытом заседании
Диссертационного совета Д 002.203.01 при Специальной Астрофизической
Обсерватории РАН по адресу: 369167, КЧР, Зеленчукский район, пос. Ниж-
ний Архыз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан "____" сентября 2013 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета

кандидат физ.-мат. наук _____ Шолухова О.Н.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Согласно стандартной космологической модели, плотность энергии видимого (барионного) вещества составляет 4% от общей плотности энергии Вселенной, плотность энергии тёмной материи — 23%, темная энергия — остальные 73%. Наиболее надежная оценка постоянной Хаббла по данным спутника WMAP составляет 70.4 ± 1.4 км/(с·Мпк) [1]. На данный момент природа темной материи неизвестна, поэтому обычно имеют в виду абстрактное холодное темное вещество, проявляющее себя только гравитационно, но именно благодаря значительному вкладу оно служит определяющим фактором зарождения и развития видимых структур во Вселенной. По популярному сценарию иерархического скучивания [2], теоретически обоснованному как модель формирования галактик с холодной темной материей [3], галактики образуются с помощью охлаждения и конденсации газа в потенциальной яме гало темной материи и затем вырастают посредством иерархической серии слияний, сопровождающихся аккрецией газа на развивающиеся структуры.

Быстрое накопление данных, благодаря обзорам SDSS, 2dF, 6dF, HIPASS, ALFALFA, 2MASS и другим, открыло новые возможности для исследования распределения видимой и темной материи в ближней Вселенной. За последние 20 лет количество известных галактик в Местном сверхскоплении и его окрестностях, т.е. имеющих лучевые скорости относительно центроида Местной группы $V_{LG} < 3500$ км/с, возросло более чем в четыре раза. В этом представительном объеме с размерами, сопоставимыми с размерами ячейки однородности, содержится приблизительно 11 тысяч галактик с надежно измеренными лучевыми скоростями. Около половины галактик входит в группы типа нашей Местной группы, и при этом они дают вклад приблизительно 80% по светимости [4].

Группы галактик являются количественно наиболее распространенными структурами галактик и одновременно являются важными космологическими индикаторами темной материи. На сегодняшний день вопрос о вирializedности (замкнутости) групп ставит новые задачи для космологических моделей и алгоритмов кластеризации. Применение в САО РАН нового алгоритма кластеризации, который учитывает индивидуальные свойства галактик, привело к обнаружению неожиданно большого числа пар, состоящих исключительно из карликовых галактик [5]. Многие компоненты

этих систем, расположенных вдалеке от нормальных галактик, обладают большими запасами газа и характеризуются активным звездообразованием. Изучение триплетов и систем более высокой кратности также показало наличие подобных систем [6,4]. По ряду признаков такие системы сходны с ассоциациями карликовых галактик Талли [7]. Ассоциации были выделены в объеме радиусом 3 Мпк и являются гравитационно-связанными, но преимущественно невириализованными структурами. Надо отметить, что в ассоциации были собраны все известные карликовые галактики на шкале 3 Мпк, за исключением сфероидальной ККР 25. Группы и ассоциации карликов имеют высокие по сравнению с нормальными группами отношения масса-светимость, что говорит о значительном содержании в них темной материи.

Интересным результатом анализа распределения вещества в Местном Сверхскоплении оказалось то, что средняя плотность материи в этом объеме $\Omega_{m,loc} = 0.08 \pm 0.02$ оказывается существенно меньше глобальной космической плотности $\Omega_{m,glob} = 0.28 \pm 0.03$ [8]. Данное противоречие между оценками средней локальной и глобальной плотностями может быть разрешено разными способами:

- 1) группы и скопления окружены темными ореолами, их основная масса находится за пределами вириального радиуса;
- 2) местный объем Вселенной не является репрезентативным, будучи расположенным внутри гигантского войда;
- 3) основная доля материи во Вселенной не связана со скоплениями и группами, а распределена между ними в виде массивных темных сгустков.

Изучение кратных систем карликовых галактик с повышенным содержанием темной материи является в свете вышеизложенного логичным продолжением исследований Местного сверхскопления в САО РАН. Фактически, быстрое пополнение данных о точных расстояниях и лучевых скоростях в объеме Местного сверхскопления приводит к постоянной необходимости исследований в этой области, что делает эту тему весьма актуальной.

Цели и задачи исследования

Целью данного исследования является *изучение групп карликовых галактик и свойств индивидуальных объектов вне влияния массивных галак-*

т.к.

При работе над диссертацией были поставлены и решены следующие задачи:

- создание выборки групп, состоящих исключительно из карликовых галактик на масштабе Местного сверхскопления;
- исследование кинематических свойств групп карликовых галактик как отдельных систем;
- определение физических параметров индивидуальных карликовых галактик.

Научная новизна

Новизна работы определяется следующим:

- впервые составлен список групп, состоящих исключительно из карликовых галактик в объеме Местного Сверхскопления;
- определены расстояния улучшенным методом TRGB до 30 галактик в области Гончих Псов на основе анализа диаграмм цвет-величина;
- получен новый наблюдательный материал методом щелевой спектроскопии на БТА;
- в ходе спектральных наблюдений на БТА исследована уникальная изолированная сфероидальная карликовая галактика KKR 25, подтверждена её морфологическая классификация, измерены лучевая скорость галактики и металличность принадлежащей ей планетарной туманности;
- впервые обнаружена планетарная туманность в сфероидальной карликовой галактике за пределами Местной группы.

Научная и практическая значимость

- Список карликовых галактик является основой для статистического анализа и подробного изучения систем данного типа.
- Определение точных расстояний до галактик в Гончих Псах играет важную роль в исследовании структуры и кинематики как этого облака галактик, так и Местного Объема в целом.

- Подтверждена морфологическая классификация КKR 25 как типичной карликовой сфероидальной галактики. Факт изолированности этой галактики накладывает ограничения на модели формирования и эволюции подобных систем.
- Методика поиска планетарных туманностей с помощью диаграмм “цвет-величина” предлагает простой способ для отбора кандидатов в галактиках, разрешаемых на звезды.
- Результаты наблюдений внесены в базу данных HyperLEDA и доступны для использования мировым сообществом.

Основные положения, выносимые на защиту

- 1) Список групп карликовых галактик в Местном Сверхскоплении. Результаты определения основных свойств групп карликовых галактик.
- 2) Результаты детальных исследований на телескопах БТА и GMRT цепочки из 5 карликовых галактик J1244+62 и взаимодействующей пары J0911+42.
- 3) Результаты звездной фотометрии 30 галактик в области CVnI по данным HST. Оценка расстояний до них с помощью усовершенствованного метода TRGB.
- 4) Определение массы облака галактик CVn I по теореме о вириале и по радиусу нулевой скорости. Вывод о значительном содержании тёмной материи в облаке CVn I на основе анализа его структуры и кинематики.
- 5) Результаты спектрального исследования на БТА эмиссионного объекта в галактике КKR25, определение скорости галактики, первое обнаружение планетарной туманности в изолированной карликовой галактике сфероидального типа за пределами Местной группы, оценка ее металличности.

Апробация результатов

Результаты работы излагались на семинарах CAO РАН, на различных российских и международных конференциях:

- 1) XXVI конференция “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, Пушчинская Радиоастрономическая Обсерватория (ПРАО, г. Пушино, 21 – 23 апреля 2009 г.
- 2) 16th Open Young Scientists’ Conference on Astronomy and Space Physics, Киевский Национальный Университет, Киев, Украина, 27 апреля – 2 мая 2009 г.
- 3) Международная конференция Nearby Dwarf Galaxies 2009, САО РАН, п. Нижний Архыз, 14 – 18 сентября 2009 г.
- 4) A universe of dwarf galaxies: Observations, Theories, Simulations. CRAL-IPNL, Лион, Франция, 14 – 18 июня 2010 г.
- 5) XXVIII конференция “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, ПРАО, Пушино, Россия, 19 – 21 апреля 2011 г.
- 6) 18th Open Young Scientists’ Conference on Astronomy and Space Physics, Киевский Национальный Университет, Киев, Украина, 2 – 7 мая 2011 г.
- 7) Международная конференция JENAM–2011: European Week of Astronomy and Space Science. Санкт-Петербург, 4 – 8 июля 2011 г.
- 8) Международная конференция “Galaxy Formation” (Формирование галактик), 18 – 22 июля, Дарем, Великобритания, 2011 г.
- 9) Конференция стран СНГ “50 лет космической эры: реальные и виртуальные исследования неба”, Академия Наук Армении, Ереван, Армения, 21 – 25 ноября 2011 г.
- 10) Международная конференция “Star Formation and Gas Reservoirs in Nearby Groups and Clusters”, Union College, Нью-Йорк, США. 8 – 11 июля 2012 г.
- 11) Рабочее собрание обсерватории Lowell “Star Formation in Dwarf Galaxies”, Флагстафф, США, 19 – 22 июня 2012 г.

Личный вклад автора

В работах 1, 7, 8 автор совместно с другими соавторами участвовал в создании списка групп карликовых галактик и анализе их свойств; в работе 2 автору принадлежат получение спектральных данных на телескопе БТА для $H\alpha$ -объекта и их обработка, определение металличности и скорости, классификация объекта; в работах 3 и 5 автор наравне с другими соавторами участвовал во всех этапах работы, включая проведение звёздной фотометрии галактик в области CVn I, анализ диаграмм “цвет-величина”, определение положений TRGB и написание статьи; в работе 4 автор участвовал в обработке данных по лучевым скоростям и поверхностной фотометрии; в работе 6 автору принадлежат проведение спектральных наблюдений на телескопе БТА и обработка полученных данных, совместный с другими соавторами анализ и интерпретация результатов, написание статьи. Кроме прочего, автором разработан комплекс программ применительно к поставленным задачам для обработки и анализа данных в средах ESO-MIDAS и MATLAB.

Степень достоверности

Достоверность результатов, представленных в диссертации, определяется надёжностью и точностью использованных методов.

Достоверность определения параметров списка групп карликовых галактик определяется, в первую очередь, хорошей точностью измерения лучевых скоростей галактик (~ 10 км/с), так как именно значения скоростей критично важны при кластеризации. При составлении списка было уделено особое внимание качеству данных и очистке выборки от ложных систем из-за неполноты и несовершенства используемых баз данных.

Достоверность оценок содержания кислорода в галактиках цепочки J1244+62, а также эмиссионного объекта в галактике KKR 25 определяется надёжностью классического метода электронной температуры, а также современных эмпирических и полуэмпирических методов [9, 10].

Достоверность определения расстояний до галактик в облаке CVn I определяется точностью усовершенствованного метода TRGB [11, 12].

Достоверность обнаружения планетарной туманности в изолированной карликовой галактике KKR25 определяется качеством спектральных данных и надёжностью критериев классификации эмиссионных объектов между HII-областями и планетарными туманностями, взятых из работы [13].

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из Введения, пяти глав, Заключения и одного Приложения; содержит 36 рисунков, 17 таблиц. Список цитируемой литературы включает 182 наименования. Общий объем диссертации — 145 страниц.

Основное содержание работы

Во **Введении** приводится обоснование актуальности работы, сформулированы цель и научная новизна работы, достоверность результатов, практическая значимость и основные результаты, выносимые на защиту.

В **Главе I** описываются основные методы, используемые в диссертации. Раздел 1.1 посвящен применению метода TRGB для определения расстояний на основе снимков галактик с телескопа им. Хаббла, разрешаемых на звезды. В разделе 1.2 описываются основы звездной фотометрии и соответствующие программные пакеты для обработки снимков. Раздел 1.3 дает краткое теоретическое введение в проблему определения металличностей (относительного содержания кислорода) H II-областей в галактиках и описание основных практических методов их оценки. В разделе 1.4 освещены основные этапы обработки спектральных наблюдательных данных, полученных с помощью прибора SCORPIO на шестиметровом телескопе CAO (БТА) в длиннощелевой моде.

В **Главе II** детально рассмотрена процедура создания списка групп карликовых галактик в Местном сверхскоплении. Выборка создавалась на основе подхода, аналогичного применявшемуся при составлении групп в Местном сверхскоплении. Лучевые скорости, видимые звездные величины, морфологические типы и другие параметры галактик брались из баз данных HyperLEDA и NED. Обе базы содержат большое количество ложных данных, которые во многом возникают из-за автоматических процедур обработки наблюдений. Визуальный контроль параметров галактик в работе над списком являлся важным и наиболее трудоемким этапом.

Алгоритм кластеризации кратных систем карликовых галактик основан на естественном требовании, чтобы полная энергия физической пары галактик была отрицательной. На первом этапе рассчитывались критерии связанности всех пар галактик в выборке: полная энергия системы должна удовлетворять соотношению $\Delta V^2 \Delta R < 2GM$ и галактики должны находиться внутри сферы нулевой скорости $\pi H_0^2 \Delta R^3 < 8GM$, здесь ΔV и ΔR — разница скоростей и проекционных расстояний в паре галактик, M —

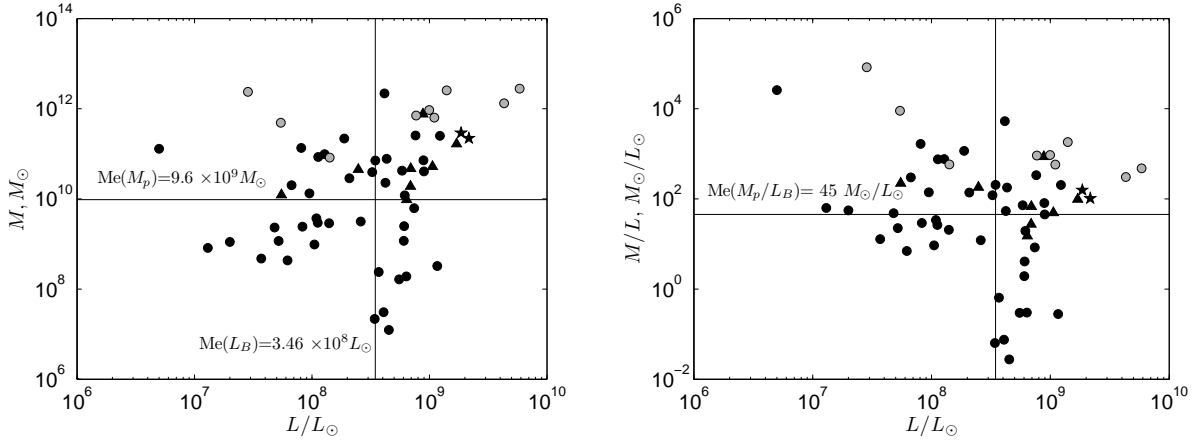


Рис. 1: Слева показана зависимость “масса-светимость” для групп и ассоциаций карликовых галактик; справа — зависимость “отношение масса-светимость — светимость”. Черными символами показаны группы из нашей выборки (пары — точки, триплеты — треугольники, группы с населенностью $n \geq 4$ — звезды). Серыми кружками отмечены ассоциации карликовых галактик.

их суммарная масса. Пары, отобранные по эти критериям, объединялись в группы. Процесс повторялся до тех пор, пока оставалась хотя бы одна пара, удовлетворяющая вышеозначенным критериям. В алгоритме используется информация только о координатах, красных смещениях и звездных величинах объектов. Расстояния до галактик определялись по закону Хаббла с $H_0 = 73$ км/(с·Мпк). Масса оценивалась по интегральной светимости галактики в ближнем инфракрасном диапазоне K_s и в предположении, что все галактики имеют одинаковые отношения “масса-светимость”. Большая часть данных по фотометрии была взята из обзора всего неба 2MASS [14, 15]. В случае отсутствия оценок в K -фильтре оптические величины (B , V , R , I) и величины ближнего инфракрасного диапазона (J , H) пересчитывались в K -величины, как это было описано в серии работ [16, 6, 4].

В список карликовых групп были включены системы, в которых ярчайшая галактика слабее $M_K = -19$ mag в фильтре K , и эти группы не являются подструктурами более ярких образований. Это позволяет отобрать в основном карликовые иррегулярные галактики с небольшим количеством галактик поздних типов среди наиболее ярких объектов.

В результате кластеризации 126 галактик были объединены в 57 систем — 47 пар, 8 триплетов, 1 квинтет и 1 секстет. Медианное значение светимости групп карликовых галактик составляет $3.5 \times 10^8 L_\odot$ в B -полосе, а медианное значение проекционной массы и отношения “масса-светимость” — $9.6 \times 10^9 M_\odot$ и $45 M_\odot/L_\odot$ соответственно. Следует отметить, что инди-

видуальная оценка массы группы карликовых галактик является крайне неопределенной из-за малой кратности систем (в своем большинстве это двойные галактики). Поэтому используются только средние величины по ансамблю. На Рис. 1 сравниваются распределения групп карликовых галактик с ассоциациями карликов [17] на диаграммах масса и отношения “масса-светимость” от полной светимости. Видно, что ассоциации в среднем более массивны, чем группы карликов. Тем не менее, необходимо отметить, что несмотря на разные алгоритмы выделения, существенную разницу в размерах и дисперсиях скоростей, группы и ассоциации карликовых галактик формируют непрерывную последовательность на диаграммах масса-светимость. Этот факт отражает генетическое родство этих систем.

Список групп карликовых галактик, рассматриваемый в данной работе, был положен в основу спектроскопического обзора, ведущегося на 6-м телескопе САО РАН с 2008 года. Основной задачей обзора является исследование химического состава карликовых галактик в группах и выяснение эволюционного статуса таких систем.

В Главе III описаны детальные исследования взаимодействующей пары карликов J0911+42 и группы из 5 карликовых галактик J1244+62. Примечательным является то, что мы наблюдаем слияния карликовых галактик в обеих группах.

В разделе 3.1 представлены результаты исследования взаимодействующей пары карликовых галактик J0911+42. Слабый компонент этой пары — объект низкой поверхностной яркости (в дальнейшем LSB J0911+4238), был впервые найден Д. Макаровым. Яркая SDSS галактика имеет лучевую скорость 1818 ± 10 км/с, измеренную по ее эмиссионным линиям из спектральной части SDSS обзора.

Мы провели поверхностную фотометрию обоих компонентов, используя данные SDSS DR9. Асимптотическая полная звездная величина была оценена из апертурной фотометрии в эллипсах, $g = 15.69$, $r = 15.40$, $i = 15.29$ — для яркого компонента и $g = 18.54$, $r = 18.21$, $i = 18.19$ — для LSB компонента. Используя для перевода звездных величин SDSS стандартную систему Джонсона [18], мы получили оценки полной звездной величины B для А и В компонент, равные 16.02^m и 18.88^m соответственно. Для кинематического расстояния 25 Мpc галактики А и В имеют абсолютные звездные величины в B -фильтре -16.0^m и -13.2^m mag соответственно. Линейное расстояние между SDSS и недавно обнаруженным LSB объектом составляет $1.35'$, что соответствует ~ 10 кпк.

Мы также оценили динамическую массу каждого компонента из $M_{\text{dyn}} = 2.33 \times 10^5 (W_{50}/2)^2 A/2$, где W_{50} — ширина линии в H I на половине максимума км/с, A — видимый диаметр галактики в кпс. Отношение динамической массы к светимости составляет 1.1 (SDSS) и 8.4 (LSB), которые типичны для иррегулярных галактик поздних типов. Отметим, что оценка массы для LSB J0911+4238, возможно, сильно переоценена, потому что эта галактика испытывает приливное искажение. Зная разницу лучевых скоростей обоих компонентов $\Delta V = 42.3 \pm 6$ км/с и проекцию расстояния между ними $R_p = 9.7$ кпк, мы оценили проекционную орбитальную массу этой двойной системы из $M_p = 1.18 \times 10^6 \Delta V^2 R_p$ [19]. Полученное значение составляет $M_p = 2.06 \times 10^{10} M_{\odot}$, то есть в 30 раз выше, чем сумма динамических масс компонентов пары. Данная величина, также как и орбитальное отношение массы к светимости, равное $49 M_{\odot}/L_{\odot}$, указывает на существенное наличие темной материи в этой паре. Отметим, что время пересечения для рассматриваемой пары составляет всего $t_{\text{cr}} = R_p/\Delta V = 0.22$ млрд. лет. Таким образом, слияние этой пары карликов должно произойти за достаточно короткое время.

В разделе 3.2 рассмотрена цепочка из 5 карликовых галактик J1244+62. Проекционное расстояние между крайними галактиками с учетом кинематического расстояния составляет около 190 кпк. Средняя скорость до группы, взвешенная с учетом ошибок скоростей, равна 2675 км/с. Дисперсия скоростей для этой группы достаточно мала и составляет около 20 км/с.

На основе наших наблюдений на 6-метровом телескопе в 2009 и 2010 году с прибором SCORPIO [20] мы измерили содержание кислорода $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ для компонентов В и С группы, получив значения 7.84 ± 0.08 и 7.80 ± 0.09 dex соответственно. Для галактик А и Е спектры не позволили сделать оценки металличности, а для D-компонента мы получили оценку 7.03 ± 0.63 dex. Этот спектр показывает признаки низкой металличности, однако для уточнения требуются дополнительные наблюдения.

В ходе наблюдений этой цепочки на радиотелескопе GMRT были обнаружены облака нейтрального водорода для всех галактик, кроме А компонента. Компоненты С и D находятся в общем облаке нейтрального водорода, что говорит о том, что эти карлики находятся на стадии слияния. В и Е имеют отдельные облака H I с признаками упорядоченного вращения. Динамические массы В и Е компонентов, оцененные по кривым вращения, составляют 5.2 и $2.6 \times 10^9 M_{\odot}$ соответственно. Отношения массы H I к светимости в g -фильтре SDSS L_g для общего облака J1244+62C+D, В и Е

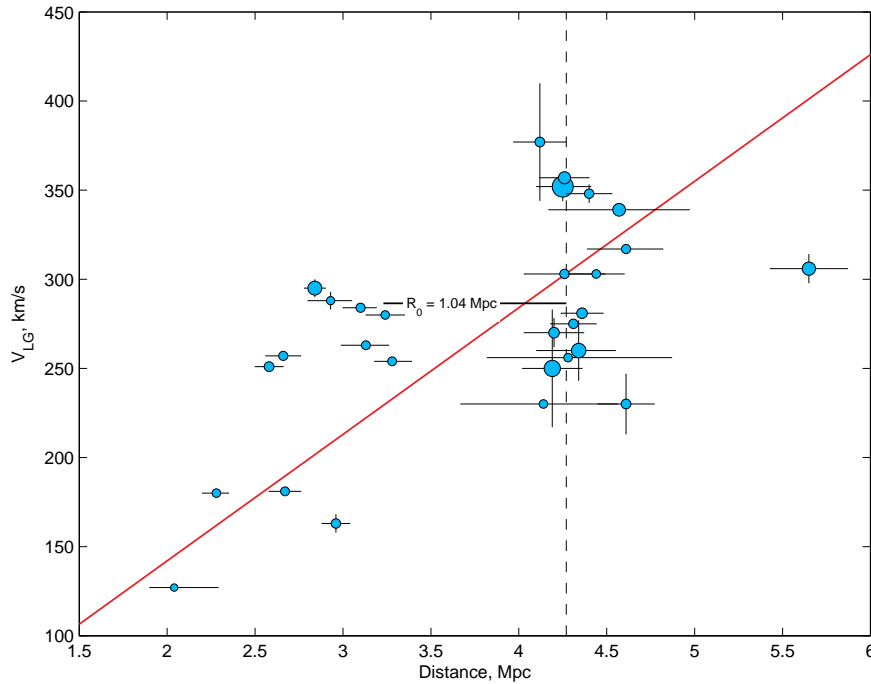


Рис. 2: Диаграмма скорость-расстояние для галактик в области Гончих Псов. Пунктиром показано медианное значение расстояния до центральной концентрации. Линейный закон Хаббла с $H_0 = 71$ км/(с·Мпк) обозначен сплошной линией. На диаграмму нанесено значение радиуса нулевой скорости для облака галактик в Гончих Псах.

компонент оцениваются нами как 0.31, 0.19 и 0.28 соответственно.

Эта группа очень похожа на ассоциации карликовых галактик, рассмотренные в работе Талли и др. 2006 [17]. Форма цепочки говорит о том, что система не находится в вириализованном состоянии, и мы видим только формирующуюся группу с довольно высоким содержанием темной материи.

Глава IV посвящена исследованию структуры рассеянного облака галактик в Гончих Псах. Несмотря на то, что оценки расстояний до многих галактик облака проводились и раньше, в том числе используя вершину ветви красных гигантов, единообразная оценка таких расстояний проводится впервые. На основе фотометрии разрешенных звезд в галактиках с помощью программных пакетов NSTPHOT [21] и DOLPHOT [22], предназначенных для обработки густых звездных полей изображений, полученных с WFPC2/HST и ACS/HST, были определены расстояния до 30 галактик в области CVn I.

Хаббловская диаграмма разбегания галактик в направлении Гончих Псов, иллюстрирующая наши результаты оценок расстояний, показана на Рис. 2. Отметим, что в предыдущем исследовании структуры этого облака

галактик данная область выглядит существенно более “размытой” (Рис. 6 из работы [23]), что не давало сделать вывод о вириализованном состоянии этой группы галактик. Более высокая точность наблюдений позволяет нам выделить зону хаотических движений вокруг центра системы. Группа галактик вокруг М 94 характеризуется медианной скоростью $V_{LG} = 287$ км/с, медианным расстоянием $D = 4.28$ Мпк, дисперсией лучевых скоростей $\sigma = 51$ км/с, скорректированной за ошибки измерений, средним проекционным расстоянием галактик от центра системы $\langle R \rangle = 455$ кпк и полной светимостью $L_B = 1.61 \times 10^{10} L_{\odot}$. Масса системы, оцененная по теореме о вириале, равна $M_{vir} = 1.93 \times 10^{12} M_{\odot}$, что соответствует отношению масса-светимость $(M/L)_{vir} = 120 (M/L)_{\odot}$. Проекционная [19] оценка массы данной системы равна $M_p = 2.56 \times 10^{12} M_{\odot}$ и соответствующее отношение масса-светимость $(M/L)_p = 159 (M/L)_{\odot}$.

Как было отмечено в работе [23], практически все галактики, расположенные ближе центральной концентрации CVn I, имеют положительные пекулярные скорости и формируют характерную “волну”, вызванную натеканием вещества на массивные группы галактик (см., к примеру, [24]). К сожалению, современные данные о расстояниях галактик, расположенных за исследуемым облаком CVn I, не позволяют однозначно утверждать о существовании аналогичного натекания с противоположной стороны группы, хотя определенные намеки на аналогичное поведение и заметны. Среди наших данных только галактика NGC 3738 имеет CMD достаточно глубокую, чтобы измерить расстояние в 5.65 Мпк. По всей видимости, эта галактика “падает” на облако Гончих Псов с противоположной стороны и при этом обладает большой отрицательной пекулярной скоростью $V_{pec} = -95$ км/с. Если предположить, что наблюдаемое распределение галактик на хаббловской диаграмме вызвано гравитационным влиянием вещества, связанного с группой галактик вокруг М 94, мы можем оценить радиус сферы нулевой скорости $R_0 = 1.04 \pm 0.15$ Мпк. Это соответствует массе $M_{R_0} = 2.38 \times 10^{12} M_{\odot}$ (формула 6 из работы [24]). Данная величина находится в хорошем согласии с проекционной оценкой массы.

Полученная нами оценка отношения масса-светимость, $(M/L)_p = 159 (M/L)_{\odot}$, для облака галактик CVn I существенно превышает типичное отношение $M/L_B \sim 30$ для близких групп галактик, таких как Местная Группа и группа М 81 [25].

В Главе V описана уникальная сфероидальная карликовая галактика KKR 25. Эта галактика является одной из наиболее изолированных га-

лактик внутри сферы 3 Мпк вокруг нас. Она расположена на расстоянии 1.9 Мпк от Млечного Пути и на 1.2 Мпк выше Сверхгалактической плоскости сразу на переднем плане Местного войда и находится на расстоянии $R_0 = 0.96 \pm 0.03$ Мпк от сферы нулевой скорости вокруг Местной группы [24]. Несмотря на изолированность, галактика КKR25 лишена газа и выглядит как нормальная карликовая сфероидальная система. Этот факт достаточно интересен, потому что ожидается нахождение карликовых сфероидальных галактик в плотных областях пространства, таких как группы и скопления галактик. Очевидно, что никакое взаимодействие с массивными галактиками не может объяснить свойства КKR25. Эта галактика может играть ключевую роль в тестировании различных сценариев образования карликовых сфероидальных галактик.

Было проведено фотометрическое и спектроскопическое исследование уникальной близкой изолированной карликовой сфероидальной галактики КKR 25. Используя метод TRGB, был оценен модуль расстояния до КKR 25 $(m - M)_0 = 26.42 \pm 0.07$ mag, что соответствует расстоянию $D = 1.93 \pm 0.07$ Мпк. Новое значение находится в хорошем соответствии с предыдущими измерениями расстояния.

На основе изображений *HST*/WFPC2 и моделей разрешенного на звезды населения была проведена реконструкция истории звездообразования КKR 25. Согласно нашим измерениям, 62 % полной массы звезд образовалось в начальной вспышке звездообразования, которая произошла 12.6—13.7 млрд. лет назад. Также найдены свидетельства присутствия звездного населения среднего возраста (от 1 до 4 млрд. лет), без признаков существенного обогащения металлами.

Распределение звезд в галактике хорошо описывается экспоненциальным профилем с депрессией в центре. Экспоненциальная шкала $h = 156_{-11}^{+12}$ пк. Профиль тянется на 5 шкал. Размеры депрессии в центре составляют $R = 170_{-30}^{+22}$ (сравнимо с экспоненциальной шкалой).

Мы не нашли подтверждений существования шаровых скоплений в КKR 25. Первоначально отобранные кандидаты оказались фоновыми объектами — галактикой типа S0 на $z = 0.34$ и квазаром на $z = 0.75$.

В $H\alpha$ -обзоре облака галактик в Гончих Псах [26] в северной части галактики КKR25 была обнаружена слабая $H\alpha$ -эмиссия. Однако на изображениях с камерой WFPC2 в этой части галактики не видно никаких протяженных объектов. Мы отождествили $H\alpha$ -объект с очень голубой звездой, которая обведена кружком на Рис. 3 на диаграмме цвет-величина. Глубокие

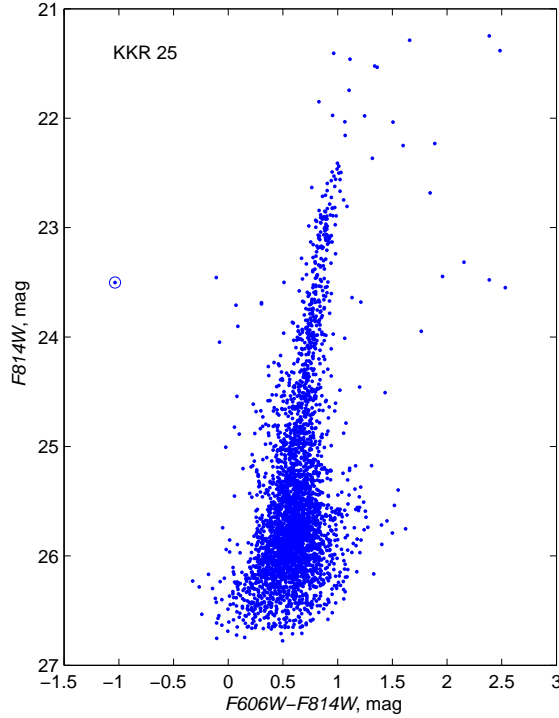


Рис. 3: Диаграмма цвет–величина галактики KKR 25, построенная по результатам фотометрии изображений HST/WFPC2. Экстремально голубой объект, оказавшийся планетарной туманностью, обведен кружком.

наблюдения этой галактики с помощью радиотелескопа GMRT не показали существенной HI-эмиссии в диапазоне $-256 < V_h < -45$ км/с на уровне $M_{HI} = 0.8 \times 10^5 M_\odot$, из чего авторы работы [27] сделали заключение об отсутствии HI-эмиссии в KKR 25.

Спектроскопия $H\alpha$ -объекта в KKR 25 показала, что это планетарная туманность с содержанием кислорода $12 + \log(O/H) = 7.60 \pm 0.07$ dex. Таким образом, нами неожиданно была обнаружена PN в карликовой сфероидальной галактике за пределами Местной группы. Поиск экстремально голубых звезд на диаграммах “цвет-величина” представляется хорошим методом поиска кандидатов в планетарные туманности в близких галактиках.

Мы определили гелиоцентрическую скорость KKR 25 по эмиссионным линиям планетарной туманности $V_h = -79 \pm 9$ км/с и по интегральному свету галактики $V_h = -65 \pm 15$ км/с.

Морфология и изолированное положение KKR 25 лучше объясняется “первичным сценарием” формирования, нежели сценарием “приливного обдирания”. Существование большого количества карликовых сфероидальных галактик в поле могло бы объяснить избыток карликовых галактик в модельных расчетах по сравнению с наблюдениями.

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы работы.

В приложении к диссертации в виде таблицы дан список групп карликовых галактик, его описание приведено в Главе II.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

- 1) *Макаров Д.И., Уклеин Р.И.* — Список групп карликовых галактик в Местном сверскоплении. Астрофизический бюллетень. Том **67**, No.2, с.141-153 (2012).
- 2) *Makarov D., Makarova L., Sharina M., Uklein R., Tikhonov A., Guhathakurta P., Kirby E., Terekhova N.* — A unique isolated dwarf spheroidal galaxy at D=1.9 Mpc. MNRAS — V. **425**, Is. 1, pp. 709–719. (2012).
- 3) *Макаров Д.И., Макарова Л.Н., Уклеин Р.И.* — Расстояния до галактик в Гончих Псах. Астрофизический бюллетень. Том **68**, No.2, с.125 (2013).
- 4) *Makarov D., Karachentsev I.D., Chengalur J.N., Uklein R., Marchuk A.* — A coupling pair of dwarfs in Lynx. MNRAS, 2013, arXiv:1303.2477.
- 5) *Uklein R. I.* — 3D-structure of the Canes Venatici I Cloud. YSC'16 Proceedings of Contributed Papers (eds. Choliy V. Ya., Ivashchenko G.), pp. 42–45 (2009).
- 6) *Uklein R. I., Makarov D. I., Roychowdhury S.* — Rendez-Vous of Dwarfs. EAS Publications Series, Volume **48**, pp.159–160 (2011).
- 7) *Makarov D., Karachentsev I., Uklein R.* — Groups of Dwarf Galaxies in the Local Supercluster. EAS Publications Series, Volume **48**, pp.289–294 (2011).
- 8) *Uklein R., Makarov D.* — Groups of Dwarf Galaxies in the Local Supercluster. "Fifty years of Cosmic Era: Real and Virtual Studies of the Sky Proceedings of the Conference of Young Scientists of CIS Countries,

held 21-25 Nov 2011, in Yerevan, Armenia. Editors: A.M. Mickaelian, O.Yu. Malkov, N.N. Samus. Yerevan: National Academy of Sciences of the Republic of Armenia (NAS RA), pp. 216–220 (2012).

Список литературы

- [1] Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Sky Maps, Systematic Errors, and Basic Results / N. Jarosik, C. L. Bennett, J. Dunkley et al. // *ApJS*. — 2011. — Vol. 192. — P. 14.
- [2] White, S. D. M. Core condensation in heavy halos - A two-stage theory for galaxy formation and clustering / S. D. M. White, M. J. Rees // *MNRAS*. — 1978. — Vol. 183. — P. 341–358.
- [3] Formation of galaxies and large-scale structure with cold dark matter / G. R. Blumenthal, S. M. Faber, J. R. Primack, M. J. Rees // *Nature*. — 1984. — Vol. 311. — P. 517–525.
- [4] Makarov, D. Galaxy groups and clouds in the local ($z = 0.01$) Universe / D. Makarov, I. Karachentsev // *MNRAS*. — 2011. — Vol. 412. — P. 2498–2520.
- [5] Karachentsev, I. D. Binary galaxies in the local supercluster and its neighborhood / I. D. Karachentsev, D. I. Makarov // *Astrophysical Bulletin*. — 2008. — Vol. 63. — P. 299–345.
- [6] Makarov, D. I. Galaxy triplets in the local supercluster / D. I. Makarov, I. D. Karachentsev // *Astrophysical Bulletin*. — 2009. — Vol. 64. — P. 24–49.
- [7] Associations of Dwarf Galaxies / R. B. Tully, L. Rizzi, A. E. Dolphin et al. // *AJ*. — 2006. — Vol. 132. — P. 729–748.
- [8] Karachentsev, I. D. Missing dark matter in the local universe / I. D. Karachentsev // *Astrophysical Bulletin*. — 2012. — Vol. 67. — P. 123–134.
- [9] Izotov, Y. I. MMT Observations of New Extremely Metal-poor Emission-Line Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey / Y. I. Izotov, T. X. Thuan // *ApJ*. — 2007. — Vol. 665. — P. 1115–1128.
- [10] Pilyugin, L. S. Abundance determination in H II regions from spectra without the $[\text{O II}]\lambda 3727 + \lambda 3729$ line / L. S. Pilyugin, L. Mattsson // *MNRAS*. — 2011. — Vol. 412. — P. 1145–1150.
- [11] Tip of the Red Giant Branch Distances. I. Optimization of a Maximum Likelihood Algorithm / D. Makarov, L. Makarova, L. Rizzi et al. // *AJ*. — 2006. — Vol. 132. — P. 2729–2742.
- [12] Tip of the Red Giant Branch Distances. II. Zero-Point Calibration / L. Rizzi,

- R. B. Tully, D. Makarov et al. // *ApJ*. — 2007. — Vol. 661. — P. 815–829.
- [13] Kniazev, A. Y. Spectroscopy of two PN candidates in IC10 / A. Y. Kniazev, S. A. Pustilnik, D. B. Zucker // *MNRAS*. — 2008. — Vol. 384. — P. 1045–1052.
- [14] 2MASS Extended Source Catalog: Overview and Algorithms / T. H. Jarrett, T. Chester, R. Cutri et al. // *AJ*. — 2000. — Vol. 119. — P. 2498–2531.
- [15] The 2MASS Large Galaxy Atlas / T. H. Jarrett, T. Chester, R. Cutri et al. // *AJ*. — 2003. — Vol. 125. — P. 525–554.
- [16] Karachentsev, I. D. Binary galaxies in the local supercluster and its neighborhood / I. D. Karachentsev, D. I. Makarov // *Astrophysical Bulletin*. — 2008. — Vol. 63. — P. 299–345.
- [17] Associations of Dwarf Galaxies / R. B. Tully, L. Rizzi, A. E. Dolphin et al. // *AJ*. — 2006. — Vol. 132. — P. 729–748.
- [18] The Sloan Digital Sky Survey View of the Palomar-Green Bright Quasar Survey / S. Jester, D. P. Schneider, G. T. Richards et al. // *AJ*. — 2005. — Vol. 130. — P. 873–895.
- [19] Heisler, J. Estimating the masses of galaxy groups - Alternatives to the virial theorem / J. Heisler, S. Tremaine, J. N. Bahcall // *ApJ*. — 1985. — Vol. 298. — P. 8–17.
- [20] Afanasiev, V. L. The SCORPIO Universal Focal Reducer of the 6-m Telescope / V. L. Afanasiev, A. V. Moiseev // *Astronomy Letters*. — 2005. — Vol. 31. — P. 194–204.
- [21] Dolphin, A. E. WFPC2 Stellar Photometry with HSTPHOT / A. E. Dolphin // *PASP*. — 2000. — Vol. 112. — P. 1383–1396.
- [22] Dolphin, A. E. Numerical methods of star formation history measurement and applications to seven dwarf spheroidals / A. E. Dolphin // *MNRAS*. — 2002. — Vol. 332. — P. 91–108.
- [23] Galaxy flow in the Canes Venatici I cloud / I. D. Karachentsev, M. E. Sharina, A. E. Dolphin et al. // *A&A*. — 2003. — Vol. 398. — P. 467–477.
- [24] The Hubble flow around the Local Group / I. D. Karachentsev, O. G. Kashibadze, D. I. Makarov, R. B. Tully // *MNRAS*. — 2009. — Vol. 393. — P. 1265–1274.
- [25] Karachentsev, I. D. The Local Group and Other Neighboring Galaxy Groups / I. D. Karachentsev // *AJ*. — 2005. — Vol. 129. — P. 178–188.
- [26] Kaisin, S. S. Canes Venatici I cloud of galaxies seen in the H α line / S. S. Kaisin, I. D. Karachentsev // *A&A*. — 2008. — Vol. 479. — P. 603–624.
- [27] Begum, A. A search for HI in some peculiar faint dwarf galaxies / A. Begum,

J. N. Chengalur // MNRAS. — 2005. — Vol. 362. — P. 609–611.

Бесплатно

Уклеин Роман Иванович

Исследование групп карликовых галактик в Местном сверхскоплении