

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ РАН

№ гос. регистрации 01201169408

УДК 520.2/.8

УТВЕРЖДАЮ
Директор САО РАН
член-корреспондент РАН Ю.Ю.Балега

16 ноября 2012 г.

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЙ ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

В рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры
инновационной России» на 2009-2013 годы

по теме:
Космология ближней Вселенной

Шифр 2011-1.5-508-004-015
Государственный контракт от « 29 » апреля 2011 г. № 14.740.11.0901

этап № 4

Наименование этапа: «Исследование галактик Местной Вселенной»

Руководитель НИР,
канд. физ.-мат. наук,

А.А.Клыпин

16 ноября 2012 г.

Нижний Архыз 2012

Список исполнителей

Руководитель темы, кандидат физ.-мат. наук,		Клыпин А.А. (введение, раздел 1 и 2, заключение)
Исполнители темы:		
Заведующий лаборатории, кандидат физ.-мат. наук,		Макаров Д.И. (введение, заключение, раздел 1, 2)
Главный научный сотрудник, доктор физ.-мат. наук, профессор,		Караченцев И.Д. (раздел 1, 2)
Ведущий научный сотрудник, кандидат физ.-мат. наук,		Моисеев А.В. (раздел 1)
Ведущий научный сотрудник, кандидат физ.-мат. наук		Пустильник С.А. (раздел 1,2)
Старший научный сотрудник, кандидат физ.-мат. наук,		Кайсин С.С. (раздел 1)
Старший научный сотрудник, кандидат физ.-мат. наук,		Макарова Л.Н. (раздел 2)
Старший научный сотрудник, кандидат физ.-мат. наук,		Митронова С.Н. (раздел 2)
Старший научный сотрудник, кандидат физ.-мат. наук,		Шарина М.Е. (раздел 1)
Научный сотрудник, кандидат физ.-мат. наук,		Насонова О.Г. (раздел 2)
Младший научный сотрудник		Кайсина Е.И. (раздел 1)
Инженер-программист		Теплякова А.Л. (раздел 1)
Старший лаборант		Короткова Г.Г. (раздел 1, 2)
Младший научный сотрудник		Уклеин Р.И. (раздел 1,2)
Аспирант		Савченко С.С. (раздел 2)
Аспирант		Лямина Ю.А. (раздел 1)
Ведущий инженер		Терехова Н.А. (раздел 2)
Студент		Сафонова Е.С. (раздел 1)

Реферат

Отчет состоит из 52 страниц, 13 рисунков и 1 приложения.

Объект исследования – галактики и их распределение в ближней Вселенной.

Цель работы – исследование близких галактик; получение космологических параметров; создание базы данных галактик Местного Объем; подготовка высококвалифицированных специалистов; развитие научно-исследовательского коллектива, специализирующегося в области внегалактической астрономии; обеспечение достижения научных результатов мирового уровня; подготовка и закрепление в сфере науки и образования научных и научно-педагогических кадров, формирование эффективных и жизнеспособных научных коллективов.

В процессе работы над четвертым этапом государственного контракта проведены обобщение и оценка результатов выполненных исследований, выполнено сопоставление, полученных данных в контексте современных представлений о Вселенной. Кроме того, коллективом продолжается На обзор всех галактик Местного Объем на 6-метровом телескопе Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН); исследуются галактики в близких войдах, с целью изучения их химического состава и эволюционного статуса; ведется обработка накопленных и новых наблюдательных данных о близких галактиках. Обобщаются и систематизируются наблюдательные данные, исследуются зависимости и физические свойства близких галактик.

Исследование по космологии ближней Вселенной с необходимостью включает области с большим диапазоном плотностей материи. Из них области низкой плотности (войды) оказываются наименее изученными в силу эффектов наблюдательной селекции, с одной стороны, и в силу ограниченных возможностей моделирования эволюции галактик на масштабах менее 10^{10} солнечных масс. В рамках проекта изучалась большая выборка маломассивных галактик в близком войде Lynx-Cancer. Получены ясные указания на пониженную (в среднем на 30%) металличность газа для галактик войда, указывающие на их замедленную эволюцию. Кроме того, впервые обнаружено, что в этом войде и в войде Eridanus имеется заметная (~10%) часть населения, которая имеет пониженную в разы металличность и высокую массовую долю газа (95-99%), а для половины таких объектов - отсутствие следов старого населения во внешних частях галактик. Наличие таких необычных маломассивных галактик в войдах не было пока предсказано в моделях и

является хорошим стимулом для развития детальных моделей образования и эволюции галактик, в частности в диапазоне барионных масс 10^7 - $10^9 M_{\odot}$.

Изученная нами очень изолированная карликовая галактика KKR 25 является в значительной мере уникальной, поскольку принадлежит к типу сфероидальных карликов, где не обнаруживается газа или текущего образования звезд. Считается, что объекты такого типа формируются в тесном окружении, где влияние близких соседей заставляет эти карлики терять газ, а, следовательно, и материал для текущего звездообразования. Существование таких объектов, как KKR 25, подтверждает так называемый «первичный» сценарий, где карликовые сфероидальные галактики формируются в малых темных гало (меньше 2×10^8 солнечных масс) до эпохи реионизации, и их эволюция происходит благодаря процессам охлаждения и обратной связи в ранней Вселенной.

Построены соотношения Фундаментальной Плоскости для динамически-горячих звездных систем (эллиптических галактик, сфероидальных и ультракомпактных карликовых галактик, шаровых скоплений). Определены наклоны важных в космологическом смысле зависимостей: полная масса — металличность, полная масса — отношение динамической массы к светимости, полная масса — среднее содержание железа на единицу светимости. Сделан вывод о происхождении ультра-компактных карликовых галактик как ядер нормальных эллиптических галактик, испытавших впоследствии приливное воздействие от других галактик в плотных областях групп и скоплений.

Получение оценки средней плотности материи в Местной Вселенной мы считаем одним из наиболее важных результатов нашей работы. Различие между глобальным значением плотности материи, $\Omega_m = 0.28 \pm 0.03$ и нашей локальной оценкой $\Omega_m = 0.08 \pm 0.02$ на масштабе 80 Мпк выходит далеко за пределы случайных погрешностей. Чтобы устранить это противоречие, необходимо предположить наличие значительных масс скрытой материи за пределами вириальных областей групп и скоплений галактик. Такая рассредоточенная компонента темной материи, если она существует, превосходит в два раза суммарную массу темных гало, в которые погружены галактики.

Подготовлены курсы лекций «Войды как элементы крупномасштабной структуры и свойства галактик в них расположенных» Пустильник С.А., «Космология ближней Вселенной» Макаров Д.И. Разработаны практикумы по курсу «Наблюдательная

космология ближней Вселенной»: Шарина М.Е. «Апертурная звездная фотометрия и определение расстояния до галактик методом ярчайших сверхгигантов»; Макарова Л.Н. «Определение фотометрического расстояния до галактик методом TRGB и диаграмма Хаббла».

Теплякова А.Л. успешно защитила кандидатскую диссертацию по теме «Эволюция карликовых галактик и ее связь с окружением» (25 марта 2012 г.) Моисеев А.В. успешно защитил докторскую диссертацию по теме «Структура и эволюция галактик по наблюдениям их внутренней кинематики» (17 сентября 2012 г.). Пустильник С.А. представил докторскую диссертацию «Поиск и исследование необычных маломассивных галактик, включая объекты с активным звездообразованием, низкой металличностью и население пустот» на Астрофизическом семинаре САО РАН (25 октября 2012 г.).

Под руководством участников проекта обучались в аспирантуре Уклеин Р.И. (САО РАН), Егоров О.В. (ГАИШ МГУ), Кайсина Е.И. (САО РАН) и Лямина Ю.А. (ЮФУ). За время выполнения проекта были выполнены 2 дипломные работы, Тереховой Н.А. (ГАИШ МГУ) и Ильиной Е.А. (КазФГУ). Большое количество студентов проходили практику в САО РАН под руководством участников проекта.

Степень внедрения – результаты работы были представлены на российских и международных научных конференциях и семинарах. Коллектив опубликовал 31 работу в высокорейтинговых научных рецензируемых журналах и материалах конференций, из них 13 в 2012 году.

Полученные результаты являются базой для сравнения наблюдений и предсказаний современных теорий формирования и эволюции галактик.

Содержание

Список исполнителей.....	2
Реферат	3
Введение	7
1 Сопоставление наблюдательных данных с результатами моделирования.....	12
Местный Объем	12
Ближние войды	14
Много-параметрические соотношения.....	19
Кинематика газа в карликовых галактиках.....	24
2 Определение космологических параметров	29
Местное сверхскопление галактик.....	29
Ближние карликовые галактики.....	33
Шаровые скопления.....	37
3 Разработка программы внедрения результатов ПНИР в образовательный процесс.....	38
Заключение.....	42
Сопоставление наблюдательных данных с результатами моделирования.....	42
Определение космологических параметров.....	43
Разработка программы внедрения результатов ПНИР в образовательный процесс	44
Выполнение индикаторов и показателей проекта	44
Список литературы.....	46
Приложение А: Список публикаций коллектива	49

Введение

Проверка различных космологических моделей обычно осуществляется по наблюдениям далеких объектов с красными смещениями $z \sim 1$ и свойствам фоновых излучений, образовавшихся в эпоху $z \sim 1000$. Однако структура и кинематика близких $z \sim 0$ объемов Вселенной также является источником важной космологической информации. В Местной Вселенной, ограниченной условно радиусом 10 Мпк, обнаружено большое количество карликовых галактик, скорости и расстояния которых трассируют Хаббловский поток с беспрецедентно высокой подробностью по сравнению с удаленными объектами. Исследование звездного населения близких галактик позволяет восстановить историю звездообразования в них с разрешением $\sim 10^8$ - 10^9 лет. Фактически, за последние 10-15 лет изучение Местной вселенной формируется в самостоятельную и плодотворную ветвь наблюдательной космологии, что неоднократно подчеркивалось Пиблсом (1993, 2001, 2010).

Высокая плотность наблюдательных данных о галактиках в Местном Объеме позволяет иметь достаточно полное представление о пространственном распределении светящейся и темной материи в нем. Однако, на масштабе $D \sim 10$ Мпк относительные флуктуации плотности светимости чрезвычайно велики. Поэтому Местный объем не может считаться репрезентативным в смысле его кинематики и динамики. Чтобы достичь лучшей представительности наблюдательной выборки, Макаров и Караченцев (2011) рассмотрели в 100 раз больший объем вокруг нашей Галактики. Этот объем включает в себя все известные галактики с лучевыми скоростями $V_{LG} < 3500$ км/с относительно центра Местной группы за вычетом зоны сильного поглощения на галактических широтах $|b| < 15^\circ$. Данный объем диаметром 96 Мпк (при $H_0 = 73$ км/с/Мпк) содержит около 11 тысяч галактик. Большинство из них принадлежит Местному сверхскоплению, однако в этот объем («Местную Вселенную») попадают отроги и других соседних сверхскоплений. Основываясь на данных Sloan Digital Sky Survey, Папай и Запуди (2010) оценили, что вариации суммарной светимости галактик в кубе с ребром 100 Мпк составляют около 10%. Следовательно, рассматриваемый объем Местной Вселенной вполне удовлетворяет условию репрезентативности выборки.

Как показывают наблюдательные данные, основная часть галактик обитает в группах с числом членов от двух до сотни и более. Наша Галактика и ее спутники не являются

исключением, образуя группу с населением порядка 25 членов. Основные особенности Местной группы и других самых близких галактик (и поэтому наиболее изученных) групп были рассмотрены Karachentsev et al. (2005). Из-за своего обилия группы галактик вносят определяющий вклад в среднюю плотность материи во вселенной. Однако, согласно Karachentsev (2005) этот вклад в Местном Объем с радиусом 10 Мпк вокруг нас составляет всего $\Omega_{loc} \sim 0.04$ в единицах критической плотности, что существенно меньше глобального космического значения $\Omega \sim 0.28$ (Spergel et al. 2007) при постоянной Хаббла $H_0 = 73$ км/с/Мпк. Такое различие может быть обусловлено непрезентативностью Местного объема, где статистика оценок массы групп по вириальным движениям галактик оказывается недостаточной, или же она не охватывает все разнообразие групп по их морфологическому населению и структуре. Поэтому крайне важно определить среднюю локальную плотность материи в большем объеме сравнимом с так называемой «ячейкой однородности» вселенной (~ 100 Мпк).

Карликовые галактики являются самыми распространенными объектами во Вселенной. Вопрос звездообразования в карликовых галактиках является крайне важным для понимания их происхождения и эволюции. Ближняя Вселенная (до 10 Мпк) дает особое преимущество при исследовании карликовых галактик. В пределах этого объема большинство галактик разрешается на отдельные звезды при наблюдениях с самыми большими телескопами и космическим телескопом Хаббла, позволяя напрямую изучать звездное население в таких галактиках.

Считающаяся почти общепринятой космологическая Λ CDM-модель сталкивается с проблемой избытка модельных спутников массивных гало (Klypin et al., 1999) по сравнению с количеством известных спутников – членов Местной Группы. Недавние исследования неполноты обзора SDSS указывают на возможное значительное увеличение числа карликовых спутников, что, однако, способно сгладить проблему, но не решить ее. Аналогичная проблема переизбытка карликовых гало в модельных расчетах наблюдается и вдали от массивных объектов. Модель предсказывает отсутствие звездной компоненты в гало темной материи с максимальной круговой скоростью порядка 40 км/с. Однако, в наблюдениях известны достаточно изолированные галактики с суммарной амплитудой регулярной и хаотической компоненты поля скоростей порядка и даже меньше 15-20 км/с. Видимый парадокс допускает возможные как теоретические, так и наблюдательные решения.

Исследование войдов, как элементов пространственной структуры материи, было довольно популярно в последние годы. Это в первую очередь связано с завершением больших обзоров SDSS и 2dFR, которые дали исследователям сотни тысяч лучевых скоростей галактик. Однако, в силу хорошо известных эффектов наблюдательной селекции, изучение достаточно больших войдов (с диаметрами в 30-50 Мпк), хорошо выделяемых только на расстояниях, заметно больше их размеров, приводит к тому, что наиболее слабые галактики, видимые внутри таких войдов, имеют светимости лишь в 10-20 раз ниже, чем «яркие» галактики (с $M_B^* < -20.5$), по которым эти войды обрисованы (т.е. обычно изучаются свойства галактик с абсолютными величинами не слабее, чем $M_B \sim -17$). Эти галактики с массами порядка и выше чем масса Большого Магелланово Облако, из-за существенной собственной массы не очень чувствительны к влиянию окружения. Галактики же в 10-100 раз менее массивные остаются не изученными в таких войдах. Поэтому, чтобы продвинуться в понимании всего спектра галактик в войдах, их формирования и эволюции, необходимо использовать не такие большие, но значительно более близкие войды.

В современной LCDM космологии проблема войдов состоит в первую очередь в том, что предсказываемое в численных моделях количество гравитационно-связанных объектов (гало темной материи) во много раз превышает количество наблюдаемых в них галактик (например, Peebles 2001). Безусловно, правильный учет всех физических процессов и эффектов для образования галактик, сопоставление гало, как модельных объектов, и галактик, как реальных барионных конфигураций, наблюдаемых либо по свету звезд, либо по излучению их газа (линия HI 21 см), оставляет еще достаточно серьезный резерв лучшего соответствия. Определение и учет эффектов наблюдательной селекции для поиска слабых галактик в войдах тоже могут помочь в более корректном сравнении моделей и наблюдений. Таким образом, описанная ситуация показывает необходимость иметь дело с близкими войдами и глубокими выборками галактик в них.

Основные физические характеристики (масса, размер, форма, скорость движения вещества) разнообразных космологических структур (галактики, скопления галактик, звезды) хорошо объясняются основными физическими принципами, которые, например, описаны в книгах Зельдовича и Новикова «Строение и эволюция Вселенной», Пиблза «Структура Вселенной в больших масштабах», Падманабхана «Теоретическая астрофизика». Однако существуют промежуточные звенья космической иерархии

(карликовые галактики, шаровые скопления), а также объекты, изменившие свои характеристики в ходе динамической эволюции и вспышек звездообразования. Их свойства не укладываются в «диетические» теоретические инструкции. Наша работа направлена на понимание происхождения и физики этих объектов.

Для определения таких космологических параметров, как постоянная Хаббла, плотность барионной и темной материи, необходимо развивать независимые от красного смещения методы определения расстояний до галактик. Объекты, находящиеся в пределах приливного радиуса от центра группы или скопления, подвержены гравитационному воздействию, и имеют значительные хаотические пекулярные скорости (см. например, Караченцев arXiv:1204.3377). Для них расстояния не могут быть определены по красному смещению. Одним из наиболее популярных подходов к решению проблемы для дисковых (спиральных и позднего морфологического типа галактик) является использование зависимости Талли-Фишера между светимостью и максимальной угловой скоростью вращения галактики. Усилиями многих творческих групп ученых, включая нашу, удалось выяснить, что наклон зависимости Талли-Фишера является разным для разных спектральных диапазонов и разных морфологических типов галактик. Разброс соотношения минимален в инфракрасной области. Считается, что в ближнем инфракрасном диапазоне он обусловлен только ошибками наблюдений (Verheijen 2001).

Целью работ по четвертому этапу госконтракта является обобщение и оценка результатов выполненных исследований. В основе работы лежат наблюдения близких галактик и анализ их свойств, полученные на 6-метровом телескопе САО РАН и других телескопах.

Содержание работ на четвертом этапе госконтракта:

1. Сопоставление наблюдательных данных с результатами моделирования
2. Определение космологических параметров
3. Разработка программы внедрения результатов ПНИР в образовательный процесс

Актуальность работ, проводимых по госконтракту, определяется активным развитием наших представлений о Вселенной, как в области теории так и наблюдений. Близкая Вселенная предоставляет уникальную возможность подробного изучения мира галактик, недоступных на больших расстояниях. Многие проблемы сценария образования и эволюции особенно ярко проявляются при изучении галактик малых масс, широко

представленные в наблюдениях именно близких галактик.

Новизна работы. Коллектив проводит наблюдения на наземных и космических телескопах в оптическом и радиодиапазоне. Основные работы выполняются на 6-метровом телескопе Специальной Астрофизической Обсерватории Российской Академии Наук (САО РАН). Все наблюдения являются новыми. Коллективом созданы база данных «Каталог и Атлас галактик Местного Объем», а так же каталоги групп и изолированных галактик на шкале 40 Мпк. Каталоги, созданные нашим коллективом, не имеют аналогов и востребованы мировым сообществом.

1 Сопоставление наблюдательных данных с результатами моделирования

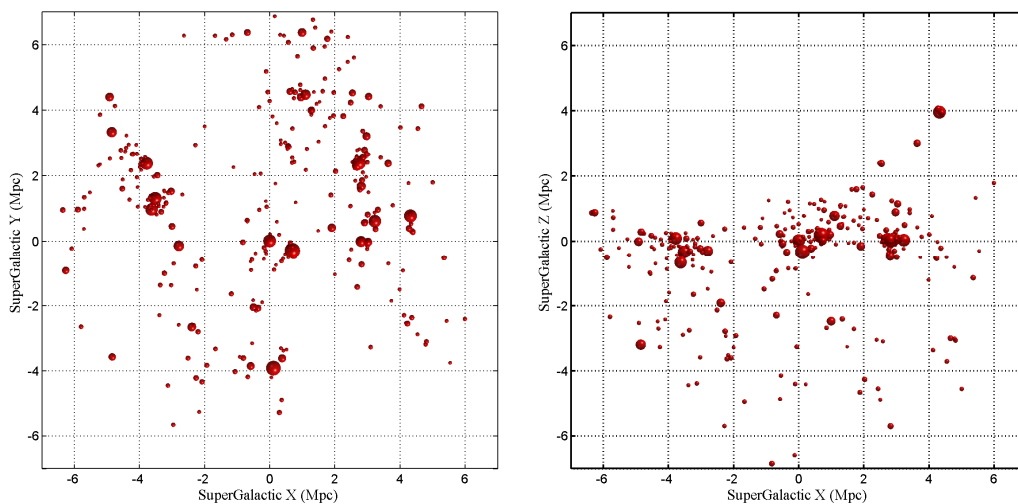
Местный Объем

Как неоднократно отмечалось Peebles (1993), Peebles & Nusser (2001), Peebles et al. (2010), исследование репрезентативной выборки самых близких галактик является источником важных сведений о формировании и эволюции крупномасштабной структуры вселенной. Широко практикуемое в настоящее время N-body моделирование в рамках различных космологических моделей предполагает наблюдательную проверку его результатов путем сравнения со свойствами галактик в некотором образцовом объеме фиксированного размера. Однако, почти все существующие каталоги галактик представляют собой выборки, ограниченные потоком (видимой величиной), а не расстоянием галактик. Поскольку галактики отличаются большим диапазоном их светимостей и поверхностных яркостей, то формирование выборки, ограниченной фиксированным объемом, оказывается исключительно сложной задачей.

Изучение галактик в Местном Объеме, ограниченном условно радиусом $D=10$ Мпк, обладает очевидным преимуществом, поскольку в нем было обнаружено множество карликовых галактик, недоступных наблюдениям на больших расстояниях. Эти «пробные частицы» с измеренными лучевыми скоростями и расстояниями трассируют Хаббловский поток с беспрецедентно высокой детальностью. До конца 90-х годов развитие наблюдательной космологии Местной Вселенной сдерживалось скудностью данных о расстояниях даже самых близких галактик, расположенных сразу за границами Местной группы. Использование уникальной разрешающей способности космического телескопа Хаббла, а также нового метода определения расстояний до галактик любого типа по светимости верхушки ветви красных гигантов (Lee et al. 1993) привело к массовому измерению расстояний до более чем 250 соседних галактик с точностью 5-10%. Сводка накопленных данных о расстояниях, лучевых скоростях и других параметрах 450 галактик Местного объема ($D<10$ Мпк) была представлена в «Catalog of Neighboring Galaxies» (CNG, Karachentsev et al. 2004). Этот объем содержит карликовые галактики со светимостями в 10^4 раз меньше светимости Млечного Пути, в нем имеется более десятка групп, похожих на Местную группу по своим размерам и светимости. Детальная картина движений галактик в этих группах и вокруг них впервые выявила неожиданные свойства

Хаббловского потока на масштабах 1-3 Мпк. Были получены свидетельства того, что Хаббловские диаграммы «скорость-расстояние» вокруг Местной группы и других соседних групп характеризуются малой дисперсией пекулярных скоростей ~ 30 км/с. При таких малых хаотичных скоростях и малых ошибках измерения расстояний $\sim 100-200$ кпк становится заметным искривление «холодного» Хаббловского потока, обусловленное гравитационным торможением окружающих группу галактик суммарной массой самой группы. Достигнутые точности позволяют определять полную массу близких групп с погрешностью $\sim 30\%$ по величине «радиуса сферы нулевой скорости» R_0 , которая отделяет объем группы от остального расширяющегося окружения (Karachentsev et al. 2009, Karachentsev 2005).

Следует подчеркнуть, что метод « R_0 » дает оценку массы группы, независимую от теоремы о вириале, причем эта оценка полной массы относится к масштабу в 3-4 раза большему, чем вириальный радиус группы. Примечательно, что согласие оценок массы у близких групп по внешним и по внутренним (вириальным) движениям галактик достигается только при наличии космологического параметра $\Omega_\Lambda \sim 0.7$. Это означает, что наблюдаемые свойства Местного хаббловского потока дают прямое и независимое свидетельство существования во вселенной особой среды - темной энергии, недавно обнаруженной по наблюдениям далеких Сверхновых.



Карта распределения близких галактик в пространстве. Левая панель показывает проекцию на сверхгалактическую плоскость, правая - вид с ребра.

Подробное описание свойств галактик в Местном Объеме было приведено в

предыдущем отчете. Подчеркнем, что основное количество близких галактик сконцентрировано в тонком слое вокруг Сверхгалактической плоскости. В связи с предстоящим 100-летним юбилеем академика Я.Б. Зельдовича, предсказавшего существование космических каустик, мы предлагаем назвать эту структуру, впервые исследованную в САО РАН, Космической Стенкой Зельдовича (Zel'dovich's cosmic wall). Изображение Стенки Зельдовича в двух проекциях показано на диаграмме.

В предстоящем 2013 году Программный комитет Хаббловского телескопа выделил для наших исследований структуры близкой Вселенной еще 24 орбиты (заявки GO 12877 и 12878).

Ближние войды

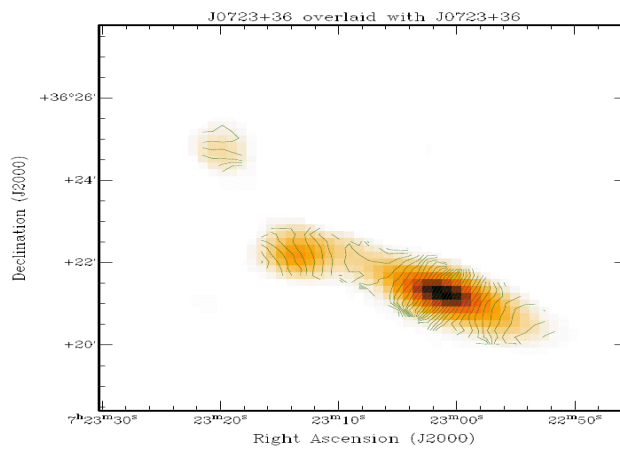
Одним из достаточно близких войдов является войд в области Lynx-Cancer, располагающийся в северной полусфере, в зоне, хорошо покрытой обзором SDSS. Его центр находится на 18 Мпк от Местной группы, а минимальный размер в поперечнике составляет ~16 Мпк (диаметр вписанной сферы). Он находится в области отрицательных сверхгалактических Z-координат (SGZ), с противоположной стороны от Местного Слоя (Local Sheet) относительно очень большого Местного Войда (Local Void или войд Tully). В отличие от Местного Войда, в значительной части закрытого галактической плоскостью, и в пределах которого известно весьма небольшое число галактик, в объеме войда Lynx-Cancer отождествлено на сегодня более 100 галактик с абсолютными голубыми величинами M_B в диапазоне от -9.7 до -18.4.

Слабые галактики, для которых были получены спектры в SDSS, составили более половины исходной выборки галактик войда (79 объектов). Но из-за того, что для спектральной части обзора SDSS имеет место достаточно сильная селекция против галактик низкой поверхностной яркости (LSBG), такие галактики, особенно на низких светимостях, где они в реальности составляют большинство (известная корреляция «светимость - средняя яркость»), сильно недопредставлены. Поэтому, если мы желаем лучше понимать состав галактик в близкой Вселенной и их свойства, необходимы дополнительные усилия по определению расстояний до LSBG в определенной части неба (выделенных, например, как такие объекты по базе изображений обзора SDSS). Lynx-Cancer войд является в этом плане достаточно оптимальным. Дополнительную помощь оказывают слепые обзоры в линии H I 21 см (например, ALFALFA), для которых

ограничение по оптической поверхностной яркости (почти) не работает, но есть предел по потоку $F(\text{HI})$, который в случае LSBG грубо соответствует видимой величине $V_{\text{tot}} \sim 18$. Для более слабых LSB галактик необходимы либо более чувствительные наблюдения в линии HI, либо оптические спектры с целью определить их лучевые скорости и возможную принадлежность к ближайшему или более дальнему войду. Таким образом, улучшение объема и качества выборки галактик в войде Lynx-Cancer является важной и актуальной задачей.

Наши наблюдения в линии HI 21 см на радио-телескопе NRT (~70 галактик) и Arecibo (52 галактики), а также спектроскопия на БТА около 70 галактик привели в итоге к обнаружению в войде Lynx-Cancer около дюжины новых LSB галактик, включая и ряд очень необычных и богатых газом. Несколько новых галактик обнаружены как члены пар или триплетов, что позволяет лучше понять скучивание галактик в войдах. Кроме того, обнаружено около 2-х десятков LSBD в войдах следующего эшелона ($1800 < V < 4000$ км/с). В рамках изучения свойств населения Местного Сверхскопления эти новые галактики дают дополнительную информацию о составе наиболее разреженных областей.

Галактики в войдах оказываются наименее изученными в силу эффектов наблюдательной селекции, с одной стороны, и в силу ограниченных возможностей моделирования эволюции галактик на масштабах масс менее 10^{10} солнечных масс. В рамках проекта изучалась большая выборка маломассивных галактик в близком войде Lynx-Cancer. В результате получены ясные указания на пониженную (в среднем на 30%) металличность газа для галактик войда, указывающие на их замедленную эволюцию. Кроме того, впервые обнаружено, что в этом войде и в войде Eridanus имеется заметная (~10%) часть населения, которая имеет пониженную в разы металличность и высокую массовую долю газа (95-99%), а для половины таких объектов - отсутствие следов старого населения во внешних частях галактик. Наличие таких необычных маломассивных галактик в войдах не было пока предсказано в моделях и является хорошим стимулом для развития детальных моделей образования и эволюции галактик, в частности в диапазоне барионных масс 10^7 - $10^9 M_{\odot}$.



Карта HI необычного карликового триплета вблизи центра войда Lynx-Cancer на расстоянии 16 Мпк от Местной группы, полученная на индийском радиотелескопе GMRT. Изолинии скорости водорода с шагом 6 км/с наложены на распределение колонковой плотности газа (в оттенках серого). Новая слабая галактика на NE (с видимой величиной $g=21.6$ на изображении SDSS, соответствующей $M_B=-9.6$) обнаружена только благодаря экстремально высокой массовой доле газа ($M_{HI}/L_B=28$).

Полдюжины самых низкометаллических LSBD галактик из выборки населения войда Lynx-Cancer картографировались с хорошим угловым разрешением на индийском радиотелескопе GMRT в линии HI 21 см. Получено два неожиданных результата, которые пока (хорошо) не описываются имеющимися моделями. Первый - обнаружение в центральной части войда Lynx-Cancer двух голубых карликовых LSB галактик J0723+3622 и J0723+3624 с рекордно-высокими значениями параметра $M(HI)/L_B=10$ и 25, соответственно (Chengalur, Pustilnik, 2012, arXiv/1210.1063, MNRAS, in press). Массовая доля звезд по отношению ко всей барионной массе в этих карликах составляет рекордно-низкие значения ~ 0.002 , что указывает на их эволюционную молодость. Они входят в состав триплета с еще одной, более массивной карликовой LSB галактикой J0723+3621 (смотри карту HI этого триплета). Галактики с такими необычными свойствами в местной Вселенной пока в моделях не воспроизведены. Другой интересный параметр для сравнения с моделями является массовая доля барионов по отношению к оцененной полной массе темных гало. В этих 2-х галактиках она примерно на порядок ниже среднего значения для Вселенной (~ 0.15), что не противоречит численным моделям для таких маломассивных объектов (Hoefl, Gottloeber, 2010). Однако, для более массивного члена триплета, также как еще для нескольких более массивных LSBD в этом войде, численные модели предсказывают этот параметр близким к среднему, но наблюдения, также, как и для менее массивных, дают очень низкие значения. Какие-то из гипотез, заложенных в численных экспериментах, по-видимому, нуждаются в уточнениях.

Второй результат связан с возмущенной структурой HI во внешних частях для всех изученных LSBD в войдах, даже для тех галактик, где никаких возмущающих соседей не видно с хорошим запасом (Chengalur, Pustilnik, Martin 2012, MNRAS, в подготовке). Природа этого феномена остается неясной. Имеется несколько возможных вариантов объяснения: от менее экзотических, связанных с так называемой холодной аккрецией межгалактического газа вдоль филаментов из темной материи, до существования в войдах «голых» темных гало с массами, сравнимыми с массами галактик, но значительно пониженным содержанием барионов, которые проявляются лишь по их гравитационному воздействию на достаточно близкие нормальные соседи. Для сужения поля возможностей необходимы как более детальные модели с предсказаниями более специфических деталей, так и более полные наблюдательные данные, в том числе и оптические.

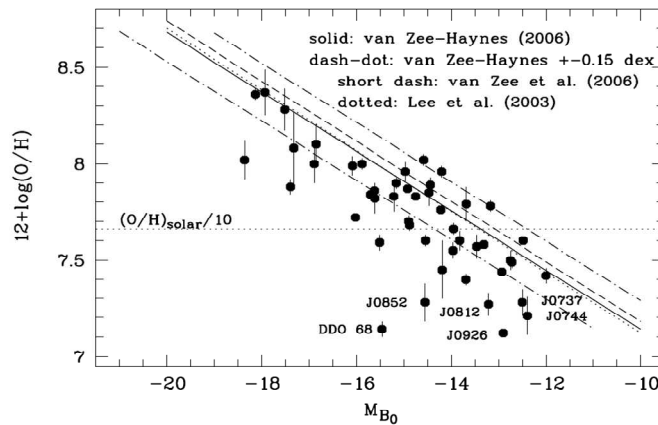


Диаграмма O/H vs M_B для 48 галактик войда Lynx-Cancer в сравнении с зависимостью для таких же галактик из Местного Объема и его окрестностей. Кроме систематического смещения большинства галактик войда в сторону меньших O/H, выделяется группа самых низкометаллических объектов, которые имеют O/H в разы ниже, чем для контрольной выборки. Эти же галактики показывают и другие признаки эволюционной молодости.

В результате проведенного изучения выборки галактик в ближайшем войде Lynx-Cancer, а также в войде Eridanus, получены следующие результаты и сделаны следующие выводы. 1) Определены параметры близкой пустоты в области Lynx-Cancer (центр на расстоянии 18 Мпс, минимальный размер в поперечнике ~16 Мпс) и построена выборка из более 100 галактик, которые находятся внутри этого войда, с глубиной до абсолютной величины M_B около -10. 2) Изучение металличности газа в НII областях примерно 50-ти галактик войда показало, что эти галактики имеют пониженную металличность при той

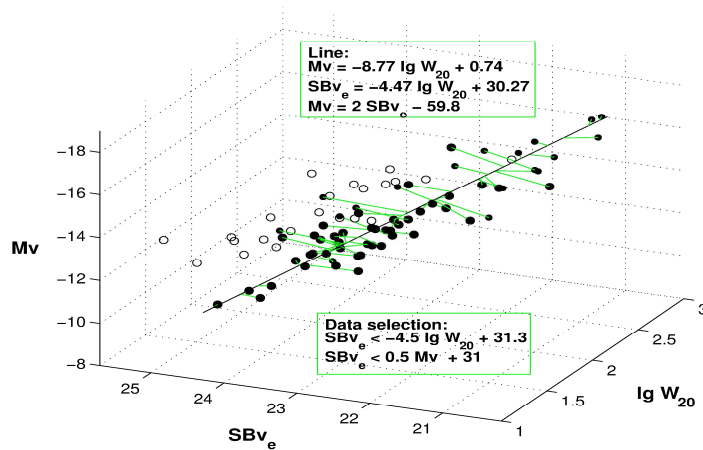
же светимости (в среднем на 30%) по сравнению с аналогичными галактиками в более плотном окружении, что указывает на их более медленную эволюцию. Модельных расчетов эволюции галактик в войдах пока в литературе нет. Таким образом, новые данные стимулируют теоретиков на работу в этой области. 3) Была найдена также небольшая часть галактик войда (~10%), металличность которых в разы ниже, чем у их аналогов той же светимости. Более детальное исследование этой группы LSB галактик с помощью поверхностной фотометрии по изображениям из SDSS и по нашим новым данным об их параметрах HI (а также их более слабых аналогов в войде без данных о металличности) показало, что эти галактики показывают свойства эволюционно-молодых объектов. А именно: их металличности в разы ниже, чем для остальной группы, их массовая доля газа достигает 98-99%, для части из них цвета периферии, вдали от областей недавнего звездообразования, где стандартно наблюдается самое старое население галактик, оказываются достаточно голубыми и при сравнении с модельными треками эволюционного пакета PEGASE соответствуют времени порядка 1-4 млрд. лет от начала эпизода звездообразования. Их можно объяснить либо очень медленной эволюцией на космологической шкале, при которой и масса звезд, и металличность межзвездного газа оказываются нетипично низкими. Либо (для большинства из них с голубыми цветами периферийных областей) - поздним включением и относительно медленным звездообразованием, в результате которого и относительная масса звезд (0.2-2 процента) и металличность газа ($1/35-1/20 Z_{\odot}$) минимальны среди известных галактик. Похожие галактики найдены в другом более далеком войде в Eridanus. Модельные расчеты для таких маломассивных галактик в войдах (масса барионов $\sim 10^7-10^8 M_{\odot}$), к сожалению, тоже пока недоступны, и наши новые результаты стимулируют работу теоретиков в этой области. 4) Суммируя предыдущие результаты, можно сформулировать вывод о том, что в войдах реализуются условия, способствующие тому, что часть галактик в них формируется как звездные системы с большим запаздыванием относительно подавляющего большинства их аналогов в местной Вселенной, и кроме того, процесс звездообразования и обогащения металлами межзвездного газа в них весьма замедлен, что частично может объясняться очень редкими взаимодействиями с другими массивными объектами.

Много-параметрические соотношения

В построении, интерпретации и космологическом осмыслении зависимости Талли-Фишера есть нерешенные проблемы. В частности разброс соотношения, обусловленный физическими причинами, интерпретируется как следствие вариаций для отдельных галактик 1) в звездных M/L , 2) отношений звездной массы к полной, 3) в отношении наблюдаемой ширины линии водорода (максимальной скорости вращения) к полной массе (Kannappan et al. 2002, AJ, 123, 2358). Оказывается все эти факторы сказываются по-разному на параметрах зависимости для карликовых иррегулярных и нормальных спиральных галактик. Для спиралей физический разброс мал и обусловлен в основном различием истории звездообразования. Для карликовых иррегулярных разброс зависит от окружения и факторов динамической эволюции, скорости истощения газа. Дискутируется наличие других источников разброса зависимости Талли-Фишера. Начиная с 2005 года решаются проблемы построения барионной (звезды+газ) зависимости (см. например, Begum et al. 2008; McGaugh & Wolf 2010). В частности для мало-массивных галактик обсуждается зависимость между фракцией газа в галактике, светимостью и другими фотометрическими параметрами, возможность уточнения зависимости Талли-Фишера путем построения много-параметрических зависимостей, то есть использование соотношений Фундаментальной плоскости.

Мы ищем подходы к решению этих кратко перечисленных проблем в работе Шариной М.Е., Караченцевой В.Е., Макарова Д.И. «Много-параметрические масштабные соотношения для карликовых иррегулярных галактик в различном окружении», которая была представлена на Генеральной ассамблее Международного Астрономического Союза на симпозиуме IAUS298 «Advancing the physics of cosmic distances». Была исследована корреляция между скоростью вращения, светимостью и поверхностной яркостью карликовых иррегулярных галактик. Обнаружено, что изолированные объекты вносят большой вклад в разброс на диаграмме Талли-Фишера. Была построена трех-параметрическая зависимость Талли-Фишера (светимость — ширина линии H α на 20% от максимума — эффективная поверхностная яркость) для 60 dIrrs ($T > 8$) в Местном Объем с оценками расстояний по наблюдениям Цефеид и светимости ярчайших звезд ветви красных гигантов. Полученное соотношение было применено для оценки расстояний до галактик Местного сверхскопления с лучевыми скоростями в системе Местной Группы < 3500 км/с. Это изолированные объекты из списка Караченцевой и др. (2010) и 50 dIrrs в

малых группах вокруг скопления Девы. Мы выполнили поверхностную фотометрию и определили структурные параметры для этих объектов на снимках Слоановского обзора неба. Скорости вращения и определенные фотометрические параметры галактик в малых группах хорошо согласуются с положением карликовых иррегулярных галактик Местного объема на, полученной нами, трехмерной диаграмме Талли-Фишера. Однако изолированные галактики имеют систематически более низкие поверхностные яркости и большие размеры (экспоненциальные масштабные длины дисков), чем карлики в малых группах. Этот результат может означать отношение размеров дисков нейтрального водорода к оптическим примерно в 2 раза больше для изолированных карликовых галактик. По всей видимости, звездообразование в изолированных галактиках, исследованных нами, идет менее активно.



Трех-параметрическое TFR для dIrrs Местного объема. Галактики, отклоняющиеся более чем на 3 сигма от полученного соотношения в следствие их слишком низкой поверхностной яркости показаны открытыми кружками. Уравнения линии (TFR) и условия отбора объектов для его построения приведены на рисунке.

Нами был проведен статистический анализ большой выборки динамически горячих звездных систем, с полным набором наблюдательных физических параметров. Единообразно исследовался большой спектр систем от гигантских до карликовых, в том числе ультра-компактные карликовые галактики (UCD) и все известные шаровые скопления в нашей Галактике и за ее пределами. Было исследовано отношение масс барионной и темной материи и соотношение масса – металличность для динамически-

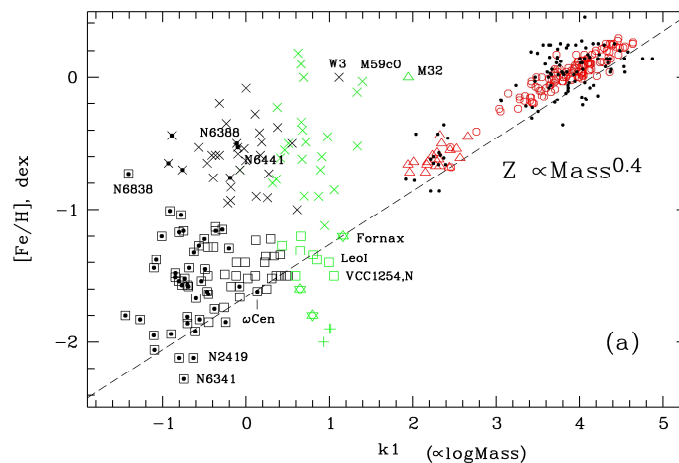
горячих звездных систем.

UCD были открыты сравнительно недавно при проведении спектральных обзоров скопления галактик в созвездии Печь (Hilker et al. 1999; Phillipps et al. 2001; Drinkwater et al. 2000, 2003; Mieske et al. 2006). Эти объекты по своим свойствам являются переходными между шаровыми скоплениями и карликовыми галактиками в том смысле, что в среднем массивнее, ярче и имеют более высокие отношения массы к светимости, но слабее и компактнее карликовых эллиптических галактик. (Zaritsky et al. 2006; Forbes et al. 2008; Dabringhausen et al. 2008). Например, Mieske & Kroupa (2008) изучили внутреннюю динамику отдельных представителей UCDs и показали, что они не полностью релаксировали динамически, их вириальные отношения массы к светимости выше, чем у шаровых скоплений и приближаются по величине к таковым у галактик.

Несколько сценариев формирования было предложено для объяснения их физических свойств. Kroupa (1998) and Fellhauer & Kroupa (2002) предположили что UCD являются результатом слияния многих молодых звездных скоплений формирующихся при столкновениях галактик. Mieske et al. (2002) считает их ярким продолжением массивных шаровых скоплений. Формирование UCD путем потери оболочек галактиками с ядрами было предложено рядом исследователей (Bassino et al. 1994; Zinnecker et al. 1988; Bekki et al. 2003; Goerdt et al. 2008). Drinkwater et al. (2004) считает их фундаментальными строительными блоками галактик, наряду с первичными карликовыми галактиками. Большие усилия были приложены различными группами исследователей чтобы объединить различные динамически горячие звездные системы находя общность в физических характеристиках

Для исследования происхождения и физических свойств UCD и ярких компактных шаровых скоплений нами была создана выборка их наблюдательных характеристик на основе списка Форбса и др. (2008, *Uniting old stellar systems: from globular clusters to giant ellipticals*). В этой статье авторы сконцентрировались на изучении сферических звездных систем разных масштабов (яркие шаровые скопления, UCD, эллиптические и сфероидальные карликовые и нормальные галактики, балджи спиральных галактик), которые близки по своим свойствам и считаются вириализованными (Антонов 1973). Первоначальный список Форбса включал 499 динамически горячих объекта с литературными данными о расстояниях, центральных дисперсиях скоростей, эффективных радиусах и светимостях в инфракрасном фильтре K. Мы дополнили эти данные из

литературы насколько это было возможно широкополосными цветами (U-B), (B-V), (V-I), (B-K), металличностями $[Fe/H]$, возрастами; вычислили отношения вириальных масс к светимостям (M_{vir} / L_k) и звездных масс к светимостям (M/L_v), металличность и возраст с использованием интегральных цветов и моделей простых звездных населений Bruzual & Charlot (2003). Мы также дополнили список данными для 19 шаровых звездных скоплений в M31, вычислив возраста и металличности с использованием измерений ликских индексов из литературы. Всего получился список из 370 объектов в полном набором данных (11 независимых физических параметров). На этом материале проведен мультивариационный статистический кластерный анализ, разбивший наш список объектов на 6 групп, однородных по физическим характеристикам. Нами были построены двух-параметрические зависимости между важнейшими физическими параметрами, характеризующими объекты.

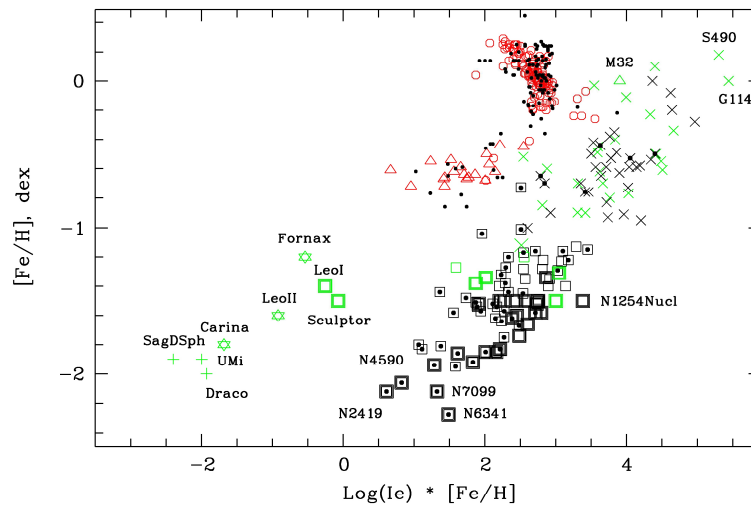


Соотношение масса - металличность. Красные кружки - эллиптические галактики, красные треугольники - карликовые эллиптические галактики, "+" - группа высокометалличных шаровых скоплений и UCD; открытые квадраты - низкометаллические наиболее массивные ШС, карликовые сфероидальные галактик (Leo I, Sculptor).

Объекты выборки были объективно разбиты на группы согласно с их наблюдательными свойствами с помощью мульти-вариационных статистических методов (кластеризация К-средних, метод Главных компонент), а также нового статистического алгоритма (статистика скачков – Gap Statistics). Было установлено, что:

Во-первых, все объекты выборки сконцентрированы выше линии «металличность –

светимость в фильтре К в степени 0.35» или «металличность – логарифм массы в степени 0.4». Наклон этой границы совпадает с, найденным в литературе, для эллиптических галактик разных масс (Dekel & Silk (1986), Thomas et al. (2003), Gallazzi et al. (2005)). Для шаровых скоплений тоже находили подобную зависимость ($Z/L^{0.5}$, e.g. Strader & Smith 2008). Нами было показано, что эти два соотношения являются одним, то есть существует единое соотношение масса-металличность для динамически горячих систем справедливое на шкале в шесть порядков по массе от гигантских эллиптических галактик до шаровых скоплений. Во-вторых, бимодальность по металличности давно известная для шаровых скоплений (Harris 1989) полностью соответствует таковой для UCD. Природа бимодальности не ясна.



[Fe/H] в зависимости от содержания металлов на единицу плотности светимости.

Мы ввели новую величину – эффективность производства металлов, то есть металличность на единицу эффективной плотности светимости ($\log I_e * [Fe/H]$). Основываясь на анализе этой зависимости было показано, что, в частности, UCD имеют более высокую эффективность производства металлов при данной металличности, светимости, чем эллиптические галактики. Это возможно только если они произошли не из карликовых галактик, а как наиболее плотные части эллиптических галактик, то есть их ядра.

Анализ соотношений между параметрами галактик на фундаментальной плоскости

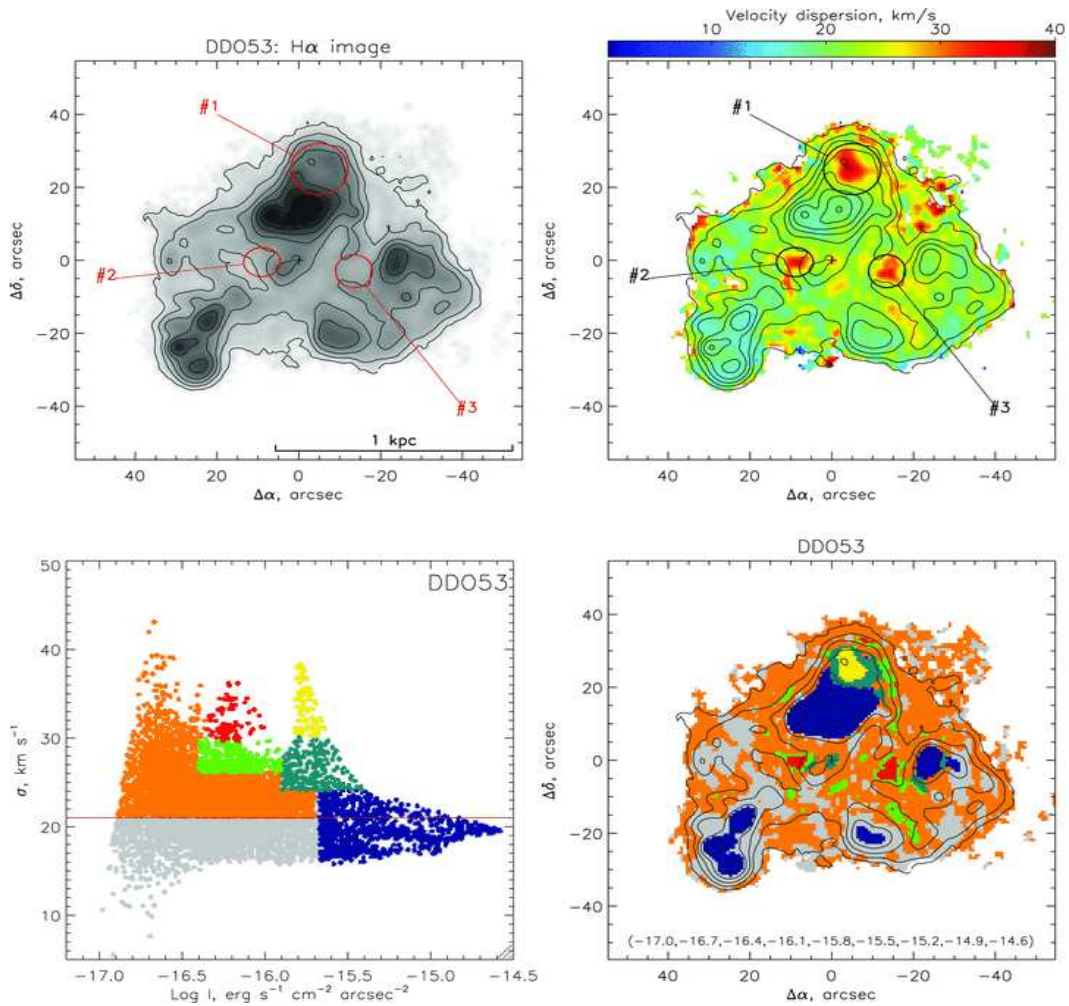
показал известный факт, что карликовые сфероидальные галактики сильно отличаются от остальных объектов выборки своими большим отношением масса-светимость. Интересно также, что разные группы, найденные при помощи кластерного анализа, отличаются различным наклоном зависимости. Группы, содержащие шаровые скопления и UCD, показывают корреляции близкие к $M/L \sim M^{0.2}$ в пределах ошибок. Для (E галактик: $M/L \sim M^{0.3}$. Это означает более сложную кинематическую структуру эллиптических галактик по сравнению с другими объектами выборки. Систематический сдвиг между группами, содержащими шаровых скоплений и UCD с одной стороны и группами, содержащими гигантские и карликовые эллиптические галактики, с другой, означает в среднем на порядок более высокое отношение массы к светимости для эллиптических галактик.

В ходе данного исследования было установлено, что самые низко-металлические шаровые скопления и UCD следуют единому с эллиптическими галактиками соотношению масса-металличность (факт, не нашедший пока теоретического объяснения). Среднее содержание железа на единицу инфракрасной светимости UCD выше, чем для эллиптических галактик, что свидетельствует о происхождении UCD как ядер эллиптических галактик. Гигантские эллиптические галактики, карликовые эллиптические галактики, UCD совместно с шаровыми скоплениями показывают разные зависимости отношения динамической (полной) массы к светимости от полной массы. Для эллиптических галактик: $M/L \sim M^{0.3}$, для UCD + ШС: $M/L \sim M^{0.2}$.

Кинематика газа в карликовых галактиках

По результатам сравнения пространственного распределений модельных гало из численных расчетов высокого разрешения и галактик слабой светимости выборки Местного Объем, получается (Tikhonov & Klypin 2009; Tikhonov et al. 2009), что модель предсказывает отсутствие звездной компоненты в гало темной материи с максимальной круговой скоростью 40 км/с. Вместе с тем галактики с такой внутренней динамикой наблюдаются – известные данные о полуширине линии нейтрального водорода карликовых галактик (Karachentsev et al., 2004) и кривым вращения HI (Begum et al. 2006, 2008) указывают на то, что такие достаточно изолированные галактики могут иметь суммарную амплитуду регулярной и хаотической компоненты поля скоростей порядка и даже меньше 15-20 км/с. Видимый парадокс допускает возможные как теоретические, так и наблюдательные решения. Например, что в поле находится на порядок больше карликовых

сфероидальных галактик, невидимых из-за их очень низкой поверхностной яркости. Другим популярным решением этой проблемы является предположение о том, что на самом деле газовый диск в карликовых галактиках находится глубоко внутри темного гало, масса которого соответствует значительно большей скорости вращения, минимум 30-50 км/с. Таким образом, наблюдаемая скорость вращения газового диска оказывается значительно меньше, чем круговая скорость, определяемая суммарным распределением барионного и темного вещества.



Пример наблюдений ионизованного газа с интерферометром Фабри-Перо в галактике DDO 53. Левая верхняя панель показывает изображение галактики в H α . Верхняя правая панель - карту распределения дисперсии скоростей. Слева внизу показана диаграмма интенсивность - дисперсия скоростей. Расположение областей, выделенных различным цветом, в галактике показано на правой нижней панели.

Безусловно, что измерения кривых вращения газовой подсистемы являются одним из

основных каналов информации о распределении темного вещества в галактиках. Но при сравнении модельных расчетов с наблюдениями необходимо правильно учесть все факторы, влияющие на кинематику межзвездной среды. Особенно это важно в случае карликовых галактик, так как наблюдаемая дисперсия скоростей (характеризующая величину хаотических движений ионизованного газа) в них может превышать наблюдаемую скорость вращения. Так, в отличие от нейтральной составляющей межзвездной среды галактик, дисперсия скоростей ионизованного газа превышает 15-20 км/с, т.е. носит принципиально сверхзвуковой характер.

Нами была поставлена задача исследования внутренней кинематики карликовых иррегулярных галактик с помощью сканирующего интерферометра Фабри-Перо на 6-м телескопе САО РАН. Поля лучевых скоростей в линии H α , покрывающие центральные области галактики, дополненные данными о распределении и динамике нейтрального водорода, и поверхностной яркости звездного населения, позволяют восстановить распределение массы объекта и, в том числе, проверить, может ли гало темной материи иметь максимум круговой скорости значительно больший чем максимум амплитуды вращения газовой компоненты галактики. Нами были получены интерферограммы 7 карликовых иррегулярных галактик Местного Объемы.

Во всех изученных галактиках прослеживается четкая связь между потоком в линии H α и дисперсией скоростей ионизованного газа. Яркие области HII показывают малую ширину линий, с уменьшением поверхностной яркости разброс наблюдаемых величин растет. В целом, вид диаграммы интенсивность - дисперсия скоростей для карликовых иррегулярных галактики напоминает аналогичные диаграммы для комплексов звездообразования NGC 588 и NGC 604 (Munoz-Tunon и др, 1996). Такое сходство для объектов разных масштабов не удивительно, поскольку в обоих случаях кинематика газа должна, в основном, определяться притоком механической энергии ветра массивных молодых звезд и множественных вспышек сверхновых, взаимодействие которых с окружающей межзвездной средой зависит от ее плотности.

Есть однако и ряд отличий между кинематическими свойствами гигантских областей HII и иррегулярными галактиками. Полный размер областей, излучающих в линии H α , в NGC 588 и NGC 604 составляет не более 130-150 пк. В карликовых галактиках картина более сложная. Здесь значительно (в 8-10 раз) больше пространственный размер областей, в которых мы изучаем движения ионизованного газа. В пяти из семи галактик основной

выборки (DDO53, DDO125, UGC 8508, UGCA 92, VII Zw 403) удалось выделить расширяющиеся оболочки размером 80-350 пк. Однако основную часть точек с высокой дисперсией скоростей не удастся связать с подобными структурами. Это не удивительно, так как образование гигантских оболочек требует некоторых специфических условий (достаточная начальная плотность газа, одновременное начало вспышки звездообразования) и, в большинстве случаев, может быть результатом воздействия на межзвездную среду нескольких поколений звездных группировок.

Представляется, что наблюдаемое расположение точек с повышенной дисперсией скоростей ионизованного газа связано не с конкретными оболочками, а с суммарным воздействием молодых звездных группировок на межзвездную среду. При этом и фотоионизационное излучение OB-звезд и кинетическая энергия вспышек сверхновых и ветра молодых звезд приводит к росту хаотических, турбулентных скоростей ионизованного газа. При этом менее плотный газ демонстрирует большую амплитуду скоростей, чем газ в более плотных облаках. Тот же приток энергии в среде низкой плотности обеспечивает более высокие скорости движения газа из-за зависимости скорости распространения ударной волны от плотности окружающего газа.

Совместное использование диаграмм яркость-дисперсия вместе с двумерными картами дисперсии лучевых скоростей позволило выявить ряд общих закономерностей, указывающих на связь величины хаотических движений газа с процессами текущего звездообразования:

Наблюдается четкая связь между поверхностной яркостью в линии Na и дисперсией лучевых скоростей: с уменьшением яркости растет разброс значений σ , максимальная дисперсия скоростей всегда наблюдается в областях малой яркости.

В пяти галактиках выделены расширяющиеся оболочки ионизованного газа, размером 80-350 пк, являющиеся результатом коллективного действия звездных группировок на газовую среду галактик. Их характерный кинематический возраст составляет 1-4 млн. лет, что указывает на связь с текущим звездообразованием.

Показано, что диаграммы I- σ могут быть полезны для поиска в близких галактиках остатков сверхновых или других компактных расширяющихся оболочек (туманности вокруг звезд WR и т.п.).

Ранее предложенная модель для объяснения вида диаграммы I- σ отдельных

комплексов звездообразования, требует существенного дополнения в случае карликовых галактик. Наиболее важным здесь является то, что основная часть областей с высокой дисперсией скоростей связана не с конкретными расширяющимися оболочками, а принадлежит диффузному фону низкой яркости, окружающему комплексы звездообразования. Это поведение наблюдаемых распределений σ мы объясняем наличием у гигантских областей НШ корон возмущенного газа низкой плотности с высокими турбулентными скоростями. Такое объяснение согласуется с современными представлениями о турбулентности в межзвездной среде.

2 Определение космологических параметров

Местное сверхскопление галактик

За последние 20 лет число галактик с известными скоростями в объеме Местного сверхскопления выросло более чем в 4 раза. Обновление базы наблюдательных данных о лучевых скоростях и появление однородного по всему небу инфракрасного фотометрического обзора 2MASS (Jarrett et al. 2000, 2003) позволяет исследовать структуру и кинематику близких групп галактик с существенно большей подробностью. Мы собрали все имеющиеся в HyperLEDA и NED измерения лучевых скоростей для галактик в Местном Сверхскоплении. Особое внимание было уделено проверке исходных данных и исключению ненадежных и ошибочных измерений. Всего в нашей, очищенной от сомнительных случаев, содержится 10914 галактики с лучевыми скоростями в системе Местной Группы $V_{LG} < 3500$ км/с, расположенных на галактических широтах $|b| > 15^\circ$. Для всех этих галактик были фиксированы их видимые величины и морфологические типы. Выборка такой глубины содержит в себе целиком все Местное сверхскопление с его дальними окраинами, окрестными пустотами и отрогами соседних скоплений.

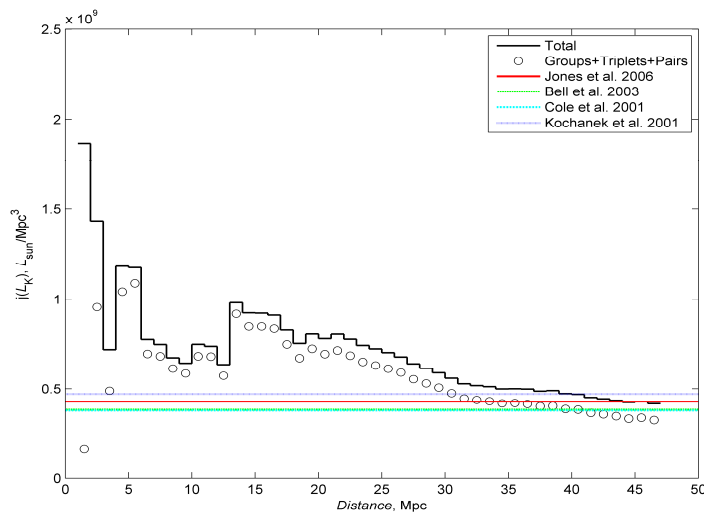
Для выделения групп галактик нами был применен оригинальный алгоритм, основанный на естественном требовании отрицательности полной энергии у замкнутой системы частиц. Этот подход, разработанный нашим коллективом, позволяет рассматривать не только геометрическое положение галактик в пространстве, но и учитывать их индивидуальные свойства, а именно светимость для оценки массы. Данный алгоритм был «обучен» на выборке галактик Местного Объема, где нам известна реальная и детальная трехмерная картина распределения галактик в пространстве. Для близких галактик мы знаем их индивидуальные расстояния и, следовательно, их членство в группах. Это позволило подобрать параметры группирования так, чтобы наилучшим образом воспроизводить известные близкие группы галактик.

В результате этой работы было выделено 389 групп галактик, состоящие из 4 членов и более. Совместно с парами и триплетами, суммарное количество кластеризованных галактик составляет 5903 штуки или 54% от их общего числа. При этом в галактиках, собранных в группы, содержится 82% всей светимости Местной Вселенной внутри радиуса 40 Мпк. Группы галактик в Местном Сверхскоплении характеризуются следующими медианными параметрами: средний проекционный радиус $= 268$ кпк;

дисперсия радиальных скоростей ≈ 74 км/с; полная светимость в ближнем инфракрасном диапазоне $\approx 1.2 \times 10^{11}$ светимостей Солнца; вириальной и проекционной оценкой массы $\approx 2.4 \times 10^{12}$ и $\approx 3.3 \times 10^{12}$ масс Солнца, соответственно.

При этом мы не использовали каких-либо специальных условий, которые бы ограничивали исходную выборку галактик по морфологическому составу или другим признакам (кроме наличия лучевой скорости). Минимальная избирательность нашей выборки делает ее привлекательной при анализе различных свойств систем галактик в зависимости от их окружения.

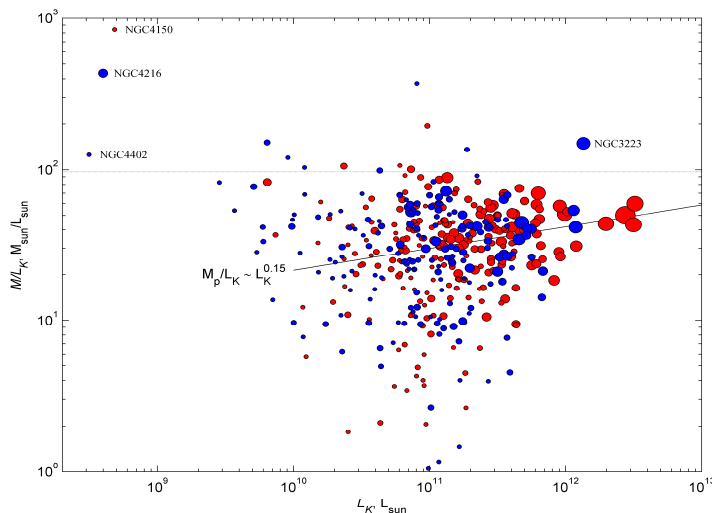
Имеющиеся в нашем распоряжении данные о галактиках в группах и парах и общем поле позволяют судить об основных особенностях распределения светлой и темной материи в Местной Вселенной диаметром ~ 80 Мпк, который близок к размеру «ячейки неоднородности».



Ход средней плотности K-светимости в Местной Вселенной в зависимости от радиуса.

Средняя плотность светимости галактик в K-фильтре является чрезвычайно важной наблюдательной величиной и позволяет проводить сравнения с более глубокими обзорами галактик. Bell et al. (2003), Cole et al. (2001) и Kochanek (2001) использовали данные 2MASS обзора, но с несколько разными предположениями о доле света, поглощенной пылью внутри галактик. Они получили, что средняя плотность светимости равна $(3.8-4.7) \times 10^8$ светимостей Солнца в кубическом мегапарсеке. В пределах сферы радиуса 40

Мпк средняя плотность К-светимости по нашим данным составляет $4.7 \times 10^8 \text{ Lo/Мпк}^3$. Следовательно, рассматриваемый нами объем Местной Вселенной довольно близок к размеру ячейки однородности. Отметим, что в этом объеме суммарная К-светимость галактик, входящих в систему разной кратности $n > 2$, составляет 84% от светимости всех галактик. Другими словами, только 16% звездных барионов находятся за пределами вириальных зон систем галактик. Сравнивая долю кластеризованной светимости в К-полосе (82%) с относительным числом кластеризованных галактик (54%), мы заключаем, что степень сгущения у карликовых галактик заметно ниже, чем у галактик высокой К-светимости. Еще одна особенность местной вселенной проявляется в том, что приближение средней звездной плотности к ее асимптотическому космическому значению происходит именно сверху, т.е. широкие окрестности Местной Группы представляют собой обширную зону повышенной плотности. При этом, флуктуации сравнимые со средним значением имеют место на масштабах $\sim (15-20) \text{ Мпк}$.



Зависимость масса-светимость от полной светимости для групп галактик. Наблюдается слабый рост доли темной материи с ростом полной светимости систем галактик. Горизонтальная пунктирная линия соответствует глобальному отношению масса-светимость 97 M/L, соответствующую $\Omega_m = 0.28$.

Зная индивидуальные отношения масса-светимость для групп галактик, мы можем построить карту распределения гравитирующего вещества на шкале Местного Сверхскопления. Средняя локальная плотность материи в пределах расстояния 40-47 Мпк

составляет $\Omega_m=0.08$ в единицах критической плотности, что в 3 раза ниже глобальной космической плотности $\Omega_m=0.28$ в стандартной Λ CDM модели (Fukugita & Peebles 2004).

Получение оценки средней плотности материи в Местной Вселенной мы считаем наиболее важным результатом нашей работы. Низкие оценки $\Omega_m \sim 0.10$ следуют также из вириальных масс у групп галактик из списков Vennik (1984), Tully (1987) и Magtesian (1988). В недавней статье Crook et al. (2007) были получены оценки Ω_m в диапазоне от 0.10 до 0.23 в зависимости от выбора параметров объединения галактик в группы и способа вычисления вириальной массы групп. Ранее Bahcall et al. (2000) рассмотрели опубликованные оценки отношения массы к светимости у групп и скоплений и получили по ним значение $\Omega_m=0.16 \pm 0.05$. Abate & Erdogdu (2009) проанализировали поле пекулярных скоростей галактик, используя данные обзора SFI++ (Springob et al. 2007), и пришли к выводу, что в местной вселенной с характерным масштабом ~ 6000 км/с плотность материи заключена в интервале $\Omega_m=0.09-0.23$.

Различие между глобальным значением плотности материи, $\Omega_m=0.28 \pm 0.03$ и нашей локальной оценкой $\Omega_m=0.08 \pm 0.02$ на масштабе близкой к размеру ячейки однородности выходит далеко за пределы случайных погрешностей. Чтобы устранить это противоречие, необходимо предположить наличие значительных масс скрытой материи за пределами вириальных областей групп и скоплений галактик. Такая рассредоточенная компонента темной материи, если она существует, превосходит в два раза суммарную массу темных гало, в которые погружены галактики.

Как широко известно, некоторые предсказания стандартной космологической модели Λ CDM не согласуются с имеющимися сегодня наблюдательными данными. В первую очередь, это касается проблемы «потерянных» спутников Klypin (1999), которая выражается в том, что теория предсказывает количество спутников у галактик типа Млечного Пути в сотни раз больше, чем их наблюдается у нашей Галактики, у Туманности Андромеды и у других соседних галактик высокой светимости. Были предложены различные объяснения этому противоречию, основанные на особенностях процесса звездообразования в карликовых галактиках. Однако проблема «потерянных» спутников все же остается.

Другая загадка заключается в том, что теория образования химических элементов в горячей расширяющейся Вселенной дает значение космического обилия барионов

$\Omega_b=0.045\pm 0.005$. Однако, по данным наблюдений только 1/10 часть этих барионов известна нам в виде звезд и газа в галактиках. Предполагается, что основная масса барионов может быть распределена между галактиками наподобие теплого $T\sim 10^5\text{K}$ невириализованного газа.

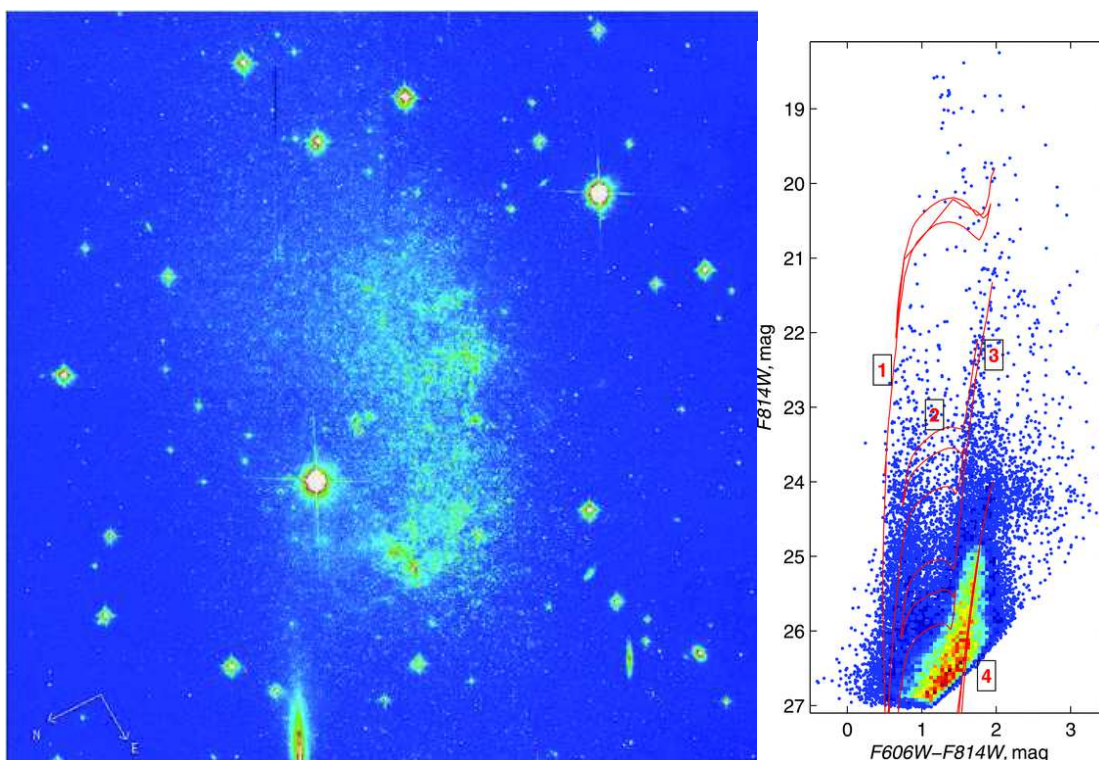
Существенное расхождение между локальным 0.08 ± 0.02 и глобальным 0.28 ± 0.03 значением средней плотности материи добавляет еще одну задачу — проблему «потерянной» темной материи. В отличие от ситуации с потерянными спутниками и потерянными барионами, недостаток темной материи в Местной Вселенной характеризуется не одним--двумя порядками величины, а всего лишь фактором 3, что, однако, также немало для так называемой «эпохи прецизионной космологии». Противоречивые оценки Ω_m вероятно указывают на то, что предположение о пропорциональном распределении темной и звездной материи, оказывается хотя и удобной, но не вполне оправданной парадигмой. Другими словами, наша вселенная может выглядеть более скрытой и темной, чем это нам представлялось до недавнего времени.

Ближние карликовые галактики

Около 50 процентов близких галактик формирует различные группы. Учитывая малые группы галактик, выделенные в локальной Вселенной Б. Талли и Д. Макаровым, большинство галактик в пределах 3 Мпк не являются изолированными. Группа близких галактик вокруг гигантской спирали IC342 в значительной мере скрыта от нас сильным галактическим поглощением, в то время как комплекс галактик IC342-Maffei должен сильно влиять на динамику и эволюцию ближней Вселенной. Изучение галактик этого комплекса является, таким образом, важной, но сложной задачей из-за сильного галактического поглощения. Нами была исследована история звездообразования карликовой иррегулярной галактики UGCA92, которая традиционно считается ближайшим соседом самой близкой к нам галактики со вспышкой звездообразования NGC1569.

Нами была получена диаграмма цвет - звездная величина для галактики UGCA 92, отснятой на телескопе Хаббла с помощью камеры ACS (HST/ACS) в рамках проекта 9771. Мы определили количественную историю звездообразования карликовой иррегулярной галактики UGCA92. Ввиду низкой галактической широты ($l = +10.5^\circ$) поглощение в этом направлении очень велико: $E(B-V) = 0.79\pm 0.13$. История звездообразования была реконструирована, используя изображения галактики UGCA92, полученные с HST/ACS, а

также моделирование звездного населения. Согласно нашим измерениям, 84 процента полной массы звезд галактики было образовано в ходе эпизода звездообразования 12 — 14 млрд. лет назад. Диапазон металличности этих звезд: $[Fe/H] = [-2.0 : -1.5]$ dex. Имеются также признаки незначительного звездообразования 4 — 6 млрд. лет назад. Металличность этих звезд приблизительно соответствует обилию металлов самого старого звездного населения.



Галактики UGCA 92, снятая космическим телескопом Хаббла, и диаграмма цвет - звездная величина ее звездного населения.

UGCA92 имеет морфологию типичного иррегулярного карлика, с несколькими хорошо заметными концентрациями ярких голубых звезд ближе к центру галактики. Многочисленные НII-области, обозначающие текущее звездообразование, были давно открыты в этой галактике. Согласно нашим измерениям, недавний эпизод звездообразования начался 1.5 — 2 млрд. лет назад и продолжается вплоть до настоящего времени. Мы построили модель этого современного звездообразования с повышенным временным разрешением. Непрерывное звездообразование в этот период показывает умеренный рост интенсивности около 200 — 300 млн. лет назад. Средний темп звездообразования в последние 500 млн. лет равен $4.3 \pm 0.6 \cdot 10^{-2}$ Msun/год и $3.9 \pm 0.6 \cdot 10^{-2}$

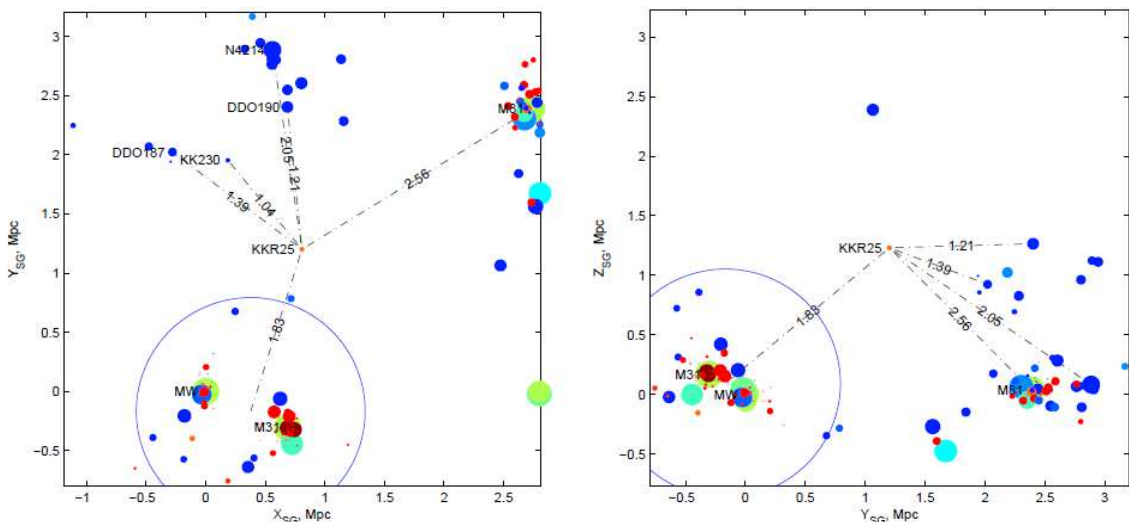
M_{sun} /год в последние 50 млн. лет. Масса звезд, образовавшихся в последние 500 млн. лет, составляет 7.6 процента всей массы звезд. Металличность звезд этого недавнего эпизода звездообразования определяется со значительными неточностями из-за сравнительно бедной статистики по отношению к существенно более многочисленным старым звездам. Однако, наши расчеты показывают, что значительная часть молодых звезд несомненно обогащена металлами, и соотношение $[\text{Fe}/\text{H}]$ лежит в диапазоне $[-0.6 : -0.3]$ dex.

UGCA92 обычно рассматривается как ближайший компаньон уникальной близкой галактики со вспышкой звездообразования NGC1569. Согласно нашим последним измерениям, линейное расстояние между этими объектами составляет 360 кпк. Их близость на небе и близкие лучевые скорости также можно рассматривать как подтверждение того, что галактики составляют физическую пару. Однако, проведенное нами сравнение недавних эпизодов звездообразования в двух этих галактиках показало отсутствие видимой временной корреляции вспышек звездообразования между ними. Следует также отметить, что металличность звезд ветви красных гигантов, расположенных в самых внешних частях NGC1569, несколько выше, чем металличность красных гигантов UGCA92. Таким образом, нам приходится сделать вывод о том, что феномен интенсивных недавних вспышек звездообразования в NGC1569 не связан с известным ближайшим соседом UGCA92, на чью историю звездообразования такое соседство также, по-видимому, не повлияло.

Были проведены фотометрические и спектроскопические исследования уникальной карликовой сфероидальной галактики KKR 25. Для получения диаграммы показатель цвета - звездная величина звезд этой галактики мы использовали архивные данные с космического телескопа Хаббла, полученные с камерой ACS. На этих снимках галактика разрешается на отдельные звезды, включая звезды ветви красных гигантов и красного сгущения. Мы построили модель разрешенного звездного населения и измерили темп звездообразования и металличность в зависимости от времени. Судя по нашим измерениям, основное звездообразование в KKR 25 происходило 12.6 — 14 млрд. лет назад. Эти звезды имеют низкую металличность, в среднем $[\text{Fe}/\text{H}]$ от -1 до -1.6 dex. В этот период было образовано около 60 процентов всей массы звезд в галактике. Модели показали также присутствие в галактике звезд среднего возраста между 1 и 4 млрд. лет, однако, мы не обнаружили признаков заметного обогащения металлами для звезд этого возраста, по сравнению с более старыми. Длиннощелевые спектры KKR 25 были

получены на 6-м телескопе САО РАН. Эти спектры позволили измерить обилие кислорода в галактике : $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 7.60 \pm 0.07$ и лучевую скорость галактики: $V_h = -79$ км/с. С помощью полученных спектров мы открыли планетарную туманность в KKR 25. Это первая планетарная туманность, найденная в карликовой сфероидальной галактике за пределами Местной Группы.

KKR 25 одна из самых изолированных галактик в окрестностях Местной Группы. Она не содержит газа и может быть надежно классифицирована как карликовая сфероидальная галактика. KKR 25 не могла подвергаться воздействию со стороны соседей в течении своей эволюции, так как она находится достаточно далеко от любой галактики Местного Объема. «Первичный сценарий» эволюции галактик, предполагает, что карликовые сфероидальные галактики формируются до эпохи реионизации в малых гало темной материи массой менее $2 \times 10^8 M_\odot$. Их эволюция происходит благодаря процессам охлаждения и обратной связи в ранней Вселенной. Моделирование таких объектов объясняют основные свойства карликовых сфероидальных галактик в Местной Группе. Похоже, что KKR 25 является наилучшим кандидатом в такие «первичные» галактики.



Карта распределения галактик Местного Объема, центрированная на KKR 25. Слева показана проекция на сверх-галактическую плоскость. Справа - вид с «ребра». Размеры кружков пропорциональны светимости галактик. Цвет соответствует их морфологическому типу.

Tikhonov & Klypin (2009) отмечают, что стандартная космологическая модель с холодным темным веществом и лямбда-членом предсказывает в 10 раз больше карликовых галактик вне групп, чем их наблюдаемое количество. Одним из возможных решений

является сильная неполнота наблюдательных данных в области галактик низкой поверхностной яркости, без звездообразования и без существенных запасов газа. Такие галактики чрезвычайно тяжелы для обнаружения. KKR 25 является хорошим кандидатом, в такую популяцию «потерянных» галактик. Мы оценили возможное количество карликовых сфероидальных галактикам на шкале 10 Мпк в 1000-2000 объектов. Эта величина практически совпадает с оценкой Tikhonov & Klupin (2009). Поиск карликовых сфероидальных галактик вне известных групп галактик является очень важной задачей. Существование популяции карликовых сфероидальных галактик в войдах является критическим тестом на модели формирования и эволюции карликовых галактик.

Шаровые скопления

Чтобы лучше интерпретировать спектры шаровых скоплений в других галактиках, необходимо обратить внимание на аналогичные объекты в нашей Галактике. С этой целью были сравнены свойства звездного населения с модельными с целью определения возраста и металличности для мало исследованного шарового скопления ВН176 с помощью прямых снимков, полученных на VLT (Very Large Telescope) с помощью прибора FORS2.

Объект ВН176 впервые был замечен van den Bergh & Hagen (1975) и занесен этими авторами в списки рассеянных звездных скоплений благодаря своей рыхлой структуре и близости к плоскости Млечного Пути (его галактическая широта $b=+4.34$ градуса). Глубокие диаграммы «цвет-звездная величина», построенные как в оптическом, так и в ближнем инфракрасном диапазонах, позволили уточнить данные о поглощении света в нашей Галактике в направлении к ВН176, определить расстояние до скопления с точностью 0.5 кпк, оценить металличность с точностью 0.1 dex и возраст скопления с точностью 1 млрд лет. ВН176 оказалось промежуточного типа между рассеянными и шаровыми скоплениями. Расстояние от Солнца 15.1 ± 0.5 кпк. Оно имеет довольно высокую металличность $[Fe/H]=-0.1\pm 0.1$ dex и возраст 6-7 млрд лет. Полученные параметры позволят по новому взглянуть на проблему формирования звездных скоплений в других галактиках. Ведь функция светимости внегалактических шаровых скоплений используется для определения расстояний до достаточно удаленных галактик (до ~20 Мпс) в пределах Местного сверхскопления. Эти результаты поднимают вопросы и формирования Нашей Галактики. Происхождение ВН176 является загадкой. Шаровых скоплений такой металличности, возраста и массы практически не известно, равно как и

рассеянных скоплений такой массы и удаленности от Галактического центра. Рассеянное скопление давно бы разрушилось за 7 миллиардов лет в плоскости Млечного Пути в результате столкновения с плотными газовыми облаками. ВН176 могло бы принадлежать к кольцу Monoceros. Эта протяженная структура находится на гелиоцентрическом расстоянии 25 кпк, примерно на Галактической широте ВН176 (Penarrubia et al. 2005).

3 Разработка программы внедрения результатов ПНИР в образовательный процесс

Статистические методы имеют первостепенное значение для анализа и исследования, поскольку позволяют с научной точки зрения подойти к анализу данных в различных областях, выявить тенденции их развития. Астрофизические исследования являются отраслью фундаментальных научных исследований где активно используются статистические методы выявления закономерностей. Анализ свойств галактик и отдельных представителей звездного населения галактик широко применяется в астрофизических исследованиях в нашей стране и за рубежом. Нашим коллективом был развит и применен новый статистический метод анализа популяций объектов. В статьях Chattopadhyay et al. (2010) и Chattopadhyay et al. (2012) разрабатываются новые мультивариационные методы кластерного анализа. Эти методы позволяют наиболее эффективно, по сравнению с ранее использованными, выявить отдельные группы объектов, сходных по свойствам и происхождению в большом неоднородном ансамбле.

Результаты, полученные в ходе выполнения государственного контракта, вошли в лекции и практикумы для аспирантов и молодых научных сотрудников в рамках школы «Наблюдательная и теоретическая космология», проведенной в августе 2011 г. в САО РАН при поддержке фонда «Династия». Разработаны курсы лекций для студентов старших курсов астрономической специальности, приезжавших САО РАН из ведущих университетов России для прохождения практики.

Макаровым Д.И. разработан курс лекций «Космология ближней Вселенной»¹, в котором рассматриваются вопросы наблюдательной основы современных космологических представлений. Большое внимание уделено таким важным вопросам как определение шкалы внегалактических расстояний. Дана ретроспектива определения постоянной Хаббла. Рассмотрены основные методы определения расстояний до галактик, такие как зависимость период-светимость классических Цефеид, RR Лиры, светимость вершины ветви красных гигантов, метод флуктуации поверхностной яркости, зависимость Талли-Фишера и другие. В лекциях систематизированы наши знания о распределении

1 http://sed.sao.ru/~vo/cosmo_school/presentations/Makarov1.pdf
http://sed.sao.ru/~vo/cosmo_school/presentations/Makarov2.pdf
http://sed.sao.ru/~vo/cosmo_school/presentations/Makarov3.pdf
http://sed.sao.ru/~vo/cosmo_school/presentations/Makarov4.pdf

вещества в наблюдаемой Вселенной от первых каталогов распределения галактик по небу, до современных глубоких обзоров, насчитывающих миллионы галактик. Обсуждается одна из ключевых проблем современной космологии — проблема темной материи, ее наблюдательные проявления и доказательства существования, от кинематики звезд и газа в галактиках, до вириальных движений в скоплениях галактик.

В курсе лекций Пустильника С.А. «Войды как элементы крупномасштабной структуры и свойства галактик в них расположенных»² дана ретроспектива наблюдательного изучения войдов, описаны методики обнаружения и выделения войдов в больших обзорах красных смещений галактик. Описаны свойства войдов - размеры, формы, контраст плотности, подструктуры. Описаны статистики войдов как инструмент для сравнения моделей с наблюдениями. Обсуждены возможные причины отличий свойств галактик в войдах. Представлены первые итоги статистического анализа по большим выборкам цветов галактик в войдах и их темпа звездообразования. Дано сравнение наблюдений с моделями формирования структуры - наличие филаментов в войдах, радиальное распределение плотности, расширение войдов. Рассказано о глубоком исследовании галактик войдов и необходимости изучения близких войдов. Приведена иллюстрация детального изучения большой выборки галактик на примере войда Lynx-Cancer, среди объектов которого обнаружено много эволюционно-молодых галактик.

Разработаны практикумы по курсу «Наблюдательная Космология Ближней Вселенной» для НОЦ «Фундаментальные частицы и астрофизика» МФТИ, Бакалавриат. Работа Шариной М.Е. «Апертурная звездная фотометрия и определение расстояния до галактик методом ярчайших сверхгигантов»³ направлена на массовое измерение расстояний до разрешенных на ярчайшие звезды галактик и определение постоянной Хаббла. Практикум знакомит молодых исследователей с современной методикой фотометрических измерений, методами определения расстояний до внегалактических объектов, звездным составом галактик. Практикум Макаровой Л.Н. «Определение фотометрического расстояния до галактик методом TRGB и диаграмма Хаббла»⁴ знакомит исследователей с одним из самых эффективных методов оценки расстояний до близких галактик на шкале до 10 Мпк. Одной из задач практикума наглядно продемонстрировать

2 http://sed.sao.ru/~vo/cosmo_school/presentations/Pustilnik_voids1.pdf
http://sed.sao.ru/~vo/cosmo_school/presentations/Pustilnik_voids2.pdf

3 <http://www.astrolyceum.lpi.ru/Lab/LabSAO1.pdf>

4 <http://www.astrolyceum.lpi.ru/Lab/LabSAO3.pdf>

наблюдаемые основы изучения движений галактик в ближней Вселенной.

Клыпин А.А. прочитал курс лекций⁵, посвященный современным проблемам численного моделирования эволюции Вселенной. В лекциях рассмотрены вопросы формирования структур в численных моделях, их эволюции со временем, описании статистик, таких как функция масс и функция круговых скоростей, их связь с наблюдениями. Численное моделирование способно объяснять и предсказывать большое количество наблюдательных космологических проявлений. Наибольшие проблемы возникают при моделировании объектов на малых шкалах. Современные N-body расчеты сталкиваются с проблемой каспов и избытка карликовых спутников и галактик в поле.

В рамках школы 7-ой летней школы современной астрофизики «Наблюдательная и теоретическая космология» (САО РАН, 14-27 августа 2011 г.), Теплякова А.Л. разработала практикумы, основанные на изучении свойств галактик в войдах. «Практическая работа по свойствам галактик в войдах»⁶ знакомит с основами поверхностной фотометрии карликовых галактик и методами определения содержания тяжелых элементов в галактиках методами длиннощелевой спектроскопии.

Теплякова А.Л. успешно защитила кандидатскую диссертацию по теме «Эволюция карликовых галактик и ее связь с окружением». Защита состоялась 25 марта 2012 г. Моисеев А.В. успешно защитил докторскую диссертацию по теме «Структура и эволюция галактик по наблюдениям их внутренней кинематики» (17 сентября 2012 г). На астрофизическом семинаре САО РАН 25 октября 2012 г. Пустильник С.А. представил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук «Поиск и исследование необычных маломассивных галактик, включая объекты с активным звездообразованием, низкой металличностью и население пустот».

Коллектив принимает активное участие в руководстве аспирантской подготовкой: Макаров Д.И. руководил аспирантурой Уклеина Р.И. (САО РАН); Моисеев А.В. был руководителем диссертационной работы Егорова О.В. (ГАИШ МГУ); Караченцев И.Д. руководил аспирантурой Кайсиной Е.И. (САО РАН); Пустильник С.А. является соруководителем аспирантки Южного Федерального Университета Ю.А.Ляминой.

Сотрудники САО РАН регулярно осуществляют руководство дипломами, курсовыми

5 <http://www.sao.ru/hq/seminar/optic/Klypin/Klypin.html>

6 http://sed.sao.ru/~vo/cosmo_school/presentations/Teplyakova_Prac_phot.pdf
http://sed.sao.ru/~vo/cosmo_school/presentations/Teplyakova_Prac_spectra2.pdf

работами и преддипломными практиками студентов ведущих российских ВУЗов. Макаров Д.И. осуществлял со-руководство дипломной работой Тереховой Н.А. «Калибровка зависимости Талли-Фишера для галактик видимых с ребра», (ГАИШ МГУ). Шарина М.Е. Была руководителем дипломной работы Ильиной Е.А. «Изучение свойств карликовых галактик со Слоановским обзором неба» (Казанский (Приволжский) Федеральный государственный университет). Пустильник С.А. руководил стажировками Ляминой Ю.А. (Южный Федеральный Университет, Ростов-на-Дону) по теме: «Изучение эволюции карликовых галактик по данным БГА и SDSS» и Сафоновой Е.С. (Московский Государственный Университет) по теме: «Изучение связи эволюции маломассивных галактик с глобальным окружением». Под руководством Моисеева А.В. проходили практику и сделали курсовые работы студенты Смирнова К.И. (Уральский Федеральный Университет), Воротынцев С.В. (МГУ), Опарин Д.В. (МГУ), Янчиков П.В. (МГУ). Макаров Д.И. руководил преддипломной практикой студентов Санкт-Петербургского Университета Марчука А.А. и Тимирбаевой А.М. Шарина М.Е. осуществляла руководство практикой студентки Казанского (Приволжского) Федерального Государственного Университета Казаченок В.С.

Заключение

В данном отчете представлены результаты работы по четвертому этапу «Обобщение и оценка результатов выполненных исследований» в рамках ПНИР «Космология ближней Вселенной». На данном этапе были выполнены следующие запланированные работы.

Сопоставление наблюдательных данных с результатами моделирования

Определены параметры близкой пустоты в области Lynx-Cancer (центр на расстоянии 18 Мпс, минимальный размер в поперечнике ~ 16 Мпс) и построена выборка из более 100 галактик, которые находятся внутри этого войда, с глубиной до абсолютной величины M_B около -10.

Изучение металличности газа в НП областях примерно 50-ти галактик войда показало, что эти галактики имеют пониженную, в среднем на 30%, металличность при той же светимости по сравнению с аналогичными галактиками в более плотном окружении, что указывает на их более медленную эволюцию.

У небольшой части галактик войда ($\sim 10\%$) металличность в разы ниже, чем у их аналогов той же светимости. Детальное исследование этой группы LSB галактик показало, что эти галактики показывают свойства эволюционно-молодых объектов. Чрезвычайно низкая металличность, массовая доля газа достигает 98%, возраст звездного населения порядка 1-4 млрд.лет. Модельные расчеты для таких маломассивных галактик в войдах (масса барионов $\sim 10^7$ - $10^8 M_\odot$), к сожалению, пока недоступны, и наши новые результаты стимулируют работу теоретиков в этой области.

Суммируя предыдущие результаты, можно сформулировать вывод о том, что в войдах реализуются условия, способствующие тому, что часть галактик в них формируется как звездные системы с большим запаздыванием относительно подавляющего большинства их аналогов в местной Вселенной, и кроме того, процесс звездообразования и обогащения металлами межзвездного газа в них весьма замедлен, что частично может объясняться очень редкими взаимодействиями с другими массивными объектами.

Построено трех-параметрическое соотношение Талли-Фишера (светимость — поверхностная плотность — скорость вращения) для карликовых иррегулярных галактик с

целью определения расстояния до объектов этого морфологического типа, расположенных в пределах Местного Сверхскопления, определения постоянной Хаббла (скорости расширения этого пространства) и температуры Хаббловского потока.

Построены соотношения Фундаментальной Плоскости для динамически-горячих звездных систем (эллиптических галактик, сфероидальных и ультракомпактных карликовых галактик, шаровых скоплений). Определены наклоны важных в космологическом смысле зависимостей: полная масса — металличность, полная масса — отношение динамической массы к светимости, полная масса — среднее содержание железа на единицу светимости. Сделан вывод о происхождении ультра-компактных карликовых галактик как ядер нормальных эллиптических галактик, испытавших впоследствии приливное воздействие от других галактик в плотных областях групп и скоплений.

Определение космологических параметров

Получение оценки средней плотности материи в Местной Вселенной мы считаем одним из наиболее важных результатов нашей работы. Различие между глобальным значением плотности материи, $\Omega_m=0.28\pm 0.03$ и нашей локальной оценкой $\Omega_m=0.08\pm 0.02$ на масштабе 80 Мпк выходит далеко за пределы случайных погрешностей. Чтобы устранить это противоречие, необходимо предположить наличие значительных масс скрытой материи за пределами вириальных областей групп и скоплений галактик. Такая рассредоточенная компонента темной материи, если она существует, превосходит в два раза суммарную массу темных гало, в которые погружены галактики.

Изученная нами очень изолированная карликовая галактика KKR 25 является в значительной мере уникальной, поскольку принадлежит к типу сфероидальных карликов, где не обнаруживается газа или текущего образования звезд. Считается, что объекты такого типа формируются в тесном окружении, где влияние близких соседей заставляет эти карлики терять газ, а, следовательно, и материал для текущего звездообразования. Существование таких объектов, как KKR 25, подтверждает так называемый «первичный» сценарий, где карликовые сфероидальные галактики формируются в малых темных гало (меньше 2×10^8 солнечных масс) до эпохи реионизации, и их эволюция происходит благодаря процессам охлаждения и обратной связи в ранней Вселенной.

Сравнены цвет и светимость звезд с модельными с целью определения возраста и

металличности для мало исследованного шарового скопления ВН176. Сделан вывод о принадлежности этого объекта приливной Галактической звездной структуре Monoceros.

Разработка программы внедрения результатов ПНИР в образовательный процесс

Подготовлены курсы лекций «Войды как элементы крупномасштабной структуры и свойства галактик в них расположенных» Пустильник С.А., «Космология ближней Вселенной» Макаров Д.И. Разработаны практикумы по курсу «Наблюдательная космология ближней Вселенной»: Шарина М.Е. «Апертурная звездная фотометрия и определение расстояния до галактик методом ярчайших сверхгигантов»; Макарова Л.Н. «Определение фотометрического расстояния до галактик методом TRGB и диаграмма Хаббла».

Теплякова А.Л. успешно защитила кандидатскую диссертацию по теме «Эволюция карликовых галактик и ее связь с окружением» (25 марта 2012 г.) Моисеев А.В. успешно защитил докторскую диссертацию по теме «Структура и эволюция галактик по наблюдениям их внутренней кинематики» (17 сентября 2012 г.). Пустильник С.А. представил докторскую диссертацию «Поиск и исследование необычных маломассивных галактик, включая объекты с активным звездообразованием, низкой металличностью и население пустот» на Астрофизическом семинаре САО РАН (25 октября 2012 г.).

Под руководством участников проекта обучались в аспирантуре Уклеин Р.И. (САО РАН), Егоров О.В. (ГАИШ МГУ), Кайсина Е.И. (САО РАН) и Лямина Ю.А. (ЮФУ). За время выполнения проекта были выполнены 2 дипломные работы, Тереховой Н.А. (ГАИШ МГУ) и Ильиной Е.А. (КазФГУ). Большое количество студентов проходили практику в САО РАН под руководством участников проекта.

Выполнение индикаторов и показателей проекта

К проведению исследований привлечено 18 человек, в том числе 8 молодых участников, из которых 2 аспиранта и 1 студент. Среди исполнителей — 2 доктора наук, 8 — кандидатов наук, в том числе 2 молодых (меньше 35 лет на момент отчета). Доля приглашенного руководителя на четвертом этапе в общем ФОТ за 2012 год составляет 7%, доля молодых участников в общем ФОТ равна 29%. За период выполнения проекта была опубликована 31 работа в высокорейтинговых научных рецензируемых журналах и

материалах конференций, из них 13 в 2012 году. Моисеев А.В. успешно защитил докторскую диссертацию по теме «Структура и эволюция галактик по наблюдениям их внутренней кинематики». Пустильник С.А. представил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук «Поиск и исследование необычных маломассивных галактик, включая объекты с активным звездообразованием, низкой металличностью и население пустот». Макаров Д.И., Макарова Л.Н. И Шарина М.Е. приняли участие в работе Генеральной Ассамблеи Международного Астрономического Союза. Были сделаны устные доклады Макаровым Д.И. «Maximum-Likelihood implementation of Tip of the Red Giant Branch method», Макаровой Л.Н. «Tip of the Red Giant Branch Distance Indicator and Structure of the Nearest Galaxy Groups» и Шариной М.Е. «Multi-parametric scaling relations for gas-rich dwarf galaxies in different environments».

Результаты проведенных НИР будут использованы для дальнейших работ по изучению распределения и эволюции вещества во Вселенной. Изучение близких галактик является основой для сравнения наблюдений с современными космологическим моделированием. Полученные результаты, в том числе каталоги и базы данных галактик, могут быть использованы астрономами для проведения фундаментальных исследований и для образовательных целей.

Таким образом, настоящий Отчет иллюстрирует, что все задачи, поставленные по государственному контракту выполнены в полном объеме и в соответствии с Техническим заданием и Календарным планом.

Руководитель работ

Д.И. Макаров

Список литературы

1. Antonov, V.A. 1973, In: The Dynamics of Galaxies and Star Clusters, p. 139, ed. G.B. Omarov, Nauka, Alma Ata
2. Bassino, L.P., Muzzino, J.C. & Rabolli, M. 1994, ApJ, 431, 634
3. Begum A., Chengalur J. N., Karachentsev I. D., Kaisin S. S, Sharina M. E. 2006, MNRAS, 365, 1220
4. Begum A., Chengalur J.N., Karachentsev I.D., Sharina M. E. 2008 MNRAS, 386, 138
5. Begum A., Chengalur J.N., Karachentsev I.D., Sharina M.E, Kaisin S.S. 2008, MNRAS, 386, 1667
6. Bender, R., Burstein, D. & Faber, S.M. 1992, ApJ, 399, 462
7. Chattopadhyay, T.; Sharina, M.E.; Karmakar, P., 2010, ApJ 724, 678
8. Dabringhausen, J., Hilker, M. & Kroupa, P. 2008, MNRAS, 386, 864
9. Dekel, A. & Silk, J. 1986, ApJ, 303, 39
10. Djorgovski, S. & Davis, M., 1987, ApJ, 313, 59
11. Drinkwater, M.J., Gregg, M. D., Couch, W. J., Ferguson, H. C.,
12. Drinkwater, M.J., Jones, J.B., Gregg, M.D. & Phillipps, S. 2000, PASA, 17, 227.
13. Faber S.M., Wegner, Gary, Burstein, D., Davies, Roger L., Dressler, A., Lynden-Bell, D. & Terlevich, R. J. 1989, ApJS, 71, 173
14. Faber S.M., Jackson R.E., A&A 204, 668-683 (1976)
15. Fellhauer, M. & Kroupa, P. 2002, MNRAS, 330, 642.
16. Gallazzi, A., Charlot, S., Brinchmann, J., White, S. D. M. & Tremonti, C.A. 2005, MNRAS, 362, 41
17. Geha M., Blanton M.R., Masjedi M., West A.A., 2006, ApJ 653, 240
18. Goerdt, T., Moore, B., Kazeantzidis, S., Kaufmann, T., Maccio, A.W. & Stadel, J. 2008, 385, 2136.
19. Harris, W. E. 1989, in B.W. Carney and W.E. Harris 2001, Star Clusters: Saas-Fee Advanced Course 28, ed. L.Labhardt and B.Binggeli, Springer, Swiss Society for

20. Hilker, M., Infante, L., Viera, G., Kissler-Patig, M. & Richtler, T. 1999, A&AS, 134, 75.
21. Hilker, M., Jones, J. B., Karick, A. & Phillipps, S. 2004, PASA, 21, 375.
22. Kannappan S.J., Fabricant D.G., Franx M., 2002, AJ, 123, 2358
23. Karachentsev I.D., Karachentseva V. E., Huchtmeier, W.K., Makarov D. I., 2004, AJ, 127, 2031
24. Klypin A.A., Kravtsov, A. V., Valenzuela O., Prada F. 1999, ApJ, 522, 82
25. Kroupa, P. 1998, MNRAS, 300, 200.
26. McLaugh, Wolf 2010, ApJ 722, 248
27. McLaughlin, D. E. 2000, ApJ, 539, 618
28. Mieske, S. & Kroupa P. 2008, ApJ 677, 276
29. Mieske, S., Hilker, M., Infante, L. & Jordan, A. 2006, AJ, 131
30. Moiseev A.V., 2002, Bulletin of the Special Astrophys. Observatory, 2002, 54, 74
31. Моисеев А.В., Егоров О.В. 2008, Астрофизический Бюллетень, 63, 193
32. Munoz-Tunon C., Tenorio-Tagle G., Castaneda H.O., Terlevich R., 1996, ApJ, 112, 1636
33. Padmanabhan T. 2000, Theoretical Astrophysics, Volume I: Astrophysical Processes, Cambridge Univ. Press., Cambridge
34. Penarrubia, J., Martinez-Delgado, D., Rix, H.W., et al., 2005, ApJ 626, 128
35. Пиблс Ф.Дж. «Структура Вселенной в больших масштабах» М.:Мир (1983).
36. Stetson P.B., Davis L.E., Crabtree D.R., 1990, in ASP Conf.Ser. 8, CCDs in Astronomy (San Francisco: ASP), 289
37. Strader, J. & Smith, G. H. 2008, AJ, 136, 1828
38. Thomas, D., Maraston, C., Bender, R. & Mendes de Oliveira, C. 2005, ApJ, 621, 673
39. Tikhonov A.V. Gottloeber S, Yepes G, Hoffman Y., 2009, MNRAS, 399, 1611
40. Tikhonov A.V. & Klypin A. 2009, MNRAS, 395, 1915
41. van den Bergh, S., Hagen G.L., 1975, AJ, 80, 11

42. Verheijen 2001, ApJ 563, 694
43. Warren S.R. et al., 2011, ApJ, 738 , 10
44. Zaritsky, D., Gonzalez, A. H. & Zabludoff, A. I. 2006, ApJ, 638, 725.
45. Зельдович Я.Б., Новиков И.Д. «Строение и эволюция Вселенной», М.: Наука (1975)

Приложение А: Список публикаций коллектива

1. Chattopadhyay T., Sharina M., Davoust E., De T., Chattopadhyay A.K. “Uncovering the Formation of Ultracompact Dwarf Galaxies by Multivariate Statistical Analysis” 2012, *ApJ*, 750, 91
2. Chengalur J.A., Pustilnik S.A. “Discovery of an extremely gas-rich dwarf triplet near the center of the Lynx-Cancer void” 2012, arXiv/1210.1063, *MNRAS*, tmp, 1365
3. Courtois H.M., Tully R.B., Makarov D.I., Mitronova S.N., Koribalski B., Karachentsev I.D., Fisher J.R., “Cosmic Flows: Green Bank Telescope and Parkes H I observations”, 2011, *MNRAS*, 414, 2005
4. Davoust E., Sharina M.E., Donzelli C.J. «The globular cluster BH 176 revisited», 2011, *A&A*, 528, 70
5. Кайсин С.С., Караченцев И.Д., Кайсина Е.И., “Обзор H α эмиссии у 30 близких карликовых галактик”, 2011, *Астрофизика*, 54, 3
6. Kaisin S.S., Karachentsev I.D., Ravindranath S. “H α survey of nearby dwarf galaxies”, 2012, *MNRAS*, 425, 1365
7. Kaisina E.I., Makarov D.I., Karachentsev I.D., Kaisin S.S., «Observational database for studies of nearby universe», 2012, *Astrophys.Bull.*, 67, 115
8. Karachentsev I.D. “Missing dark matter in the local universe”, 2012, *Astrophysical Bulletin*, 67, 123
9. Karachentsev, Kaisin, Kaisina, Makarova, «Emission sparks around M81 and in some dwarf spheroidal galaxies» 2011, *MNRAS*, 415, 31
10. Karachentsev I.D., Karachentseva V.E., Melnyk O.V., Elyiv A.A., Makarov D.I. “Low Density Structures in the Local Universe. I. Diffuse Agglomerates of Galaxies”, 2012, *Astrophysical Bulletin*, 67, 353
11. Karachentsev I.D., Nasonova O.G., Courtois H.M. “Fast motions of galaxies in the Coma I cloud: a case of Dark Attractor?” 2011, *Astrophysical Journal*, 743, 123
12. Karachentseva V.E., Karachentsev I.D., Melnyk O.V. «Faint companions of isolated 2MIG galaxies», 2011, *Astrophysical Bulletin*, 66, 389

13. Kniazev A., Pustilnik S., Tepliakova A., Burenkov A. “Metallicities of Galaxies in the Lynx-Cancer Void”, 2011, Environment and the Formation of Galaxies: 30 years later, Astrophysics and Space Science Proceedings, 25
14. Kudrya Yu.N., Karachentseva V.E., Karachentsev I.D., «Optical and HI properties of isolated galaxies in the 2MIG catalog. I. General relationships», 2012. Astrophysics, 54, 4, 445-462
15. Makarov D.I., Karachentsev I.D., Uklein R.I. “Groups of Dwarf Galaxies in the Local Supercluster”, 2011, EAS Publication Series, 48, 289-294
16. 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” 2012, MNRAS, 425, 709
17. Makarov D.I., Uklein R.I. “A List of Groups of Dwarf Galaxies in the Local Supercluster”, 2012, Astrophys.Bull., 67, 123
18. Makarova L., Koleva M., Makarov D., Prugniel Ph. “Star Formation History of KDG 61 and KDG 64 From Spectroscopy and Colour-Magnitude Diagrams”, 2011, EAS Publications Series, 48, 65
19. Makarova L., Makarov D., Savchenko S., «Star formation history and environment of the dwarf galaxy UGCA 92», 2012, MNRAS, in press
20. Martin J.-M., Pustilnik S.A., Kniazev A.Y. “Properties of unusual void LSBs versus cosmological simulations predictions”, 2011, SF2A-2011: Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics, 37
21. Moiseev A.V. & Lozinskaya T.A. “Ionized gas velocity dispersion in nearby dwarf galaxies: looking at supersonic turbulent motions”, 2012, MNRAS, 423, 1831
22. Nasonova O.G., de Freitas Pacheco J.A., Karachentsev I.D., “Hubble flow around Fornax cluster of galaxies”, 2011, Astron. and Astrophys., 532, 104.
23. Pustilnik S., Kniazev A., Lyamina Yu., Tepliakova A. “Dwarf Galaxies in the Nearby Lynx-Cancer Void: Photometry, Colours and Ages”, 2012, Dwarf Galaxies: Keys to Galaxy Formation and Evolution, Astrophysics and Space Science Proceedings, 315
24. Pustilnik S.A., Martin J.-M., Tepliakova A.L., Kniazev A.Y., «Study of galaxies in the

- Lynx-Cancer void. III. New extreme LSB dwarf galaxies», 2011, MNRAS, 417, 1335-1349
25. Pustilnik S.A., Tepliakova A.L. “Study of galaxies in the Lynx-Cancer void - I. Sample description”, 2011, MNRAS, 415, 1188-1201
 26. Pustilnik S.A., Tepliakova A.L., Kniazev A.Y. “Study of galaxies in the Lynx-Cancer void. II. The element abundances”, 2011, *Astrophys.Bulletin*, 66, 255-292
 27. Roychowdhury S., Chengalur J.N., Kaisin S.S., Begum A., Karachentsev I.D. “Small Bites: star formation recipes in extreme dwarfs”, 2011, MNRAS, 414, 55
 28. Sharina M., Aringer B., Davoust E., Kniazev A.Y., Donzelli C.J. “A CH star in the globular cluster NGC 6426”, 2012, MNRAS, 426, 1365
 29. Sharina M.E., Chandar R., Puzia T.H., Goudfrooij P., Davoust E. «Observational Properties of Globular Clusters in Dwarf Galaxies», 2011, *EAS Publications Series*, 48, 237-241
 30. Uklein R.I., Makarov D.I., Roychowdhury S. «Rendez-Vous of Dwarfs», 2011, *EAS Publications Series*, 48, 159
 31. Uklein R., Makarov D. “Groups of Dwarf Galaxies in the Local Supercluster”, 2012, *Fifty years of Cosmic Era: Real and Virtual Studies of the Sky, Proceedings of the Conference of Young Scientists of CIS Countries*, 216