

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Егорова Евгения Сергеевна

Наблюдательное исследование галактик в войдах

Специальность 1.3.1.

«Физика космоса, астрономия»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физическо-математических наук
Пустильник Семен Аронович

Нижний Архыз — 2022

Оглавление

	Стр.
Введение	5
Глава 1. Обработка данных и методы	21
1.1 Наблюдения и обработка данных	21
1.1.1 Спектральные данные, полученные на телескопе SALT . . .	21
1.1.2 Спектральные данные, полученные на телескопе БТА . . .	22
1.1.3 Наблюдения с интерферометром Фабри-Перо	27
1.1.4 Данные GMRT	28
1.1.5 Фотометрические данные	29
1.2 Методы оценки содержания кислорода O/H	30
Глава 2. Исследование галактик в войде Eridanus	35
2.1 Войд Eridanus	35
2.2 Выборка галактик войда	36
2.3 Спектральные наблюдения	41
2.3.1 Результаты оценки O/H	43
2.3.2 Комментарии для некоторых галактик	44
2.4 Обсуждение результатов	46
2.4.1 Выборка галактик в войде Eridanus	46
2.4.2 Зависимость между $12+\log(\text{O}/\text{H})$ и светимостью галактик	48
2.4.3 Замечания относительно некоторых интересных объектов	51
2.4.4 Сравнение с предыдущими исследованиями и моделями .	52
2.5 Выводы	54
Глава 3. Поиск и исследование галактик с экстремально низкой металличностью	56
3.1 Введение	56
3.2 Выборка галактик в близких войдах	60
3.3 Галактики-прототипы для поиска необычных богатых газом карликовых галактик с экстремально низкой металличностью . .	60
3.4 Критерии отбора кандидатов и итоговая выборка	64

	Стр.
3.5	Наблюдения на телескопах SALT и БТА 72
3.6	Содержание кислорода O/H по данным с телескопов SALT и БТА 78
3.7	Обсуждение 81
3.7.1	Сценарии для различных типов карликовых ХМР галактик 84
3.7.2	Связь ХМР объектов войдов и очень молодых галактик . 86
3.8	Выводы 87
Глава 4.	Исследование галактики UGC 3672 88
4.1	Введение 88
4.2	Результаты 89
4.2.1	Данные низкого разрешения 89
4.2.2	Карты HI высокого разрешения 90
4.2.3	Звездные величины, цвета, и потоки в линии H α 94
4.3	Обсуждение 96
4.3.1	Природа UGC 3672 96
4.3.2	Система UGC 3672 в контексте 103
4.4	Выводы 106
Глава 5.	Взаимодействие галактик и аккреция газа в войдах.
	Выборка и исследование галактики NGC 428 108
5.1	Введение 108
5.2	Выборка галактик 110
5.3	NGC 428: основные свойства и окружение 111
5.4	Используемые данные 115
5.5	Результаты 116
5.5.1	Фотометрическая структура и глобальная кинематика ионизованного газа 116
5.5.2	Мелкомасштабные некруговые движения 121
5.5.3	Возбуждение газа и содержание химических элементов . . 125
5.6	Обсуждение результатов 132
5.7	Выводы 134
Глава 6.	Детальное исследование галактики Ark 18 136
6.1	Введение 136

	Стр.
6.2	Используемые данные 139
6.3	Результаты 141
6.3.1	Морфология и темп звездообразования Ark 18 141
6.3.2	Глобальная кинематика ионизованного газа 145
6.3.3	Оценка возрастов звезд из широкополосной фотометрии . 149
6.3.4	Условия возбуждения газа и содержание химических элементов 150
6.4	Обсуждение результатов 160
6.5	Выводы 163
Заключение 164	
Благодарности 166	
Список литературы 167	
Приложение А. 190	
A.1	Выборка галактик войда Eridanus 190
A.2	Галактики с новыми оценками скоростей 194
A.3	Спектры галактик из выборки в войде Eridanus 195

Введение

Актуальность темы исследования

Распределение галактик в пространстве, как сейчас известно, довольно неоднородно. Хотя указания на существование скоплений и сверхскоплений исследователи отмечали давно (с 1950х-60х годов), но изначально предполагалось, что они находятся на относительно равномерном фоне. Поэтому в конце 70-х годов XX века довольно удивительным оказалось обнаружение областей, в которых галактик практически не наблюдалось [1, 2] – войдов. Так, был открыт войд Bootes [3] – одна из самых крупных «пустот» в распределении галактик, с поперечником более 60 Мпк.

Немного позже, при анализе данных обзора красных смещений CfA в работе Де Лаппаран и др., 1986 [4] была обнаружена ячеистая структура в распределении галактик, включающая несколько «пустот». Затем данные обзоров 2dFGRS, SDSS, 2MASS показали, что войды являются неотъемлемой частью крупномасштабной структуры Вселенной [см., например, 5]. Также оказалось, что сами войды не пустые, однако плотность галактик в них существенно ниже, чем в группах и скоплениях. Они занимают около 77% объема пространства, но при этом содержат всего ~15% массы вещества [6]. Это означает, что средняя плотность вещества в войдах составляет около 20% от средней плотности вещества во Вселенной. Предполагается, что они могут включать одномерные (филаменты) и двумерные (т.н. «стенки») структуры, состоящие из темной материи, газа и галактик, а также подвойды меньшего размера. Размеры войдов зависят от того, какие галактики используются для определения их границ (и от самого применяемого метода), и могут достигать нескольких десятков мегапарсек, хотя верхний предел на возможные размеры войдов в настоящий момент не установлен.

Указания на сложную, ячеистую крупномасштабную структуру Вселенной были получены еще в моделях Я.Б.Зельдовича и его группы [7, 8], – согласно этому приближению, разработанному в рамках космологической модели с горячей темной материей, такая структура возникает из малых возмущений плотности после рекомбинации. При этом сжатие вещества происходит

несимметрично, и сначала образуются плоские объекты, так называемые «блины Зельдовича». Они фрагментируются на более мелкие сгустки, внутри которых формируются галактики. Постепенно под действием гравитации «блины» продолжают собираться сначала в одномерные структуры, филаменты, а затем – в скопления. Согласно модели, «блины» хаотично расположены в пространстве, и в результате получается ячеистая структура Вселенной. Областям с большей плотностью соответствуют скопления, цепочки скоплений, и сверхскопления. Модели, в рамках которых получалась подобная картина, разрабатывались также и другими группами [например, 9].

Считается, что войды «сохраняют» информацию о космологических параметрах и сценарии эволюции Вселенной. Это позволяет тестировать различные космологические модели, исследовать свойства темной энергии и темной материи. Помимо этого, войды являются идеальными областями для исследования процесса формирования и эволюции галактик. Благодаря очень разреженному окружению, галактики испытывают гораздо меньше взаимодействий, чем в группах и скоплениях. Это значит, что они являются хорошими объектами для изучения как внутренней эволюции, так и взаимодействий между галактиками (при низком темпе взаимодействий и слияний легче восстановить их историю и учесть влияние отдельного события) и аккреции газа. В частности, ожидается, что холодная аккреция газа из филаментов может играть большую роль для галактик на больших красных смещениях, а также для маломассивных гало в войдах в настоящую эпоху. Кроме того, считается, что условия в центральных областях войдов в принципе могут быть приближены к условиям в ранней Вселенной [10], а результаты моделирования показывают, что там могут находиться эволюционно более молодые галактики [11].

Согласно численным космологическим моделям в рамках парадигмы холодной темной материи с лямбда-членом, в разреженном окружении гравитационно-связанные гало могут формироваться позже [10–12]. Это значит, что галактики в войдах могут быть более молодыми объектами и обладать свойствами, отличными от свойств галактик в окружении умеренной плотности. Анализ данных из обзоров SDSS и 2dFGRS показал, что галактики войдов действительно могут быть более голубыми и с более высоким удельным темпом звездообразования (темп звездообразования, нормированный на массу звезд галактики) и более поздними морфологическими типами [13–15]. Однако важно понимать, нельзя ли объяснить наблюдаемые отличия тем, что войды населе-

ны менее массивными галактиками поздних типов (то есть наблюдаются ли принципиальные отличия между галактиками с одинаковыми массами в разном окружении).

В литературе нет полного согласия по поводу отличий между галактиками войдов и галактиками в более умеренном окружении (в частности, это может быть связано с разными методами отбора галактик войдов), и в ряде работ таких отличий обнаружить не удалось [16, 17]. Однако в целом больше указаний на то, что галактики войдов обладают более высокими удельными темпами звездообразования и более высокой эффективностью звездообразования (темп звездообразования, нормированный на массу газа – параметр, дающий представление о том, насколько эффективно галактика перерабатывает свой газ в звезды).

Как уже было отмечено выше, результаты космологических моделирования показывают, что условия в центральных областях войдов могут напоминать условия в ранней Вселенной, а среди галактик войдов можно ожидать популяции молодых объектов – возможных аналогов маломассивных протогалактик.

В рамках парадигмы холодной темной материи с лямбда-членом, галактики формируются в процессе диссипативного коллапса в гало темной материи. В этом случае сначала должны образовываться маломассивные объекты, а более массивные структуры (галактики, группы, скопления) формируются позже при их слиянии. Яркие эллиптические галактики имеют довольно красные цвета, что в основном объясняют старым звездным населением в них, и в меньшей степени – высокой металличностью. Молодые галактики, наоборот, должны обладать низкой металличностью – поскольку тяжелые элементы образуются в ходе звездообразования (обогащение происходит в результате взрывов сверхновых и истечения звездных ветров), и молодые галактики еще не успели произвести большое их количество. Исходя из этого сценария, галактики с очень низкой металличностью должны часто встречаться в ранней Вселенной, и реже – в настоящее время. Считалось, что низкая металличность галактики может указывать на ее молодость [см., например, обзор 18].

За последнюю пару десятилетий было накоплено количество данных о низкометаллических галактиках, достаточное для проведения статистических исследований. Было показано, что $\sim 60\%$ низкометаллических галактик (с металличностью менее $1/10$ от солнечной) находятся в окружении низкой плотности, $\sim 75\%$ находятся в войдах и их стенках [19]. Анализ их непосредственного окру-

жения показал, что, как правило, они являются относительно изолированными объектами. Авторы работы обсуждают два возможных сценария, которые могут объяснить низкую металличность галактик – аккреция небогатенного газа из филаментов, и их возможная молодость. И аккреция, и наличие молодых галактик в войдах вполне ожидаемы. Стоит подчеркнуть, что, несмотря на существенное увеличение статистики галактик с низкой металличностью (менее 1/10 от солнечной), объекты с экстремально низкой металличностью (менее 1/30 от солнечной), которые представляют особый интерес, до сих пор очень трудны в обнаружении.

В работе [20] авторы предположили, что все галактики с низкой металличностью ($12 + \log(O/H) < 7.6$) являются молодыми объектами с возрастaми не более 40 млн. лет (что существенно меньше времени жизни Вселенной), которые испытывают первую вспышку звездообразования. В ряде последующих работ, однако, было показано, что в подавляющем большинстве низкометаллических голубых компактных галактик все же наблюдается подстилающее старое звездное население, так что их нельзя назвать действительно молодыми объектами [см., например, обзор 21]. То есть они представляют собой проэволюционировавшие карликовые системы, которые в настоящий момент переживают сильную вспышку звездообразования. Из-за того, что подстилающие диски из старых звезд имеют гораздо более низкую поверхностную яркость, чем текущие вспышки звездообразования в BCD, их долгое время не удавалось детектировать, и возможным это стало благодаря развитию наблюдательных возможностей.

Однако для IZw18, первой известной галактики с экстремально низкой металличностью [22], было показано в работе [23], что в галактике не наблюдается существенного подстилающего диска из старого звездного населения. В более современных работах, например, Твид и др., 2018 [24], очень молодые галактики определяются как объекты, в которых за последний ~ 1 млрд. лет сформировалось более половины массы звезд. Согласно этому критерию IZw18 можно отнести к молодым объектам.

В целом, галактики следуют зависимости «светимость-металличность» (см., например, [25] и более ранние работы): менее яркие (и, соответственно, менее массивные) галактики обладают более низкой металличностью. Было показано, что следование этой зависимости обусловлено внутренними процессами в галактиках, такими как более эффективное выметание тяжелых элементов [см., например, 26], а также менее эффективное звездообразование в маломас-

сивных галактиках [27]. С этой точки зрения сама по себе низкая металличность уже перестала быть указанием на особый эволюционный статус объекта.

При этом остается ряд объектов, которые не следуют общей зависимости, и обладают пониженной металличностью для их светимости (см., например, обсуждение в работе Экты и Ченгалура, 2010 [28]). К ним относятся в том числе галактики IZw18 [22], SBS 0335-052 [29], DDO 68 [30], AGC198691 [31], J1234+3901 [32] и J0811+4730 [33]. Пониженная металличность в подобных объектах может быть связана с разными механизмами, такими как аккреция низкометаллического газа (из газовых филаментов или из карликовых спутников) [см., например, обзор 34], взаимодействия или слияния галактик [35], в результате которых газ с более низкой металличностью с периферии галактик попадает в центральные области, что приводит к локальному понижению металличности и вспышке звездообразования. Кроме того, в случае молодых галактик, в которых звездообразование началось недавно, металличность также окажется пониженной [см. обзор 18].

За последние пять десятилетий, с момента обнаружения IZw18, много усилий было направлено на поиски подобных объектов с экстремально низкой металличностью. За это время выводы об их эволюционном статусе несколько раз менялись по мере развития как наблюдательных возможностей, так и теории и возможностей компьютерного моделирования. Несмотря на все усилия, галактик с экстремально низкими металличностями, как у IZw18 и ниже, все еще известно лишь два десятка, а вопрос об их эволюционном статусе до сих пор открыт и является предметом многих современных комплексных исследований.

Данная Диссертационная работа посвящена исследованию свойств и эволюции галактик в разреженном окружении (войдах) и, в частности, поиску и детальному изучению галактик с экстремально низкой металличностью и обсуждению их возможного эволюционного статуса. Также в Диссертации исследуются процессы взаимодействия и слияния галактик, и внешней аккреции газа в войдах.

Таким образом, **предметом** данного исследования являются особенности эволюции галактик в разреженном окружении, **объектом** являются галактики в войдах.

Цели и задачи исследования

Целью выполненного в диссертации исследования является изучение популяции галактик войдов и особенностей их эволюции. В ходе выполнения диссертационной работы были поставлены и решены следующие задачи:

- Создание выборки галактик в экваториальной зоне войда Eridanus. Проведение спектральных наблюдений галактик выборки на телескопе SALT (ЮАР) и 6м телескопе БТА САО РАН. Обработка полученных данных и оценка содержания кислорода по полученным спектрам и архивным данным. Сравнение свойств галактик этой выборки и реперной выборки галактик, находящихся в более плотном окружении.
- Создание выборки для поиска кандидатов в очень молодые галактики. Проведение спектральных наблюдений на телескопе SALT (ЮАР) и 6м телескопе БТА САО РАН. Обработка полученных данных и оценка содержания кислорода по полученным спектрам, исследование вопроса о возможной эволюционной молодости части объектов выборки.
- Поиск и исследование эпизодов аккреции и взаимодействия среди галактик войдов методами панорамной и длинноцелевой спектроскопии с привлечением фотометрии.
- Детальное исследование индивидуальных галактик войдов и процессов, влияющих на их эволюцию и наблюдаемые свойства.

Методология и методы исследования

Для решения поставленных в работе задач были использованы как общенаучные методы (анализ, дедукция, индукция), так и специальные – обработка и анализ фотометрических, спектральных, и интерферометрических данных в средах IRAF, MIDAS, IDL, Python, AIPS, а также методы математической статистики.

Научная новизна работы

Все основные результаты работы являются новыми и состоят в следующем:

- впервые была создана выборка для поиска кандидатов в очень молодые галактики в близких войдах, а также выборка галактик из экваториальной зоны войда Eridanus;
- впервые были получены данные длиннощелевой спектроскопии и оценки содержания кислорода для галактик войда Eridanus и для выборки кандидатов в очень молодые галактики. Было обнаружено 10 новых галактик с экстремально низкой металличностью $Z_{\text{gas}} < Z_{\odot}/30$, а также 13 новых низкометаллических галактик с $Z_{\odot}/30 < Z_{\text{gas}} < Z_{\odot}/20$;
- впервые были получены данные о распределении и кинематике нейтрального водорода в линии 21см для системы UGC3672 на индийском радиоинтерферометре GMRT. Была исследована экстремально богатая газом карликовая галактика низкой поверхностной яркости в системе UGC3672;
- впервые исследованы методом панорамной спектроскопии галактики NGC428 и Ark18. Впервые сделан вывод о возможном недавнем эпизоде аккреции газа или малого слияния для галактики NGC428. Впервые был сделан вывод о формировании диска низкой поверхностной яркости в галактике Ark18 как результата слияния двух карликовых галактик.

Научная и практическая значимость

Полученные в данной диссертационной работе результаты значительно расширяют представления об эволюции галактик в разреженном окружении, а также о влиянии процессов аккреции газа и взаимодействий галактик на их эволюцию в целом. Галактики с экстремально низкой металличностью часто рассматриваются как аналоги молодых галактик в Ранней Вселенной. Изучение таких объектов на больших красных смещениях из-за их удаленности является сложной задачей даже с использованием самых современных инструментов и

методов. Поэтому поиск и исследование их более близких аналогов может дать важную информацию об их свойствах. Галактик с металличностью как у IZw18 и ниже до последнего времени в ближней Вселенной было известно около десятка. Как экстремальные объекты, они представляют большой интерес с точки зрения моделирования процессов формирования и эволюции маломассивных галактик. Добавление еще такого же количества подобных объектов существенно расширяет возможности их статистического группового исследования, и изучения их возможного разнообразия и различных сценариев эволюции. Кроме того, в научных работах соискателя исследуются процессы взаимодействий галактик и аккреции газа в войдах. Такие исследования важны для понимания эволюции галактик в целом, а также вопроса о том, каким образом происходит пополнение запасов газа в галактиках, необходимых для поддержания звездообразования на протяжении длительного времени. Найденные в ходе работы галактики с экстремально низкой металличностью могут быть использованы для исследования важного космологического параметра – содержания первичного гелия, для детального исследования звездообразования при очень низких металличностях, а также в качестве аналогов молодых галактик в Ранней Вселенной для их дальнейшего более детального изучения. Результаты исследования процессов аккреции и взаимодействий могут быть использованы при отборе объектов для наблюдений с инструментами нового поколения, таких как JWST (The James Webb Space Telescope), SKA (Square Kilometre Array), ELT (The Extremely Large Telescope), TMT (The Thirty Meter Telescope). Таким образом, результаты проведенных соискателем ученой степени исследований обладают высокой научной и практической значимостью и затрагивают фундаментальные вопросы формирования и эволюции галактик в целом.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Среднее содержание кислорода в галактиках экваториальной зоны войда Eridanus по результатам спектральных наблюдений на телескопах SALT и БТА, а также по архивным спектрам SDSS, понижено по сравнению с галактиками реперной выборки Местного Объемы в более плотном окружении. Это подтверждает выводы, сделанные ранее

по выборке галактик в войде Lynx-Cancer. Средний дефицит металличности газа по обеим выборкам составляет $\sim 40\%$.

2. Из 44 кандидатов в низкометаллические галактики в войдах, по результатам наблюдений на телескопах SALT и БТА, 23 имеют очень низкую металличность ($Z_{\odot}/50 < Z_{\text{gas}} < Z_{\odot}/20$). 10 из них относятся к объектам с рекордно низкой металличностью $Z_{\text{gas}} < Z_{\odot}/30$. Половина галактик с $Z_{\text{gas}} < Z_{\odot}/30$ показывают набор необычных свойств, а именно голубые цвета звездного населения, высокие массовые доли газа (97% и выше), и металличность, пониженную в 2.5-4 раза по сравнению с галактиками реперной выборки. Такие свойства указывают на то, что эти галактики находятся на ранних этапах эволюции.
3. Карликовая иррегулярная галактика UGC3672, находящаяся вблизи центра войда Lynx-Cancer, по результатам картографирования нейтрального водорода HI на индийском радиоинтерферометре GMRT, представляет собой систему из трех взаимодействующих галактик. Две более массивные из них находятся в процессе слияния; маломассивный третий компонент, вероятно, аккрецирует на центральную систему вдоль газового филамента крупномасштабной структуры. Этот маломассивный компонент показывает голубые цвета звездного населения, необычно высокое содержание газа ($M(\text{HI})/L_B=17$), а также, согласно результатам независимой спектроскопии, имеет экстремально низкую металличность газа $Z_{\text{gas}} \sim Z_{\odot}/50$. Эти свойства указывают на ранние этапы эволюции галактики.
4. Согласно результатам панорамной и длиннощелевой спектроскопии, проведенной на телескопе БТА и дополненной архивными фотометрическими данными, крупномасштабная кинематика ионизованного газа спиральной галактики войда NGC428 хорошо описывается круговыми движениями в тонком плоском диске с радиальными потоками в области бара. Наличие наклонного околоядерного диска, а также области с высокими остаточными скоростями, полученными после вычитания модели из наблюдаемого поля скоростей, указывают на вероятный недавний эпизод аккреции газа или малого слияния на шкале времени не более 500 млн. лет в NGC428. Наблюдаемое распределение металличности газа по радиусу галактики также не противоречит этому выводу.

5. Согласно результатам панорамной и длиннощелевой спектроскопии, полученной на телескопе БТА и дополненной архивными фотометрическими данными, галактика Ark18 содержит две кинематические подсистемы. Звездный диск низкой поверхностной яркости необычной галактики войда Ark18 был сформирован в результате слияния двух карликовых галактик, произошедшего не менее 300 млн. лет назад.

Апробация работы

Результаты работ были представлены на семинаре астрономического отделения математического факультета Университета Белграда в (2018 г., Белград, Сербия), на семинаре Института астрономических вычислений Хайдельбергского университета (2021 г., Хайдельберг, Германия), а также на следующих российских и международных конференциях:

1. Международная конференция «The interplay between local and global processes in galaxies», Козумель, Мексика, 11-15 апреля 2016, стендовый доклад «Search for evidences of gas accretion onto late-type disc galaxies in voids: the first results»
2. Международная конференция «Crossing the Rubicon: The fate of gas flows in galaxies», Сантарканджелло-ди-Романья, Италия, 5-9 сентября 2016, стендовый доклад «Gas kinematics of void galaxies: searching for evidences of gas accretion»
3. Международная конференция «Multi-spin Galaxies 2016», п. Нижний Архыз, Карачаево-Черкессия, Россия, 26-30 сентября 2016, устный доклад «Gas kinematics of void galaxies: Searching for evidences of gas accretion»
4. Международная конференция «The galaxy life-cycle. From activity to quiescence, and back, across cosmic times», Венеция, Италия, 24-28 октября 2016, стендовый доклад «Gas kinematics of void galaxies: searching for evidences of gas accretion»
5. Международная конференция «EWASS 2017», Чехия, 26-30 июня 2017, стендовый доклад «Gas kinematics of void galaxies: searching for evidences of gas accretion»

6. Международная конференция «The Role of Gas in Galaxy Dynamics», Валетта, Мальта, 2-6 октября 2017, стендовый доклад «Ionized gas in galaxies with peculiar morphology: searching for external accretion imprints»
7. Международная конференция «The Olympian Symposium 2018: Gas and stars from milli- to mega-parsecs», Paralia Katerini, Греция, 28 мая - 1 июня 2018, стендовый доклад «Ionised gas kinematics of void galaxies»
8. XXXth General Assembly of the International Astronomical Union, Вена, Австрия, 20-31 августа 2018, два стендовых доклада: «Study of galaxies in the Eridanus void», «Search for evidence of gas accretion onto late-type disc galaxies in void environment: NG428 case»
9. Международная конференция 15th Potsdam Thinkshop: «The role of feedback in galaxy formation: from small-scale winds to large-scale outflows», Потсдам, Германия, 3-7 сентября 2018, стендовый доклад «Search of the gas inflows and outflows in the void galaxies»
10. XIII съезд Международной общественной организации «Астрономическое общество» и приуроченная к нему Научная конференция «Астрономия - 2018», ГАИШ МГУ, Москва, Россия, 22-26 октября 2018, устный доклад «Наблюдаемые проявления аккреции газа в галактиках войдов»
11. II конференция «Chemical abundances in gaseous nebulae», Сан-Жозе-дус-Кампус, Бразилия, 11-14 марта 2019, устный доклад «Low metallicity galaxies in voids: young population and imprints of gas accretion»
12. Международная конференция «Multi-spin Galaxies 2019», Асьяго, Италия, 20-23 мая 2019, устный доклад «Study of strongly misaligned galaxies in voids»
13. Международная конференция «EWASS 2019», Лион, Франция, 24-28 июня 2019, устный доклад «Ionized gas kinematics of void galaxies as probe of their dynamical evolution»
14. Международная конференция «Diversity of the Local Universe», Нижний Архыз, Россия, 30 сентября - 4 октября 2019, два устных доклада: «Search for new very low metallicity galaxies in the Local Universe, study of their diversity and speculations on its origin», «Ionized gas kinematics of void galaxies»

15. Международная конференция «EAS 2020», Лейден, Нидерланды, 29 июня - 3 июля 2020, устный доклад (онлайн) «Nearby Void galaxies as tools for near-field cosmology»
16. Всероссийская астрономическая конференция — 2021 (ВАК — 2021) «Астрономия в эпоху многоканальных исследований», ГАИШ МГУ, Москва, Россия, 23-28 августа 2021, устный доклад «Галактика Ark 18 как результат слияния двух карликов»
17. Международная конференция «EAS 2022» (секция SS3: Voids: Cosmology, Cosmic Web and Void Galaxies), Валенсия, Испания, 27 июня - 1 июля 2022, устный доклад «Probing galaxy population in the nearby voids: the current status», стендовый доклад «Ionized gas kinematics of void galaxies»

Публикации по теме Диссертации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 печатных изданиях, все из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science/Scopus/RSCI, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

1. Chengalur J. N., Pustilnik S. A., Egorova E. S. - UGC 3672: an unusual merging triplet of gas-rich galaxies in the Lynx-Cancer void. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, V. 465, Is. 2, p.2342–2351, 2017 (импакт-фактор: 5,287 по WoS)
2. Kniazev A.Y., Egorova E. S., Pustilnik S. A. - Study of galaxies in the Eridanus void. Sample and oxygen abundances. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, V. 479, Is. 3, p.3842–3857, 2018 (импакт-фактор: 5,287 по WoS)
3. Egorova E. S., Moiseev A. V., Egorov O. V. - Search for gas accretion imprints in voids – I. Sample selection and results for NGC 428. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, V. 482, Is. 3, p.3403–3414, 2019, (импакт-фактор: 5,287 по WoS)
4. Pustilnik S. A., Egorova E. S., Perepelitsyna Y. A., Kniazev A. Y. - XMP gas-rich dwarfs in nearby voids: candidate selection. *Monthly Notices of the*

- Royal Astronomical Society, V. 492, Is. 1, p. 1078–1090, 2020 (импакт-фактор: 5,287 по WoS)
5. Pustilnik S. A., Kniazev A. Y., Perepelitsyna Y. A., Egorova E. S. - XMP gas-rich dwarfs in nearby voids: results of SALT spectroscopy. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, V. 493, Is. 1, p. 830–846, 2020 (импакт-фактор: 5,287 по WoS)
 6. Egorova E. S., Egorov O. V., Moiseev A. V., Saburova A. S., Grishin K. A., Chilingarian I. V. - Search for gas accretion imprints in voids: II. The galaxy Ark 18 as a result of a dwarf-dwarf merger. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, V. 504, Is. 4, p. 6179–6197, 2021 (импакт-фактор: 5,287 по WoS)
 7. Pustilnik S. A., Egorova E. S., Kniazev A. Y., Perepelitsyna Y. A., Tepliakova A. L., Burenkov A. N., Oparin D. V. - XMP gas-rich dwarfs in nearby voids: results of BTA spectroscopy. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, V. 507, Is. 1, p. 944–962, 2021 (импакт-фактор: 5,287 по WoS)

Личный вклад автора

- Во всех работах автор участвовала в подготовке публикации, анализе и обсуждении полученных результатов
- Подготовка объектов программы для наблюдений на телескопах БТА и SALT. Обработка полученных спектральных данных в работе 2 проводилась совместно с Князевым А.Ю. Обработка полученных спектральных данных в работах 5,7 проводилась совместно с Перепелицыной Ю.А. и Тепляковой А.Л.
- Построение модельного поля скоростей при анализе кинематики ионизованного газа в работе 3, поверхностная фотометрия галактик в работах 1,3,6. В работе 6 построение модельного поля скоростей проводилось совместно с Моисеевым А.В.
- Автор является основным заявителем поддержанной наблюдательной программы «Наблюдательные проявления аккреции газа в дисковых

галактиках» на телескопе БТА, по результатам которой были опубликованы статьи 3,6

Структура и объем диссертации

Диссертация содержит введение, шесть глав, заключение, список цитируемой литературы из 271 наименований (на 23 страницах) и приложение. Полный объем диссертации – 200 страниц, включая 45 рисунков и 22 таблицы.

Краткое содержание диссертации

Во Введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы. Описаны цели и задачи исследования, дается характеристика научной новизны работы, а также научной и практической значимости полученных результатов. Формулируются основные положения, выносимые на защиту. Указан личный вклад автора, приведен список опубликованных статей, которые содержат основные результаты работы, а также конференций, на которых были представлены эти результаты. Изложена структура и новизна работы, а также краткое содержание диссертации.

В Главе 1 описываются полученные в работе наблюдательные данные, их обработка и используемые методы. П. 1.1.1 посвящен спектральным данным, полученным на телескопе SALT, п. 1.1.2 – спектральным данным, полученным на 6м телескопе БТА САО РАН, п. 1.1.3 – данным о кинематике ионизованного газа в линии $H\alpha$, полученным с интерферометром Фабри-Перо на 6м телескопе БТА САО РАН, п. 1.1.4 – данным в линии $H\text{I}$ 21см, полученным на индийском радиоинтерферометре GMRT, п. 1.1.5 – использованным в работе архивным фотометрическим данным. В п. 1.2 кратко описаны применяемые в работе методы оценки содержания кислорода в газе $12+\log(\text{O}/\text{H})$.

В Главе 2 Диссертации сформирована выборка из 66 галактик в экваториальной зоне войда Eridanus, и приводится анализ новых спектральных данных, полученных для галактик выборки на телескопах SALT и БТА, а также архив-

ных спектров SDSS. Была построена зависимость “светимость – металличность” для исследуемых галактик войда, и сделан вывод о пониженной металличности галактик войда по сравнению с реперной выборкой галактик в более плотном окружении в Местном Объеме. Полученные результаты сравниваются с предыдущими исследованиями и моделями. Также в **Главе 2** приводятся комментарии относительно отдельных объектов выборки. П. 2.5 содержит основные выводы.

В **Главе 3** Диссертации представлено описание подхода к поиску галактик с экстремально низкой металличностью газа в войдах, а также обсуждаются результаты этого поиска. Первая часть **Главы 3** посвящена формированию выборки галактик-кандидатов в экстремально низкометаллические объекты. Для этого был использован Каталог галактик в близких войдах (NVG), представленный в работе Пустильника и др., 2019 [36]. Выборка галактик из этого каталога была использована для того, чтобы выделить группу из примерно 60 карликовых галактик поздних типов и низкой светимости в качестве кандидатов в богатые газом ХМР объекты. Затем была проведена спектроскопия на 6-м телескопе БТА САО РАН и Южно-африканском большом телескопе (SALT, [37, 38]) для оценки содержания кислорода O/H. Во второй части **Главы 3** описаны результаты наблюдений, и обсуждается возможный эволюционный статус обнаруженных в ходе исследования новых ХМР объектов. В ходе проведенной спектроскопии было обнаружено 10 новых галактик с экстремально низкой металличностью $Z_{gas} \lesssim Z_{\odot}/30$, а также 13 новых низкометаллических галактик с $Z_{\odot}/30 \lesssim Z_{gas} \lesssim Z_{\odot}/20$. Также был сделан вывод о том, что половина новых галактик войдов с $Z_{gas} \lesssim Z_{\odot}/30$ показывают набор необычных свойств, которые указывают на их эволюционную молодость. В п. 3.8 представлены основные выводы.

В **Главе 4** Диссертации представлено исследование системы UGC 3672, которая находится в центральных 8% объема войда Lynx-Cancer. В первой части **Главы 4** представлен анализ карт HI низкого и высокого разрешения, полученных на индийском радиоинтерферометре GMRT, а также данных оптической фотометрии системы. Во второй части **Главы 4** обсуждается природа системы UGC 3672, свойства входящих в нее галактик и возможный эволюционный статус самого слабого компонента системы, галактики UGC 3672A. Сделан вывод о том, что UGC 3672 представляет собой триплет очень богатых газом

карликовых галактик, находящихся в процессе слияния. В п. 4.4 представлены основные выводы.

В Главе 5 Диссертации представлена выборка галактик для исследования процессов взаимодействий и аккреции в войдах, а также результаты анализа для самой яркой галактики выборки, NGC 428. Обсуждается фотометрическая структура, глобальная и мелкомасштабная кинематика ионизованного газа по данным, полученным с интерферометром Фабри-Перо, а также результаты спектральных наблюдений, проведенных на 6м телескопе БТА САО РАН. Сделан вывод о доминировании в крупномасштабной кинематике ионизованного газа чисто кругового вращения с радиальными потоками в области бара, а также об указаниях на аккрецию газа или малое слияние в недавней истории NGC 428. В п. 5.2 обсуждается выборка галактик, в п. 5.3 – приведено описание системы NGC428. В п. 5.4 описаны используемые данные, в п. 5.5 и 5.6 обсуждаются результаты, в п. 5.7 представлены основные выводы.

В Главе 6 Диссертации представлено исследование маломассивной галактики Ark 18 с диском низкой поверхностной яркости, находящейся в войде Eridanus. Был проведен анализ наблюдательных данных, полученных с длиннощелевым спектрографом и сканирующим интерферометром Фабри-Перо на 6-м телескопе БТА САО РАН. Также были использованы архивные изображения и спектры SDSS. Обсуждается глобальная кинематика ионизованного газа в линии $H\alpha$, условия возбуждения газа, содержание химических элементов и структура галактики. В конце **Главы 6** обсуждаются результаты и наиболее вероятный эволюционный сценарий формирования системы Ark 18. Сделан вывод о формировании диска низкой поверхностной яркости в результате слияния двух карликовых галактик, а также о возможном недавнем малом слиянии или аккреции газа. В п. 6.5 представлены основные выводы.

В Заключение сформулированы основные результаты работы.

В Приложении к Диссертации приводятся: изображения галактик из выборки в войде Eridanus; таблица с галактиками с оценками скоростей, полученными по данным с телескопов БТА и SALT; мозаики одномерных спектров для галактик, по которым получены оценки O/H в Главе 2.

Глава 1. Обработка данных и методы

1.1 Наблюдения и обработка данных

1.1.1 Спектральные данные, полученные на телескопе SALT

В Главах 2 и 3 для части галактик выборки наблюдения проводились со спектрографом RSS (Robert Stobie Spectrograph, [39, 40]) на Большом южноамериканском телескопе (SALT, [37, 38]).

Для наблюдений на телескопе SALT со спектрографом RSS была использована гризма GR900, которая покрывает спектральный диапазон от 3600 Å до 6700 Å, с шириной щели 1.5'' и спектральным разрешением ~ 5 Å. На SALT применяется компенсатор атмосферной дисперсии, что позволяет получать спектральные данные при любом положении длинной щели (в отличие от наблюдений на телескопе БТА, где при планировании наблюдений приходится учитывать этот эффект, см. 1.1.2).

Первичная обработка данных с SALT проводилась с использованием специального пакета программ [41] для обработки и анализа научных данных, полученных на данном телескопе и включает в себя вычитание тока смещения ("bias"), устранение вклада паразитного влияния друг на друга разных аналого-цифровых преобразователей (АЦП), расположенных на одной ПЗС-матрице, а также учет разных уровней АЦП/отсчет для разных частей мозаики. Дальнейшая обработка спектральных данных, а также последующее измерение эмиссионных линий, проводились в соответствии с процедурой, описанной в работах [30, 42]. Обработка данных включала следующие этапы: коррекция плохих колонок и строк на ПЗС-приемнике, вычисление и применение выравнивающих коэффициентов, коррекция за плоское поле, заполнение промежутков между тремя ПЗС-матрицами мозаики, поиск и удаление следов космических частиц, калибровка по длинам волн и вычитание спектра ночного неба. Для данных, полученных на SALT, спектрофотометрические стандарты были использованы только для относительной калибровки потоков. Абсолют-

ная калибровка в данном случае невозможна из-за особенностей конструкции телескопа.

Из-за этих особенностей SALT незаполненный входной зрачок телескопа перемещается во время наблюдений. Это означает, что площадь зеркала, собирающая свет, постоянно меняется, поэтому абсолютная калибровка потоков в случае наблюдений на SALT невозможна. Однако, поскольку все оптические элементы и приборы всегда одинаковы, можно использовать относительную калибровку по потокам, то есть для данных SALT можно получить относительное распределение энергии в спектрах. Для этого используется несколько известных спектрофотометрических стандартов, которые наблюдаются каждую ночь. По их спектрам строится кривая спектральной чувствительности всей системы “телескоп + спектрограф” в наблюдаемом диапазоне длин волн и проводится относительная калибровка по потокам. Одномерные спектры анализируемых HII-областей были получены суммированием нескольких строк вдоль щели.

Измерение интенсивностей эмиссионных линий одномерных спектров, а также оценка их ошибок проводились в соответствии алгоритмом, описанным в работе [43]. Все эмиссионные линии после вычитания континуума аппроксимировались гауссианами, в некоторых случаях две и более линий (например, дублет [SII] $\lambda\lambda 6716, 6730$, $H\alpha$ $\lambda 6563$ и [NII] $\lambda\lambda 6548, 6584$, дублет [OII] $\lambda\lambda 7320, 7330$) аппроксимировались одновременно. При анализе одномерных спектров хорошего качества для вычитания подстилающего континуума были использованы модельные спектры звездных населений, учитывающие вклад абсорбционных линий от звездного населения и полученные с использованием пакета ULySS [<http://ulyss.univ-lyon1.fr>, 44], в остальных случаях положение континуума определялось вручную – задавалось положение реперных точек, а затем континуум аппроксимировался гладкой кривой.

1.1.2 Спектральные данные, полученные на телескопе БТА

В Главах 2 и 3 были использованы наблюдательные данные, полученные на 6-м телескопе БТА САО РАН. Наблюдения проводились с многорежимным фокальным редуктором SCORPIO [45], установленном в первичном фокусе телескопа. Поскольку основной целью было получение оценки металличности газа

в наблюдаемых галактиках, длинная щель была ориентирована близко к текущему параллактическому углу, чтобы минимизировать влияние атмосферной дисперсии. Впервые эффект атмосферной дисперсии был детально описан в статье Филиппенко (1982) [46]. В наблюдениях использовался детектор EEV 42-40, размер пикселя на итоговом изображении составил $0.36''/px$.

При наблюдениях 4 объектов из Главы 2 использовалась гризма VPHG550G, покрывающая спектральный диапазон от 3500 до 7500 Å. Наблюдения проводились с щелью шириной $1.0''$, спектральное разрешение составило ~ 12 Å. Для оценки скоростей некоторые галактики также наблюдались с гризмой VPHV1200R, которая охватывает спектральный диапазон от 5500 до 7500 Å.

В Главе 3 выполнялись наблюдения преимущественно северной части выборки кандидатов в ХМР галактики. В период с сентября 2017 г. по январь 2019 г. (5 ночей) был использован длиннощелевой режим с шириной щели $1,0''$, и длиной $\sim 6'$. В период с октября 2019 по август 2020 наблюдения проводились (7 ночей) с модернизированным прибором SCORPIO, который позволяет, в частности, без потери времени менять предварительно установленные гризмы при наблюдениях одного и того же объекта. В этот период наблюдения проводились в длиннощелевой моде с шириной щели $1,2''$.

Для основной программы в темные ночи, когда позволяли условия, использовалась гризма VPHG1200B с полным спектральным диапазоном от 3650 до 5450 Å и FWHM=5,5 Å. В период с октября 2019 года помимо гризмы VPHG1200B использовалась также VPHG1200R, чтобы получить спектр исследуемой галактики в спектральном диапазоне 5680-7430 Å, с FWHM=5,5 Å для точно такого же положения щели, что и при использовании гризмы VPHG1200B.

Для резервной программы наблюдений (в случае плохого качества изображений и/или ночей с Луной) использовалась гризма VPHG1800R со спектральным диапазоном от ~ 6100 до 7100 Å и спектральным разрешением FWHM ~ 3.5 Å. С октября 2019 г. гризма VPHG1800R была недоступна, поэтому в этот период времени для резервной программы была использована гризма VPHG1200R. Полученные спектры позволили подтвердить лучевые скорости для ряда объектов, которые были отобраны из слепого HI обзора ALFALFA [47]. Кроме того, они использовались для оценки отношений линий [NII]λ6584 и дублета [SII]λ6716,6730 к Hα, для ранжирования наблюдаемых галактик как бо-

лее или менее приоритетных кандидатов в ХМР для последующих наблюдений с гризмой VPH1200B.

Обработка спектров и измерение потоков эмиссионных линий в Главах 2 и 3 были выполнены в средах *IRAF* и *MIDAS*. Основные этапы процесса обработки данных включали вычитание “тока смещения” (bias), коррекцию кривизны линий, коррекцию за плоское поле, калибровку по длинам волн и вычитание спектра ночного неба. Спектрофотометрические стандарты наблюдались в те же ночи и были использованы для привязки спектров к абсолютным потокам. Затем из двумерных спектров извлекались отдельные одномерные спектры исследуемых областей III путем суммирования вдоль щели (как правило, $\sim 2''$ - $4''$).

Континуум проводился таким же образом, как описано в разделе 1.1.1. После проведения континуума в одномерных спектрах и измерения потоков в линиях применялась итерационная процедура, описанная в работе [48], которая позволяет одновременно определить коэффициент экстинкции $S(H\beta)$ и эквивалентную ширину бальмеровских линий поглощения $EW(abs)$ в подстилающем звездном континууме.

Спектральные данные для галактики NGC428 в Главе 5 получены с многорежимным фокальным редуктором первичного фокуса SCORPIO [45] на 6-м телескопе БТА САО РАН. Спектральные наблюдения проводились с детектором EEV 42-40, размер пикселя на итоговом изображении составил $0.36''/px$. Была использована гризма VPHG550G, со спектральным диапазоном от 3500 до 7500 Å. Спектры снимались с шириной щели $1,0''$, что обеспечивает типичное спектральное разрешение 12 \AA , как было оценено по полуширине линий ночного неба.

Спектральные наблюдения галактики Ark18 в Главе 6 проводились в прямом фокусе 6-м телескопа БТА с использованием многорежимного фокального редуктора первичного фокуса SCORPIO-2 [49], в длиннощелевом режиме. Спектральные наблюдения проводились с детектором E2V 42-90, размер пикселя на итоговом изображении составил $0.36''/px$. Было получено три спектра при разных положениях щели. Была использована гризма VPHG1200@540, со спектральным диапазоном 3650-7250 Å, и типичным спектральным разрешением 5.3 \AA , как было оценено по полуширине линий ночного неба. Спектры снимались с шириной щели $1,0''$.

Обработка приведенных в Главах 5 и 6 спектров производилась стандартным образом с использованием пакетов программ на IDL и PYTHON, специально разработанных соавторами работ для спектральных длиннощелевых данных, полученных на SCORPIO и SCORPIO-2. Основные этапы процесса обработки данных включают вычитание “тока смещения” (bias), коррекцию кривизны линий, коррекцию за плоское поле, калибровку по длинам волн и вычитание спектра ночного неба. Обработка для каждой экспозиции проводилась отдельно, затем экспозиции складывались – на данном этапе проводилось удаление следов от космических частиц. Калибровка по длинам волн производилась с использованием эталонного спектра He-Ne-Ar лампы, полученного в ходе наблюдений. Один из спектрофотометрических стандартов (BD+25d4655 либо BD+28d4211) наблюдался на близком зенитном расстоянии непосредственно перед или после наблюдения объекта и использовался для привязки спектров к абсолютным потокам. После первичной обработки данных была проведена аппроксимация обработанных спектров с учетом параметров инструментального контура спектрографа, которые были оценены из анализа спектра сумеречного неба, полученного в рамках тех же наблюдений.

Для измерения потоков в эмиссионных линиях было использовано программное обеспечение, работающее в среде IDL и основанное на пакете программ MPFIT [50]. Чтобы увеличить соотношение сигнал/шум, для всех спектров было произведено бинирование вдоль щели, размер бинов составил 3 пикселя. После этого для измерения интегральных потоков в каждой исследуемой области эмиссионные линии были аппроксимированы гауссианами. В случае галактики NGC428, чтобы вычистить спектр подстилающего звездного населения, было выполнено его моделирование с использованием пакета ULYSS.

В случае галактики Ark18 простые модели звездного населения (simple stellar population models, SSP) PEGASE.HR [51] были свернуты с инструментальным контуром, а затем сравнивались с обработанными спектрами. Эмиссионные спектры были получены при вычитании наиболее подходящих моделей звездного населения из наблюдаемых спектров (для примера на Рис. 1.1 приведены спектры для двух ярких центральных областей галактики Ark 18). После этого для измерения интегральных потоков и ширин линий в каждой исследуемой области эмиссионные линии были аппроксимированы гауссианами, свернутыми с инструментальным контуром. Для этого, как и в случае галакти-

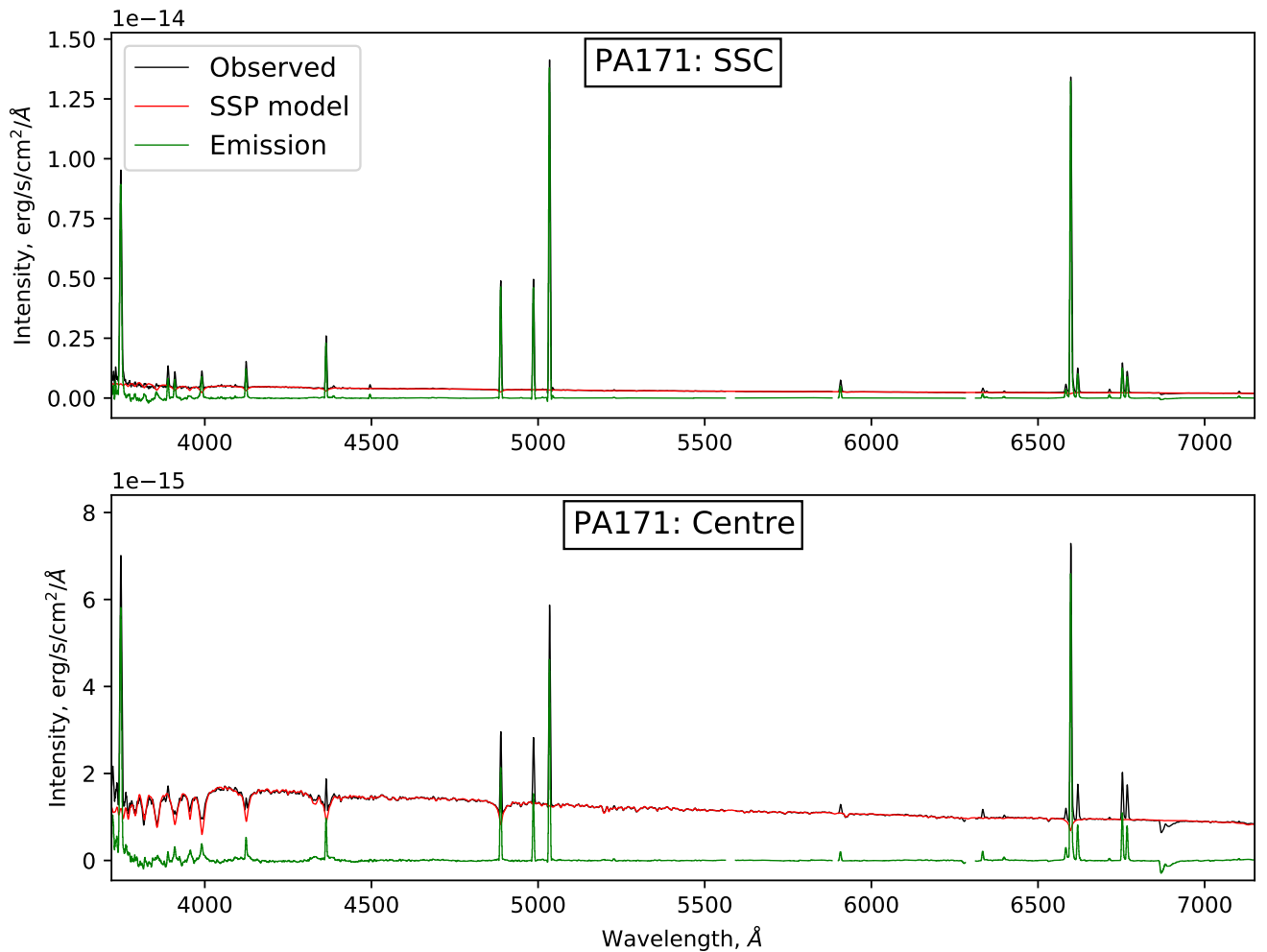


Рис. 1.1 — Интегральные спектры для областей “SSC” (сверху) и “centre” (снизу) галактики Ark 18 (см. Главу 6), извлеченные в границах, указанных в Таблице 6.3, показаны для демонстрации качества восстановления эмиссионных спектров (зеленые линии) после вычитания наиболее подходящей модели звездного населения (красные линии) из наблюдаемых спектров (черные линии).

ки NGC 428, было использовано программное обеспечение, работающее в среде IDL и основанное на пакете программ MPFIT [50].

Все измеренные потоки были исправлены за покраснение. Избыток цвета $E(B - V)$ был оценен из наблюдаемого бальмеровского декремента, а для коррекции за покраснение была использована функция поглощения из работы [52], параметризованная в работе [53].

1.1.3 Наблюдения с интерферометром Фабри-Перо

Наблюдения галактик NGC428 и Ark18 проводились в первичном фокусе 6-м телескопа БТА со сканирующим интерферометром Фабри-Перо (ИФП), установленном в многорежимном фокальном редукторе первичного фокуса SCORPIO-2 [49]. Был использован детектор E2V 42-90, размер пикселя на итоговом изображении составил $0.36''/px$. Применялся интерферометр IFR751, работающий в 751 порядке интерференции в линии $H\alpha$. Расстояние между порядками интерференции составляет $\Delta\lambda = 8.7 \text{ \AA}$, спектральное разрешение – 0.4 \AA (18 км/с). Для выделения нужного участка спектра использовались узкополосные фильтры, центрированные на длину волны линии $H\alpha$ с учетом смещения из-за эффекта Доплера. В процессе сканирования было последовательно получено 40 интерферограмм при различных расстояниях между пластинами ИФП. Наблюдения проводились с двумя позиционными углами, для того чтобы убрать блики, согласно работе [54].

Обработка данных производилась при помощи пакета программ, написанных в среде IDL. Подробное описание алгоритмов обработки данных приведено в работах [55, 56]. Основные этапы обработки включают вычитание “тока смещения” (bias), удаление следов космических частиц, коррекцию за плоское поле, калибровку по длинам волн и вычитание спектра ночного неба. После первичной обработки наблюдаемые данные были объединены в кубы данных, где каждый пиксель в поле зрения содержит 40-канальный спектр в области эмиссионной линии $H\alpha$.

Далее профили линий $H\alpha$ анализировались путем вписывания однокомпонентного профиля Фойгта [54], что позволяет получить поток, лучевую скорость и дисперсию скоростей с учетом инструментального уширения для каждого компонента. Несколько областей, демонстрирующих асимметричные профили линий $H\alpha$, были проанализированы отдельно с помощью вписывания многокомпонентного профиля Фойгта.

Таблица 1.1 Параметры наблюдений с радиоинтерферометром GMRT

	UGC 3672
Дата наблюдений	8-9.09.2015
Центральная скорость (км/с)	994.0
Время экспозиции (на источнике) (ч)	~5.3
Число каналов	512
Разделение между каналами (км/с)	~1.73
Амплитудные калибраторы	3C48,3C286
Фазовые калибраторы	0741+312

1.1.4 Данные GMRT

Наблюдения галактики UGC 3672, представленные в Главе 4, проводились в линии H_I 21 см на индийском радиоинтерферометре GMRT 8 и 9 сентября 2015 г., суммарное время экспозиции на источнике ~5.3 часа (см. Таблицу 1.1). Ширина полосы пропускания 4,17 МГц (~890 км/с) была разделена на 512 каналов (что соответствует спектральному разрешению по скоростям 1,73 км/с), центр полосы пропускания соответствовал гелиоцентрическому красному смещению галактики. Первичная обработка и калибровка выполнялись с использованием пакета обработки данных FLAGCAL [57], а последующая обработка выполнялась с использованием пакета AIPS. Изображение в континууме было получено по свободным от линии каналам и затем было использовано для самокалибровки. Вычитание континуума производилось с помощью процедуры UVSUB в AIPS. Затем с использованием процедуры IMAGR были построены изображения с различным итоговым разрешением, а остаточный континуум был вычтен с помощью процедуры IMLIN. Интегральные изображения в линии H_I 21см и поля скоростей H_I были получены с помощью процедуры MOMNT.

1.1.5 Фотометрические данные

В Главе 2 примерно для половины объектов выборки звездная величина в фильтре B была пересчитана из величин в фильтрах g и r . Для этого было использовано соотношение, полученное по фотометрии звезд Лаптоном, 2005 [58]: $B = g + 0,313(g - r) + 0,2271$; $\sigma = 0,0107$, где σ – среднеквадратичное отклонение для полученной зависимости. В данной диссертационной работе в некоторых случаях были использованы модельные величины из базы SDSS, в остальных – результаты апертурной фотометрии изображений SDSS [59, 60]. Аналогичным образом оценивались звездные величины для некоторых объектов в Главе 3.

Фотометрия системы UGC 3672, представленная в Главе 4, была выполнена с использованием изображений в фильтрах u, g, r, i , из обзора SDSS DR12 [61], а также изображений в фильтрах B и $H\alpha$, полученных на 0.9-м телескопе обсерватории Китт-Пик (KPNO) из работы [62]. В SDSS DR12 доступны обработанные изображения после вычитания неба и калибровки, которые можно сразу использовать для получения фотометрических потоков. Звездные величины в фильтрах g - и r были использованы для пересчета звездной величины в фильтре B B_{tot} , согласно формуле из [58] (см. выше). В случае данных с 0.9м телескопа KPNO изображения после вычитания неба и калибровки были скачаны из базы данных NED. Величины в фильтрах $H\alpha$ и B были рассчитаны с использованием формул преобразования, указанных в заголовках FITS-файлов.

Для проведения поверхностой и апертурной фотометрии галактики Ark18 в Главе 6 были использованы архивные изображения из обзора Sloan Digital Sky Survey [63] Stripe 82 в полосах u, g, r, i . Stripe 82 представляет собой область шириной $2,5^\circ$ вдоль небесного экватора, которая наблюдалась 70–90 раз в фильтрах u, g, r, i, z в рамках обзора SDSS. В проекте IAC Stripe 82 [64, 65] были получены суммарные глубокие изображения, которые на 1,7–2,0 звездных величины глубже, чем единичные (не сложенные) изображения SDSS. Обработка данных и вычитание неба проводились авторами обзора таким образом, чтобы сохранить информацию об объектах низкой поверхностной яркости.

1.2 Методы оценки содержания кислорода O/H

Содержание кислорода в Главах 2 и 3 оценивалось таким же образом, как описано в работе [66]. А именно, в случае, когда уверенно детектировалась слабая авроральная линия [OIII] $\lambda 4363\text{\AA}$, применялся прямой T_e метод для двухзонной модели HII областей, и были использованы процедуры, описанные в работе [67]. Для оценки содержания кислорода прямым T_e методом в первую очередь необходимо оценить электронную температуру газа. Для этого было использовано соотношение из работы Аллера, 1984 [68]:

$$t = \frac{1.432}{\log[(\lambda 4959 + \lambda 5007)/\lambda 4363] - \log C_T}, \quad (1.1)$$

где $t = 10^{-4}T_e(\text{OIII})$,

$$C_T = (8,44 - 1,09t + 0,5t^2 - 0,08t^3) \frac{1 + 0,0004x}{1 + 0,044x}, \quad (1.2)$$

и $x = 10^{-4}N_e t^{-0,5}$. Электронная плотность N_e может быть оценена из соотношений линий дублета [SII] $\lambda\lambda 6716, 6730$. Для HII областей, как правило, N_e существенно меньше 10^3см^{-3} , так что x слабо влияет на результат.

Затем для оценки содержания кислорода были использованы обновленные формулы из работы Изотова и др., 2006 [69], с учетом уточненных атомных констант:

$$12 + \log \text{O}^+/\text{H}^+ = \log \frac{\lambda 3727}{H\beta} + 5,961 + \frac{1,676}{t} - 0,40 \log t - 0,034t + \log(1 + 1,35x), \quad (1.3)$$

$$12 + \log \text{O}^{2+}/\text{H}^+ = \log \frac{\lambda 4959 + \lambda 5007}{H\beta} + 6,200 + \frac{1,251}{t} - 0,55 \log t - 0,014t, \quad (1.4)$$

$$\frac{\text{O}}{\text{H}} = \frac{\text{O}^+}{\text{H}^+} + \frac{\text{O}^{2+}}{\text{H}^+} \quad (1.5)$$

подавляющее количество кислорода в HII областях находится в состоянии O^+ и O^{2+} . Однако в случае, если в спектре наблюдается линия HeII $\lambda 4686$, можно также учесть вклад иона O^{3+} в областях с высоким возбуждением следующим образом:

$$\frac{\text{O}^{3+}}{\text{H}^+} = 0,5 \times \frac{\text{He}^{2+}}{\text{He}^+ + \text{He}^{2+}} \left(\frac{\text{O}^+}{\text{H}^+} + \frac{\text{O}^{2+}}{\text{H}^+} \right) \quad (1.6)$$

Поскольку излучение от ионов с разной степенью ионизации происходит из разных частей НII областей, условия в которых могут отличаться, при оценке содержания химических элементов необходимо использовать значение температуры, соответствующее области излучения данного иона. Температуру $t(OII)$ можно оценить, используя следующие соотношения, полученные для трех значений металличности в работе [69]:

$$t(OII) = -0,577 + t \times (2,065 - 0,498t), \quad 12 + \log \frac{O}{H} = 7,2,$$

(“низкие” металличности)

$$= -0,744 + t \times (2,338 - 0,610t), \quad 12 + \log \frac{O}{H} = 7,6,$$

(“промежуточные” металличности)

$$= 2,967 + t \times (-4,797 + 2,827t), \quad 12 + \log \frac{O}{H} = 8,2, \quad (1.7)$$

(“высокие” металличности); где $t(OII) = 10^{-4}T(OII)$ и $t = 10^{-4}T(OIII)$. На практике для галактик с $12 + \log(O/H) < 7,2$ применяется зависимость для “низких” металличностей, для $7,2 < 12 + \log(O/H) < 7,6$ – линейная интерполяция между зависимостями для “низких” и “промежуточных” металличностей, для $7,6 < 12 + \log(O/H) < 8,2$ – линейная интерполяция между зависимостями для “промежуточных” и “высоких” металличностей, и для $12 + \log(O/H) > 8,2$ – зависимость для “высоких” металличностей

Для коррекции измеренных потоков в эмиссионных линиях за поглощение и подстилающие бальмеровские абсорбции от молодых звездных скоплений применялась итеративная процедура, описанная в работе [48]. В рамках этой процедуры находится оптимальная комбинация двух параметров, влияющих на эмиссионный спектр НII-области: величина экстинкции $S(H\beta)$ вблизи линии $H\beta$, а также эквивалентная ширина линий поглощения водорода в подстилающем звездном континууме $EW(abs)$. В результате такой коррекции соотношения Бальмеровских линий приводились к рекомбинационным величинам (с учетом принятых ошибок потоков). Была использована функция поглощения из работы [70]. Как было отмечено в работе [66], ее использование не существенно влияет на оценки O/H по сравнению с функциями поглощения, полученных в более современных работах.

Во многих объектах, исследуемых в Главах 2 и 3, для которых были получены спектральные данные, линию $[OIII] \lambda 4363$ не удалось детектировать,

либо она была слишком слаба. В таких случаях применялся “полуэмпирический” метод из работы [71]. Этот метод использует хорошо аппроксимируемую зависимость T_e от суммы интенсивностей линий кислорода [OIII] $\lambda\lambda 4959,5007$ и [OII] $\lambda 3727$, нормированной на интенсивность $H\beta$. Она, в свою очередь, была получена на основе моделей, хорошо аппроксимирующих зависимости между эквивалентной шириной $EW(H\beta)$ и интенсивностями сильных эмиссионных линий для большой выборки внегалактических III-областей в широком диапазоне наблюдаемого содержания кислорода O/H, из работы [72]. После того, как из этой зависимости оценена T_e , последующие вычисления всех параметров проводятся так же, как при использовании T_e метода. Поскольку этот метод был прокалиброван для галактик с содержанием кислорода $12+\log(O/H) \lesssim 7.9$ dex [66, 71], мы использовали его только для галактик в данном диапазоне O/H.

Чтобы получить более надежную оценку O/H, помимо полуэмпирического, также были использованы два эмпирических метода из работ [73] и [74], которые показывают довольно небольшой внутренний разброс (~ 0.08 dex). Они используют относительные интенсивности линий [OIII] $\lambda\lambda 4959,5007$ и [OII] $\lambda 3727$. Полуэмпирический метод и метод из работы [74] применимы только для диапазона $12+\log(O/H) \lesssim 7.9$. Метод из работы [73] использовался в основном для случая нижней ветви металличностей ($12+\log(O/H) \lesssim 8.1$), поскольку большая часть объектов выборки обладают металличностями в этом диапазоне.

В работах [75] и [76] были предложены эмпирические калибровки O/H, основанные на сильных линиях кислорода и дублетах [NII] $\lambda\lambda 6548,6584$ и [SII] $\lambda\lambda 6716,6730$. Для спектров с высоким отношением сигнал-шум эти оценки показывают довольно небольшой внутренний разброс O/H, равный $\sim 0.08-0.10$ dex. Однако при низком отношении сигнал-шум в линии [NII] $\lambda 6584$ точность этих оценок существенно снижается. Кроме того, как было показано в работе [77], $\sim 10\%$ низкометаллических объектов имеют повышенное отношение N/O, а также повышенный поток в линиях [NII]. В таких случаях можно ожидать, что оценки O/H, полученные этими методами, должны быть систематически выше, чем значения, полученные с помощью прямого T_e метода. Метод “Counterpart”, который также использует эмиссионные линии сильной и средней интенсивности [78], имеет аналогичные ограничения. По этой причине эти методы были использованы выборочно, для дополнительного контроля оценок O/H.

Для галактик из выборок в Главах 2 и 3 линия [OII] $\lambda 3727$ находится за пределами доступного спектрального диапазона используемых SDSS-спектров.

В статьях [79] и [43] был предложен модифицированный T_e -метод. В случае, когда детектируется линия [OIII] $\lambda 4363$, метод использует интенсивность слабого аврорального дублета [OII] $\lambda\lambda 7320, 7330$ для оценки числа ионов O^+ . Кроме того, в случае, когда линию [OIII] $\lambda 4363$ не удавалось детектировать, мы оценивали $I(\lambda 3727)$ итеративным методом с использованием $I(\lambda\lambda 7320, 7330)$, как было предложено в работе [80], а затем использовали полуэмпирический метод.

В статье [66] было проведено сравнение нескольких эмпирических и полуэмпирических методов с прямым T_e методом и получены формулы, учитывающие небольшие рассогласования этих методов относительно прямого T_e метода. Мы использовали эти формулы для расчета скорректированных значений O/H , оцененных полуэмпирическим методом из работы [71], а также эмпирическими методами из [73] и [74].

Кроме того, для объектов с наименьшим содержанием кислорода O/H был использован также новый “эмпирический” метод из работы [81], основанный на относительных потоках сильных линий кислорода. Соответствующее соотношение имеет следующий вид:

$$12 + \log(O/H) = 0.950 \times \log(R_{23} - 0.08 \times O_{32}) + 6.805, \quad (1.8)$$

где R_{23} – отношение суммы потоков сильных линий [OIII] $\lambda 4959$, [OIII] $\lambda 5007$ и [OII] $\lambda 3727$ к потоку в линии $H\beta$, а O_{32} – отношение потоков в линиях [OIII] $\lambda 5007$ и [OII] $\lambda 3727$. Этот метод “сильных линий” подходит только для самых низких металличностей, а именно для диапазона $12 + \log(O/H) \lesssim 7.4$. Однако для этого диапазона он обеспечивает небольшой внутренний разброс ~ 0.05 dex. В приведенном выше соотношении учитываются большие вариации параметра ионизации U в различных III-областях. Это позволяет уменьшить относительно большой внутренний разброс, присущий другим методам, использующим сильные линии кислорода. Как отмечается в работе [81], этот метод показывает небольшой систематический сдвиг ~ 0.04 dex в $12 + \log(O/H)$ по сравнению с оценками, полученными при помощи “прямого” T_e метода.

Также мы дополнительно проверили используемые зависимости из [81]. В частности, было проведено сравнение оценок $O/H(s)$, полученных методом “сильных линий”, и “прямым” методом $O/H(dir)$, когда линии [OIII] $\lambda 4363 \text{ \AA}$ и [OII] $\lambda 3727 \text{ \AA}$ детектировались в спектрах с высоким отношением сигнала к шуму (подробнее см. работу [82]). Мы получили среднее значение $12 + \log(O/H)(s) - 12 + \log(O/H)(dir) = +0.011 \pm 0.0044$ dex. Это немного меньше поправки

+0,04 dex из работы [81], однако благодаря большей выборке и использованию средневзвешенного значения полученную нами поправку $12+\log(\text{O}/\text{H})(s)$ относительно $12+\log(\text{O}/\text{H})(dir)$ можно принять как более надежную. В исследованиях, где используются оба метода оценки содержания кислорода O/H , $\text{O}/\text{H}(s)$ и $\text{O}/\text{H}(dir)$, для минимизации возможных систематических ошибок стоит учитывать эту поправку и использовать величину $12+\log(\text{O}/\text{H})(s,c) = 12+\log(\text{O}/\text{H})(s) - 0,011 \text{ dex}$.

В Главе 5 для галактики NGC428 слабую эмиссионную линию $[\text{O III}] \lambda 4363 \text{ \AA}$, чувствительную к электронной температуре, удалось уверенно детектировать только в двух ярких областях в имеющихся спектрах. Из-за этого было невозможно использовать “прямой” T_e -метод для оценки содержания кислорода в большинстве H II-областей. Содержание кислорода оценивалось при помощи нескольких широко применяемых эмпирических методов, использующих яркие эмиссионные линии: R - и S -методы из [83], а также метод IZI из [84] с фотоионизационной моделью из [85]. Эти методы были выбраны потому, что они обеспечивают надежные оценки для диапазона металличностей, который наблюдается в NGC 428. Оценки, полученные при помощи первых двух методов, дают хорошее согласие с T_e -методом, в то время как для метода IZI ожидается систематическое смещение до $\sim 0,1 \text{ dex}$ из-за хорошо известной проблемы расхождения между эмпирическими методами и теоретическими, использующими яркие эмиссионные линии [см., например, 86, 87]. Все эти методы требуют разных наборов наблюдаемых отношений потоков: R -метод основан на отношениях линий $[\text{O II}] \lambda\lambda 3727,3729 \text{ \AA}$, $[\text{N II}] \lambda 6584 \text{ \AA}$ и $[\text{O III}] \lambda 5007 \text{ \AA}$ к $\text{H}\beta$; для применения S -метода необходимы потоки в линиях $[\text{S II}] \lambda\lambda 6717,6731 \text{ \AA}$ вместо $[\text{O II}]$; метод IZI, основанный на моделях фотоионизации, использует все доступные данные о линиях излучения.

Для галактики Ark18 более детальное обсуждение оценки металличностей для разных областей приведено в Главе 6.

Глава 2. Исследование галактик в войде Eridanus

2.1 Войд Eridanus

В работе Гусевой и др., 2009 [88] авторы представили выборку новых низкометаллических галактик, и в том числе карликовую галактику низкой поверхностной яркости SDSS J0015+0104 с металличностью $12+\log(\text{O}/\text{H})=7,07$. В более поздней работе Гусевой и др., 2017 [89] этот параметр был обновлен до 7,17, что соответствует металличности IZw18. Последующее исследование [90] показало очень высокую массовую долю газа и нетипично голубые цвета периферии этого объекта. Также оказалось, что SDSS J0015+0104 находится в области, не содержащей ярких галактик и известной как войд Eridanus [91].

Название войда никак не связано с соответствующим созвездием и его положением на небе, а относится к греческому слову, обозначающему реку. Как было отмечено в работе [92], это связано с тем, что он имеет сильно вытянутую форму. Войд находится в направлении созвездий Aquarius ($19,5^h - 0,5^h$), Pisces ($23^h - 02^h$), и Cetus ($00^h - 3,5^h$).

Для исследования эволюционного статуса галактик в этой области, аналогичного проведенному ранее для войда Lynx-Cancer [93], были определены границы войда Eridanus (см. ниже). Затем была составлена выборка галактик, попадающих в экваториальную зону войда с $\text{Dec.} = (-7^\circ, +7^\circ)$. Для этого были использованы данные, доступные в базах NED, HyperLeda¹ [94], а также других источниках.

Для иллюстрации распределения галактик войда на Рис. 2.1 приведены веерные диаграммы для соответствующей области на небе. В некоторых случаях точки, отмечающие положение объектов выборки, накладываются на точки, отмечающие положение ярких галактик из-за эффекта проекции.

Для составления выборки в качестве первого приближения были использованы границы войда, приведенные в работе [91]. Затем для уточнения границ были построены и проанализированы веерные диаграммы с узкими диапазонами по склонениям. Границы войда определялись по положению ярких галактик с $M_B < M_B^* + 1.0 = -19,5^m$ (где $M_B^* = -20,5^m$ – величина, соответствующая

¹<http://leda.univ-lyon1.fr/>

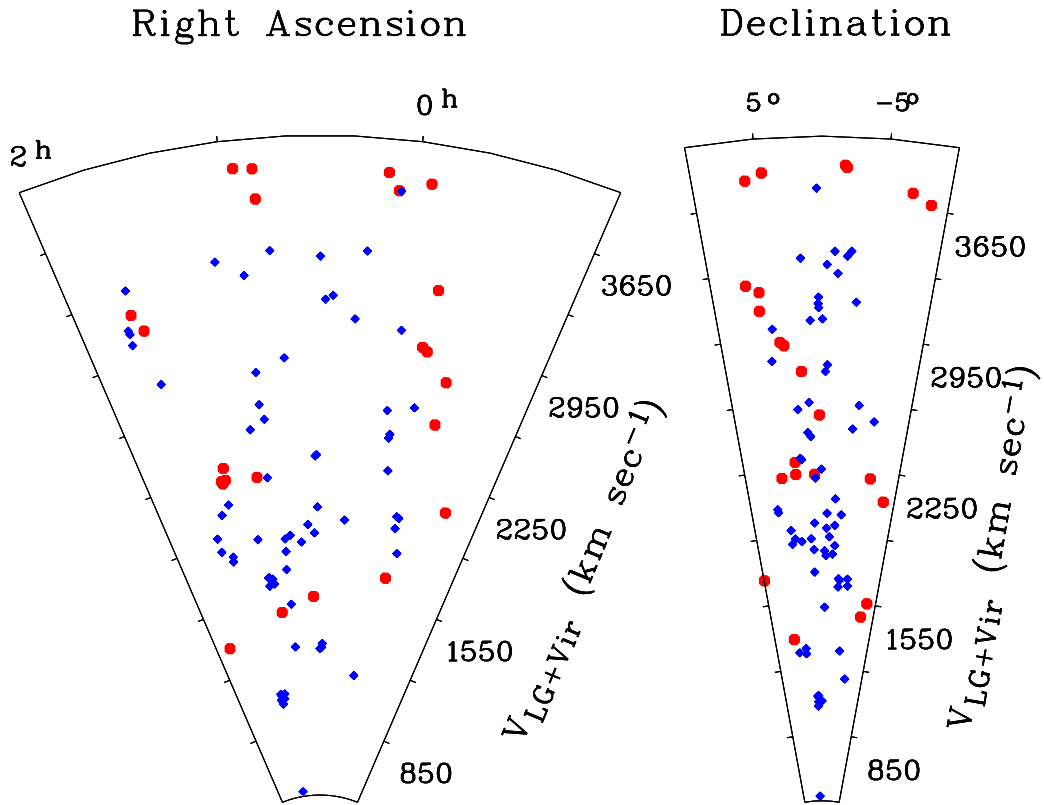


Рис. 2.1 — Красными кружками обозначены яркие галактики с $M_B^* < -19,5$, синими ромбами обозначены галактики, входящие в void Eridanus. **Слева:** Веерная диаграмма для $\text{Dec.} = -10^\circ, +10^\circ$. **Справа:** Веерная диаграмма для $RA = 23^h, 2^h$

“излому” функции светимости галактик [95]). В качестве кандидатов в галактики войда были отобраны объекты, попадающие в “пустой” объем внутри этих границ. На заключительном этапе были отобраны объекты, находящиеся достаточно далеко (не менее 2 Мпк) от ярких галактик.

2.2 Выборка галактик войда

В ходе исследования были отобраны галактики, попадающие в область войда Eridanus и находящиеся на расстоянии не менее 2 Мпк от ярких галактик, ограничивающих войд. В этом случае часть галактик войда вблизи его границ не попадает в выборку, но это позволяет также исключить объекты, входящие в группы вокруг ярких галактик, а также объекты, которые могли мигрировать из стенок войда за последние несколько миллиардов лет.

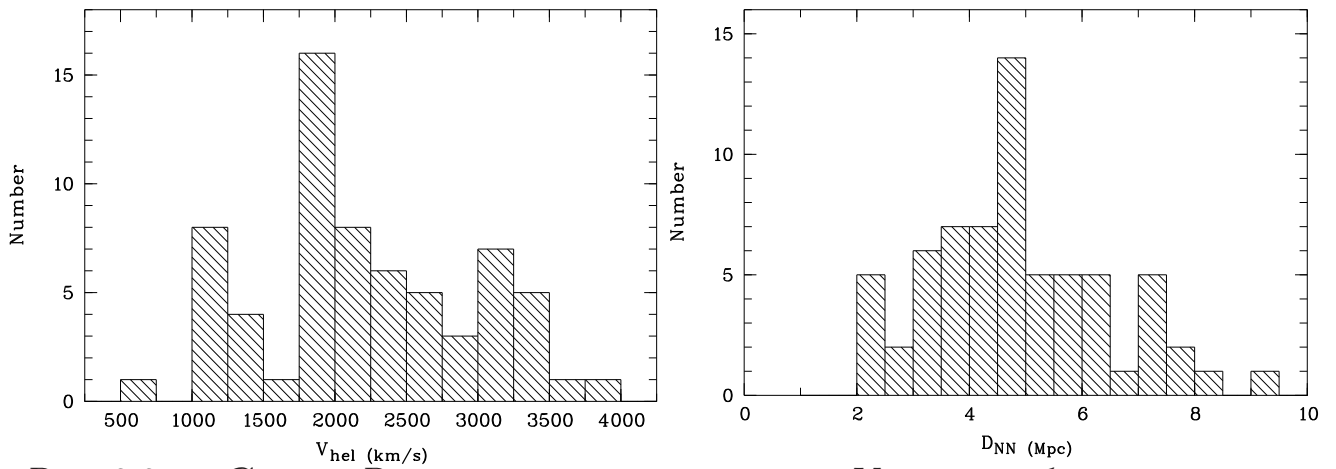


Рис. 2.2 — **Слева:** Распределение по скоростям V_{hel} для выборки галактик войда; **Справа:** Распределение по расстояниям D_{NN} до ближайшей яркой галактики.

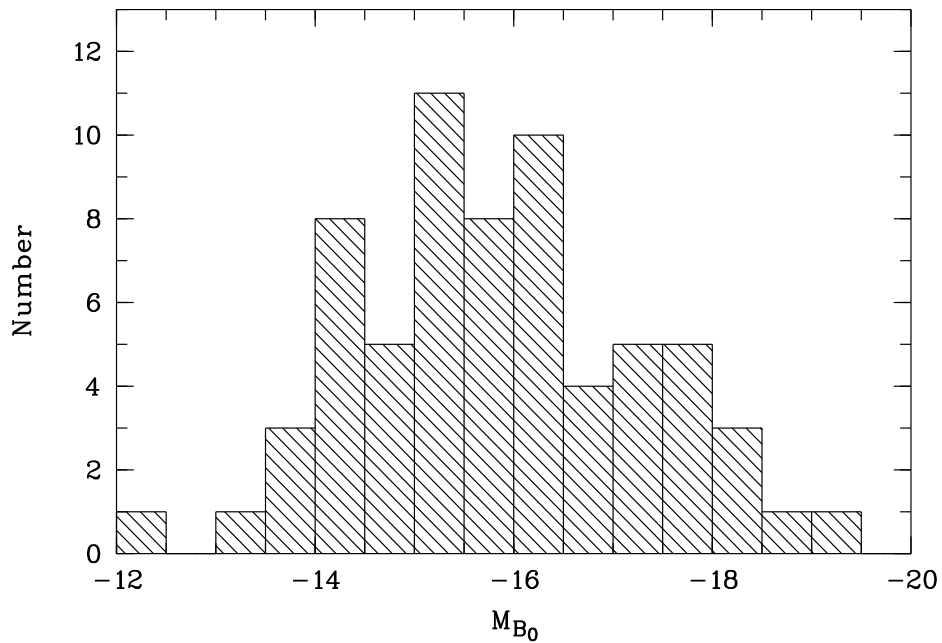


Рис. 2.3 — Распределение по абсолютным звездным величинам M_B для галактик, входящих в войд Eridanus.

Таблица 2.1 Выборка галактик, попадающих в экваториальную зону войда Eridanus

Название или обозначение (1)	Координаты (J2000)		V_{hel} , км/с (4)	D, Мпк (5)	B_{tot} , mag (6)	M_B , mag (7)	Тип (8)	D_{NN} , Мпк (9)
	RA (2)	Dec (3)						
APM B0001+0008	00 04 21.61	+00 25 35.3	3795	54.4	19.67	-14.2	BCG	4.2
SDSS J0013-0106	00 13 40.76	-01 06 41.4	3477	49.9	19.37	-14.3	dI	7.1
SDSS J0015+0104	00 15 20.68	+01 04 37.0	2035	30.6	18.31	-14.2	dI	7.1
SDSS J0016+0108	00 16 28.25	+01 08 01.9	3103	44.8	19.27	-14.1	BCG	5.8
UM 240	00 25 07.43	+00 18 45.7	3234	46.5	17.32	-16.1	Sm	8.1
UM 38	00 27 51.52	+03 29 23.1	1371	21.1	15.91	-15.7	Sb	5.7
6dF J0027-0311	00 27 55.29	-03 11 00.9	3231	46.2	15.84	-17.6	Sc	7.4
UM 40	00 28 26.60	+05 00 15.9	1344	20.8	15.36	-16.3	Sb	5.2
KUG 0027+015	00 29 48.02	+01 51 17.6	3436	49.3	16.17	-17.4	Sd	7.9
UGC 300	00 30 04.10	+03 30 47.0	1346	20.8	15.86	-15.8	IAB	5.6
UGC 313	00 31 26.11	+06 12 24.3	2085	31.0	14.48	-18.1	Sbc	7.2
APM B0029+0226	00 31 45.35	+02 42 53.3	2380	34.9	17.90	-14.9	Sm	7.0
UGC 320	00 32 30.93	+02 34 27.0	2374	34.8	15.7	-17.1	Sc	6.9
UGC 328	00 33 22.09	-01 07 16.9	1985	29.3	15.49	-16.9	Sd	5.5
SDSS J0037-0040	00 37 20.42	-00 40 43.0	2030	29.9	19.27	-13.2	BCG?	6.3
HIPASS J0041-01b	00 41 39.66	-02 00 42.0	1949	28.6	16.89	-15.5	I	4.8
CGCG410-002	00 44 48.42	+05 08 08.7	2894	41.9	15.12	-18.1	E?	9.1
NGC 259a	00 47 17.82	-02 32 41.0	3508	49.9	18.30	-15.3	S	3.8
IC 52	00 48 23.78	+04 05 30.7	1961	29.1	15.19	-17.2	Sb	6.1
UGC 527	00 51 49.90	+03 06 21.0	1951	28.8	15.89	-16.5	Sm	5.9
UM 285	00 51 58.73	-01 40 18.7	1908	28.0	17.24	-15.2	BCD	4.8
ARK 18	00 51 59.62	-00 29 12.2	1621	24.1	14.76	-17.2	S0	3.4
MCG-01-03-027	00 52 17.23	-03 57 59.8	1412	21.1	15.69	-16.1	Scd	2.9
CGCG 384-019	00 52 52.80	+01 12 50.7	1799	26.7	15.90	-16.3	SABd	4.8
6dF J0055-0601	00 55 53.66	-06 01 20.0	2641	37.8	16.05	-17.0	E?	4.1
WINGS J0057-0124	00 57 03.50	-01 24 42.6	3389	48.2	19.38	-14.2	Sd	6.2
SDSS J0057-0021	00 57 12.60	-00 21 57.7	2866	41.1	19.30	-13.9	BCG	7.5
MRK 965	00 57 28.75	-04 09 34.0	2713	38.8	15.81	-17.3	S0-a	5.3
SDSS J0057+0052	00 57 56.58	+00 52 09.1	2299	33.4	17.43	-15.3	I	3.4
MCG-01-03-072	01 02 22.91	-04 30 30.9	1764	25.8	15.69	-16.5	Im pec	2.4
6dF J0103-0302	01 03 09.69	-03 02 55.8	1784	26.1	15.79	-16.4	dI	3.1
MRK 970	01 03 10.43	-03 36 36.6	2587	37.1	14.55	-18.4	S	3.7
6dF J0105-0424	01 05 18.59	-04 24 29.7	1801	26.3	16.01	-16.2	S?	3.2
6dF J0105-0251	01 05 55.46	-02 51 36.0	1794	26.2	16.85	-15.4	dI	3.2
SDSS J0106-0250	01 06 03.06	-02 50 52.4	1750	25.6	18.33	-13.8	S	2.8
CGCG 384-074	01 06 30.98	-02 11 48.0	3489	49.5	15.75	-17.8	Sc	6.4

Таблица 2.1 Выборка галактик, попадающих в экваториальную зону войда Eridanus

Название или обозначение (1)	Координаты (J2000)		V_{hel} , км/с (4)	D, Мпк (5)	B_{tot} , mag (6)	M_B , mag (7)	Тип (8)	D_{NN} , Мпк (9)
	RA (2)	Dec (3)						
UGC 695	01 07 46.44	+01 03 49.2	628	10.5	14.95	-15.2	Sd	3.3
UGC 711	01 08 36.90	+01 38 30.0	1982	29.0	14.49	-17.9	SBcd	4.8
SHOC 053	01 09 07.97	+01 07 15.5	1156	17.7	16.98	-14.3	I	4.9
SDSS J0110-0000	01 10 03.68	-00 00 36.4	1136	17.4	19.34	-12.0	dI	4.8
PGC 135629	01 12 50.68	+01 02 48.8	1105	16.9	16.10	-15.1	Sm	4.9
NGC 428	01 12 55.71	+00 58 53.6	1152	17.6	12.16	-19.1	SABm	4.6
UGC 772	01 13 39.40	+00 52 27.9	1161	17.7	16.28	-15.0	I	4.6
MCG +00-04-049	01 14 20.48	+00 55 01.9	1129	17.2	17.04	-14.3	Sm	4.7
FGC0155	01 21 23.80	-01 51 46.0	2217	31.9	16.50	-16.2	Sd	2.3
UM 323a	01 26 16.02	-00 24 30.3	1938	28.1	17.40	-14.9	Sd	3.7
UGC 1014	01 26 23.53	+06 16 40.7	1129	31.2	14.79	-17.8	Sm	2.3
UM 323	01 26 46.60	-00 38 46.1	2132	27.8	16.12	-16.2	iE BCD	3.6
UGC 1102	01 32 29.30	+04 35 54.0	1954	28.6	14.37	-18.0	S?	3.6
UGC 1105	01 32 39.90	+04 38 30.0	2027	29.6	16.95	-15.5	Im	4.0
SDSS J0137-0033	01 37 08.07	-00 33 53.7	2924	41.5	17.23	-16.0	SABd	5.4
SDSS J0139-0027	01 39 18.59	-00 27 30.4	3453	48.7	18.91	-14.6	dI	4.6
SDSS J0142+0018	01 42 48.13	+00 18 14.6	3222	45.5	18.39	-15.0	dI	4.4
SDSS J0142+0021	01 42 59.31	+00 21 36.5	3243	45.9	18.04	-15.4	I	4.3
SDSS J0143-0002	01 43 13.36	-00 02 50.9	3165	44.8	19.00	-14.4	BCG	4.6
UGC 12729	23 40 20.75	+01 14 45.1	1870	28.2	15.05	-17.3	S0/a	4.5
APM B2341-0330	23 43 55.00	-03 13 35.0	2080	30.8	16.99	-15.6	Sd	4.4
B2342-0223	23 44 48.20	-02 06 53.5	2018	30.0	16.77	-15.7	dI	5.1
UGC 12769	23 45 19.22	-01 16 24.3	2078	30.9	16.58	-16.0	Sd	5.3
SDSS J2347+0126	23 47 21.47	+01 26 25.4	2674	38.9	18.43	-14.6	dI	2.1
SDSS J2354-0005	23 54 37.30	-00 05 01.7	2311	34.1	18.79	-14.0	dI	4.6
MCG-01-01-003	23 55 26.96	-06 14 14.9	1242	19.1	15.87	-15.6	S0-a	6.2
SDSS J2356+0141	23 56 26.83	+01 41 16.7	2496	36.7	17.61	-15.3	dI	3.5
UGC 12857	23 56 47.62	+01 21 18.0	2477	36.4	14.70	-18.2	Sbc	3.6
HIPASS J2358+04	23 58 07.15	+04 49 07.3	3035	44.2	17.66	-15.8	Sd	2.0
HIPASS J2359+02	23 59 13.23	+02 43 24.3	2616	38.4	16.40	-16.6	Sc	4.0

В Таблице 2.1 приведены основные параметры галактик выборки, доступные из литературы:

(1) Название галактики.

(2),(3) Прямое восхождение и склонение на эпоху J2000.

(4) Гелиоцентрическая скорость V_{hel} (практически во всех случаях величины были взяты из NED или SDSS), в км/с.

(5) Расстояние D , в Мпк, оцененное как $V_{\text{LG}}/73$. Здесь V_{LG} - скорость удаления галактики в координатной системе Местной группы.

(6) Видимая полная звездная величина B_{tot} в полосе B . Величины пересчитаны из модельных звездных величин g и r из базы данных SDSS, с использованием формулы из [58], либо взяты из литературы.

(7) Абсолютная звездная величина M_B в полосе B . Пересчитывалась из видимой звездной величины B_{tot} , скорректированной за межзвездное поглощение в Галактике A_B (из NED, согласно [96]).

(8) Тип галактики (в основном из NED и HyperLeda).

(9) Расстояние D_{NN} в Мпк до ближайшей яркой галактики.

Войд Eridanus – протяженный и обладает сложной формой. В рамках данного исследования была рассмотрена экваториальная зона с $\text{Dec.} = (-7^\circ, +7^\circ)$, $\text{RA} = (23^{\text{h}}40^{\text{m}}, 01^{\text{h}}45^{\text{m}})$, и $V_{\text{hel}} < 3500 - 3800$ км/с (граница по скоростям примерно соответствует дальней стенке войда). Стоит отметить, что выборка галактик в данном объеме не является полной, в особенности в диапазоне низких светимостей из-за эффектов наблюдательной селекции.

Итоговая выборка содержит галактики со следующими характеристиками: абсолютные величины в фильтре B в диапазоне от $M_B = -12^{\text{m}}$ до -19^{m} с медианным значением $-15,8^{\text{m}}$; радиальные скорости в диапазоне $V_{\text{hel}} = 600 - 3800$ км/с с медианным значением ~ 2030 км/с; расстояние до ближайшей яркой галактики D_{NN} в диапазоне от 2 до 10 Мпк с медианным значением $\sim 4,7$ Мпк.

В выборку вошли в основном дисковые и неправильные галактики, а также несколько голубых компактных объектов круглой или эллиптической формы на расстоянии $D \geq 30$ Мпк, которые, предположительно, относятся к так называемым голубым компактным галактикам (BCG - blue compact galaxies). Кроме того, $\sim 10\%$ (6 объектов) нашей выборки относятся к галактикам морфологических типов E или S0/S0-a (согласно данным из баз NED или HyperLeda). При этом для двух таких объектов более глубокие изображения, доступные в базах SDSS Stripe82 или DECaLS² (The Dark Energy Camera Legacy Survey, [97]), показывают наличие структур низкой поверхностной яркости вокруг яркой центральной области (диски или следы взаимодействия). Еще несколько

²<http://legacysurvey.org/decamls/>

объектов выборки также показывают подобные структуры низкой поверхностной яркости на более глубоких изображениях.

По сравнению с выборкой галактик из войда Lynx-Cancer в данной выборке доля более ярких галактик выше, а объекты очень низкой светимости практически отсутствуют. Это является прямым следствием эффекта наблюдательной селекции, поскольку войд Eridanus находится в $\sim 1,7$ раз дальше, чем войд Lynx-Cancer. В связи с этим интерес представляет сравнение выводов, сделанных в ходе исследований двух этих выборок галактик.

На Рис. 2.2–2.3 показаны распределения галактик выборки по абсолютным звездным величинам M_B , радиальным скоростям V_{hel} , и расстояниям до ближайшей яркой галактики D_{NN} . На Рис. A.1–A.3 в Приложении приведены изображения 66 галактик войда Eridanus.

2.3 Спектральные наблюдения

Для 21 галактики наблюдения проводились со спектрографом RSS (Robert Stobie Spectrograph, [39, 40]) на Большом южноафриканском телескопе (SALT, [37, 38]). Ещё 4 галактики войда наблюдались с фокальным редуктором SCORPIO [45] на 6-м телескопе БТА САО РАН. Наблюдения на обоих телескопах проводились в длиннощелевом режиме. Описание обработки полученных данных приведено в п. 1.1.1, 1.1.2. Используемые методы оценки металличности обсуждаются в п. 1.2. Информация о наблюдениях представлена в Таблице 2.2.

Также была сформирована выборка галактик без данных о скоростях, попадающих в область войда Eridanus. Информация об этих наблюдениях приведена в Табл. A.1 в Приложении. Большинство объектов оказались фоновыми галактиками, два находятся в изучаемом войде. Для нескольких объектов, для которых были получены спектральные данные, линию $H\alpha$ детектировать не удалось, поэтому провести оценку скоростей оказалось невозможным для галактик SDSS J000224.09-013147.8, J000634.13+153037.5, J003933.37+010652.3.

Все одномерные спектры приведены на Рис. A.4–A.6 (SALT) и Рис. A.7 (БТА) в Приложении.

Для галактик NGC 428 и Ark18 были использованы спектры из базы данных SDSS DR12. Детальное описание базы данных можно найти в работах [98],

Таблица 2.2 Журнал спектральных наблюдений на телескопах SALT (верхняя часть таблицы, до горизонтальной черты) и БТА (нижняя часть таблицы)

Название (1)	Дата (2)	Время экспозиции, с (3)	РА (4)	Seeing " (5)	Возд. масса (6)
SDSS J0013-0106	03.08.2013	3×800	310	2.0	1.24
UM 38	12.11.2012	3×950	75	1.7	1.29
6dF J0027-0311	31.07.2013	3×800	55	2.0–2.6	1.22
UM 40	30.07.2013	3×800	8	1.7	1.27
APM B0029+0226	12.10.2012	3×760	60	2.0	1.35
UGC 328	10.08.2013	3×800	342	2.0	1.27
HIPASS J0041-01b	24.07.2012	3×950	90	1.5	1.21
IC 52	30.07.2013	3×800	95	1.5	1.28
UM 285	24.07.2012	2×950	0	1.6	1.16
MCG -01-03-027	13.09.2013	3×900	18	2.5	1.22
J0057+0052	10.07.2013	3×850	55	2.5	1.20
MCG -01-03-072	12.11.2012	3×950	75	2.7	1.29
6dF J0105-0251	24.10.2012	2×1100	70	2.1	1.18
MCG 01-04-005	10.09.2013	2×900	147	1.8	1.27
MCG 01-04-005	24.09.2013	2×800	147	2.5	1.23
SDSS J0137-0033(w/o O/H)	07.09.2013	1×900	95	2.0	1.25
UGC 12729	29.07.2013	3×800	75	1.4	1.20
APM B2341-0330	11.07.2013	3×900	60	2.0	1.20
B2342-0223	19.11.2012	3×870	18	1.5	1.31
UGC 12769	04.09.2013	3×900	29	1.6	1.21
SDSS J2356+0141	07.09.2013	3×900	88	2.0–2.5	1.25
HIPASS J2359+02	06.09.2013	1×900	12	1.5	1.31
HIPASS J2359+02	23.10.2013	3×850	12	2.5–3.0	1.22
UGC 527	28.12.2013	3×900	24.5	1.0	1.32
MRK 965	29.12.2013	2×900	40.3	1.7	1.47
UGC 711	28.12.2013	2×600	179.5	1.6	1.41
MCG +00-04-049	22.01.2009	2×900	29	2.2	1.66

[99] и [63]. Ещё для трех галактик (SDSS J0142+0018, SDSS J0142+0021, SDSS J0143-0002) доступны спектры SDSS лишь плохого качества, так что использовать их для уверенной оценки содержания кислорода в этих объектах не представлялось возможным.

Одномерные спектры из базы данных SDSS приведены на Рис. A.8 в Приложении.

2.3.1 Результаты оценки O/H

Используемые в данной работе методы оценки металличности обсуждаются в п. 1.2. В Таблице 2.3 представлены принятые для галактик значения O/H, полученные из наших наблюдений и из анализа спектров SDSS. Таблица включает следующую информацию:

Колонка 1: Название галактики или префикс SDSS;

Колонка 2: Прямое восхождение на эпоху J2000;

Колонка 3: Склонение на эпоху J2000;

Колонка 4: Оценка $12+\log(\text{O}/\text{H})$, полученная при помощи T_e метода, а также ошибка 1σ ;

Колонка 5: Величина $12+\log(\text{O}/\text{H})$, принятая для дальнейшего анализа.

Колонка 6: Источник значения $12+\log(\text{O}/\text{H})$ в Колонке 5:

(1) Значение $12+\log(\text{O}/\text{H})$ было оценено по данным БТА, SALT и SDSS при помощи прямого T_e метода (для IC52 значения в колонках 4,5 являются средневзвешенными значениями O/H, полученными с помощью прямого T_e метода для спектров а) и с)); для спектров SDSS потоки в линиях [OII] $\lambda\lambda$ 7320,7330 были использованы для оценки O/H модифицированным прямым T_e методом [43, 79];

(2) Наиболее надежная оценка $12+\log(\text{O}/\text{H})$ по данным SALT, БТА и SDSS, соответствующая средневзвешенному значению, полученному полуэмпирическим методом [71] и эмпирическими методами из [73] и [74]; для всех трех методов оценки O/H были слегка скорректированы, чтобы учесть небольшую систематику по сравнению с O/H, полученными прямым T_e методом (см. 1.2);

(3) То же, что и в (2), но с учетом значений O/H , полученных прямым T_e методом;

(4) То же, что и в (3), но с учетом значений O/H , полученных при помощи эмпирических методов из [76] и [75], [78], которые используют, помимо сильных линий кислорода, интенсивности $[NII]\lambda 6584$ и $[SiII]\lambda\lambda 6716,6730$. Как обсуждается в п. 1.2, некоторые низкометаллические объекты могут иметь повышенное отношение N/O , а также повышенный поток в линиях $[NII]$, поэтому мы использовали эти оценки только там, где они не показывали систематического смещения относительно O/H , полученного с использованием только сильных кислородных линий;

(5) Значение $12+\log(O/H)$ было взято из литературы и при необходимости пересчитано в соответствии с [69]. Буквы после (5) отмечают источники O/H , приведенные в сноске таблицы. Для галактик с более чем одной оценкой O/H принятое $12+\log(O/H)$ является средневзвешенным значением (для $ARMB0001+0008$ и $UGC772$). Для случаев, когда вычисленная ошибка средневзвешенного значения была менее $0,03$ dex, мы приняли минимальное значение $0,03$ dex.

2.3.2 Комментарии для некоторых галактик

MCG-01-04-005. Галактика изначально была включена в выборку, а ее спектр был получен на телескопе SALT. Однако позже галактика была исключена из рассмотрения, поскольку она, по-видимому, принадлежит к группе NGC450 (с проекционным расстоянием $D_{proj} = 0,7$ Мпк до NGC448, при $\delta V = 33$ км/с).

UM285=J0051-0140, MCG+00-04-049=J0114+0055. Для этих галактик были приняты значения $12 + \log(O/H)_{T_e}$. Однако они также хорошо согласуются с величинами $12 + \log(O/H)$, полученными при помощи других методов.

MCG-01-03-027=J0052-0357, SDSS J0057+0052, MCG-01-04-005. Из-за довольно слабого сигнала в линии $[OIII]\lambda 4959$, для указанных галактик поток в этой линии был рассчитан из теоретического соотношения $I([OIII]\lambda 5007)/2.98$.

SDSS J0013-0106. Для этой галактики доступен спектр SDSS, однако в текущем анализе был использован спектр, полученный на SALT. Оценка

O/H, полученная из данных SDSS, согласуется со значением, полученным из спектра SALT, при определенных предположениях относительно $I([\text{OII}]3727)$ и $I([\text{OIII}]5007,4959)$.

UGC12729=J2340+0114. Были использованы как спектр SALT, так и SDSS. Значение $I([\text{OII}]3727)$ для спектра SDSS было принято таким же, как для спектра SALT. Оба значения O/H хорошо согласуются между собой.

IC52=J0048+0405. Принятое значение O/H является средневзвешенным из двух значений, полученных прямым T_e методом для спектров из областей а) и с).

Ark18=J0051-0029. Для этой галактики в SDSS доступны два спектра. В Таблице 2.3 приведены значения $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ для двух областей отдельно. O/H, полученное для центральной области Ark18 полуэмпирическим методом, значительно ниже, чем O/H для нецентральной области. В целом для галактики было принято последнее значение, полученное модифицированным T_e методом. Детальное исследование галактики Ark18 описано в Главе 6 данной Диссертации.

NGC428. В статье [100] было показано, что, по данным SDSS, эта относительно яркая спиральная галактика имеет “плоский” градиент металличности. Их оценки $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ ($8,20 \pm 0,06$) согласуются со значением $8,12 \pm 0,06$, полученным в рамках данного исследования, в пределах погрешностей. Поэтому для галактики была принята величина $12 + \log(\text{O}/\text{H})$, полученная прямым T_e методом для одной из HII областей. Детальное исследование галактики NGC428 описано в Главе 5 данной Диссертации.

UGC12769=J2345-0116. Спиральная галактика с возможным градиентом металличности. В этой галактике были оценены величины $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ для двух областей: $7,87 \pm 0,06$ вблизи центра и $7,55 \pm 0,05$ на расстоянии $\sim 5''$ от центра. Обычно для подобных систем с видимым градиентом металличности в качестве характерного значения O/H принимается измеренное на $R = R_{25}/2$. Обе области с оцененным $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ находятся внутри этого радиуса. Поэтому принятое значение (средневзвешенное, $7,63 \pm 0,13$) следует рассматривать как верхний предел для этой галактики.

Mrk965=J0057-0409. На обеих диагностических диаграммах [101] ($I([\text{OIII}])/I(\text{H}\beta) - I([\text{NII}])/I(\text{H}\alpha)$ и $I([\text{OIII}])/I(\text{H}\beta) - I([\text{SII}])/I(\text{H}\alpha)$), все три области с эмиссионными линиями, для которых были получены одномерные спектры, попадают в область фотоионизации. Поэтому были использованы

стандартные методы оценки O/H для III областей. Однако стоит отметить, что стандартные диагностические диаграммы построены для солнечной металличности. Для более низкой металличности вклад ударных волн может быть значительным даже в той части диаграммы, в которую попадают III области на классических диаграммах для солнечной металличности [102]. Это может быть случай Mrk965 с её очень возмущенной морфологией, высоким отношением $I([OII]3727/H\beta)$ и $I([NiII]6584/H\beta)$ и низким $I([OIII]4959,5007/H\beta)$. Принятые величины $12+\log(O/H)$ следует использовать с осторожностью.

SHOC053=J0109+0107. В статье [43] значение $12+\log(O/H)=7,54\pm 0,15$ было получено при помощи модифицированного T_e метода, для спектра SDSS. В [88] была получена оценка $12+\log(O/H)=7,98\pm 0,04$ прямым T_e методом для спектра с 3,6-метрового телескопа ESO. Однако при визуальном осмотре этого спектра кажется, что точность измерения линии $[O III] \lambda 4363$ может быть завышена. Следовательно, это значение O/H следует использовать с осторожностью. Значение $12+\log(O/H)$ для *SHOC053*, оцененное полуэмпирическим методом с использованием потоков в линиях, приведенных в работе [88], составляет $7,73\pm 0,09$. Это значение лучше согласуется со значением из [43] и намного лучше соответствует абсолютной звездной величине галактики ($M_B = -14,3$). При анализе для *SHOC053* была принята эта оценка O/H .

2.4 Обсуждение результатов

2.4.1 Выборка галактик в войде Eridanus

Исследуемая выборка из 66 галактик из экваториальной зоны войда Eridanus является лишь второй подобной выборкой, включающей большое количество галактик в широком диапазоне светимостей: M_B от $-12,0^m$ до $-19,5^m$. Важно сравнить её с аналогичной выборкой из войда Lynx-Cancer, исследованной ранее.

Основные отличия между выборками связаны со средними расстояниями до объектов, которые для галактик в войде Eridanus примерно в 1,7 раза больше. Это приводит к разнице в медианном значении M_B : $\sim -15,8$ для выборки

Таблица 2.3 Основные параметры галактик в войде Eridanus с новыми и уточненными значениями $12+\log(\text{O}/\text{H})$

#	Название или префикс (1)	Координаты объектов на эпоху J2000		$12+\log(\text{O}/\text{H})$, прямой метод (4)	$12+\log(\text{O}/\text{H})$, принятое (5)	Источник (6)
		(2)	(3)			
1	SDSS J0013-0106	00 13 40.8	-01 06 41	–	7.52±0.05	2, SALT
2	UM 38	00 28 51.5	+03 29 23	7.95±0.05	7.95±0.05	1, SALT
3	6dF J0027-0311	00 27 55.3	-03 11 01	–	7.76±0.08	2, SALT
4	UM 40	00 28 26.6	+05 00 16	7.97±0.10	7.97±0.10	1, SALT
5	APM B0029+0226	00 31 45.3	+02 42 53	–	7.48±0.06	2, SALT
6	UGC 328	00 33 22.1	-01 07 17	–	7.74±0.08	2, SALT
7	HIPASS J0041-01b	00 41 43.1	-01 59 18	7.68±0.11	7.60±0.03	3, SALT
8	IC 52	00 48 23.8	+04 05 31	8.01±0.06	8.01±0.06	1, SALT
9	UGC 527	00 51 49.9	+03 06 21	7.84±0.14	7.84±0.03	4, БТА
10	UM 285	00 51 58.7	-01 40 19	7.77±0.06	7.77±0.06	1, SALT
11	ARK 18 (a)	00 51 59.7	-00 29 21	8.08±0.10	8.08±0.10	1, SDSS
12	ARK 18 (b,nuc)	00 51 59.6	-00 29 12	–	7.55±0.04	2, SDSS
13	MCG-01-03-027	00 52 17.2	-03 58 00	–	7.72±0.07	2, SALT
14	MRK 965	00 57 28.7	-04 09 34	–	7.59±0.06	2, БТА
15	SDSS J0057+0052	00 57 56.6	+00 52 09	–	7.80±0.03	2, SALT
16	MCG-01-03-072	01 02 22.9	-04 30 31	7.84±0.09	7.84±0.09	1, SALT
17	6dF J0105-0251	01 05 55.4	-02 51 36	–	7.94±0.05	2, SALT
18	UGC 711	01 08 36.9	+01 38 30	7.91±0.08	7.91±0.08	1,БТА
19	NGC 428	01 12 55.7	+00 58 54	8.12±0.06	8.12±0.06	1,5a, SDSS
20	MCG +00-04-049	01 14 20.5	+00 55 02	7.56±0.07	7.56±0.07	1, БТА
21	UGC 12729	23 40 20.7	+01 14 45	–	7.84±0.08	2, SALT,SDSS
22	APM B2341-0330	23 43 55.0	-03 13 35	–	7.62±0.05	2, SALT
23	B2342-0223	23 44 48.2	-02 06 54	–	7.62±0.04	2, SALT
24	UGC 12769	23 45 19.2	-01 16 24	–	7.63±0.13	2, SALT
25	SDSS J2356+0141	23 56 26.8	+01 41 17	–	7.72±0.06	2, SALT
26	HIPASS J2359+02	23 59 13.2	+02 43 26	–	7.79±0.08	2, SALT
27	APM B0001+0008	00 04 21.6	+00 25 35	–	7.45±0.09	5b
28	SDSS J0015+0104	00 15 20.7	+01 04 37	–	7.17±0.03	5c
29	SDSS J0016+0108	00 16 28.2	+01 08 02	–	7.53±0.06	5b
30	UM 240	00 25 07.4	+00 18 46	7.89±0.08	7.89±0.08	5d
31	UGC 300	00 30 04.1	+03 30 47	7.80±0.03	7.80±0.03	5e
32	SDSS J0057-0021	00 57 12.6	-00 21 58	7.60±0.01	7.60±0.01	5b
33	UGC 695	01 07 46.4	+01 03 49	7.69±0.12	7.69±0.12	5f
34	SHOC 053	01 09 08.0	+01 07 15	–	7.73±0.09	5b
35	UGC 772	01 13 39.4	+00 52 28	7.27±0.03	7.27±0.03	5g
36	UM 323	01 26 46.5	-00 38 45	7.96±0.04	7.96±0.04	5h
37	SDSS J2354-0005	23 54 37.3	-00 05 02	7.36±0.13	7.36±0.13	5b

а)[100]; б)[88]; в)[89] ; д)[43]; е)[103]; ф)[25]; г)[104] - средневзвешенное для нескольких областей; h)[69]

из войда Eridanus по сравнению с $\sim -14,45$ для выборки из войда Lynx-Cancer [105]. При одной и той же предельной видимой звездной величине для больших обзоров ($B \sim 18,5^m$), эта разница в среднем расстоянии также приводит к значительному уменьшению относительного числа карликовых галактик низкой яркости. В войде Eridanus всего четыре галактики с $M_B > -14^m$, в то время как в обновленной выборке галактик войда Lynx-Cancer 40 таких объектов [66, 105].

Стоит отметить, что значительная доля карликовых галактик самой низкой светимости, среди которых были обнаружены самые необычные объекты войдов [66, 106–108], была найдена в ходе целенаправленного поиска слабых галактик в войдах. В частности, проводился поиск возможных компаньонов уже известных карликовых галактик. Обзор SDSS Stripe82 [64], в который входит центральная часть экваториальной зоны войда Eridanus, примерно на 2 звездные величины глубже, чем обзор SDSS, и может служить хорошей основой для поиска более слабого населения галактик в этом войде.

2.4.2 Зависимость между $12+\log(\text{O}/\text{H})$ и светимостью галактик

Основная цель данного исследования – сравнение эволюционного статуса галактик в войде Eridanus с аналогичными галактиками в более плотном окружении. До этого была исследована выборка галактик в войде Lynx-Cancer [66, 80, 93, 105], однако важно проверить, сохраняются ли основные выводы для галактик, отобранных и проанализированных аналогичным образом, но населяющих другой войд, или полученные результаты отражают какие-либо особенности конкретного войда Lynx-Cancer. Таким образом, важно получить независимое подтверждение полученных ранее выводов.

В качестве “реперной” выборки галактик в более плотном окружении была использована выборка из работы [25], в которую вошли галактики Местного объема с надежными оценками расстояний и светимостей, а также содержания кислорода $12+\log(\text{O}/\text{H})$, измеренного прямым T_e методом. Та же выборка была использована в качестве “реперной” в работах по исследованию галактик войда Lynx-Cancer [66].

На рис. 2.4 приведена зависимость $\log(\text{O}/\text{H})$ от M_B для галактик выборки, а также зависимость для реперной выборки из работы Берг и др. (2012)

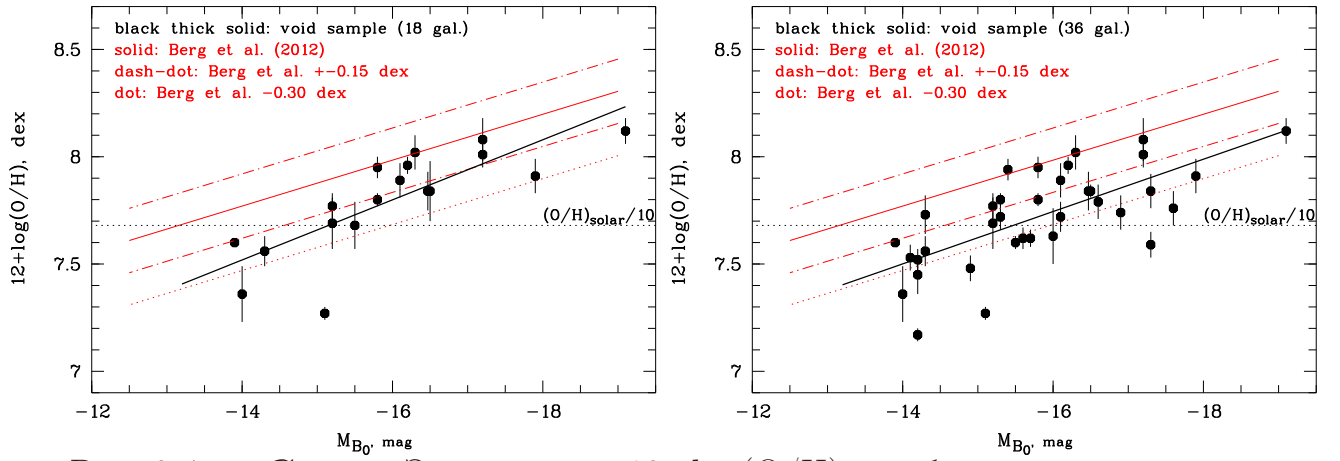


Рис. 2.4 — **Слева:** Зависимость $12+\log(\text{O}/\text{H})$ от абсолютной звездной величины в В полосе M_B для подвыборки галактик из войда Eridanus, для которых величины $12+\log(\text{O}/\text{H})$ были оценены прямым T_e методом. **Справа:** То же для всех галактик выборки. Сплошной красной линией показана линейная регрессия для реперной выборки галактик из Местного объема из работы Берг и др. (2012) [25]. Две красные пунктирные линии по обе стороны от реперной зависимости отмечают среднеквадратичное отклонение от линейной регрессии для их выборки (0,15 dex). Самая нижняя красная пунктирная линия (-0,30 dex) отделяет регион, куда попадают низкометаллические карликовые галактики, сильнее всего отклоняющиеся от реперной зависимости. Горизонтальная черная пунктирная линия отмечает значение $Z_{\odot}/10$, которое соответствует $12+\log(\text{O}/\text{H})=7,69$ для Z_{\odot} из работ [109] и [110].

[25]. Галактики войда Eridanus отмечены черными кружками, также показаны ошибки величин O/H. Зависимость для реперной выборки показана сплошной красной прямой, две параллельные ей пунктирные линии отмечают величину среднеквадратичного отклонения от линейной регрессии с $\sigma = 0,15$ dex в $\log(\text{O}/\text{H})$ для реперной выборки. Пунктирная линия, параллельная сплошной, со смещением на $-0,30$ dex, показывает отклонение -2σ . Галактики под этой пунктирной линией сильнее всего отклоняются от реперной зависимости. Горизонтальная пунктирная черная линия отмечает значение $Z_{\odot}/10$, которое соответствует $12+\log(\text{O}/\text{H})=7,69$ для Z_{\odot} из [109] и [110].

На левой панели на Рис. 2.4 отдельно показана подвыборка галактик с O/H, измеренным прямым T_e методом. На правой панели нанесены значения O/H для полной выборки галактик войда. Две этих выборки не показывают какого-либо заметного смещения друг относительно друга. Черные сплошные

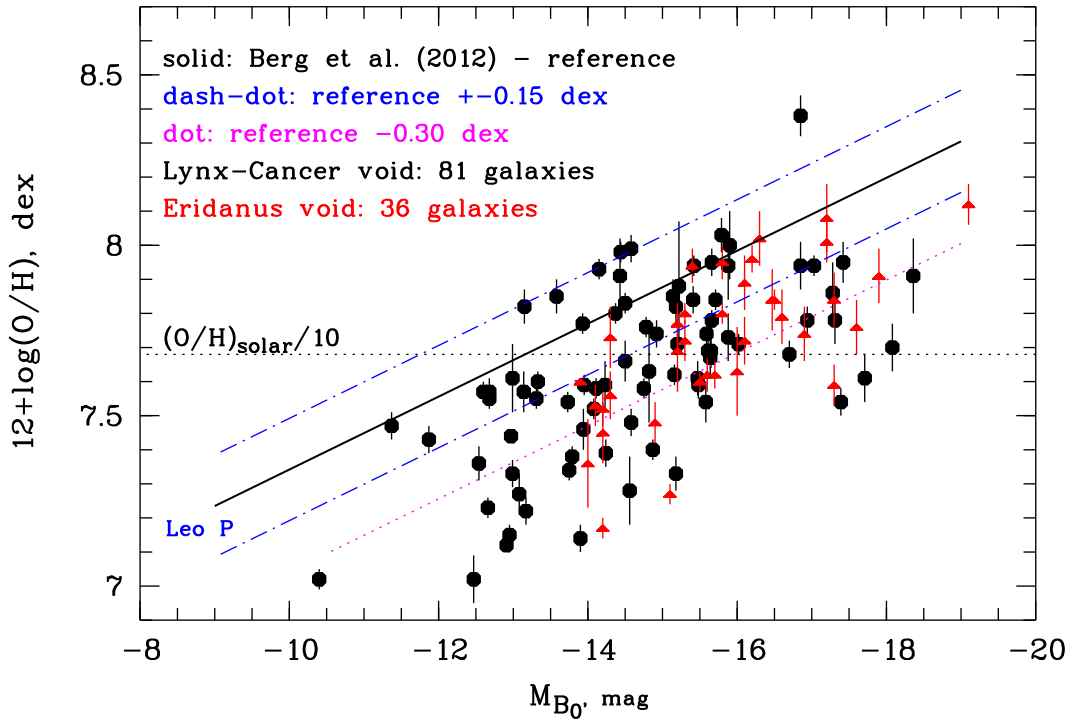


Рис. 2.5 — Зависимость между $12+\log(\text{O}/\text{H})$ и абсолютной звездной величиной в В полосе M_{B_0} для 36 галактик войда Eridanus (красные треугольники) и 81 галактики войда Lynx-Cancer (черные кружки). Сплошной линией отмечена линейная регрессия для реперной выборки из Местного объема из работы [25], двумя штрихпунктирными линиями по обе стороны от нее — среднеквадратичное отклонение от линейной регрессии для реперной выборки (0.15 dex). Пунктирная линия (смещенная на -0.30 dex от реперной) отделяет регион, куда попадают низкометаллические карликовые галактики, сильнее всего отклоняющиеся от реперной зависимости.

линии на обеих панелях показывают линейную регрессию для этих выборок галактик войда Eridanus, и они проходят значительно ниже линейной регрессии для реперной выборки.

Такой результат хорошо согласуется с выводом, сделанным в работе по исследованию металличности газа 81 галактики войда Lynx-Cancer [66]. На Рис. 2.5 приведены данные для галактик из обоих войдов (всего 117 объектов). На этом графике хорошо видно, что галактики в войдах показывают систематически более низкие значения O/H для всего доступного диапазона по светимости по сравнению с галактиками из реперной выборки. К такому эффекту могут приводить различные механизмы, в том числе это может указывать на возможную более медленную эволюцию галактик в войдах.

Кроме того, среди карликовых галактик наименьшей светимости была обнаружена небольшая подгруппа объектов с экстремально низкой металличностью O/H и очень высокой массовой долей газа. Из-за эффектов наблюдательной селекции большинство этих необычных объектов относится к выборке галактик в войде Lynx-Cancer [66]. В войде Eridanus представителем этой группы является галактика SDSS J0015+0104 [90], с металличностью $12+\log(O/H)=7,17$ [89]. Помимо этого, была найдена еще одна галактика с похожими свойствами в войде Eridanus – SDSS J0110-0000. Таким образом, при поиске таких необычных галактик в войдах на $D > 25$ Мпк большую роль играют эффекты наблюдательной селекции.

2.4.3 Замечания относительно некоторых интересных объектов

Ark18 = J0051-0029. На изображениях этой галактики в SDSS Stripe82 виден подстилающий диск низкой поверхностной яркости. Объект входит в выборку “Local Orphan Galaxies” [111], которая включает самые изолированные близкие галактики. Детальное исследование галактики Ark18 описано в Главе 6 данной Диссертации.

UM40 = J0028+0500; 6dF J0055-0601. Вокруг центральной более яркой части в обеих галактиках видны структуры низкой яркости на глубоких изображениях DECaLS (The Dark Energy Camera Legacy Survey, [97]). Это могут быть подстилающие диски низкой поверхностной яркости или результат недавних взаимодействий.

J0142+0018, J0142+0021, J0143-0002. Галактики J0142+0018 с $V_{\text{hel}} = 3222$ км/с и J0142+0021 с $V_{\text{hel}} = 3243$ км/с являются парой, проекционное расстояние между ними составляет 50 кпк. J0143-0002 с $V_{\text{hel}} = 3165$ км/с может относиться к тому же крупномасштабному филаменту.

2.4.4 Сравнение с предыдущими исследованиями и моделями

Несмотря на то, что на сегодняшний день не так много работ, в которых исследуется связь эволюции галактик с их глобальным окружением, стоит сравнить полученные результаты с выводами из других исследований. Описанная здесь работа продолжает исследование газовой металличности для выборки галактик в близком войде Lynx-Cancer [66]. В разделе 2.4.2 было продемонстрировано, что результаты и выводы для выборки галактик войда Eridanus полностью согласуются с результатами, полученными для войда Lynx-Cancer. Похожее исследование, но ограниченное всего семью галактиками из Обзора галактик войдов (Void Galaxy Survey, VGS), было представлено в работе [17]. Авторы не нашли указаний на пониженную металличность галактик войдов, в отличие от результатов, полученных в рамках исследования, представленного в диссертационной работе. Однако, как обсуждалось в [66], если рассматривать только три объекта из выборки VGS с надежными оценками O/H , полученными прямым T_e методом, они согласуются с полученными в данном исследовании результатами.

В работе [77] было представлено исследование экстремально бедных металлами (eXtremely Metal-Poor, XMP) галактик (с $12+\log(O/H) \leq 7,69$), основанное на анализе спектров SDSS. Это исследование было дополнено анализом крупномасштабного окружения галактик, основанным на космологическом моделировании системы N тел в местной Вселенной [112]. Хотя в этой работе используется другое определение войдов, авторы пришли к выводу, что вероятность обнаружения XMP-галактик в войдах значительно выше, чем в “стенках”, “узлах” (группах) и филаментах крупномасштабной структуры. Этот результат полностью согласуется с полученными результатами о пониженной в среднем металличности галактик позднего типа в войдах по сравнению с аналогичными галактиками той же светимости в более плотном окружении.

Также в работе [113] авторы пришли к выводу, что маломассивные гало, расположенные в “узлах” крупномасштабной структуры, старше гало такой же массы в войдах. Этот результат согласуется с выводом, полученным в данной работе, что галактики в войдах могут находиться на менее продвинутой стадии эволюции по сравнению с аналогичными галактиками в более плотном окружении.

Модельные работы на сегодняшний день дают слишком мало данных о том, какие свойства ожидаются у галактик в войдах. И в особенности это относится к диапазону барионных масс (от $M_{\text{bar}} \sim 10^7$ до $3 \times 10^8 M_{\odot}$), в котором были обнаружены самые необычные объекты, по свойствам напоминающие молодые галактики. В статье [114] было найдено указание на более позднее формирование гало темной материи в войдах по сравнению с гало в более плотном окружении, однако разрешения по массе в этой работе недостаточно для того, чтобы можно было сравнивать их результаты с большей частью популяции галактик в войдах.

В работе Крекель и др., 2011 [115] представлены результаты моделирования свойств звезд и газа галактик в войдах в рамках стандартной космологической модели с холодной темной материей. Несмотря на то, что разрешение по массе темной материи и газа ($1,5 \times 10^8 / 2 \times 10^7 M_{\odot}$) недостаточно хорошее для случая наименее массивных галактик войдов, авторы пришли к следующим выводам. Наиболее яркие галактики с $M_r < -18$ не показывают какой-либо зависимости свойств от плотности окружения. Однако карликовые галактики с $M_r > -16$ в войдах оказываются более голубыми, с более высоким темпом звездообразования и более низким средним возрастом звезд, чем галактики в более плотном окружении. Это согласуется с выводами о возможной замедленной эволюции галактик в войдах, а также обнаружением необычных карликовых галактик, свойства которых указывают на их возможную эволюционную молодость.

В другой модельной работе [10] были исследованы подструктуры в войдах и их динамика. Поскольку войды стремятся расширяться относительно окружающих областей Вселенной, они служат своеобразной “машиной времени” в том смысле, что развитие структур в войдах идет значительно медленнее по сравнению с более плотным окружением. Исходя из этого, можно предположить, что, по крайней мере, часть гало темной материи в войдах (и связанные с ними галактики) сформировалась в более поздние эпохи. Из-за значительного более низкого темпа взаимодействий между галактиками в войдах они могли остаться менее проэволюционировавшими. Это одно из возможных объяснений свойств самых бедных металлами и богатых газом карликовых галактик, обнаруженных в войдах.

2.5 Выводы

Результаты исследования представлены в статье [116]. По итогам данной работы были сделаны следующие выводы:

1. В экваториальной зоне войда Eridanus была составлена выборка галактик, которые находятся достаточно далеко ($D_{\text{NN}} > 2,0$ Мpc) от самых ярких ($M_{\text{B}} < M_{\text{B}}^* + 1,0 = -19,5^m$) галактик, очерчивающих границы войда. Всего в выборку вошло 66 галактик с абсолютными звездными величинами в диапазоне $M_{\text{B}} = [-12,0, -19,1]$ и медианным значением $-15,8^m$.
2. Анализ данных новых спектральных наблюдений для 23 галактик войда, полученных на телескопах SALT и БТА, а также 3 доступных спектров SDSS, позволил оценить содержание кислорода в газе для 25 объектов выборки. Эти данные были дополнены оценками O/H, доступными в литературе для еще 11 галактик войда. Была построена зависимость “ $\log(\text{O}/\text{H}) - M_{\text{B}}$ ” для 36 объектов. Население галактик в войде сравнивалось с реперной выборкой аналогичных галактик, находящихся в более плотном окружении в Местном объеме [25]. Был сделан вывод о том, что галактики в войде Eridanus показывают систематически более низкие значения содержания кислорода O/H, что может указывать на их возможную эволюционную молодость.
3. Результаты данного исследования газовой металличности 36 галактик войда Eridanus, а также результаты предыдущей работы для 81 галактики в близком войде Lynx-Cancer, указывают на существенно пониженные (в среднем на $\sim 40\%$) металличности галактик в войдах для данной светимости. Кроме того, небольшая часть галактик обоих войдов оказалась очень богатыми газом объектами, с экстремально низкими металличностями и свойствами, указывающими на недавнее начало звездообразования (на масштабе от одного до нескольких миллиардов лет). Этот результат согласуется с теоретическими предсказаниями относительно необычных свойств некоторых галактик в войдах. Поэтому целенаправленный поиск подобных объектов в войдах может быть одним из наиболее эффективных способов их обнаружения. Этому посвящена Глава 3 данной Диссертации.

4. Эти необычные галактики в нашей выборке обладают низкими светимостями и в основном представляют собой карлики низкой поверхностной яркости с $M_V \gtrsim -14$. Это указывает на то, что поиск подобных объектов в войдах подвержен значительному эффекту наблюдательной селекции. При использовании существующих спектральных обзоров с типичной глубиной $B \sim 18,5^m - 19^m$ можно исследовать только близкие войды с $D \lesssim 25$ Мпк. В более далеких войдах можно проводить поиск таких объектов при помощи целенаправленной спектроскопии или наблюдений в HI потенциальных более слабых LSB-компаньонов известных, более ярких карликов в войдах.

Глава 3. Поиск и исследование галактик с экстремально низкой металличностью

3.1 Введение

Начиная с открытия около полувека назад необычной голубой компактной карликовой галактики (Blue Compact Dwarf Galaxy, BCDG) с экстремально низкой металличностью газа IZw18 (=MRK 116) ($Z_{\text{gas}} \sim Z_{\odot}/30$, [22]), интерес к этим редким галактикам то возрастал, то утихал. Одним из мотивов поиска других подобных BCDG была надежда, что такие необычные объекты могут быть аналогами первичных галактик на больших красных смещениях (см., например, обзор [18]). Они также являются хорошими объектами для исследования важного космологического параметра – содержания первичного гелия [см., например, 117, 118].

В последнее время интерес к таким объектам подогревается результатами массовых спектроскопических обзоров слабых галактик, в основном найденных в SDSS [63, 119]. Несколько научных групп использовали эту базу данных для поиска кандидатов в галактики с экстремально низкой металличностью (eXtremely Metal-Poor, XMP) и дальнейшего подтверждения их металличности с помощью последующей спектроскопии.

Несмотря на наличие спектральных данных для более чем одного миллиона галактик, из-за эффектов наблюдательной селекции и других ограничений обзора лишь для нескольких сотен галактик [81, 120] металличность газа была оценена на уровне $Z \lesssim Z_{\odot}/10$, или $12+\log(\text{O}/\text{H}) \lesssim 7,69$ dex. Число галактик XMP с надежной оценкой на уровне $Z_{\text{gas}} \lesssim Z_{\odot}/30$ по данным обзора SDSS на сегодняшний день существенно ниже [см. 81].

В последнее десятилетие для поиска таких редких объектов использовались и другие методы. Например, в некоторых работах используется корреляция очень низкой металличности газа с низкой светимостью галактики и высоким содержанием газа. Благодаря слепому обзору HI с высокой чувствительностью, проведенному на радиотелескопе Аресибо (ALFALFA, [47]) на площади ~ 7000 кв. град. удалось уверенно детектировать ~ 35000 внегалактических источников HI с лучевыми скоростями до ~ 16000 км/с. Значительная

часть из них оказались довольно близкими маломассивными карликовыми галактиками с ранее неизвестными лучевыми скоростями.

Проект SHIELD [121–123] был направлен на исследование подвыборки слабых карликовых галактик из обзора ALFALFA, богатых газом. В ходе этого проекта было обнаружено несколько интересных карликов, в том числе объект AGC198691 с экстремально низкой металличностью $12+\log(\text{O}/\text{H}) = 7,02$ [31] на расстоянии ~ 11 Мпк. Еще одна галактика XMP, Leo P, с $12+\log(\text{O}/\text{H}) = 7,17$, была обнаружена вблизи Местной группы ($D=1,65$ Мпк, [124]).

Карликовая галактика с очень низкой поверхностной яркостью, Coma P = AGC229386, которая находится на расстоянии $D = 5,5$ Мпк и показывает рекордно высокое отношение $M_{\text{HI}}/L_{\text{B}} = 28$ [125, 126], может относиться к той же категории объектов. Однако оценка металличности звезд $Z=0,002$ [126], что соответствует $12+\log(\text{O}/\text{H}) = 7,8$, оказывается слишком высокой, так что эту галактику сложно отнести к XMP-объектам.

При таком методе отбора кандидатов эффективность обнаружения новых галактик XMP оказывается выше, чем при поиске среди галактик с яркими эмиссионными линиями в обзоре SDSS. Однако общее количество карликов XMP, найденных таким образом, по-прежнему остается небольшим.

В некоторых работах были предложены новые методы отбора кандидатов в XMP объекты, которые основаны на фотометрических свойствах галактик, полученных из базы данных SDSS. В рамках такого подхода отбираются и исследуются галактики в пространстве параметров (цвета, морфология, размеры), типичном для Leo P и подобных XMP-галактик, обнаруженные среди галактик с имеющимися в базе данных SDSS изображениями. В частности, в работе [127] удалось обнаружить 11 галактик с $Z \lesssim Z_{\odot}/10$ среди 50 кандидатов в голубые диффузные карлики. Однако их нельзя отнести к объектам с экстремально низкой металличностью, поскольку все они показывают содержание кислорода $12+\log(\text{O}/\text{H}) > 7,4$ dex.

Похожий метод был использован в работах [128, 129]. Авторы сформировали выборку кандидатов в XMP из ~ 150 голубых галактик позднего типа, и, проведя их последующую спектроскопию, обнаружили один хороший близкий XMP-объект (получивший название “Little Cub”) с $12+\log(\text{O}/\text{H}) = 7,13$. Однако все остальные кандидаты из их выборки показывают содержание кислорода $12+\log(\text{O}/\text{H}) > 7,4$ dex. Таким образом, можно сделать вывод, что из-за различных эффектов наблюдательной селекции поиск новых XMP-галактик – очень

сложная задача. Как следствие хорошо известной зависимости “светимость – металличность” можно ожидать, что подавляющее большинство галактик поздних типов с $M_{B,tot} > -13$ должны иметь металличность газа $Z_{gas} \lesssim Z_{\odot}/10$. Однако, несмотря на это, подобные галактики удается обнаружить относительно редко [130].

В работах [66, 93] был предложен еще один метод поиска ХМР-объектов. Он основан на обнаружении пониженной (в среднем в $\sim 1,5$ раза) металличности газа галактик поздних типов в войдах относительно аналогичных объектов в более плотном окружении (типичных группах) [66, 116]. Этот вопрос обсуждается также в Главе 2 данной Диссертации. Кроме того, было обнаружено, что $\sim 1/3$ из примерно 20 самых слабых карликов поздних типов войда Lynx-Cancer показывают содержание кислорода в газе O/H, пониженное в 2–4 раза по сравнению с реперной выборкой подобных галактик в более плотном окружении [66, 131]. Эти же объекты показывают экстремально высокую массовую долю газа 0,95–0,99 и голубые цвета внешних областей.

Если экстраполировать эти выводы, основанные на относительно небольшой статистике, на выборку карликовых галактик поздних типов в других близких войдах (из Каталога галактик в близких войдах – Nearby Void Galaxies, NVG, см. раздел 3.2), то можно ожидать, что примерно $1/3$ из всех ~ 180 объектов выборки с $M_{B,tot} > -13$ должны показывать $Z \lesssim (Z_{\odot}/30 - Z_{\odot}/20)$. Однако для проверки этого предположения необходимо провести качественную спектроскопию слабых галактик, входящих в каталог NVG.

Важным вопросом является вопрос о минимальной металличности газа в галактиках близкой Вселенной, он связан с историей обогащения межгалактической среды. Есть некоторые указания на то, что за пределами областей с высокой плотностью галактик (массивных групп и скоплений) межгалактическая среда на локальных масштабах в основном показывает металличность 1–2% от солнечной. Так называемая “холодная аккреция” этого газа на маломассивные гало темной материи рассматривается как один из основных механизмов формирования карликовых галактик. Если газ, образующий звезды в галактиках, был таким образом частично аккрецирован из межгалактической среды, то металличность межгалактической среды определяет и нижний предел на металличность в ХМР-галактиках [см., например, 34]. Стоит отметить, что в далекой Вселенной, на красных смещениях $z \sim 3,1$ и $\sim 4,4$ были обнару-

жены явные указания на гораздо меньшую металличность в межгалактической среде, $\sim 0,001$ и даже $\sim 0,0001$ от солнечной величины [132, 133].

Для галактик в местной Вселенной металличность $\sim 0,02 Z_{\odot}$ (или $12+\log(\text{O}/\text{H}) \sim 7,0$ dex) была получена лишь для небольшого числа объектов. Два из них, обнаруженные относительно недавно [32, 33], являются карликовыми галактиками с активным звездообразованием (или голубыми компактными карликами), расположенными на расстояниях ~ 186 и 650 Мпк. Как было показано в работе [33] при фитировании распределения энергии в спектре, в J0811+4730 масса звездного населения с возрастом 1–10 млрд. лет меньше (возможно, намного меньше) массы молодого звездного населения.

Однако эта работа была основана на спектре, снятом в круговой апертуре диаметром $\sim 3''$ что соответствует линейному диаметру ~ 3 кпк на принятом расстоянии до галактики. В этом случае нельзя исключить, что за пределами области вспышки текущего звездообразования, которая дает наибольший вклад в спектр SDSS, может быть также старый звездный диск с массой, сравнимой или превышающей массу “молодого” звездного населения. С такой оговоркой эти далекие ХМР-галактики можно рассматривать как возможные аналоги предсказанных в моделях очень молодых галактик (Very Young Galaxies, VYG), которые сформировали большинство своих звезд в течение последнего миллиарда лет [24].

Более того, согласно анализу имеющихся данных для первой известной ХМР-галактики, голубой компактной галактики IZw18 и ее более слабого компаньона IZw18C, приведенному в работе [23], несмотря на обнаруженные с помощью космического телескопа им.Хаббла звезды ветви красных гигантов, основная масса звезд также сформировалась недавно, на временном масштабе ~ 1 млрд.лет.

Несколько карликовых галактик с экстремально низким содержанием кислорода O/H [$12+\log(\text{O}/\text{H}) \lesssim 7,0-7,1$], но при этом с достаточно низким темпом звездообразования (SFR) были обнаружены в близком войде Lynx-Cancer на расстояниях 10–25 Мпк [31, 66]. Большинство из них также показывают голубые цвета периферии, которые соответствуют времени, прошедшему с момента начала основного эпизода звездообразования $\lesssim (1-3)$ млрд.лет, и имеют очень большую массовую долю газа $M_{\text{gas}}/M_{\text{bary}} \sim 0,96-0,99$. Однако из-за эффектов наблюдательной селекции (галактики слабые и со слабыми эмиссионными линиями) обнаружить подобные объекты довольно сложно.

В данной Главе Диссертации представлено описание подхода к поиску галактик с экстремально низкой металличностью газа в войдах, а также результаты этого поиска. Для этого был использован Каталог галактик в близких войдах (NVG), представленный в работе Пустильника и др., 2019 [36]. Выборка галактик из этого каталога была использована для того, чтобы выделить группу из примерно 60 карликовых галактик поздних типов и низкой светимости в качестве кандидатов в богатые газом ХМР объекты. Затем была проведена спектроскопия на 6-м телескопе БТА САО РАН и Южно-африканском большом телескопе (SALT, [37, 38]) для оценки содержания кислорода O/H.

3.2 Выборка галактик в близких войдах

В Каталог галактик в близких войдах вошли галактики, попадающие в 25 войдов в объеме с $R = 25$ Мпк [36]. Всего каталог содержит 1354 галактики, с абсолютными звездными величинами M_B в диапазоне от $-7,5$ до $-20,5$ с медианным значением $M_{B,med} \sim -15,2$. Из них 1088 галактик находятся во “внутренних” областях войдов, с расстоянием до ближайшей “яркой” галактики $D_{NN} \geq 2,0$ Мпк (для этих объектов медианное значение $D_{NN,med,inner} = 3,4$ Мпк). Остальные галактики выборки NVG находятся во “внешних” частях войдов, ближе к их границам. Для них медианное значение $D_{NN,med,outer} = 1,6$ Мпк.

Около 200 объектов выборки NVG попадают в Местный объем, то есть в область в пределах $R = 11,0$ Мпк. Благодаря своей близости они наиболее интересны для их детального исследования.

3.3 Галактики-прототипы для поиска необычных богатых газом карликовых галактик с экстремально низкой металличностью

Для поиска новых ХМР объектов был использован Каталог галактик в близких войдах. Чтобы повысить эффективность такого поиска, необходимо хорошо обозначить наблюдательные свойства уже известных карликов, относя-

Таблица 3.1 Параметры известных галактик-прототипов для поиска богатых газом карликовых ХМР-галактик в войдах

Обозначение	O/H dex	$\frac{M(\text{HI})}{L_B}$	M_B mag	$(g-r)_0$ mag	D Мпк	$\log M(\text{HI})$	$\log M_*$	B_{tot} mag
1	2	3	4	5	6	7	8	9
J0015+0104	7.03±.05	2.4	-14.07	0.19	28.4	8.32	6.68	18.31
J0113+0052	7.16±.05	4.2	-14.20	...	16.2	8.52	...	16.90
J0706+3020	7.06±.05	17.1	-12.47	-0.08	16.9	8.41	6.2:	19.15
J0926+3343	7.12±.03	3.2	-12.90	0.09	10.6	7.86	6.11	17.34
J0929+2502	7.10±.08	2.4	-12.95	0.16	25.7	7.75	6.54	19.24
J0943+3326	7.02±.02	6.5	-10.47	0.05	11.0	7.19	5.46	19.82
J0956+2850	6.96-7.15	3.0	-13.9:	0.05	12.7	8.22:	6.6:	16.7:
J2104-0035	7.07±.07	4.1	-13.20	-0.04	17.2	8.29	6.0:	18.07
J0723+3622	...	11.9	-11.76	-0.01	16.0	7.98	5.90	19.46
J0723+3624	...	28.3	-9.56	0.08	16.0	7.46	5.00	21.68
J0811+4730	6.98±.02	...	-15.07g	...	182	...	6.24	21.37g
J1234+3901	7.03±.03	...	-17.32g	...	546	...	7.13	21.92g

щихся к этой группе (в основном по объектам из войда Lynx-Cancer). Для этого была сформирована выборка галактик-прототипов.

В Таблице 3.1 приведены основные параметры для 8 необычных карликовых галактик ХМР в близких войдах, а также для двух чрезвычайно богатых газом голубых карликовых галактик в войдах с неизвестным содержанием кислорода O/H, которые, вероятно, принадлежат к тому же типу объектов. Четыре из восьми богатых газом ХМР-объектов из Таблицы 3.1 (J0706+3020, J0926+3343, J0929+2502 и J0956+2850) были обнаружены в ходе исследования близкого войда Lynx-Cancer [30, 66, 105–108, 134]. J0956+2850 – меньший компонент хорошо известной системы сливающихся карликов DDO68 [30, 135, 136], для которой $12+\log(\text{O}/\text{H}) < 7,15$ dex [30, 71, 137].

Еще одна карликовая ХМР галактика, J0943+3326 (AGC198691 = Leoncino), была обнаружена независимо в войде Lynx-Cancer среди богатых газом объектов [31] в слепом обзоре HI ALFALFA [47].

Помимо этого, три новых ХМР карлика были обнаружены по их эмиссионным спектрам в базе данных SDSS и, как оказалось, также относятся к населению близких войдов. В частности, галактика J0015+0104 была обнаружена в работах [88, 89] и в дальнейшем более детально исследована в работах [90] и [116]. Еще два ХМР объекта J0113+0052 и J2104-0035 были обнаружены в обзоре SDSS в работе [138] и исследованы в работах [135, 139].

Две необычных карликовых галактики из войда Lynx-Cancer являются членами очень богатого газом триплета J0723+36, с $M_{\text{HI}}/L_{\text{B}} \sim 12$ и ~ 28 . Соответствующие оценки долей их звездных масс $M_{\text{star}}/M_{\text{gas}} < 0,01$ [106] также чрезвычайно низкие. Оба карлика показывают очень низкие потоки в линии $\text{H}\alpha$ и оценку O/H для них получить трудно. Однако другие их свойства указывают на то, что их также можно отнести к группе необычных карликовых галактик войдов [106].

Все богатые газом объекты ХМР из выборки галактик-прототипов показывают голубые цвета $(g - r)_0 \lesssim 0,20$, в основном $-(g - r)_0 \lesssim 0,15$. Такие показатели цвета соответствуют трекам модели PEGASE [140] для мгновенной вспышки звездообразования для металличности звезд $z=0,0004$, для времени $\lesssim 1-2$ млрд.лет, прошедшего после начала звездообразования, либо возрастам $\lesssim 3 - 5$ млрд.лет для треков непрерывного ЗО с постоянным темпом звездообразования (в зависимости от принятой начальной функции масс и цвета $(u - g)$ [131]).

Также в выборку галактик-прототипов в Таблице 3.1 были включены две очень далекие необычные компактные галактики со вспышкой звездообразования с рекордно низким содержанием кислорода O/H и очень голубым континуумом без следов старого звездного населения, J0811+4730 и J1234+3901 [32, 33]. Эти карликовые объекты, вероятно, являются лучшими кандидатами в так называемые очень молодые галактики, предсказанные в моделях в работе Твида и др., 2018 [24]. Такие ХМР-объекты, попавшие в короткую фазу сильного звездообразования, очень редки, и напоминают по своим свойствам (сильным звездообразованием, цветами, экстремально низкой металличностью) хорошо известные более близкие ХМР галактики IZw18 и SBS0335-052E.

Таблица 3.1 содержит следующие столбцы:

- (1) Обозначение галактики
- (2) Принятая величина $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ с ошибкой 1σ .
- (3) Отношение массы атомарного водорода HI к абсолютной звездной величине в фильтре B , в солнечных единицах, $M_{\text{HI}}/L_{\text{B}}$,
- (4) Абсолютная звездная величина M_{B} , оцененная из видимой звездной величины B_{tot} из Столбца 9 и расстояния до галактики из Столбца 6.
- (5) Интегральные цвета $(g - r)_0$, исправленные за межзвездное поглощение в Галактике. Для J0015+0104 из работы [90], для J0706+3020 из работы [108], для J0926+3343, J0929+2502, J0723+3622 и J0723+3624 из

работы [131], для J0943+3326 принята величина $(g-r)$ приведенная в базе данных SDSS DR14 [119]. Для J0956+2850 (DDO68B) приняты цвета более слабого компонента слияния из работы [141], для J2104-0049 приняты цвета, оцененные по изображениям из базы данных SDSS.

(6) Расстояние до объекта в Мпк, оцененное либо методом верхушки ветви красных гигантов, либо пересчитанное из радиальных скоростей, с учетом больших пекулярных скоростей Местного листа (Local Sheet), достигающих до ~ 350 км/с, в зависимости от положения галактики на небе [142].

(7) Масса атомарного водорода HI, в единицах M_{\odot} .

(8) Звездная масса, оцененная согласно формулам из работы [143], в единицах M_{\odot} . Величины были оценены в работах [90, 108, 131].

(9) Полная видимая звездная величина в фильтре B , для двух объектов в конце таблицы – в фильтре g .

Обобщая данные Таблицы 3.1, можно отметить, что объекты, вошедшие в выборку галактик-прототипов с экстремально низкой металличностью газа $12+\log(\text{O}/\text{H})$, обладают низкой светимостью M_B от $\sim -9,5$ до $-14,2$, средними и высокими M_{HI}/L_B от ~ 2 до 28. В большинстве случаев они относятся к голубым дисковым галактикам низкой поверхностной яркости. Полный диапазон барионных масс (суммарная масса газа и звезд) в известных прототипах карликовых ХМР галактик войдов составляет $(\sim 2-40) \times 10^7 M_{\odot}$. Атомарный газ HI вместе с атомарным He (его масса принималась как за 30% от HI) преобладает по массе над звездным компонентом на $\sim 1,5-2$ порядка. Оценки динамических масс M_{dyn} в пределах радиуса диска HI на уровне поверхностной плотности $0,3 M_{\odot} \text{ пк}^{-2}$ известны лишь для нескольких объектов, их типичные значения 5–10 M_{bary} . Согласно результатам моделирования, приведенного в работе [144], полная масса гало холодной темной материи (CDM), M_{vir} , может быть от нескольких до десяти раз выше, чем M_{dyn} . То есть ожидаемый диапазон масс гало холодной темной материи для этих карликов ХМР – между $< 10^9$ и $\sim 10^{10} M_{\odot}$.

3.4 Критерии отбора кандидатов и итоговая выборка

Опираясь на свойства известных галактик-прототипов, можно составить выборку кандидатов в ХМР галактики в войдах. Отбор проводился в несколько этапов.

Для начала для отбора объектов низкой светимости был использован Каталог галактик в близких войдах, описанный в разделе 3.2. При исследовании выборки галактик в близком войде Lynx-Cancer [66, 131] было обнаружено, что наиболее богатые газом карлики с самым низким содержанием кислорода в газе O/H и нетипично синими цветами звездного населения на периферии, преимущественно являются галактиками самой низкой светимости. Доля подобных объектов среди галактик войда существенно возрастает для диапазона абсолютных звездных величин $M_B > -13,2$. Однако учитывая три галактики-прототипа из Таблицы 3.1 (J0015+0104, J0113+0052, J2104-0035), находящихся в других близких войдах и имеющих более высокие светимости, стоит расширить эту границу до $M_B > -14,2$. С учетом небольшого запаса, установим предел на абсолютную звездную величину в полосе $B -14,3$, в этом случае в нашу начальную подвыборку после первого этапа отбора входит ~ 380 галактик низкой светимости из Каталога галактик в близких войдах.

На следующем этапе были использованы общедоступные данные для галактик этой подвыборки, чтобы отобрать объекты с высоким значением $MHI/L_B \gtrsim 1$. Данные, в частности, были получены из баз данных HyperLEDA [94]¹ и NED. В подвыборку вошло несколько десятков галактик с $MHI/L_B \gtrsim 3$. Галактики с таким высоким MHI/L_B довольно редки, поэтому чтобы убедиться, что это не связано с какими-либо ошибками, где это было возможно, были проверены полные звездные величины B_{tot} , полученные для них в литературе. Кроме того, была проведена апертурная фотометрия этих галактик в фильтрах g, r по соответствующим изображениям из базы данных SDSS; из полученных величин затем были пересчитаны величины B_{tot} по формуле из [58].

Для более чем половины таких “богатых газом” галактик, отобранных автоматически, было обнаружено, что обновленные B_{tot} из литературы или полученные в рамках данной работы по изображениям SDSS, принятые в качестве более надежных величин, оказались значительно ярче, чем указано в

¹<http://leda.univ-lyon1.fr>

HyperLEDA. Для некоторых проверенных объектов значение потоков в линии 21см H α в HyperLEDA также было устаревшим и существенно превышало более поздние оценки. Все это было учтено при окончательном отборе, а ложные “богатые газом” галактики были исключены из итоговой выборки. Однако некоторые ошибки в B_{tot} и потоков H α для выбранных объектов-кандидатов в XMP были обнаружены позже, когда для галактики уже были получены наблюдательные данные. Для них отношение MHI/ L_B оказалось меньше 1, однако они были оставлены в выборке.

На третьем этапе был проведен отбор по интегральным цветам, полученным по изображениям из базы SDSS, чтобы отсеять самые красные объекты и отобрать галактики с преобладающим вкладом относительно молодого звездного населения. Для этого были использованы цвета $g - r$, скорректированные за межзвездное поглощение в Галактике. В итоговую выборку вошли объекты с цветами $(g - r)_0 < 0,4$, а также несколько галактик с неуверенными оценками $(g - r)_0 > 0,4$ и высокими MHI/ L_B .

В финальную выборку для последующей оптической спектроскопии вошло 60 галактик, которые представлены в Таблице 3.2.

Для нескольких галактик из этой выборки доступны спектры SDSS в центральной области. Из-за диапазона красных смещений нашей выборки важная линия [OII] λ 3727, которая используется в классическом T_e -методе для оценки O/H в HII-областях, находится за пределами спектрального диапазона доступных для них спектров SDSS. Однако для оценки ожидаемого содержания кислорода могут быть использованы другие сильные линии. В частности, в данной работе были использованы уравнения (1) и (3) из работы [81] для поиска потенциальных кандидатов в XMP-галактики. Согласно уравнению (1) из [81], галактики с параметром $R_{23} \lesssim 4$ должны иметь $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \lesssim 7,4$, где $R_{23} = [I([\text{OII}]\lambda 4959) + I([\text{OII}]\lambda 5007) + I([\text{OII}]\lambda 3727)] / I(\text{H}\beta)$. $I([\text{OII}]\lambda 3727)$ согласно уравнению (3) из [81], может быть оценено как $I([\text{OII}]\lambda 3727) = 20 \times I([\text{NII}]\lambda 6584)$ при $I([\text{NII}]\lambda 6584) / I(\text{H}\beta) < 0,1$. Эта информация также учитывалась при отборе кандидатов в XMP-галактики войдов, и в выборку было включено несколько объектов со MHI/ $L_B < 1$ или без данных о содержании атомарного водорода, или с несколько более красным $g - r$ чем $\sim 0,4$.

Кроме того, еще одна галактика с опубликованной оценкой O/H, KK246, была включена в выборку кандидатов в XMP в войдах, поскольку удовлетворяет критериям отбора. Значение $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8,2$ для этой галактики [145]

сильно завышено по сравнению со значением, ожидаемым для остальных его свойств. Поэтому для нее стоит получить независимую оценку содержания кислорода $12+\log(\text{O}/\text{H})$.

Для нескольких кандидатов в Таблице 3.2 после дополнительных проверок параметр MHI/L_B оказался существенно ниже принятого изначально. Однако, поскольку их спектры уже были получены, они были оставлены в выборке. Это позволяет расширить пространство параметров исследуемых ХМР галактик в войдах.

Выборка кандидатов для спектральных наблюдений приведена в Таблице 3.2. Таблица содержит следующие столбцы:

- (1): Название галактики из Каталога галактик в близких войдах
- (2): Прямое восхождение и склонение на эпоху J2000
- (3): Гелиоцентрическая скорость в км/с.
- (4): Расстояние в Мпк (либо оцененное независимым методом, либо пересчитанное из скоростей с учетом пекулярных скоростей галактик и принимая постоянную Хаббла $H = 73$ км/с/Мпк)
- (5): Видимая полная звездная величина в фильтре B
- (6): Абсолютная звездная величина M_B
- (7): Отношение массы атомарного водорода HI к светимости в фильтре $B - \text{MHI}/L_B$, в солнечных единицах
- (8): Масса атомарного водорода $\log\text{MHI}$ в солнечных единицах
- (9): Масса звезд $\log(M_*)$, в солнечных единицах

Большая часть оценок M_* получена с помощью метода из работы Зибетти и др., 2009 [143] на основе фотометрии галактик-кандидатов, проведенной по изображениям, доступным в базе данных SDSS [119]. Для нескольких галактик за пределами зоны охвата SDSS, где это было возможно, также была проведена фотометрия изображений, доступных в базах данных PanSTARRS PS1[146] и Dark Energy Survey (DES DR1)[147]. Помимо этого, для нескольких галактик были использованы оценки M_* из литературы: из работы [148] для HIPASSJ0653-73, из [149, 150] для KK246 и из [151] для ESO238-005.

Кандидаты в ХМР-галактики в Таблице 3.2 попадают в широкий диапазон по расстояниям от ~ 5 до 25 Мпк. Их B_{tot} варьируется от $\sim 15,5$ до $\sim 20,0$ зв.вел., абсолютные величины M_B от $-10,3$ до $-14,3$ зв.вел.. Отношение MHI/L_B для подавляющего большинства кандидатов, вошедших в выборку, составляет от ~ 1 до 6,5. Однако для двух объектов он был оценен в $\sim 0,6$. Диапазон ба-

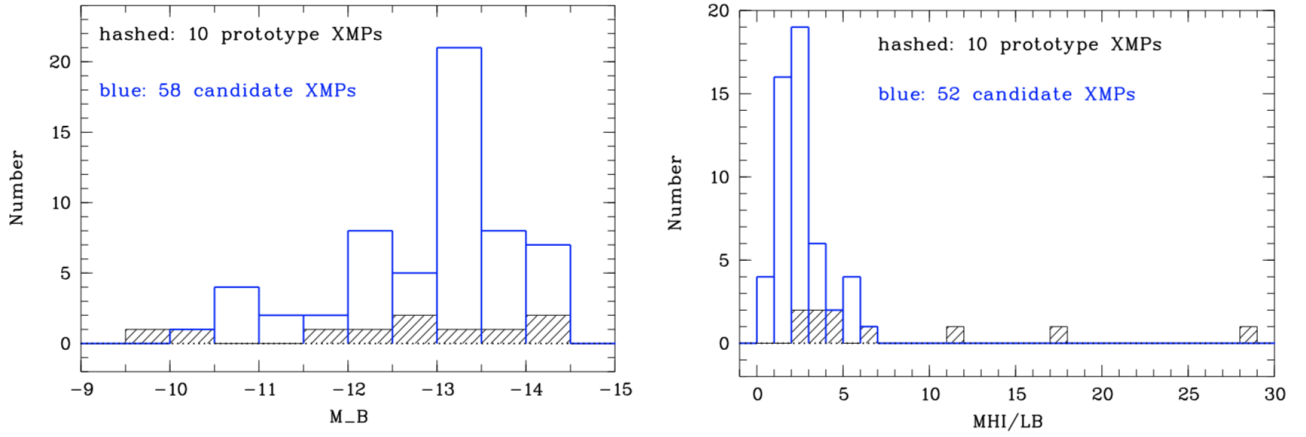


Рис. 3.1 — **Слева:** Распределение по абсолютным звездным величинам M_B . **Справа:** Распределения по отношениям M_{HI}/L_B (в солнечных единицах).

Распределения для 10 галактик-прототипов показаны заштрихованными гистограммами, для кандидатов в ХМР-галактики – синими гистограммами.

рионных масс кандидатов близок к диапазону галактик-прототипов ХМР, то есть $(2-40) \times 10^7 M_\odot$. Только четыре объекта имеют этот параметр в диапазоне $(0,6-2) \times 10^7 M_\odot$. Как следует из сравнения оценок масс HI и масс звезд в столбцах для 48 галактик, имеющих обе оценки, отношение $M(HI+He)/M_*$ для галактик-кандидатов меняется в широком диапазоне, от ~ 2 до ~ 100 , с медианным значением 12. Для половины из этих галактик параметр принимает значения от 5 до 26.

На Рис. 3.1 и 3.2 показаны распределения по параметрам M_B , M_{HI}/L_B , интегральным цветам $(g-r)_0$ и отношению R23 для двух выборок: ХМР галактик-прототипов в войдах (заштрихованные гистограммы) и кандидатов в ХМР-галактики в войдах из Таблицы 3.2 (синие гистограммы). Диапазон значений M_B для обеих выборок хорошо согласуется, однако $\sim 2/3$ объектов из выборки галактик-кандидатов имеют $M_B < -13,0$, тогда как большинство галактик-прототипов слабее, чем $M_B = -13,0$. В случае параметра M_{HI}/L_B около $2/3$ галактик-кандидатов попадают в диапазон M_{HI}/L_B для галактик-прототипов, а остальные показывают меньшее содержание газа. Еще сильнее разница для распределений по цветам $(g-r)_0$ – только $\sim 40\%$ галактик-кандидатов показывают настолько синие цвета $(g-r)_0$, как и у галактик-прототипов. Однако это позволяет расширить пространство параметров для кандидатов в ХМР, чтобы учесть возможные ошибки в оценках параметров и ограниченный размер выборки галактик-прототипов, что может повлиять на ее репрезентативность.

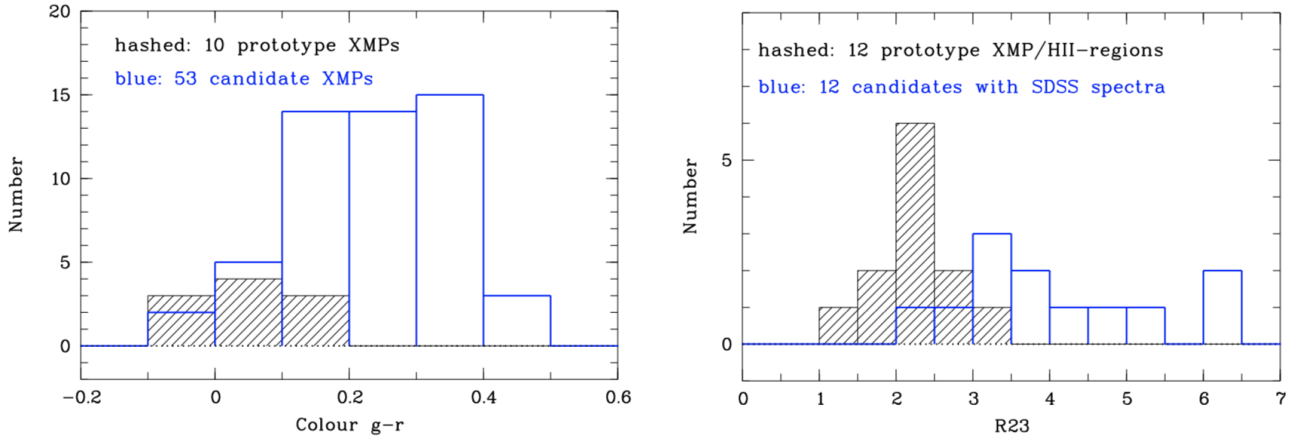


Рис. 3.2 — **Слева:** Распределение по интегральным цветам $(g - r)_0$, исправленным за межзвездное поглощение. **Справа:** Распределение по параметру R23 для 12 областей H II в галактиках-прототипах и 12 галактиках-кандидатах в XMP. Более подробное описание приведено в тексте. Распределения для 10 галактик-прототипов показаны заштрихованными гистограммами, для кандидатов в XMP-галактики – синими гистограммами.

Параметр R23 был оценен только для некоторых галактик с имеющимися SDSS-спектрами. Поскольку линия $[\text{OII}]3727\text{\AA}$ находится вне диапазона длин волн SDSS, ее поток оценивался через поток $[\text{NII}]6584\text{\AA}$, как было описано выше. Поскольку соотношение между потоками этих двух линий из-за разброса величин может меняться в ~ 2 раза, соответствующая оценка R23 также может иметь большую неопределенность и ее стоит рассматривать только как ориентировочную. Для галактик-прототипов параметр R23 попадает в диапазон от 1,3 до 3,5. Для некоторых галактик-кандидатов в XMP R23 попадает в тот же диапазон, однако в целом их R23 оказывается выше, чем в группе галактик-прототипов.

На Рис. 3.3 и 3.4 приведены изображения 46 галактик в зоне покрытия SDSS. На Рис. 3.5 показаны 14 галактики войдов, попадающих вне зоны SDSS, приведены композитные изображения в B и R фильтрах по данным из Digital Sky Survey (DSS).

Таблица 3.2 Выборка кандидатов в галактики с экстремально низкой металличностью в близких войдах

Название галактики (1)	RA(J2000) Dec(J2000) (2)	V_h , км/с (3)	D Мпк (4)	B_{tot} mag (5)	M_B mag (6)	$\frac{M_{HI}}{L_B}$ (7)	logMHI (8)	logM _* (9)
AGC102728	00:00:21.4 +31:01:19	566	9.4	19.38	-10.65	2.46	6.85	5.82
PGC000083	00:01:06.5 +32:22:41	542	9.1	17.14	-12.86	3.1	7.48	6.19
PGC000389	00:05:35.9 -41:28:56	1500	17.5	17.98	-13.30	...	...	...
AGC748778	00:06:34.3 +15:30:39	258	6.3	18.95	-10.30	2.30	6.66	5.40
PGC736507	00:09:36.2 -28:51:38	898	...	19.14	-10.95	...	...	...
PISCESA	00:14:46.0 +10:48:47	235	5.6	17.98	-11.14	2.92	7.05	5.74
HIPASSJ0021+08	00:20:41.7 +08:36:55	693	9.9	17.10	-13.37	1.21	7.63	6.72
AGC104208	00:41:42.5 +12:59:34	676	10.1	19.66	-10.74	3.45	7.01	5.92
AGC104227	00:58:23.7 +04:18:25	1198	16.9	18.12	-13.11	2.13	7.76	6.56
PGC493444	01:07:18.0 -47:56:33	837	...	19.47	-10.56	...	...	...
PGC1190331	01:09:10.1 +01:17:27	1094	15.4	17.20	-13.49	2.24	7.94	7.04
AGC411446	01:10:03.7 -00:00:36	1137	15.9	19.58	-11.54	4.80	7.53	5.66
AGC114584	01:12:50.5 +01:52:07	1089	15.4	18.23	-13.09	1.90	7.62	6.02
PISCESB	01:19:11.7 +11:07:18	616	8.9	17.63	-12.45	2.58	7.52	6.41
AGC122400	02:31:22.1 +25:42:45	938	15.5	18.92	-12.45	2.3	7.73	6.16
AGC124137	02:31:37.0 +09:31:44	897	14.0	17.98	-13.12	2.06	7.78	6.72
AGC124076	02:37:30.2 +21:22:46	950	15.5	17.60	-13.90	2.51	8.15	...
AGC121174	02:38:16.5 +29:54:23	693	12.4	16.89	-14.12	6.55	8.39	7.65

AGC123223	02:47:09.3 +10:05:16	767	12.4	17.52	-13.77	1.79	7.99	7.01
AGC124609	02:49:28.4 +34:44:29	1588	25.0	18.00	-14.25	1.31	8.05	7.07
AGC124629	02:56:05.6 +02:48:31	794	12.4	19.46	-11.58	1.72	7.22	5.88
KKH18	03:03:05.9 +33:41:39	210	4.8	17.11	-12.01	1.90	7.20	6.49
AGC132121	03:06:44.1 +05:20:08	678	11.0	17.30	-13.53	1.62	7.86	6.79
PGC1166738	03:06:46.9 +00:28:11	710	11.2	17.94	-12.67	0.89	7.21	6.39
PGC013294	03:35:56.8 -45:11:29	737	7.3	16.35	-13.36	...	...	6.82
ESO121-020	06:15:54.3 -57:43:32	582	6.1	15.87	-13.20	3.87	8.06	6.60
PGC385975	06:16:08.5 -57:45:51	554	6.1	17.10	-11.79	2.49	7.38	6.03
HIPASSJ0653-73	06:53:52.7 -73:42:28	1208	13.5	17.90	-13.14	5.39	8.19	8.03
AGC174605	07:50:21.7 +07:47:40	351	9.9	17.82	-12.25	1.33	7.21	6.44
AGC188955	08:21:37.0 +04:19:01	758	12.8	17.57	-13.04	0.86	7.40	...
AGC189201	08:23:25.6 +17:54:57	1475	23.4	19.24	-12.74	4.03	7.89	6.09
AGC198454	09:28:11.3 +07:32:37	1373	21.0	18.51	-13.28	1.25	7.84	6.54
SDSSJ0947+3905	09:47:58.5 +39:05:10	1501	24.9	18.03	-14.01	3.20	8.17	7.22
AGC191803	09:48:05.9 +07:07:43	526	9.2	16.79	-13.14	1.38	7.58	7.01
PGC1230703	10:04:25.1 +02:33:31	1126	17.1	17.71	-13.53	0.56	7.16	7.04
PGC1178576	10:21:38.9 +00:54:00	701	11.0	17.35	-13.04	1.44	7.58	6.40
AGC208397	10:38:58.1 +03:52:27	763	11.9	19.95	-10.59	5.75	7.18	5.60
PGC044681	12:59:56.6 -19:24:41	827	7.3	17.50	-12.16	3.10	7.77	6.64
PGC166153	13:06:42.5 +18:00:08	1573	22.5	18.03	-13.82	5.11	8.42	7.77

AGC233627	13:19:53.0 +13:48:24	937	13.4	17.78	-12.94	2.76	7.81	6.87
PGC135827	13:28:12.2 +02:16:42	1008	13.5	16.51	-14.24	1.62	8.09	7.20
AGC238847	13:45:09.7 +27:20:11	901	13.5	18.57	-12.21	2.64	7.47	6.40
AGC239144	13:49:08.2 +35:44:34	1366	20.4	19.06	-12.54	3.17	7.70	6.01
AGC716018	14:30:48.7 +07:09:26	1365	19.1	18.18	-13.19	3.72	8.08	6.98
AGC249590	14:40:31.6 +34:16:01	1489	21.7	18.45	-13.28	2.70	7.90	6.62
SDSSJ1444+4242	14:44:49.8 +42:42:54	634	10.9	19.11	-10.54	1.3	6.53	5.71
PGC2081790	14:47:44.6 +36:30:17	1226	18.1	17.66	-13.67	1.49	7.83	6.95
AGC009540	14:48:52.0 +34:42:43	801	12.1	16.25	-14.27	2.29	8.26	7.09
AGC249197	14:49:50.7 +09:56:30	1809	24.2	18.69	-13.48	2.45	7.92	6.75
J1522+4201	15:22:55.5 +42:01:58	608	9.8	17.87	-12.18	...	...	6.63
AGC258574	15:45:07.9 +01:48:22	1523	19.3	17.72	-13.09	2.60	8.20	7.18
SDSSJ1705+3552	17:05:17.4 +35:52:22	992	14.1	16.99	-13.85	...	...	7.20
HIPASSJ1738-57	17:38:42.9 -57:15:25	858	7.3	16.62	-13.06	2.18	7.73	...
KK246	20:03:57.4 -31:40:54	431	7.1	17.07	-13.28	2.30	8.02	7.70
SDSSJ2103-0049	21:03:47.2 -00:49:50	1411	17.4	17.44	-14.07	1.3	7.83	7.33
PGC1016598	21:39:02.9 -07:34:43	1283	15.4	18.63	-12.43	...	...	6.63
AGC321307	22:14:04.7 +25:40:52	1152	16.2	18.29	-13.07	2.85	7.86	7.01
ESO238-005	22:22:30.5 -48:24:14	706	8.0	15.53	-13.59	2.16	8.34	8.19
AGC335193	23:03:49.0 +04:31:13	1125	16.1	17.25	-14.03	0.56	7.58	7.25
PGC4581795	23:54:19.3 +10:56:47	943	13.2	17.52	-13.41	1.04	7.53	6.97

3.5 Наблюдения на телескопах SALT и БТА

Спектральные наблюдения на Большом южноафриканском телескопе [SALT; 37, 38] проводились в период с ноября 2017 г. по март 2019 г. со спектрографом RSS (Robert Stobie Spectrograph) [39, 40]. Информация о наблюдениях представлена в Таблице 3.3.

Поскольку большинство НII-областей в галактиках, вошедших в программу наблюдений, слишком тусклые и малоконтрастные, для наведения были использованы близкие опорные звезды. Таблица 3.3 содержит основную информацию о наблюдениях с SALT: название галактики, дата наблюдений, время экспозиции T_{exp} (в секундах), позиционный угол (в градусах), качество изображения θ в угловых секундах, а также воздушная масса.

Таблица 3.3 Журнал спектральных наблюдений на телескопе SALT

№.	Название галактики	Дата наблюдений	T_{exp} , с	РА	θ''	Воздушная масса
1	PGC000389	10.10.2018	2×1200	26.5	1.5	1.21
2	PGC736507	10.12.2018	2×1200	23.5	1.7	1.29
3	HIJ0021+08†	07.11.2018	2×1200	169.0	2.0	1.33
4	AGC104227	10.11.2017	2×1200	121.5	1.5	1.32
5	PGC493444	18.11.2017	2×1200	355.0	1.3	1.30
6	PGC1190331	16.09.2018	6×1200	341.0	1.6	1.19
7	AGC411446	08.12.2017	2×1200	108.0	1.1	1.29
	-#-	12.12.2017	2×1200	108.0	1.8	1.27
	-#-	14.12.2017	2×1200	108.0	1.8	1.27
	-#-	15.12.2017	2×1200	108.0	1.1	1.29
8	AGC114584	10.10.2018	2×1200	157.0	1.5	1.14
	-#-	31.10.2018	2×1200	157.0	1.7	1.14
9	AGC123223	09.11.2018	2×1200	1.0	1.5	1.14
10	AGC124629	05.11.2018	2×1200	310.5	2.0	1.24
	-#-	29.12.2018	2×1200	310.5	2.0	1.24
	-#-	30.12.2018	2×1200	310.5	2.0	1.24
11	AGC132121	11.11.2017	2×1200	320.5	1.3	1.34
12	ESO121-020	09.11.2018	2×1300	142.0	1.3	1.26

	-#-	03.03.2019	2×1300	43.2	1.3	1.26
13	PGC385975	10.10.2018	2×1200	149.0	1.9	1.23
	-#-	09.11.2018	2×1200	142.0	1.3	1.17
14	AGC174605	22.02.2018	2×1200	138.0	1.5	1.32
15	AGC188955	27.02.2019	2×1250	79.0	1.5	1.25
16	AGC198454	31.12.2018	2×1150	202.5	1.1	1.32
17	PGC1314481	25.02.2018	2×1200	172.5	2.5	1.33
18	J1001+0846	27.12.2017	2×1200	303.0	1.3	1.33
19	PGC1230703	25.12.2017	2×1200	22.0	1.6	1.28
20	PGC1178576	22.02.2018	2×1200	137.0	1.5	1.27
21	AGC208397	09.02.2019	2×1300	348.0	1.5	1.28
	-#-	27.02.2019	2×1300	348.0	1.5	1.28
	-#-	28.02.2019	2×1300	348.0	1.5	1.28
	-#-	03.03.2019	2×1300	348.0	1.5	1.28
22	PGC044681	06.07.2018	2×1200	186.5	1.6	1.27
23	PGC135827	26.02.2018	2×1200	324.5	1.5	1.22
24	AGC258574	27.02.2018	2×1200	132.0	1.8	1.27
	-#-	08.07.2018	2×1200	132.0	1.8	1.27
25	KK246	04.07.2018	2×1200	46.0	1.4	1.22
26	AGC335193	10.11.2017	2×1200	227.0	1.8	1.28

† HIJ0021+08 = HIPASSJ0021+08

Таблица 3.4 содержит основную информацию о наблюдениях на БТА: название галактики, дата наблюдений, гризма, которая была использована для наблюдений, время экспозиции T_{exp} (в секундах), позиционный угол (в градусах), качество изображения θ в секундах и воздушная масса.

Описание обработки полученных данных приведено в п. 1.1.1,1.1.2. Используемые методы оценки металличности обсуждаются в п. 1.2.

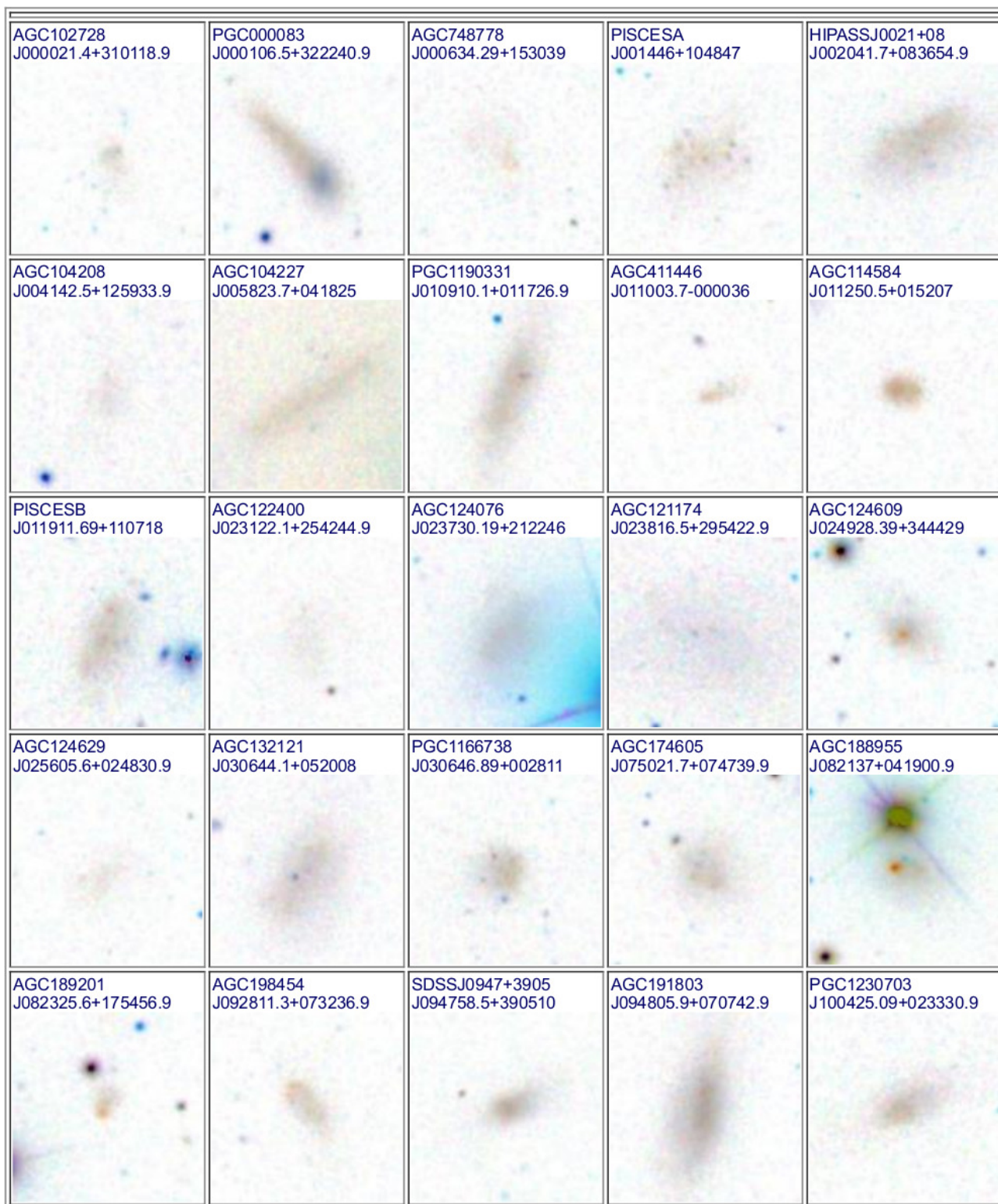


Рис. 3.3 — Цветные комбинированные изображения в полосах g, r, i из SDSS для кандидатов в ХМР-галактики в близких войдах, попадающих в зону охвата обзора SDSS. Цвета инвертированы, чтобы лучше было видно объекты очень низкой поверхностной яркости. Галактики показаны в порядке увеличения прямого восхождения. Масштаб изображений $\sim 50'' \times 50''$. Север вверху, восток слева.

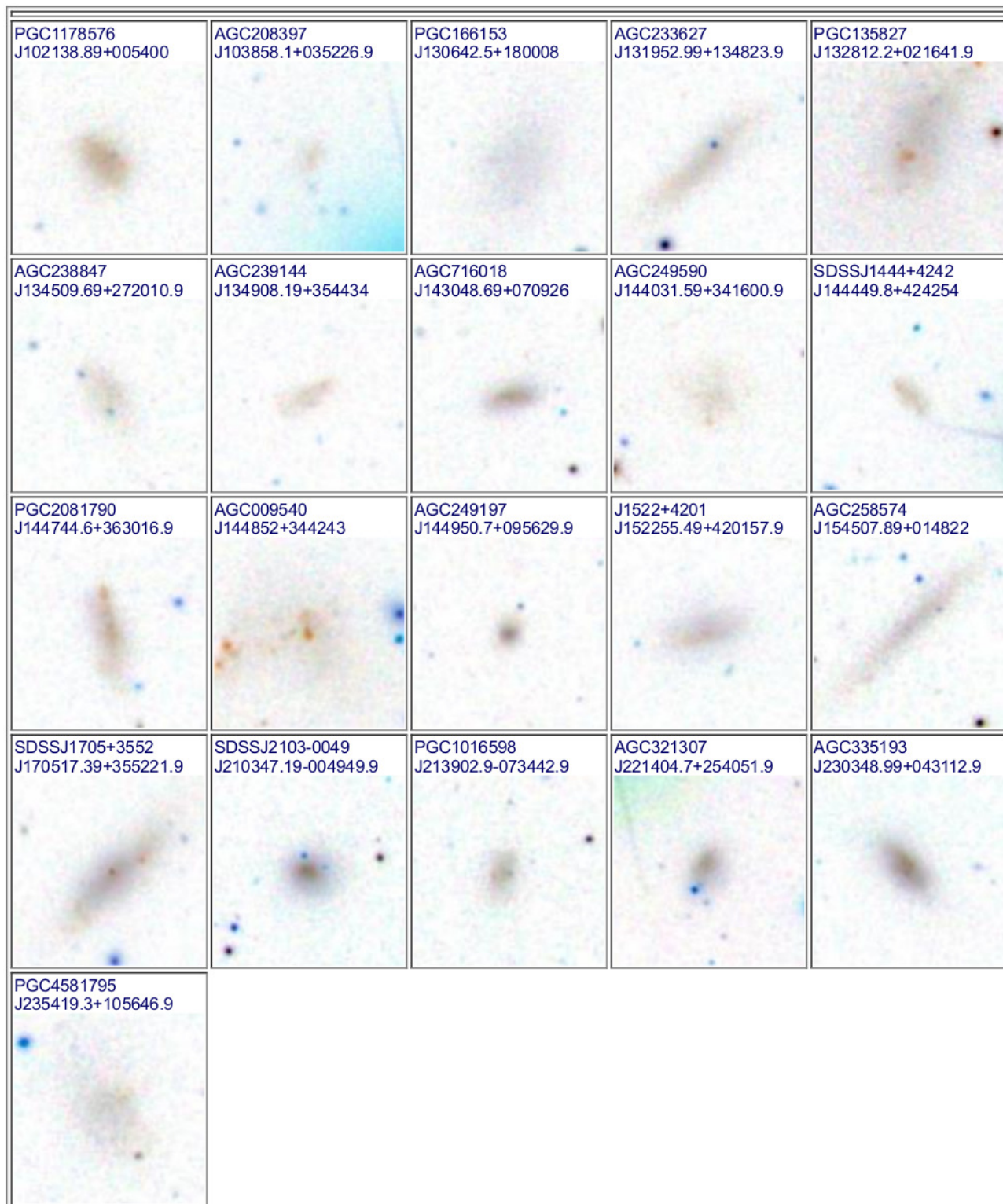


Рис. 3.4 — Цветные комбинированные изображения в полосах g, r, i из SDSS для кандидатов в ХМР-галактики в близких войдах, попадающих в зону охвата обзора SDSS. Цвета инвертированы, чтобы лучше было видно объекты очень низкой поверхностной яркости. Галактики показаны в порядке увеличения прямого восхождения. Масштаб изображений $\sim 50'' \times 50''$. Север вверху, восток слева.

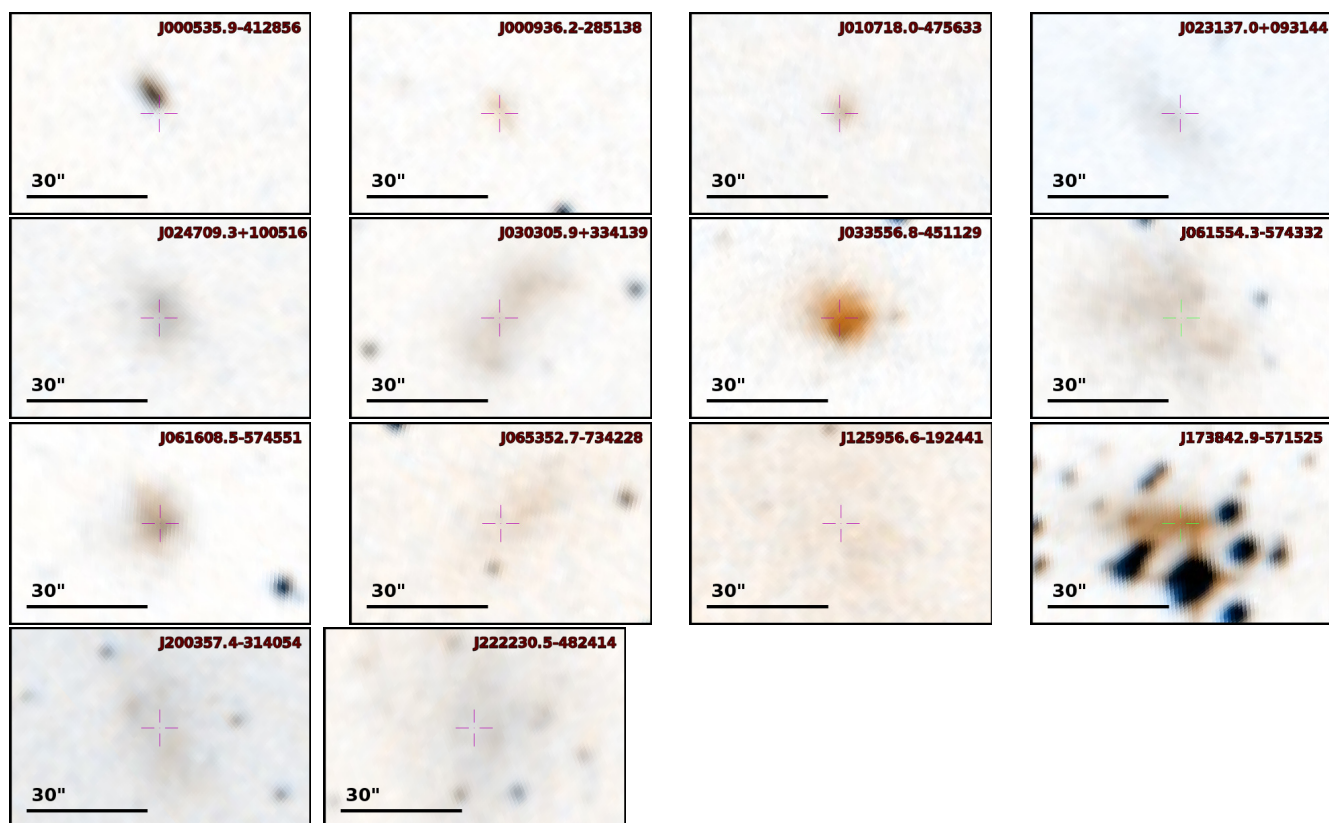


Рис. 3.5 — Комбинированные изображения в B и R фильтрах по данным из Digital Sky Survey (DSS) для 14 кандидатов в XMP-галактики в близких войдах, не попадающих в зону охвата обзора SDSS. Цвета инвертированы, чтобы лучше было видно объекты очень низкой поверхностной яркости. Галактики показаны в порядке увеличения прямого восхождения. Масштаб отмечен в левом нижнем углу каждого изображения.

Таблица 3.4 Журнал спектральных наблюдений на телескопе БТА

№.	Название галактики	Дата наблюдений	Гризма	T_{exp} , с	РА	θ''	Воздушная масса
1	AGC102728	22.10.2019	1200B	4×1200	99.0	1.5	1.05
	—#—	22.10.2019	1200R	2×900	99.0	1.1	1.06
2	PGC000083	22.10.2019	1200B	4×900	131.0	1.3	1.04
	—#—	28.10.2019	1200B	2×600	41.5	1.5	1.03
	—#—	20.01.2020	1200B	2×900	59.0	1.4	1.37
	—#—	20.01.2020	1200R	2×900	59.0	1.4	1.84
3	PISCESA	16.11.2017	1200B	2×1200	35.5	1.3	1.52
4	AGC411446	13.09.2017	1800R	4×900	98.0	1.7	1.39
	—#—	16.11.2017	1200B	3×1200	177.0	1.2	1.39
5	PISCESB	16.11.2017	1200B	2×1200	35.9	1.0	1.44
6	AGC122400	22.10.2019	1200R	2×600	20.0	1.2	1.19
	—#—	20.01.2020	1200B	2×900	53.0	1.5	1.31
	—#—	19.08.2020	1200B	3×900	140.0	1.2	1.13
7	AGC124609	26.10.2019	1200B	2×900	60.0	1.1	1.10
8	KKH18	14.01.2018	1800R	3×900	235.0	1.9	1.19
9	AGC189201	01.01.2019	1800R	2×900	42.0	3.0	1.33
	—#—	26.10.2019	1200B	2×900	137.0	1.3	1.27
	—#—	26.10.2019	1200R	1×900	137.0	1.3	1.25
	—#—	19.01.2020	1200B	3×900	173.6	1.2	1.33
	—#—	19.01.2020	1200R	1×600	173.6	1.0	1.33
10	J0823+1758	19.01.2020	1200R	1×600	163.0	1.0	1.11
	—#—	20.01.2020	1200B	3×900	163.0	1.5	1.12
	—#—	20.01.2020	1200R	2×900	163.0	1.5	1.33
11	J1012+3946	15.04.2018	1800R	1×900	70.0	1.8	1.11
12	AGC208397	15.04.2018	1800R	3×900	10.0	3.0	1.31
13	AGC239144	15.04.2018	1200B	4×900	109.0	1.2	1.19
	—#—	01.01.2019	1800R	2×900	120.5	3.3	1.07
	—#—	19.01.2020	1200B	4×900	118.2	1.7	1.14
	—#—	19.01.2020	1200R	2×900	118.2	1.7	1.08
14	J1440+3416	20.01.2020	1200B	1×900	119.0	1.1	1.25
	—#—	14.05.2020	1200B	2×1200	125.6	2.6	1.02

	—#—	14.05.2020	1200R	1×600	125.6	2.6	1.02
15	J1444+4242	17.04.2017	1200B	3×1200	41.0	2.4	1.12
16	PGC2081790	15.04.2018	1200B	4×900	11.3	1.3	1.01
17	J1522+4201	13.09.2017	1200B	2×900	62.0	1.4	1.57
18	J2103-0049	13.09.2017	1200B	5×900	05.0	1.7	1.44
19	AGC321307	13.09.2017	1800R	2×900	48.5	1.6	1.14
	—#—	16.11.2017	1200B	1×1200	23.6	1.7	1.07
20	AGC334513	28.10.2019	1200B	2×900	96.0	1.5	1.07
	—#—	28.10.2019	1200R	2×600	96.0	1.5	1.07
	—#—	19.01.2020	1200B	4×900	49.2	1.2	1.47
	—#—	19.01.2020	1200R	2×900	49.2	1.3	1.74
21	J0823+1748	19.01.2020	1200R	1×600	163.0	1.0	1.11
22	AGC322279	13.09.2017	1800R	2×900	167.0	1.4	1.14
23	AGC332939	13.09.2017	1800R	2×900	56.0	1.7	1.11
	—#—	16.11.2017	1200B	3×1200	25.0	1.7	1.03

3.6 Содержание кислорода O/H по данным с телескопов SALT и БТА

Используемые в данной работе методы оценки металличности обсуждаются в п. 1.2. В Таблицах 3.5 и 3.6 представлены оценки содержания кислорода O/H, полученные из наблюдений на телескопах SALT и БТА. Таблицы содержат следующую информацию:

Колонка 1: Название галактики или префикс SDSS;

Колонка 2: Гелиоцентрическая скорость;

Колонка 3: Оценка $12+\log(\text{O}/\text{H})$, а также ошибка 1σ ;

Колонка 4: Метод оценки содержания кислорода: T_e – “прямой” T_e метод; se – “полуэмпирический”; s,c – метод “сильных линий”, с учетом дополнительной поправки;

Колонка 5: Комментарии

Таблица 3.5 Оценки содержания кислорода, полученные на телескопе SALT для галактик выборки

№.	Название галактики	V_h км/с	$12+\log(O/H)$ $\pm err.$	Метод	Комментарии
	1	2	3	4	5
1	PGC000389	1500	7.74 ± 0.10	se	
2	PGC736507	7594	7.58 ± 0.08	se	В 2dF $V_h=898$
3	HIPASSJ0021+08	693	7.51 ± 0.07	se	
4	AGC104227	1198	...	...	Слабая $H\alpha$
5	PGC493444	7050	...	...	В 2dF $V_h=837$
6	PGC1190331	1094	7.48 ± 0.08	se	
7	AGC411446	1137	7.05 ± 0.05	s	
8	AGC114584	1089	7.17 ± 0.05	s	
9	AGC123223	767	7.47 ± 0.09	s	
10	AGC124629	794	6.96 ± 0.06	s	
11	AGC132121	678	7.30 ± 0.06	s	
12	ESO121-020	582	7.26 ± 0.05	s	Среднее по 2 обл.
13	PGC385975	554	7.29 ± 0.07	s	Среднее по 2 обл.
14	AGC174605	351	...	...	Только $H\alpha$
15	AGC188955	758	7.73 ± 0.08	Te, se	Среднее по 2 методам
16	AGC198454	1373	7.52 ± 0.09	se	
17	PGC1314481†	526	7.75 ± 0.15	se	
18	J1001+0846	1265	7.60 ± 0.08	se	
19	PGC1230703	1126	7.66 ± 0.08	se	
20	PGC1178576	701	7.25 ± 0.06	s	
21	AGC208397	763	7.15 ± 0.05	s	
22	PGC044681	827	7.20 ± 0.08	s	
23	PGC135827	1008	7.74 ± 0.11	Te	
24	AGC258574	1523	7.23 ± 0.07	s	
25	KK246	431	7.67 ± 0.08	se	
26	AGC335193	1125	7.57 ± 0.07	se	

Таблица 3.6 Оценки содержания кислорода, полученные на телескопе БТА САО РАН для галактик выборки

№.	Название галактики	V_h км/с	$12+\log(O/H)$ $\pm err.$	Метод	Комментарии
	1	2	3	4	5
1	AGC102728	566	...	...	Слабая $H\alpha$
2	PGC000083	542	7.15 ± 0.03	s,c	Среднее по 2 обл.
3	PiscesA	235	7.24 ± 0.05	s,c	
4	AGC411446	1137	7.00 ± 0.05	s,c	
5	PiscesB	616	7.29 ± 0.06	s,c	
6	AGC122400	938	7.19 ± 0.12	s,c	
7	AGC124609	1588	7.89 ± 0.02	Te	
8	KKH18	210	...	...
9	AGC189201	1475	7.31 ± 0.04	Te	
10	J0823+1758	1509	7.32 ± 0.06	s,c	
11	J1012+3946	1340	...	...
12	AGC208397	763	...	...
13	AGC239144	1366	7.22 ± 0.07	s,c	Среднее по 2 обл.
14	AGC249590	1489	7.23 ± 0.05	s,c	
15	J1444+4242	634	7.16 ± 0.04	s,c	Среднее по 2 обл.
16	PGC2081790	1226	7.30 ± 0.05	s,c	
17	J1522+4201	608	7.28 ± 0.06	s,c	
18	J2103-0049	1411	7.21 ± 0.05	s,c	
19	AGC321307	1152	7.76 ± 0.08	se	
20	AGC334513	1662	7.22 ± 0.06	s,c	
21	J0823+1748	27600	...	...	Далёкая
22	AGC322279	1272	...	...	Не в войде
23	AGC332939	692	7.69 ± 0.06	Te	Не в войде

3.7 Обсуждение

В рамках исследования, представленного в данной Главе Диссертации, по итогам спектроскопии на телескопах SALT и БТА было обнаружено 10 новых карликовых галактик с экстремально низкой металличностью. Эта выборка достаточно велика, чтобы обобщить некоторые свойства таких объектов. В Таблице 3.7 приведены их основные параметры:

Колонка 1: Обозначение галактики (префикс SDSS);

Колонка 2: Оценка $12+\log(\text{O}/\text{H})$, а также ошибка 1σ ;

Колонка 3: $M(\text{HI})/L_B$, в солнечных единицах;

Колонка 4: Центральная поверхностная яркость $\mu_{B,0,c}$, исправленная за поглощение в Галактике и наклон;

Колонка 5: Абсолютная звездная величина в фильтре B ;

Колонка 6: Интегральные цвета $g - r$, исправленные за поглощение в Галактике;

Колонка 7: Масса атомарного водорода $\log M_{\text{HI}}$, в солнечных единицах;

Колонка 8: Масса звезд $\log M_*$, в солнечных единицах

Колонка 9: Полная звездная величина в фильтре B

При отборе кандидатов в ХМР галактики изначально накладывались ограничения на их наблюдательные параметры. Критерии отбора были основаны на наблюдаемых свойствах галактик-прототипов, однако диапазон параметров при этом был несколько расширен, поскольку выборка галактик-прототипов относительно мала и реальное пространство параметров, занимаемое такими объектами, неизвестно.

Абсолютная звездная величина в фильтре B в группе новых ХМР галактик войдов (см. Таблицу 3.7) меняется от $-10,5$ до $-14,07$, с медианным значением $-12,6$. Таким образом, светимость в фильтре B внутри группы варьируется в ~ 25 раз. Это вполне соответствует вариациям M_B в группе галактик-прототипов с известными O/H (см. Таблицу 3.1).

Масса HI для новых ХМР галактик также меняется в большом диапазоне, от $0,34 \times 10^7 M_\odot$ до $\sim 8 \times 10^7 M_\odot$ ($\log M(\text{HI})$, соответственно, меняется в диапазоне от $6,53$ до $7,90$), то есть в 27 раз. Медианное значение $M(\text{HI}) = 3,8 \times 10^7 M_\odot$. У новых ХМР галактик масса атомарного водорода $M(\text{HI})$ оказалась существенно ниже, чем у галактик-прототипов. Медианное значение $M(\text{HI})$ для группы

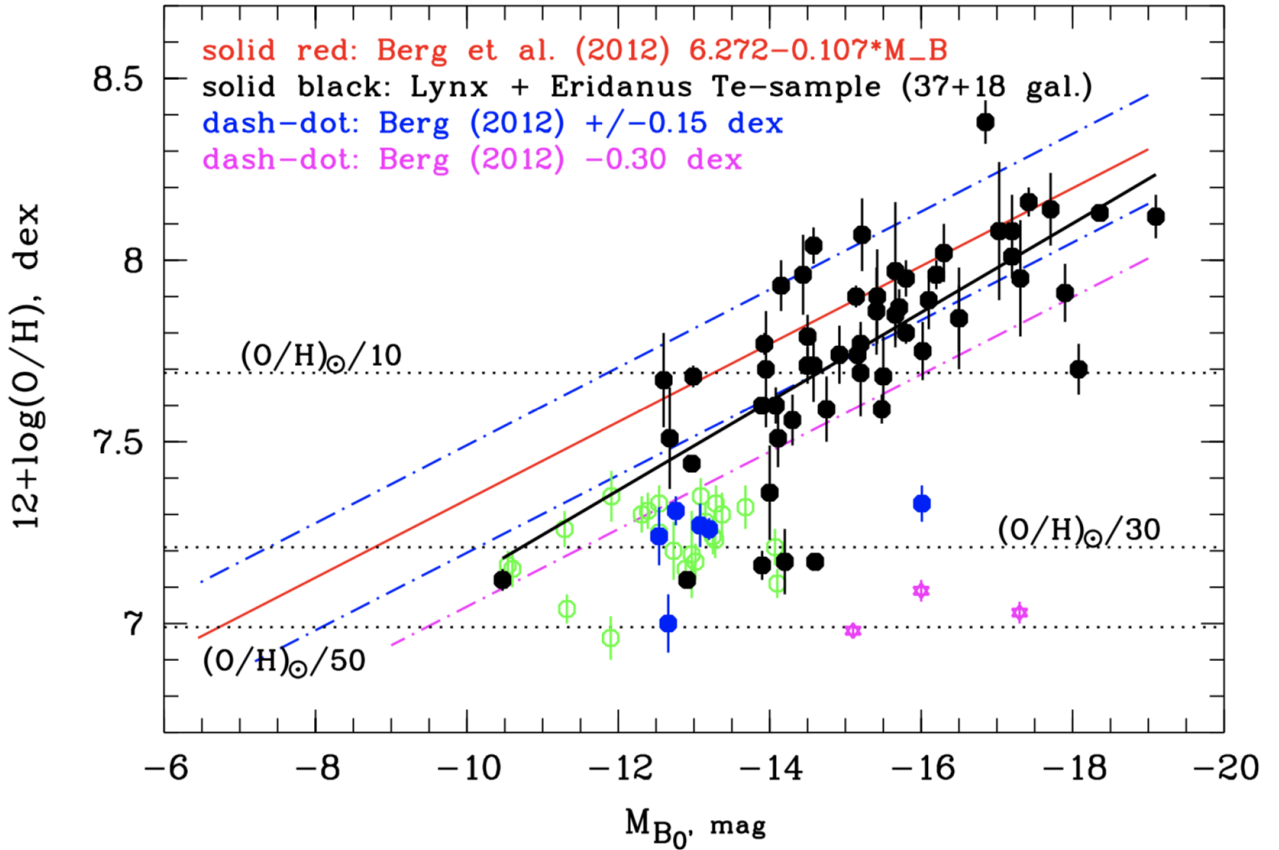


Рис. 3.6 — Диаграмма $12+\log(\text{O}/\text{H})$ – абсолютная звездная величина в фильтре B (M_B). Галактики с наименьшей металличностью из выборки кандидатов в ХМР, с оценками O/H по данным SALT и БТА отмечены зелеными кружками. Галактики из войда Lynx-Cancer [66] и галактики из войда Eridanus (см. Главу 2, а также работу [116]) с оценками O/H , полученными “прямым” T_e методом, отмечены черными кружками. Сплошной красной линией показана линейная регрессия для реперной выборки галактик из Местного объема из работы [25]. Две синие штрих-пунктирные линии по обе стороны от реперной зависимости отмечают среднеквадратичное отклонение от линейной регрессии для их выборки (0,15 dex). Самая нижняя пунктирная линия (-0,30 dex) отделяет регион, куда попадают низкометаллические карликовые галактики, сильнее всего отклоняющиеся от реперной зависимости. Горизонтальными пунктирными линиями отмечены значения $Z_\odot/10$, $Z_\odot/30$ и $Z_\odot/50$. Три далекие голубые компактные ХМР галактики с рекордно низкой металличностью J0811+4730, J1234+3901 и J2229+2725 из работ Изотова и др. (2018, 2019, 2021) [32, 33, 152] отмечены фиолетовыми звездочками. Синими символами отмечено несколько галактик из войда Lynx-Cancer с оценками O/H из литературы.

галактик-прототипов составляет $\sim 4 \times 10^8 M_{\odot}$, что на порядок больше, чем в группе новых ХМР в войдах.

Аналогичная ситуация с параметром $M(\text{HI})/L_B$. Даже если исключить экстремально высокое значение 17,1 для галактики J0706+3020 из выборки прототипов, значения $M(\text{HI})/L_B=1,3-1,7$ для 3 новых ХМР галактик значительно ниже нижней границы $M(\text{HI})/L_B=2,4$ для группы галактик-прототипов.

Интегральные цвета $g-r$ новых ХМР галактик варьируются от $-0,03$ до $\sim 0,4$ с медианным значением $\sim 0,11$. В группе галактик-прототипов этот параметр меняется в диапазоне от $-0,08$ до $+0,19$. 3 новых ХМР галактики с $g-r = 0,25 - 0,4$ показывают более красные цвета, чем галактики-прототипы.

Таким образом, действительно наблюдается довольно большой разброс и отличие некоторых параметров новых ХМР-галактик (цвета $g-r$, $M(\text{HI})/L_B$) по сравнению с параметрами галактик-прототипов. Это может указывать на отличия в происхождении и/или эволюции некоторых ХМР галактик войдов.

Из 10 новых ХМР галактик войдов 8 являются типичными галактиками низкой поверхностной яркости позднего типа, с диапазоном центральной поверхностной яркости $\mu_{B,0,c}$ от 23,4 до $\sim 25 \text{ mag}/\square''$. Два оставшихся объекта без оценки $\mu_{B,0,c}$ выглядят несколько ярче, по-видимому, из-за повышенного текущего звездообразования. Это хорошо согласуется с данными группы прототипов, в которой не менее половины объектов имеют $\mu_{B,0,c}$ в диапазоне от 24,1 до 25,4 mag/\square'' , а остальные – несколько ярче и показывают при этом следы недавних возмущений.

В группу галактик-прототипов вошло 4 объекта, являющихся, вероятно, результатом слияния галактик-предшественников, один объект входит во взаимодействующую пару, и еще три галактики являются достаточно хорошо изолированными. Среди недавно обнаруженных ХМР только две галактики относятся к триплету (J1440+3416) или паре (J1444+4242). Еще два объекта могут находиться на дальней периферии группы галактик в войде. Остальные шесть – хорошо изолированы, несмотря на то, что у двух из них есть довольно далекие соседи, которые могут относиться к тем же подструктурам войдов (крупномасштабным филаментам). Таким образом, больше половины новых ХМР галактик войдов не показывают наличия явных возмущающих компаньонов.

На Рис. 3.6 приведена диаграмма “содержание кислорода – светимость”. Новые ХМР галактики заполняют ту же область, в которой находятся известные до этого богатые газом галактики войдов с экстремально низкой

Таблица 3.7 Основные параметры новых галактик войдов с экстремально низкой металличностью, обнаруженных по результатам наблюдений на телескопах SALT и БТА

Обозначение галактики	$12+\log(\text{O}/\text{H})$ $\pm\text{err.}$	$\frac{\text{MHI}}{L_B}$	$\mu_{B,0,c}$	M_B mag	$(g-r)_0$ mag	$\log\text{MHI}$	$\log M_*$	B_{tot} mag
1	2	3	4	5	6	7	8	9
J0001+3222	$7.15\pm.03$	3.1	23.5:	-12.86	0.13	7.48	6.19	17.14
J0110-0000	$7.00\pm.05$	4.8	23.4	-11.54	0.07	7.53	5.66	19.58
J0112+0152	$7.17\pm.05$	1.9	...	-13.09	0.04	7.62	6.02	18.23
J0231+2542	$7.19\pm.12$	2.3	25:	-12.45	0.17	7.73	6.16	18.92
J0256+0248	$6.96\pm.06$	1.7	24:	-11.58	0.10	7.22	5.88	19.46
J1038+0352	$7.15\pm.05$	5.7	24:	-10.59	-0.03	7.18	5.60	19.95
J1259-1924	$7.20\pm.08$	3.1	25:	-12.16	0.4:	7.77	6.64	17.50
J1440+3416	$7.23\pm.05$	2.7	24:	-13.28	0.10	7.90	6.62	18.45
J1444+4242	$7.16\pm.04$	1.3	24:	-10.54	0.25	6.53	5.71	19.11
J2103-0049	$7.21\pm.05$	1.3	...	-14.07	0.38	7.83	7.33	17.44

Символ (:) отмечает значения с низкой точностью.

металличностью. Содержание кислорода для большинства новых ХМР галактик войдов (см.Таблицу 3.7) отличается от ожидаемого из зависимости “содержание кислорода – светимость”, полученной для реперной выборки галактик из Местного Объемы из работы [25] на 0,4-0,6 dex, что соответствует пониженному в 2,5-4 раза содержанию кислорода относительно реперной выборки.

Таким образом, половина галактик с $Z_{\text{gas}} < Z_{\odot}/30$ показывают набор необычных свойств, а именно голубые цвета звездного населения, высокие массовые доли газа (97% и выше), и металличность, пониженную в 2,5-4 раза по сравнению с галактиками реперной выборки.

3.7.1 Сценарии для различных типов карликовых ХМР галактик

У карликовых ХМР галактик может быть различная история эволюции. Как правило, обсуждается четыре физических механизма, приводящих к наблюдаемой очень низкой металличности газа в галактиках. Два из них определяют секулярную (вековую) эволюцию галактики. Первый механизм – менее эффективное звездообразование в галактиках меньшей массы и связан-

ное с этим более медленное производство металлов. Второй механизм – более эффективное выметание металлов галактическим ветром в галактиках меньших масс из-за менее глубокого гравитационного потенциала таких объектов [см., например, 153].

Два других механизма, которые могут приводить к существенному снижению металличности газа, являются более кратковременными и локальными. Характерный масштаб времени, на котором “замывается” локальное падение О/Н порядка периода обращения газового диска. Третий механизм снижения металличности связан с аккрецией очень бедного металлами окружающего межгалактического газа с $Z \sim (0,01-0,02) Z_{\odot}$ (так называемая “холодная аккреция” вдоль филаментов крупномасштабной структуры [77]). При этом газ галактики смешивается с аккрецировавшим газом, и это может привести к существенному снижению наблюдаемой металличности в области звездообразования. Падение газа также может приводить к вспышке ЗО, и этим механизмом, как правило, объясняют наличие низкометаллических областей ЗО на периферии галактик.

Аналогичный механизм связан с кратковременной центральной вспышкой звездообразования, вызванной взаимодействием с возмущающей галактикой [28]. Как показано, например, в работе [154], дальняя периферия дисков карликовых галактик поздних типов может сохранять металличность на уровне окружающей межгалактической среды. При значительном возмущении этого газа он может потерять устойчивость и упасть в центр галактики, что приведет к последующей вспышке ЗО, а также локальному и временному понижению металличности газа в центральной области.

Значительная часть ХМР галактик-прототипов в войдах, по-видимому, входит в пары или триплеты. Предполагается, что J0113+0052 может быть результатом малого слияния, на основе анализа кинематики ионизованного газа в линии $H\alpha$ [139], а также морфологии и кинематики атомарного водорода $H\text{I}$ [135]. Объект J0706+3030, скорее всего, является слабым компонентом в сливающемся триплете UGC3672 (см. [108], а также Главу 4 данной Диссертации). J0943+3326 (AGC198691), вероятно, является более слабым компаньоном соседней более массивной галактики UGC5186 [31, 66]. J0956+2850 (DDO68B), внешняя часть хорошо известной ХМР-галактики DDO68 [30, 135–137] считается остатком недавнего малого слияния. Галактика J2104–0035, несмотря на свою изолированность, выглядит возмущенной на картах $H\text{I}$ GMRT. Согласно предположению в работе [135], мы наблюдаем продвинутую стадию слияния

галактик-предшественников. Наконец, две чрезвычайно богатых газом карликовых галактики с неизвестным значением O/H , J0723+3622 и J0723+3624, входят в триплет J0723+36 вблизи центра войда [106].

Таким образом, в целом можно ожидать, что последние два механизма будут вносить вклад в наблюдаемую пониженную металличность ХМР галактик в войдах. Однако, помимо этого, к низкой металличности могут приводить также специфическое окружение и связанные с этим условия формирования и эволюции галактик, включая более позднее формирование маломассивных гало темной материи и более низкие темпы звездообразования из-за редких взаимодействий галактик.

3.7.2 Связь ХМР объектов войдов и очень молодых галактик

Основной целью представленного в данной Главе Диссертации исследования является поиск новых необычных карликовых галактик войдов, напоминающих по свойствам очень молодые галактики, которые ожидаются в Местной Вселенной, согласно моделям из работы Твида и др., 2018 [24]. В этой работе очень молодые галактики определяются как объекты, в которых за последний ~ 1 млрд.лет сформировалось более половины массы звезд.

В работах Изотова и др., 2018,2019 [32, 33] авторы показывают, что лучшими кандидатами в объекты без следов старого звездного населения, по видимому, являются карликовые галактики с самой низкой металличностью. Это согласуется с идеей о том, что экстремально низкая металличность таких объектов связана с коротким временем, прошедшим с начала основного эпизода звездообразования, и, следовательно, низким обогащением газа металлами.

Аналогичный вывод был сделан в работах по исследованию населения войда Lynx-Cancer [66, 131]. Было показано, что некоторые из самых бедных металлами карликовых галактик войда, с содержанием кислорода $1/50-1/30$ от солнечного значения, также показывают необычно голубые цвета *ugri* во внешних частях, вне областей текущего звездообразования. В отличие от большинства других галактик войда, на двухцветных диаграммах они располагаются близко к областям, соответствующим эволюционным трекам *PEGASE* для времени, прошедшего с начала эпизода звездообразования $\lesssim 1-3$ млрд.лет.

Как обсуждается в работе Пустильника и др., 2016 [66], войды обеспечивают благоприятные условия для более медленной эволюции галактик и пониженной металличности газа по сравнению с аналогичными объектами в более плотном окружении. Модели из работы Эйнасто и др., 2011 [11], а также результаты моделирования, представленные в работе Ридера и др., 2013 [155], предсказывают, что маломассивные темные гало в войдах формируются существенно позже по сравнению с более плотным окружением. Ожидаемое более позднее образование галактик в войдах может быть также причиной наблюдаемой пониженной металличности газа в дополнение к рассмотренным выше четырем механизмам.

3.8 Выводы

В данной Главе Диссертации была сформирована выборка кандидатов в галактики с экстремально низкой металличностью из ~ 60 объектов войдов, на основе данных о свойствах небольшой группы галактик-прототипов.

На телескопах SALT и БТА была проведена спектроскопия 44 из этих галактик. Было обнаружено 10 новых галактик с экстремально низкой металличностью $Z_{gas} \lesssim Z_{\odot}/30$, а также 13 новых низкометаллических галактик с $Z_{\odot}/30 \lesssim Z_{gas} \lesssim Z_{\odot}/20$. Также был сделан вывод о пониженном в 2,5-4 раза содержании кислорода для половины новых галактик войдов с $Z_{gas} \lesssim Z_{\odot}/30$ относительно реперной выборки галактик в более плотном окружении в Местном Объеме. Был сделан вывод о признаках эволюционной молодости для половины новых галактик с $Z_{gas} \lesssim Z_{\odot}/30$.

Результаты исследования представлены в трех статьях [82, 156, 157].

Глава 4. Исследование галактики UGC 3672

4.1 Введение

Войды – это регионы низкой плотности, в которых движение вещества происходит из центральной области к более плотным стенкам и филаментам [см., например, 158, 159]. Однако они обладают внутренней структурой и содержат вложенные подвойды, которые, в свою очередь, ограничены стенками, филаментами и регионами более высокой плотности на их пересечении [см., например, 10, 160]. Формирование структур в войдах происходит медленнее, чем в регионах высокой плотности, и поскольку внутренние части пустот расширяются быстрее (по сравнению со средней скоростью расширения Вселенной), структуры, содержащиеся в войдах, также расширяются. Эффективная скорость расширения увеличивается по направлению к центральным областям войдов, и эти эффекты здесь должны становиться более выраженными.

Поэтому галактики, которые находятся внутри войдов, представляют особый интерес. В некоторых исследованиях был обнаружен ряд необычных объектов войдов. Например, в работе Крекель и др., 2011 [150] авторы обсуждают карликовую галактику KK246 с протяженным и возмущенным диском, которая находится в войде Талли, а в работе Бейгу и др., 2013 [161] представлен триплет галактик, богатых газом и расположенных примерно вдоль одной линии, которые были обнаружены в ходе Обзора галактик войдов (VGS, Void Galax Survey). Авторы предполагают, что такая практически линейная ориентация может отражать движение вещества вдоль филамента внутри войда. Результаты численного моделирования, приведенные в работе Ридера и др., 2013 [155] согласуются с таким предположением.

В данной Главе Диссертации представлено исследование галактики UGC 3672, которая находится в центральных 8% объема войда Lynx-Cancer. По оценкам, плотность галактик в окрестности UGC 3672 в ~ 10 раз ниже средней плотности. До галактики было принято расстояние 16,9 Мпк, согласно работе [93], с учетом большой пекулярной скорости $\Delta V \sim -270$ км/с в этой области [142]. На принятом расстоянии угловой масштаб составляет 82 пк/”.

4.2 Результаты

Описание наблюдений и обработки HI данных, полученных на радиоинтерферометре GMRT, а также проведенной фотометрии приведены в Главе 1.

4.2.1 Данные низкого разрешения

На Рис. 4.1 (слева) контурами нанесены лучевые плотности HI (это изображение получено из куба данных с пространственным разрешением $58'',5 \times 52'',6$ и спектральном разрешением $6,8 \text{ км/с}$), наложенные на оптическое изображение с $0,9 \text{ м}$ телескопа KPNO в фильтре B из работы [62]. Эмиссия HI простирается на $\sim 4,3'$ (или $\sim 22 \text{ кпк}$ при принятом расстоянии до галактики $16,9 \text{ Мпк}$). Это значительно больше, чем диаметр галактики вдоль большой оси в оптике $\sim 1,2'$. Интегральный спектр HI, полученный из куба данных, показан на Рис. 4.2, для сравнения также приведен спектр, полученный на 43-метровом телескопе Green Bank [103, 162]. Полный поток, оцененный по данным Green Bank, составляет $\sim 10,72 \pm 1,1 \text{ Ян км/с}$. Поток, полученный на GMRT, составляет всего $\sim 70\%$ от потока, полученного на Green Bank. Это значит, что около 30% потока приходится на диффузную составляющую, которая не детектируется на GMRT. Из сравнения двух спектров на Рис. 4.2 видно, что эта диффузная компонента довольно равномерно распределена по скоростям. Стоит также отметить, что спектр показывает довольно стандартную форму с двумя пиками, типичную для спиральных галактик. Поле скоростей, полученное на GMRT, показано на Рис. 4.1 (справа). С северо-востока на юго-запад наблюдается плавный градиент скоростей. Соответственно, вся система расположена внутри оболочки HI с довольно плавным градиентом скорости.

Кривая вращения для системы UGC 3672 была получена из поля скоростей низкого разрешения с использованием стандартной модели наклонных колец, реализованной в GIPSY¹ процедурой ROTCUR. Начальный угол наклона был принят равным 60° , эта оценка была получена исходя из морфологии HI. Затем положение центра, системная скорость и позиционный угол определялись

¹GIPSY — аббревиатура от Groningen Image Processing SYstem

итеративно с помощью пакета ROTCUR. Итоговые позиционный угол и угол наклона оказались в пределах нескольких градусов от начальных предположений; итоговое положение центра также совпадает с начальным предположением в пределах ширины синтезированной диаграммы направленности. На Рис. 4.3 показаны кривые вращения, полученные при помощи пакета ROTCUR, для приближающейся и удаляющейся половины галактики по отдельности (символы с “усами” ошибок), а также средняя кривая вращения, полученная с их помощью (сплошная линия). Кривые вращения, полученные для двух половин по отдельности, довольно хорошо согласуются между собой, что усиливает визуальное впечатление, что при таком пространственном разрешении кинематика является довольно регулярной. Скорость в последней измеренной точке кривой вращения (находящейся на галактоцентрическом радиусе $135''$, или $11,1$ кпк) равна 65 км/с. Соответствующая динамическая масса равна $\sim 1,0 \times 10^{10} M_{\odot}$.

4.2.2 Карты H α высокого разрешения

Хотя эмиссия H α на картах низкого разрешения распределена довольно регулярно, на оптических изображениях UGC 3672 видно, что галактика имеет пекулярную морфологию, с диффузным “хвостом”, который начинается от северного края наиболее яркой части галактики и простирается западнее (см. Рис. 4.1). На изображении в полосе B также видна эмиссионная область к юго-востоку от основного тела и слабое диффузное излучение примерно в $1'$ на северо-запад. На H α изображении галактики, полученном на $0,9$ м телескопе KPNO в работе [62], также видна слабая эмиссия, там же, где на изображении в полосе B видно диффузное излучение на северо-западе. В работе [62] авторы никак не комментируют эту эмиссию H α , но она хорошо заметна на Рис. 4.4. Согласно анализу спектров, полученных на 6 м телескопе БТА САО РАН (в Диссертации не приводятся), эта эмиссия относится к карликовой галактике-компаньону. Данные H α , которые обсуждаются в данной Главе Диссертации, также подтверждают этот вывод. Далее в Диссертации эта галактика будет обозначаться как компонент А или UGC 3672А. Таким образом, UGC 3672 показывает возмущенную морфологию и имеет близкую галактику-компаньон,

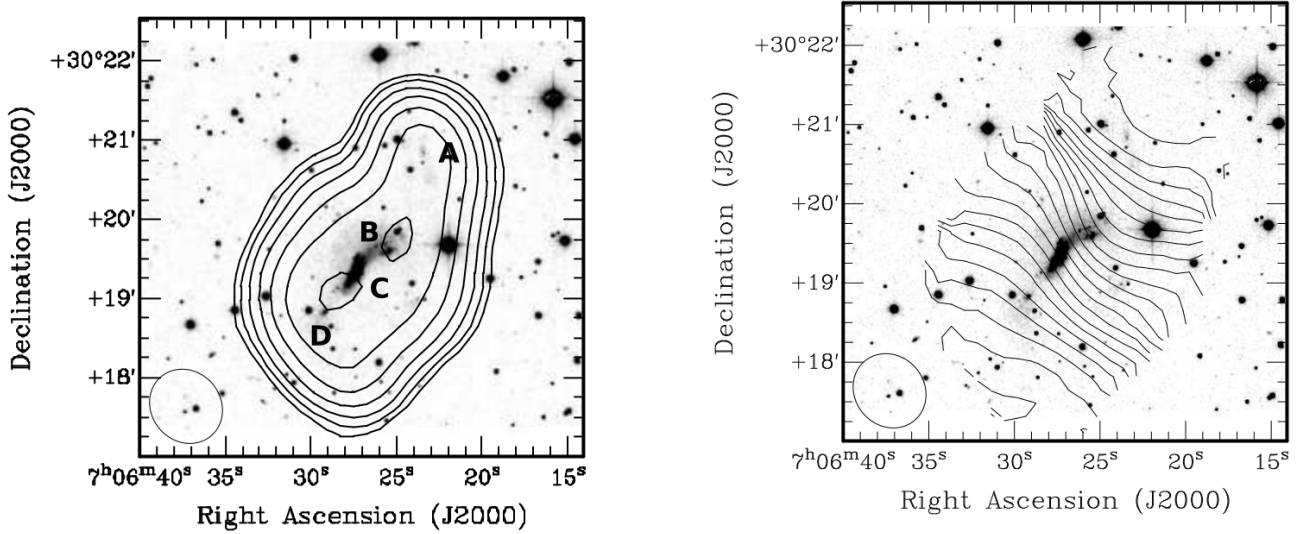


Рис. 4.1 — **Слева:** Контурами нанесены лучевые плотности HI 21 см для системы UGC 3672, полученные из куба данных с пространственным разрешением $58'',5 \times 52'',6$ и спектральным разрешением 6,8 км/с, наложенные на оптическое изображение с 0,9 м телескопа KPNO в фильтре *B* из работы [62]. Контуры HI начинаются от лучевой плотности $5,5 \times 10^{19}$ атомов/см⁻²; каждый следующий контур обозначает в 1,5 раза более высокую плотность. Пояснения для обозначений компонентов A, B, C, и D приведены в тексте. Размер диаграммы направленности показан в левом нижнем углу. **Справа:** Поле скоростей, полученное из куба данных HI, наложенное на изображение в фильтре *B* из [62]. Пространственное разрешение $58'',5 \times 52'',6$. Изовелы показаны контурами и начинаются от 929 км/с до 1040 км/с с шагом 5 км/с. Наблюдается плавный градиент скорости, соответствующий тому, что ожидается при вращении системы.

погруженную вместе с ней в общую оболочку HI. Стоит более детально рассмотреть оптические изображения и изображения в линии HI 21 см.

UGC 3672 на оптических изображениях в фильтре *B* показывает возмущенную морфологию, хорошо видна диффузная структура низкой поверхностной яркости, которая далее будет обозначена как компонент B (см. Рис. 4.1), и располагается к северо-западу от эмиссионной области с относительно высокой поверхностной яркостью (которая в дальнейшем будет обозначена как компонент C). На изображении $H\alpha$ (Рис. 4.4) видны яркие эмиссионные области, связанные с обеими этими структурами, а также слабая эмиссионная область $H\alpha$ на юго-восток от них (которая далее будет обозначена как компонент D).

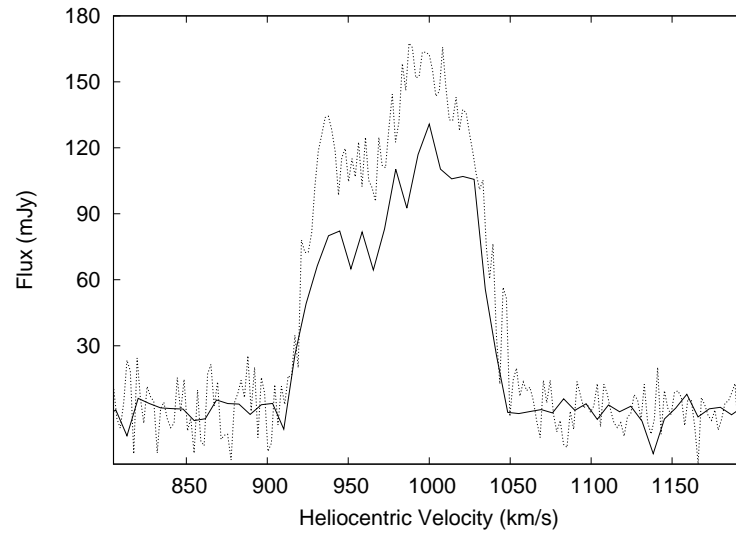


Рис. 4.2 — Интегральный спектр HI, полученный из куба данных GMRT с пространственным разрешением $58''{,}5 \times 52''{,}6$ и спектральным разрешением $6{,}8$ км/с (сплошная линия). Пунктирной линией показан спектр, полученный на телескопе Green Bank [103, 162].

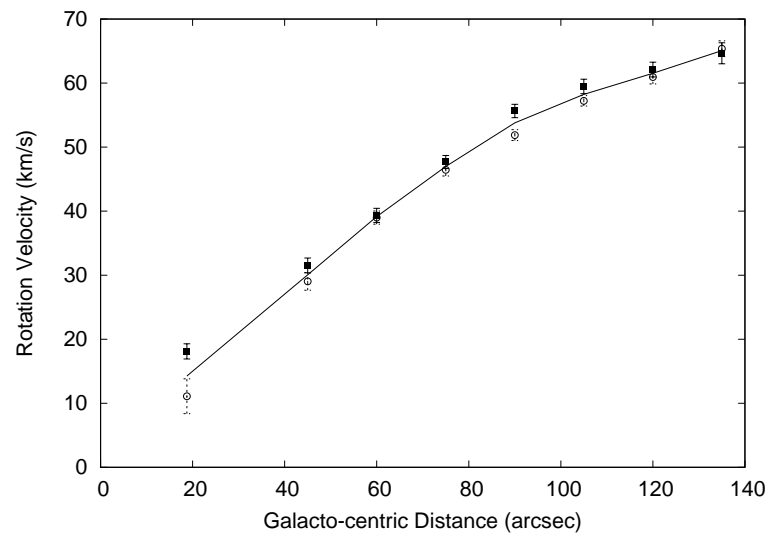


Рис. 4.3 — Кривая вращения для UGC 3672, полученная из поля скоростей с пространственным разрешением $58''{,}5 \times 52''{,}6$. Символами отмечены кривые вращения, полученные для приближающейся и удаляющейся половины по отдельности, а сплошная линия отмечает кривую вращения, построенную для всей галактики целиком. Кривые вращения хорошо согласуются между собой.

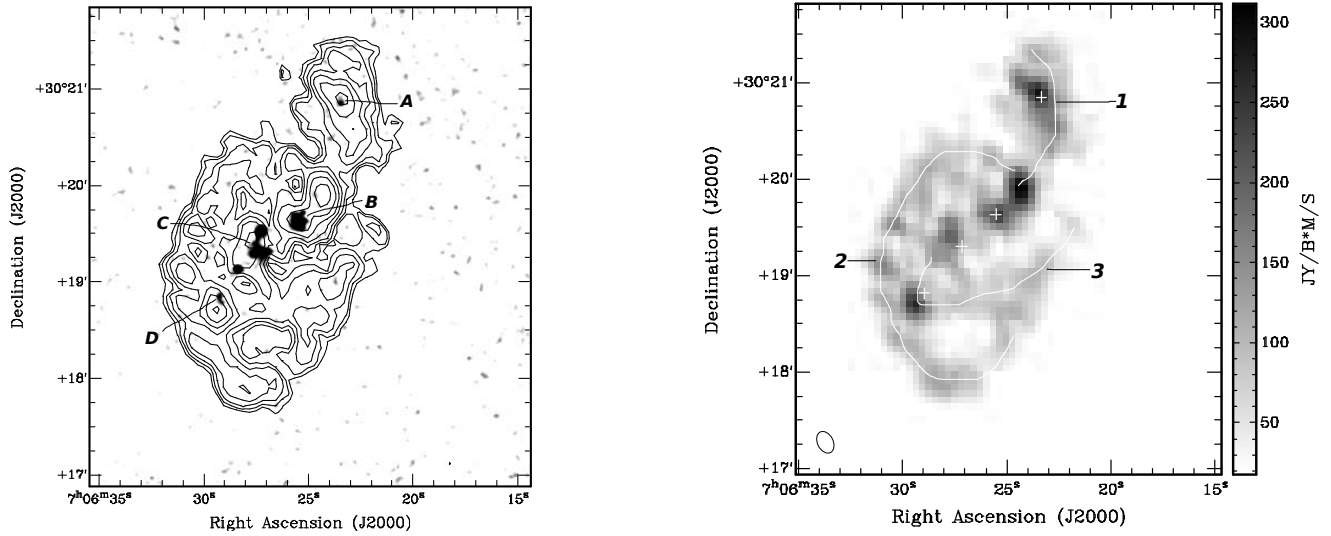


Рис. 4.4 — **Слева:** Контурами нанесены лучевые плотности HI 21 см для системы UGC 3672 с разрешением $14'',6 \times 10'',1$ (контуры), наложенные на карту потоков в линии H α (оттенки серого). Данные H α взяты из работы [62] и сглажены до разрешения $3''$. Контуры HI начинаются от $1,7 \times 10^{20}$ атомов/см $^{-2}$ и увеличиваются с шагом $\sqrt{2}$. **Справа:** Карта потоков HI в оттенках серого с разрешением $14'',6 \times 10'',1$. Размер диаграммы направленности показан в левом нижнем углу. Компоненты A, B, C, D отмечены крестиками (от севера к югу, соответственно). Также отмечены три филаментарные структуры (1,2,3). Как обсуждается в тексте, скорость непрерывно меняется вдоль этих структур.

Кроме того, как упоминалось выше, детектируется также излучение H α , связанное с галактикой-компаньоном UGC 3672A. Эмиссия HI также показывает филаментарную структуру (см. Рис. 4.4). Как обсуждается далее в п. 4.3.1, такую структуру можно интерпретировать наличием приливных хвостов, возникающих при взаимодействии очень богатых газом галактик-предшественников. На Рис. 4.5 также показана карта дисперсии скоростей HI. Вблизи всех четырех оптических компонентов (A,B,C,D) наблюдается увеличение дисперсии скоростей.

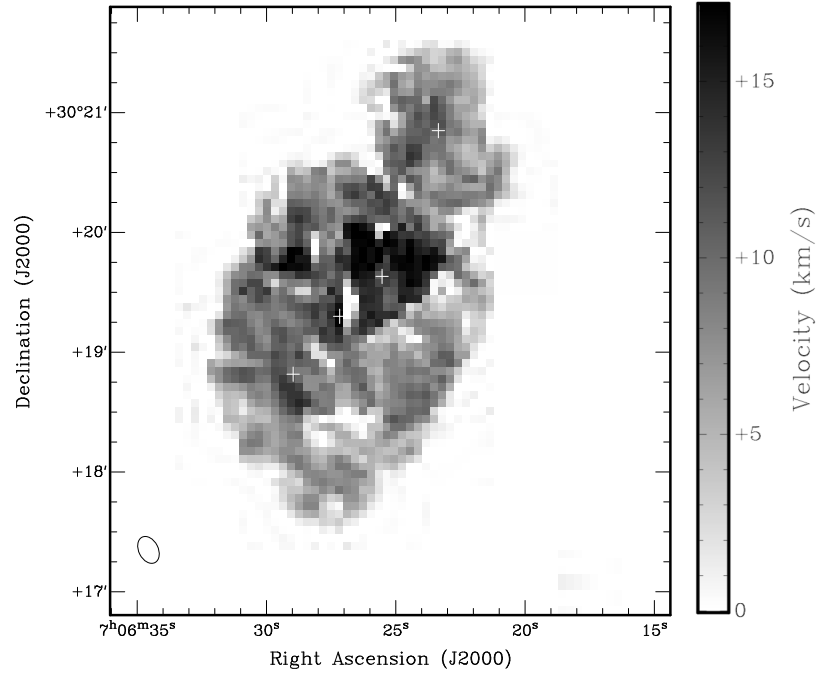


Рис. 4.5 — Карта дисперсии скоростей HI в оттенках серого с разрешением $14'',6 \times 10'',1$. Размер диаграммы направленности показан в левом нижнем углу. Все четыре компонента связаны с локальными пиками дисперсии скоростей.

4.2.3 Звездные величины, цвета, и потоки в линии $H\alpha$

В Таблице 4.1 представлены результаты фотометрии для компонентов A, B и C+D. Межзвездное поглощение в Галактике в фильтре B было принято равным $A_B = 0,26^m$, согласно работе [96]. Это значение использовалось для вычисления как абсолютных величин, так и цветов. В Таблице 4.1 приведены величины g_{tot} , оцененные по изображениям SDSS, а также величины B , пересчитанные из величин g и r SDSS. Также приведены цвета $(u - g)$, $(g - r)$ и $(r - i)$ для различных компонентов (полные цвета и/или цвета периферии). Для оценки цветов были использованы только области с явным сигналом в фильтре u . Однако величины в фильтре B оценивались для больших апертур по изображениям с более высоким отношением сигнал/шум в фильтрах g и r . Для компонентов B и C измеренные цвета совпадают в пределах ошибок, поэтому в Таблице приведены цвета, полученные для суммы этих компонентов.

Также для всех компонентов были оценены потоки в фильтрах B и $H\alpha$ на изображениях из работы [62], полученных на 0,9м телескопе KPNO. Оценка

Таблица 4.1 Фотометрические параметры системы UGC 3672

Свойства	Компонент А	Компонент В	Компонент С ⁴
B_{tot} (SDSS)	18.93 ± 0.15	17.09 ± 0.08	16.32 ± 0.04
B_{tot} (KPNO)	19.09	17.15	16.26
M_B^1 (mag)	-12.47	-14.31	-15.08
$F_{\text{H}\alpha}^2$	26 ± 4.8	139 ± 6.6	296 ± 9.4
μ_B^3	25.27	...	...
g_{tot}	19.39 ± 0.13	17.24 ± 0.05	16.20 ± 0.03
$(u - g)_{\text{tot}}$	0.81 ± 0.33		0.86 ± 0.07
$(g - r)_{\text{tot}}$	-0.08 ± 0.18		0.31 ± 0.04
$(r - i)_{\text{tot}}$	-0.29 ± 0.18		0.16 ± 0.03
$(u - g)_{\text{outer}}$	...		0.92 ± 0.11
$(g - r)_{\text{outer}}$	...		0.23 ± 0.06
$(r - i)_{\text{outer}}$	...		0.12 ± 0.05

1. Получено из B_{tot} , пересчитанной из величин g и r SDSS, и модуля расстояния $31,14^m$. Используется далее для получения оценки $M(\text{H}\text{I})/L_B$. Исправлено за межзвездное поглощение в Галактике $A_B = 0,26^m$. **2.** $\text{H}\alpha$ в единицах 10^{-16} эрг см^{-2} с^{-1} . **3.** mag arcsec^{-2} , средняя поверхностная яркость в фильтре B в пределах изофоты $\text{SB}(B) = 26,54^m \text{ arcsec}^{-2}$, скорректированная за поглощение $A_B = 0,26^m$, но не скорректированная за наклон. Коррекция за наклон приведет к ослаблению поверхностной яркости на дополнительные $(1,3-1,8)^m \text{ arcsec}^{-2}$ для соотношения осей диска $q = 0,2-0,3$. Полные звездные величины, $F_{\text{H}\alpha}$ и цвета в таблице не исправлены за межзвездное поглощение в Галактике. **4.** Для компонентов С и D приведены суммарные B_{tot} , M_B и $M(\text{H}\text{I})/L_B$, поскольку на карте HI низкого разрешения, которая используется для оценки потоков HI , они не разделяются.

полной звездной величины B для суммы компонентов В, С и D, полученная в данном исследовании, несколько слабее, чем полученная для всей системы UGC 3672 в работе [62]. Вероятно, это связано с отличием в размерах используемых апертур. Однако полученная в данном исследовании величина B для суммы компонентов В и С+D согласуется с полной величиной UGC 3672 из работы Перепелицыной и др., 2014 [131], а также с величиной, пересчитанной здесь из величин SDSS g,r .

На Рис. 4.7 компонент А показан крупным планом. Видно, что наиболее яркая в линии H α 21 см область расположена вблизи области звездообразования. Помимо области звездообразования также можно заметить яркую звезду переднего фона, которая проецируется в оптике на диффузную эмиссию низкой поверхностной яркости. При оценке полной звездной величины звезда переднего фона была замаскирована. Для оценки цветов были использованы только области с явным сигналом в фильтре u . Однако звездная величина в фильтре B оценивалась для больших апертур по изображениям с более высоким отношением сигнал/шум в фильтрах g и r .

4.3 Обсуждение

4.3.1 Природа UGC 3672

Если анализировать карты H α низкого разрешения, можно заключить, что мы имеем дело с клампированным вращающимся газовым диском, что в целом довольно типично для карликовых галактик [см., например, 163]. Однако на оптических изображениях видно, что это возмущенная система, и, как упоминалось выше, данные H α также указывают на то, что UGC 3672 взаимодействует с гораздо более слабой галактикой-компаньоном, богатой газом, которая была обозначена в данном исследовании как UGC 3672A.

Теперь стоит рассмотреть систему UGC 3672 в целом. На Рис. 4.4 представлена карта потоков в линии H α 21 см для разрешения $\sim 14''$. Компоненты А, В, С и D отмечены крестиками (где А — самый северный, а D — самый южный). Пики в эмиссии H α видны вблизи всех компонентов, хотя пик вблизи самого

яркого оптического компонента (С) относительно слабый. Также распределение HI показывает филаментарную структуру. Три филаментарные структуры обозначены цифрами 1,2,3 на Рис. 4.6, и видно, что скорость непрерывно меняется вдоль этих трех филаментов. Центры компонентов А, В, С и D на этом рисунке также отмечены крестиками. На карте в канале с максимальной скоростью (1024,3 км/с) виден юго-западный “хвост” филамента 3. В каналах на более низких скоростях видно, что эмиссия от этого филамента появляется северо-восточнее, проходит через компонент D и затем детектируется восточнее от основной, наиболее яркой в оптике части системы (области в районе двух центральных крестов) и, наконец, заканчивается (на скорости $\sim 975,8$ км/с) немного севернее компонента В. Эмиссия от филамента 2 детектируется начиная со скорости $\sim 1003,5$ км/с немного южнее компонента С, также проходит через компонент D, а затем продолжается к северо-западу от центральной части системы и заканчивается на скорости ~ 962 км/с. Филамент 1 детектируется начиная со скорости $\sim 948,2$ км/с севернее компонента В и затем продолжается на север, и заканчивается вблизи компонента А (на скорости $\sim 920,5$ км/с).

Учитывая все это, можно предложить следующую модель этой системы. Центральная, наиболее яркая часть UGC 3672 представляет собой результат слияния двух галактик-прародителей, а именно компонентов В и С. Приливное взаимодействие между ними, а также с третьей галактикой UGC 3672А привело к образованию филаментарных структур, которые, по сути, представляют собой приливные хвосты и рукава. Компонент D располагается на пересечении двух таких приливных хвостов. Возможный альтернативный сценарий – что система включает только две галактики, а именно UGC 3672 и компаньон UGC 3672А. Однако такой сценарий предполагает, что вещество компонента В было выброшено при приливном взаимодействии основного тела UGC 3672 с компаньоном UGC 3672А. Это кажется маловероятным, учитывая, что UGC 3672А значительно менее массивен, чем UGC 3672. Гипотеза о том, что компонент В изначально был отдельной самостоятельной галактикой, также подтверждается данными о кинематике в линии $\text{H}\alpha$, полученными со сканирующим интерферометром Фабри-Перо в работе Моисеева, 2014 [164]. Автор [164] отмечает, что кинематика системы очень возмущенная, при этом кинематический позиционный угол изменяется почти на 90° от центра к периферии. Кинематические данные $\text{H}\alpha$ из работы Моисеева, 2014 [164] согласуются с предположением о том, что централь-

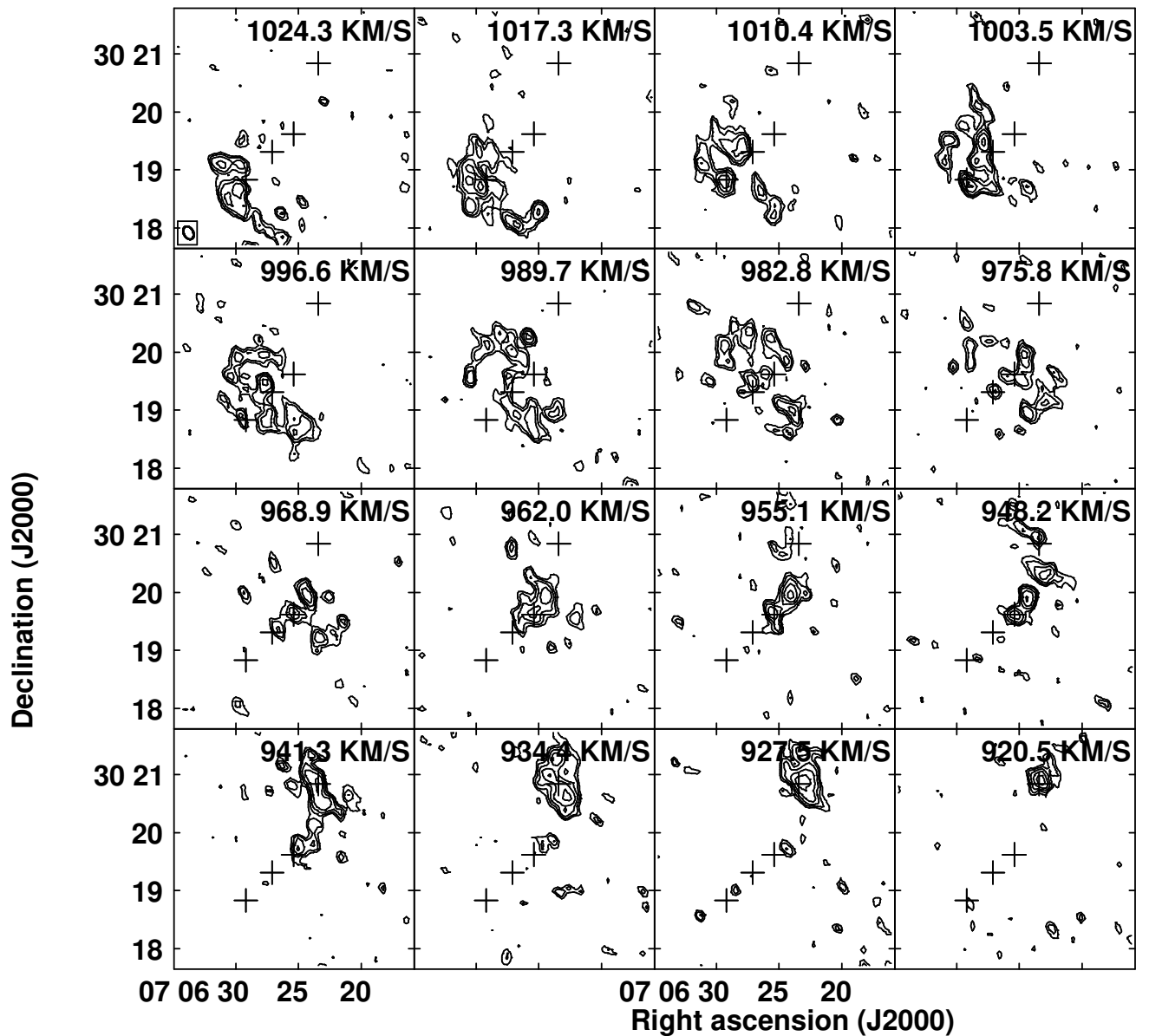


Рис. 4.6 — Поканальные карты потоков HI UGC 3672 для разрешения $14'' \times 10''$. Приведенные каналы не включают всю эмиссию от системы.

Данный диапазон скоростей был выбран, чтобы продемонстрировать непрерывное изменение скорости вдоль филаментов, отмеченных на Рис. 4.4. Крестиками отмечены центры компонентов А, В, С, D (с севера на юг). Размер диаграммы направленности показан в левом нижнем углу первой панели.

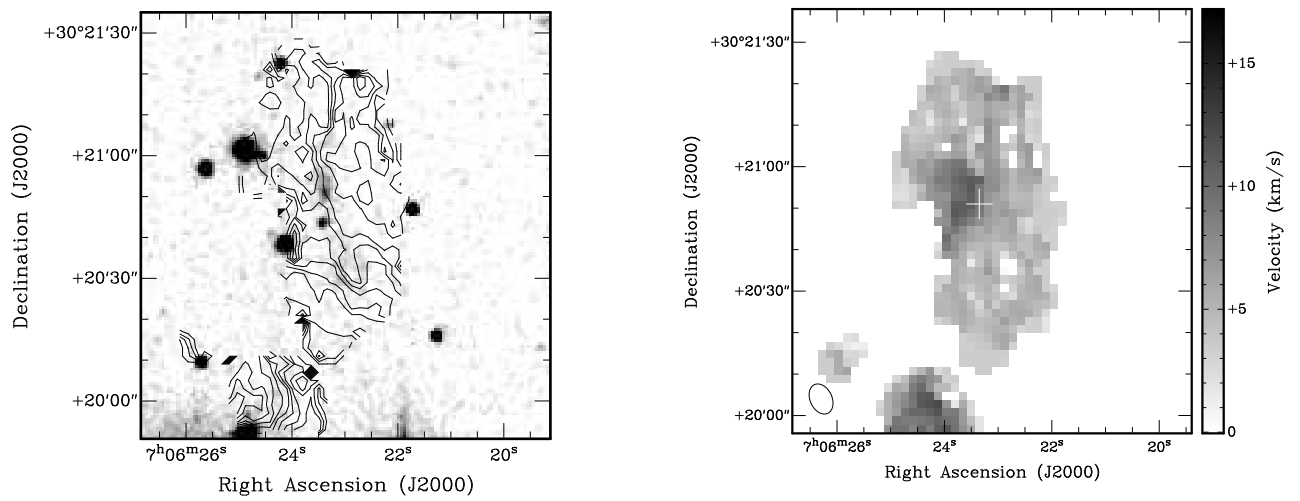


Рис. 4.7 — **Слева:** Поле скоростей HI для разрешения $8'',1 \times 5'',5$ (контуры), наложенное на изображение UGC 3672A в фильтре *B* с 0,9м телескопа KPNO. Общая протяженность слабой эмиссии в оптике в направлении с севера на юг составляет $\sim 40''$. Также видна слабая звезда переднего фона, которая накладывается на слабую диффузную эмиссию в оптике. Хорошо видно изменение направления градиента поля скоростей HI вблизи UGC 3672A. **Справа:** Карта дисперсии скоростей HI для разрешения $8'',1 \times 5'',5$. Размер диаграммы направленности показан в левом нижнем углу.

ная часть системы UGC 3672 является результатом слияния двух галактик, которые были предшественниками компонентов В и С.

На Рис. 4.7 приведено поле скоростей (слева), а также карта дисперсии скоростей (справа) HI вблизи UGC 3672A. Видно, что скорость сначала плавно меняется в направлении север-юг (в соответствии с градиентом вдоль филамента 1 на Рис. 4.4), но вблизи компонента А градиент меняет направление (изменение скорости наблюдается здесь вдоль направления восток-запад). На карте дисперсии скоростей на Рис. 4.7 (справа) также видно увеличение дисперсии скоростей вблизи компонента А. Таким образом, UGC 3672A является кинематически выделенным компонентом, что согласуется с предположением о том, что он является отдельной галактикой.

Таблица 4.2 Свойства галактик-прародителей в системе UGC 3672

Свойства	Компонент А	Компонент В	Компоненты С+D
B_{tot}^1 (mag)	18.93	17.09	16.32
M_{B}^2 (mag)	-12.47	-14.31	-15.08
L_{B}^2 ($10^7 L_{\odot}$)	1.51	8.24	16.7
V_{hel}^3 (км/с)	936.7 ± 1.3	976.5 ± 1.3	1015.9 ± 3.5
S_{HI}^4	2.38 ± 0.5	3.66 ± 0.7	4.7 ± 0.8
S_{HI}^5	3.41 ± 0.7	5.21 ± 1.0	6.73 ± 1.1
M_{HI}^6	25.8 ± 5	35 ± 7	45 ± 8
$M_{\text{HI}}/L_{\text{B}}^7$	17.1	4.2	2.7
$L_{\text{H}\alpha}^8$	9.8	52.3	124.0

1. Пересчитано из величин g и r , оцененных по изображениям SDSS. **2.** Было использовано принятое в данном исследовании расстояние 16,9 Мпк, а также межзвездное поглощение в Галактике $A_{\text{B}} = 0,26^m$ [96]. **3.** Оценено по кубу данных с разрешением $\sim 60''$. Ошибки этой и остальных величин, основанных на оценке HI, включают также неопределенности, связанные с отнесением эмиссии к данному компоненту. **4.** В единицах Ян км/с. **5.** В единицах Ян км/с. Эти оценки получены при пересчете из полного потока, полученного на 43-м телескопе Green Bank, используя соотношения потоков разных компонентов, полученные на GMRT (предыдущая строка). **6.** В единицах $10^7 M_{\odot}$. Пересчитано с использованием потоков из предыдущей строки. **7.** В солнечных единицах. **8.** Светимость в линии $\text{H}\alpha$ в единицах 10^{37} эрг с^{-1} , исправленная за межзвездное поглощение в Галактике.

Предполагая, что система UGC 3672 является (промежуточным) результатом слияния триплета галактик, интересно оценить свойства галактик-прародителей. В Таблице 4.2 приведены их звездные величины и светимости в фильтре B , а также потоки HI и массы газа HI. Потоки HI были оценены при помощи процедуры BLSUM в AIPS, при суммировании потока от области вокруг каждого оптического компонента. Стоит отметить, что отнесение газового компонента HI к той или иной галактике несколько субъективно, учитывая довольно сложную морфологию системы в HI. Поэтому оценки, приведенные ниже, довольно неточны.

Стоит отдельно подчеркнуть чрезвычайно высокое отношение $M(\text{HI})/L_B = 17,1$ (в солнечных единицах), полученное для слабого компаньона низкой поверхностной яркости UGC 3672A. Этот объект — одна из немногих галактик с таким высоким и при этом хорошо измеренным отношением $M(\text{HI})/L_B$. Также стоит отметить, что еще два подобных, очень богатых газом объекта низкой поверхностной яркости были обнаружены в центральных областях войда Lynx-Cancer — это J0723+3622 и J0723+3624 с $M(\text{HI})/L_B \sim 10$ и 26, соответственно [106]. Компоненты В и С+D также являются богатыми газом объектами с $M(\text{HI})/L_B \sim 4,2$ и $\sim 2,6$, соответственно. Как упоминалось выше, полная видимая звездная величина $B=15,87^m$ для UGC 3672, полученная в рамках данного исследования, слабее на $\sim 0,44 \pm 0,20^m$, чем приведенная в работе [62]. Если принять для системы оценку $B(\text{UGC3672}) = 15,43^m$ из [62], то $M(\text{HI})/L_B$ для суммы компонентов В и С+D уменьшится с $\sim 3,2$ до $\sim 2,1$.

Наблюдаемые цвета компонентов системы были сопоставлены с эволюционными треками из пакета PEGASE2. В качестве двух крайних случаев использовались треки для двух законов звездообразования: непрерывное звездообразование с постоянным темпом ЗО, и мгновенная вспышка ЗО, в предположении двух начальных функций масс — Солпитера [165] и Кроуны [166]. Соответствующие диаграммы $(g-r)-(u-g)$ с отмеченным положением всех компонентов системы приведены на Рис. 4.8. На левой панели показаны эволюционные треки для металличности звезд $z=0,004$, что близко к оценке для областей III в компонентах В и С ($12+\log(\text{O}/\text{H})\sim 8,0$). Для очень богатого газом и маломассивного компонента А оценка $12+\log(\text{O}/\text{H})\sim 7,0$ (полученная по спектрам с 6м телескопа БТА, см. работу Пустильника и др., 2016 [66]) соответствует металличности $z=0,0004$ — на правой панели показаны эволюционные треки для этой металличности.

Как и ряд других слабых карликовых галактик низкой поверхностной яркости, обнаруженных среди галактик войда Lynx-Cancer и обсуждаемых в работе Перепелицыной и др., 2014 [131], компонент А показывает очень голубые цвета $u-g$, $g-r$. Это указывает на малый возраст его основного звездного населения, хотя оценки цветов довольно неточны. В частности, цвета компонента А лучше всего соответствуют мгновенной вспышке звездообразования с прошедшим временем от начала вспышки $\sim 0,1$ млрд.лет. Эволюционный трек для непрерывного ЗО в этой области диаграммы igr проходит достаточно близко к эволюционному треку для мгновенной вспышки ЗО, и соответствующие допу-

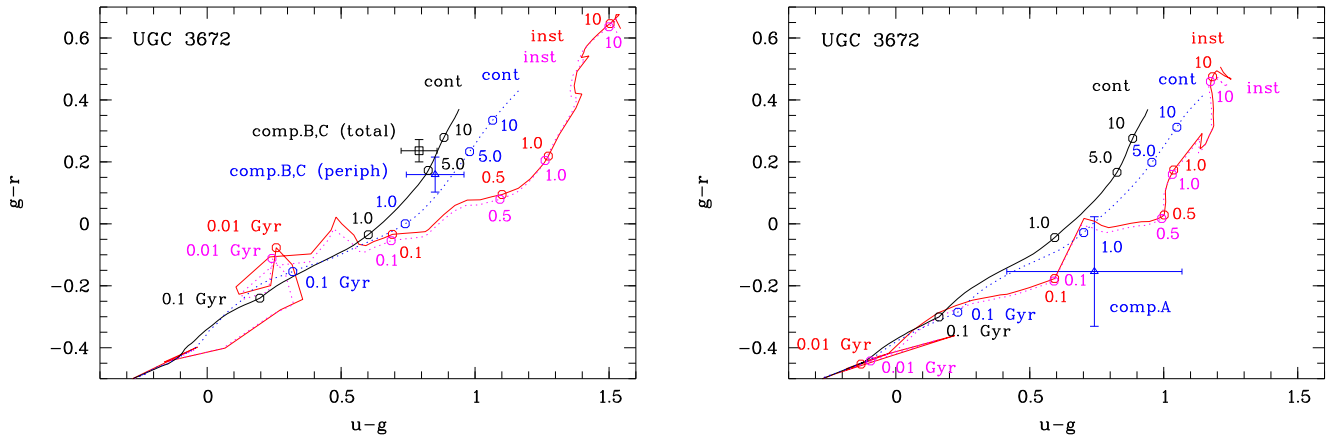


Рис. 4.8 — Диаграммы “цвет – цвет” $(g - r) - (u - g)$. Все цвета были исправлены за покраснение. Цветными линиями отмечены эволюционные треки из пакета PEGASE.2 [140], для двух крайних случаев законов звездообразования – мгновенная (inst) вспышка звездообразования для двух начальных функций масс (IMF): Солпитер [165] (красная сплошная линия) и Кроупа [166] (розовая пунктирная линия); непрерывное звездообразование (cont) для тех же IMF: Солпитер (черная сплошная линия) и Кроупа (синяя пунктирная линия). Значения вдоль треков – время от начала звездообразования в миллиардах лет. **Слева:** Синим треугольником отмечены цвета периферии компонентов В и С, черным квадратом - полные цвета компонентов В и С. Эволюционные треки для металличности $z = 0,004$, что близко к оценке $12 + \log(O/H) \sim 8,0$, полученной для НII областей в компонентах В и С; **Справа:** Синим треугольником отмечены полные цвета компонента А. Эволюционные треки для металличности $z = 0,0004$, что близко к оценке $12 + \log(O/H) = 7,0$ для компонента А (см. работу Пустильника и др., 2016 [66]).

стимые диапазоны по возрастам составляют $T \sim 0,3-1$ млрд. лет, в зависимости от предполагаемой формы НФМ – Солпитера или Кроупы, соответственно. Стоит также отметить, что оценки возраста для компонента А существенно меньше, чем для внешних частей компонентов В и С.

4.3.2 Система UGC 3672 в контексте

Система UGC 3672 находится в центральных 8% объема войда Lynx-Cancer. В целом в войде Lynx-Cancer плотность галактик с $M_B \lesssim -14$ оценивается в $\sim 10\%$ от среднего значения [106]. UGC 3672 также входит в Каталог близких изолированных галактик Караченцева и др., 2011 [111]. Таким образом, система обладает довольно необычными свойствами и находится в необычном (экстремальном) окружении. Можно предположить, что свойства UGC 3672 могут быть связаны с ее положением. Дополнительным свидетельством этого эффекта является обнаружение еще одной необычной системы – очень богатого газом триплета карликов J0723+36, также вблизи центра войда, на $\sim 2,2$ Мпк от UGC 3672 [106].

Интересно отметить, что система UGC 3672 напоминает уменьшенную версию хорошо известных близких взаимодействующих групп, например, группу M81 [167]. В группе M81 также наблюдаются приливные потоки и “мосты”, соединяющие галактики. Однако общая масса HI системы M81 составляет $\sim 5 \times 10^9 M_\odot$, что в ~ 5 раз превышает общую массу HI системы UGC 3672. Масштабы размеров также в ~ 7 раз больше, при этом общая протяженность системы M81 составляет ~ 150 кпк, а длина отдельных приливных потоков составляет ~ 60 кпк.

Также стоит отметить текущее в настоящий момент звездообразование в приливных структурах в UGC 3672, особенно яркую область ЗО в компоненте D, где пересекаются два приливных потока. Это похоже на то, что наблюдается в других, более крупных приливных хвостах [например, 168, 169].

Представляет интерес и звездообразование в галактике-компаньоне UGC 3672A. Результаты численного моделирования приливных взаимодействий в карликовых системах, богатых газом, показывают, что в ходе таких взаимодействий могут формироваться яркие, компактные центральные области ЗО [170]. Такие взаимодействия также могут приводить к образованию галактик с дефицитом металлов (eXtremely Metal-Deficient, XMD) [28, 35, 171]. Альтернативным сценарием является аккреция холодного межгалактического газа из окружающей среды вдоль филаментов темной материи [см., например, 34, 172]. В этом случае можно ожидать асимметричного расположения областей со вспышкой ЗО (что наблюдается, например, в галактиках-“головастиках”), и

локального понижения металличности из-за перемешивания газа галактики с аккрецированным межгалактическим низкометаллическим газом.

Результаты анализа спектральных данных, полученных на 6м телескопе БТА САО РАН, указывают на чрезвычайно низкую металличность компонента UGC 3672A, близкой к минимальному уровню металличности $\sim Z_{\odot}/50$, обнаруженному как для областей звездообразования XMD и голубых компактных галактик, так и для их внешних оболочек [см., например, 104, 154, 173]. Предполагается, что наличие этого минимального уровня металличности отражает предобогащение металлами от звезд населения III вещества, из которого сформировались эти галактики. В связи с этим можно предположить, что большая часть или всё звездообразование в UGC 3672A происходило относительно недавно, т.е. на масштабе $T_{SF} \lesssim 1$ млрд.лет (согласно результатам, представленным на Рис. 4.8). Такое “недавнее” начало ЗО может быть связано с течением вещества вдоль филамента в войде к ранее существовавшей паре компонентов В и С, которые в настоящее время находятся в процессе слияния. Приливное воздействие от относительно массивного гало темной материи этой пары могло вызвать возмущение и привести к началу ЗО на временных масштабах $\lesssim 1$ млрд.лет.

В работе [31] авторы сообщили об открытии еще одной карликовой галактики SDSS J094332.35+332657.6 с рекордно низкой металличностью, которая была отождествлена с HI-источником AGC 198691 из обзора ALFALFA. Её металличность ($12+\log(O/H)=7,02\pm 0,03$, полученная “прямым” T_e методом), близка к упомянутому выше “минимальному” уровню металличности. Это слабый ($B_0=19,76$), чрезвычайно богатый газом карлик с $M(HI)/L_B=6,5$ также очень голубой по цветам, который, вероятно, является слабопрэволюционировавшим объектом. Галактика расположена на угловом расстоянии $\sim 13'$ от более яркой (на $3,5^m$) галактики войда Lynx-Cancer UGC 5186 ($D \sim 10,8$ Мпк [93]). Гелиоцентрическая скорость AGC 198691 составляет $V_{hel}=514$ км/с, что всего на 35 км/с меньше, чем у UGC 5186. Если предположить, что эти две галактики образуют гравитационно-связанную систему, то угловое расстояние между ними соответствует проекционному расстоянию ~ 40 кпк. В этом случае можно было бы ожидать наличия следов приливного возмущения в морфологии и кинематике HI более слабой галактики. В работе [174] авторы действительно обнаружили признаки взаимодействия AGC 198691 и UGC 5186.

Для остальной системы UGC 3672 информация о металличности доступна для двух HI-областей в компонентах В и С [103]. Обе оценки согласуются в

пределах ошибок, а среднее содержание кислорода составляет $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8,01 \pm 0,1$. Это значение очень близко к величине $7,99 \pm 0,05$, полученной в работе [80]. Оба значения O/H согласуются с тем, что ожидается из зависимости “светимость-металличность” [25, 28].

В системе UGC 3672 наблюдаются четко выраженные приливные хвосты и “мосты”, а диффузный газ выглядит так, как будто он оседает во вращающийся диск. Влияние слияний на морфологию современных галактик давно вызывает интерес. Уже несколько десятилетий известно, что слияние дисковых галактик может привести к образованию объектов, напоминающих эллиптические галактики [175—177]. Однако в рамках иерархических моделей формирования галактик, где в прошлом ожидаются частые слияния, очень важный вопрос заключается в том, могут ли дисковые галактики пережить слияния.

Результаты ранних моделирований указывали, что слияния приводят к разрушению дисков, однако позже было показано, что в случае галактик, богатых газом, даже крупные слияния могут приводить к формированию дисков [178—180]. Потеря углового момента газа, падающего на центр галактики, приводит к полному разрушению бедных газом дисков. Однако в очень богатых газом галактиках большая часть газа сохраняет свой высокий угловой момент и возвращается в диск в конце слияния. В работе Бекки, 2008 [35] также представлены результаты численного моделирования слияний очень богатых газом карликов, которые показывают, что часть газа направляется внутрь, и подпитывает центральную вспышку ЗО, а остальная часть преобразуется в диск. Однако физический механизм, лежащий в основе этого, не обсуждается.

Однако результаты более поздних моделирований показывают, что не все слияния богатых газом галактик приводят к формированию диска. В работе [181] было показано, что влияние содержания газа на результат слияния существенно зависит от того, преобладает ли в диске клампированный турбулентный газ. В случае дисков, в которых преобладает клампированный турбулентный газ, слияния не приводят к длинным кинематически когерентным приливным хвостам, и формирование диска не происходит. В частности, авторы утверждают, что в случае галактик на $z \sim 1 - 2$ маловероятно, что их слияние может привести к образованию остатка, похожего на наблюдаемые в настоящую эпоху дисковые галактики. Однако, судя по морфологии и кинематике UGC 3672, здесь мы имеем дело с иной ситуацией.

Наконец, стоит обратить внимание на пространственное распределение галактик в системе. Как обсуждалось выше, UGC 3672 представляет собой триплет взаимодействующих галактик, причем галактики в триплете расположены более или менее линейно. Эта система похожа на триплет, обнаруженный в работе [161] в рамках обзора VGS – авторы предполагают, что положение галактик в системе отражает их расположение вдоль филамента крупномасштабной структуры в войде. Помимо расположения примерно вдоль одной линии в проекции на небо, в системе UGC 3672 также наблюдается непрерывное изменение скоростей при переходе от одного объекта к другому – это также может служить указанием на то, что галактики в триплете относятся к одному филаменту крупномасштабной структуры.

Обнаруженный ранее вблизи центра войда Lynx-Cancer триплет галактик [106] также имеет более-менее линейную геометрию, хотя в этом триплете отсутствует какая-либо эмиссия между третьим компонентом и основной парой. Также, хотя наблюдается непрерывное изменение скоростей в основной паре, это не распространяется на третью галактику. Линейное расположение и непрерывное изменение скоростей галактик в системе UGC 3672, а также тот факт, что диффузный газ, по-видимому, оседает и формирует вращающийся диск, указывают на то, что слияния богатых газом галактик, движущихся вдоль филаментов крупномасштабной структуры, являются возможным сценарием образования дисковых систем.

4.4 Выводы

В данной Главе Диссертации представлен анализ карт HI, полученных на индийском радиоинтерферометре GMRT, а также данных оптической фотометрии системы UGC 3672, расположенной недалеко от центра близкого войда Lynx-Cancer. Результаты исследования представлены в статье [108].

Из анализа данных и их обсуждения в более широком контексте были сделаны следующие выводы:

1. На картах HI с низким пространственным разрешением система UGC 3672 выглядит как клочковатый диск, демонстрирующий регулярную кинематику. При таком разрешении распределение и кинематика

HI согласуются с тем, что обычно наблюдается в случае карликовых неправильных галактик.

2. Однако на картах с более высоким пространственным разрешением наблюдается несколько филаментарных структур, а также вторичный пик в распределении HI, который соответствует отдельной, слабой карликовой неправильной галактике.
3. Этот слабый карлик низкой поверхностной яркости UGC 3672A оказался очень богатым газом объектом, с $M(\text{HI})/L_B = 17$. Его интегральные цвета $u - g$ и $g - r$ при сравнении с эволюционными треками из пакета PEGASE2 указывают на то, что основная масса звезд в галактике образовалась недавно. Свойства UGC 3672A указывают на её возможную эволюционную молодость.
4. Также был сделан вывод о том, что система UGC 3672 представляет собой триплет очень богатых газом карликовых галактик, находящихся в процессе слияния. Можно предположить, что необычные свойства системы связаны с эффектами окружения и являются следствием того, что UGC 3672 находится в центральной области войда.

Глава 5. Взаимодействие галактик и аккреция газа в войдах. Выборка и исследование галактики NGC 428

5.1 Введение

При текущем темпе звездообразования (SFR) запасы газа в современных галактиках должны быть исчерпаны за 1–2 миллиарда лет [182–185]. Поскольку это значение существенно меньше Хаббловского времени, для поддержания звездообразования необходим дополнительный приток газа [186]. В различных работах обсуждается несколько механизмов набора массы галактиками и пополнения газового резервуара, включая слияния галактик [например, 187, 188], галактические фонтаны [например, 189–191] и аккрецию холодного газа из филаментов крупномасштабной структуры [192–195]. Результаты некоторых моделирований показывают, что аккреция из филаментов преобладает над слияниями [187, 196, 197].

Целью исследования является изучение взаимодействий и возможных наблюдательных проявлений аккреции газа (как в результате слияния галактик, так и в результате возможной аккреции холодного газа из филаментов) в войдах. Войды хорошо подходят для этой задачи благодаря низкому темпу взаимодействий и слияний по сравнению с более плотным окружением — в этом случае легче выделить конкретные сценарии взаимодействий/аккреции и определить источники аккрецирующего газа.

Подробные исследования войдов Lynx-Cancer [66, 80, 93, 105] и Eridanus [116] (результаты исследования войда Eridanus представлены в Главе 2 данной диссертации) показали, что галактики в них имеют в среднем значительно более низкую металличность газа, чем в реперной выборке аналогичных галактик Местного объема [25]. Такие результаты могут указывать на более медленную эволюцию галактик в войдах. Небольшая подгруппа объектов демонстрирует очень низкую металличность газа, высокую массовую долю газа ($\sim 94 - 99\%$) и нетипичные цвета периферии, соответствующие времени, прошедшему с начала звездообразования $\sim 1 - 3,5$ млрд. лет [131]. Такие свойства согласуются с предположением о том, что подобные объекты, обнаруженные среди наиме-

нее массивных галактик войдов, могут находиться на более раннем этапе своей эволюции (см. также Главу 3 диссертации).

Однако пониженную металличность для данной светимости относительно “реперной” зависимости показывают не только маломассивные галактики войдов [66]. В случае объектов средней светимости понижение металличности может быть вызвано приливными взаимодействиями [28], слияниями [35, 198] или аккрецией низкометаллического газа из филаментов крупномасштабной структуры [34]. Такие события также могут приводить к повышению темпа звездообразования.

Хотя детальное исследование взаимодействий и различных сценариев аккреции газа (например, аккреция из галактик-компаньонов или в результате слияний) в войдах важно само по себе, отдельного интереса заслуживает поиск аккреции холодного газа из филаментов крупномасштабной структуры. Предполагается, что холодная аккреция из филаментов происходила на больших красных смещениях, однако в случае маломассивных галактик она может идти и в настоящее время [199]. Результаты моделирования, представленные в [10], показали также, что газ из филаментов крупномасштабной структуры может аккрецировать на гало в войдах в течение длительных периодов времени.

Прекрасным наблюдательным примером является хорошо известный объект Хога. Исследование его морфологии, кинематики и свойств звездного населения указывает на то, что массивное кольцо звездообразования является результатом длительной аккреции холодного газа из филамента на изолированную галактику в окружении относительно низкой плотности [200]. Более того, в ходе наблюдений в линии 21см был обнаружен возможный остаток этого филамента [201].

Представленное исследование направлено на изучение процессов аккреции газа и взаимодействий между галактиками в войдах. Основная идея состоит в том, чтобы объединить данные по кинематике ионизированного газа, морфологии в оптике и ближнем инфракрасном диапазоне, а также данные о химическом составе. Для получения данных о кинематике газа (распределении лучевых скоростей и дисперсии скоростей) были выполнены наблюдения со сканирующим интерферометром Фабри-Перо (ИФП) на 6м телескопе БТА САО РАН. Используя эти данные вместе с информацией о морфологии и о распределении химического состава, можно делать предположения об источнике возмущений или об источнике внешнего газа в случае событий аккреции.

В данной Главе Диссертации представлена выборка галактик для исследования процессов взаимодействий и аккреции в войдах, а также результаты анализа для самой яркой галактики выборки, NGC 428.

5.2 Выборка галактик

В выборку вошли галактики промежуточных светимостей, входящие в войды Lynx-Cancer [66, 80, 93, 105] и Eridanus [116]. Были отобраны галактики с пониженной металличностью для их светимости (по сравнению с выборкой галактик в более плотном окружении из работы Берг и др., 2012 [25]) и/или с признаками возмущений – яркими областями звездообразования на периферии, приливными деталями и асимметричной морфологией. Выборка включает как изолированные галактики, так и системы, находящиеся на разных стадиях взаимодействия.

Зависимость “светимость–металличность” для галактик войдов Lynx-Cancer и Eridanus представлена на Рис.5.1. Галактики из исследуемой выборки отмечены красными символами. Значения $12+\log(\text{O}/\text{H})$ взяты из статей [66, 80] и [116]. В Таблице 5.1 представлены основные параметры выборки галактик:

Колонка 1: Название галактики;

Колонка 2: Прямое восхождение на эпоху J2000;

Колонка 3: Склонение на эпоху J2000;

Колонка 4: Гелиоцентрическая скорость V_{hel} , км/с;

Колонка 5: Расстояние D , в Мпк, оцененное как V_{LG}/H (принимая постоянную Хаббла $H = 73$ км/с/Мпк). Здесь V_{LG} – скорость удаления галактики в координатной системе Местной группы. Источники скоростей указаны в примечаниях к Таблице;

Колонка 6: Видимая звездная величина B_{tot} в полосе B (из NED и из литературы);

Колонка 7: Абсолютная звездная величина M_B в полосе B . Пересчитывалась из видимой звездной величины B_{tot} , скорректированной за межзвездное поглощение в Галактике A_B (из NED, согласно [96]);

Колонка 8: Величина $12+\log(\text{O}/\text{H})$ из работ [66, 116].

В примечаниях к Колонке 1 указана информация об окружении для некоторых объектов.

Для галактик Ark 18, MCG -01-03-027, Mrk 965, MCG -01-03-072 и NGC 428 все величины брались из Таблиц 1 и 3 из работы [116], для остальных объектов – из Таблиц 2 и 3 из работы [66].

В выборку вошло 18 галактик с абсолютными величинами M_B в диапазоне от $-19,1^m$ до $-14,5^m$. Десять объектов были включены в выборки близких изолированных галактик [111, 202, 203], а остальные в основном входят в системы на разных стадиях взаимодействий. Почти все галактики выборки показывают пекулярную морфологию, хотя более половины из них считаются изолированными, и не имеют каких-либо известных спутников. Далее в данной Главе Диссертации представлены результаты исследования самой яркой галактики выборки, NGC 428. Согласно литературным данным, эта галактика демонстрирует как пекулярную морфологию, так и пониженную металличность.

5.3 NGC 428: основные свойства и окружение

NGC 428 — спиральная галактика позднего типа (SABm), является центральным компонентом бедной группы. Ее основные параметры приведены в Таблице 5.1. Галактика выглядит возмущенной, с асимметричными спиральными рукавами и множеством ярких областей звездообразования, неравномерно распределенных по всему диску [204, 205]. Наиболее интересной особенностью является большое (диаметром ~ 7 кпк) голубое кольцо звездообразования на северо-западной периферии диска, которое хорошо видно на оптических изображениях SDSS и SDSS Stripe82 (Рис. 5.2).

В группу NGC 428 входят также галактики UGC 772, MCG +00-04-049 и LEDA 135629 (=J0112+0102). J0112+0102 — галактика низкой поверхностной яркости $\sim 3'$ к северу от NGC 428 (см. Рис. 5.2), без оценок $12 + \log(\text{O}/\text{H})$. UGC 772 и MCG +00-04-049 — низкометаллические карликовые галактики с $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 7,15 - 7,32$ (оценки для нескольких НII областей из работы [104]) и $7,56 \pm 0,07$ [116], соответственно. Для UGC 772 в работе Моисеева и др., 2010 [139] представлено исследование кинематики ионизованного газа в линии $\text{H}\alpha$; в статье [135] также представлены результаты HI наблюдений в линии 21 см на

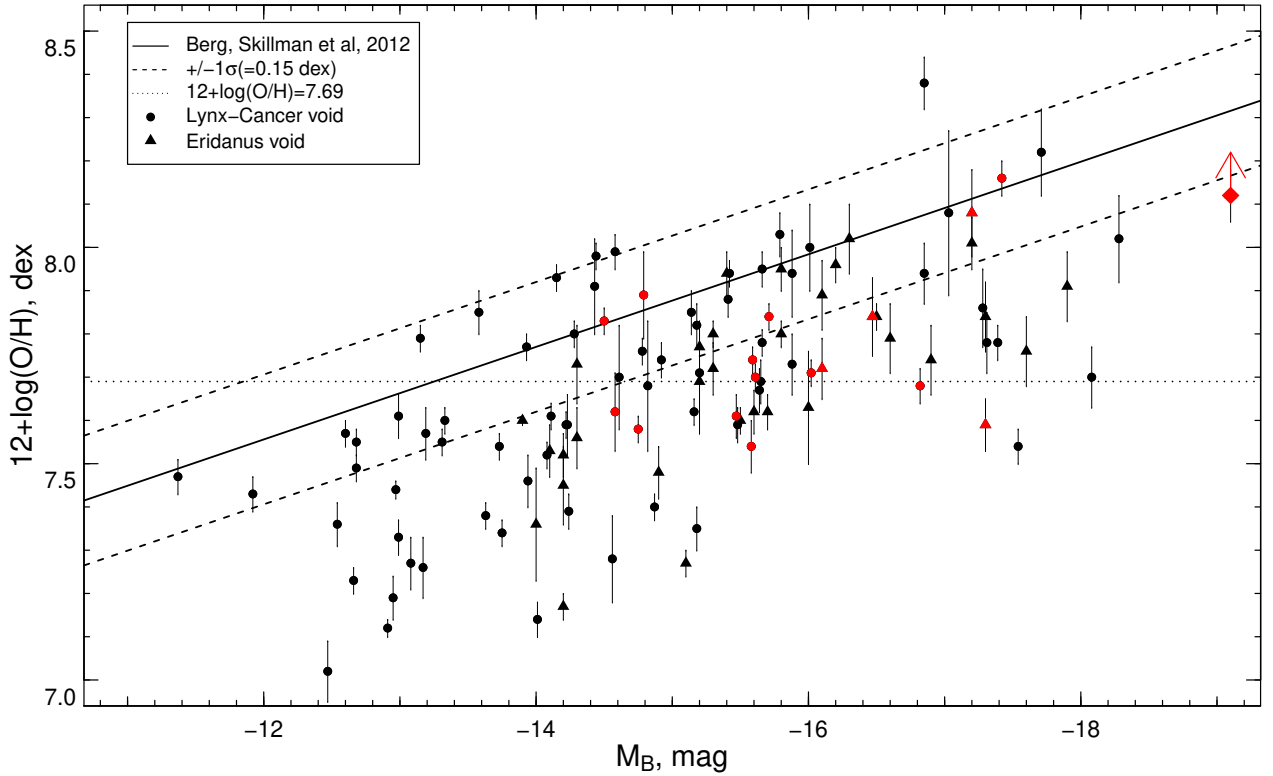


Рис. 5.1 — Зависимость между $12+\log(\text{O}/\text{H})$ и абсолютной звездной величиной M_V для галактик из войдов Lynx-Cancer (кружки) и Eridanus (треугольники). Красными символами отмечены галактики, вошедшие в выборку. Красным ромбом отмечена галактика NGC 428 (металличность газа из работы [116]). Красной стрелкой отмечена металличность, полученная для галактики в рамках данного исследования (см. Таблицу 5.4). Черной сплошной линией отмечена линейная регрессия для реперной выборки из Местного объема из работы [25], двумя штриховыми линиями по обе стороны от нее — среднеквадратичное отклонение от линейной регрессии для реперной выборки (0,15 dex). Горизонтальной пунктирной линией отмечена величина $12+\log(\text{O}/\text{H})=7,69$, которая соответствует металличности газа $Z_{\odot}/10$ (для Z_{\odot} из [109, 110]).

Таблица 5.1 Галактики выборки

Название галактики (1)	Координаты на эпоху J2000 (2) (3)		V_{hel} , км/с (4)	D , Мпк (5)	B_{tot} , mag (6)	M_B , mag (7)	$12+\log(O/H)$, dex (8)
Ark 18 ¹	00 51 59.62	-00 29 12.2	1621	24.1 ^a	14.76	-17.2	8,08±0,10
MCG-01-03-027 ¹	00 52 17.23	-03 57 59.8	1412	21.1 ^a	15.69	-16.1	7,72±0,07
Mrk 965	00 57 28.75	-04 09 34.0	2713	38.8 ^a	15.81	-17.3	7,59±0,06
MCG-01-03-072	01 02 22.91	-04 30 30.9	1764	25.8 ^a	15.69	-16.5	7,84±0,09
NGC 428 ²	01 12 55.71	+00 58 53.6	1152	17.6 ^a	12.16	-19.1	8,12±0,06
UGC 3476 ³	06 30 29.22	+33 18 07.2	469	9.8 ^b	14.96	-16.0	7,71±0,03
UGC 3860 ³	07 28 17.20	+40 46 13.0	354	7.8 ^b	15.21	-14.5	7,83±0,03
UGC 3966 ³	07 41 26.00	+40 06 44.0	361	8.6 ^b	15.32	-14.6	7,62±0,09
UGC 4115 ¹	07 57 01.80	+14 23 27.0	341	7.7 ^b	14.81	-14.8	7,61±0,06
UGC 4117 ¹	07 57 25.98	+35 56 21.0	773	14.1 ^b	14.81	-15.6	7,73±0,03
NGC 2552	08 19 20.14	+50 00 25.2	524	11.1 ^b	13.01	-17.4	8,16±0,04
KUG 0934+277 ⁴	09 37 47.65	+27 33 57.7	1588	25.1 ^b	16.50	-15.6	7,55±0,08
IC 559 ³	09 44 43.82	+09 36 57.5	541	9.4 ^b	14.98	-14.9	7,89±0,10
Mrk 407	09 47 47.60	+39 05 03.0	1589	25.2 ^b	15.27	-16.8	7,68±0,05
UGC 5272 ⁵	09 50 22.40	+31 29 16.0	520	10.3 ^b	14.45	-15.7	7,84±0,03
UGC 5288 ³	09 51 16.77	+07 49 47.9	556	9.5 ^b	14.42	-15.6	7,66±0,05
IC 2520	09 56 20.12	+27 13 39.3	1243	19.9 ^c	14.27	-17.3	–
UGC 5464	10 08 07.70	+29 32 34.4	1003	16.9 ^b	15.77	-15.5	7,61±0,06

¹ изолированная, включена в выборку из работы [111];

² находится в группе;

³ изолированная, согласно [203];

⁴ изолированная, согласно [202];

⁵ находится в паре;

^a по данным из NASA/IPAC Extragalactic Database (NED);

^b из работы [66];

^c из работы [105].

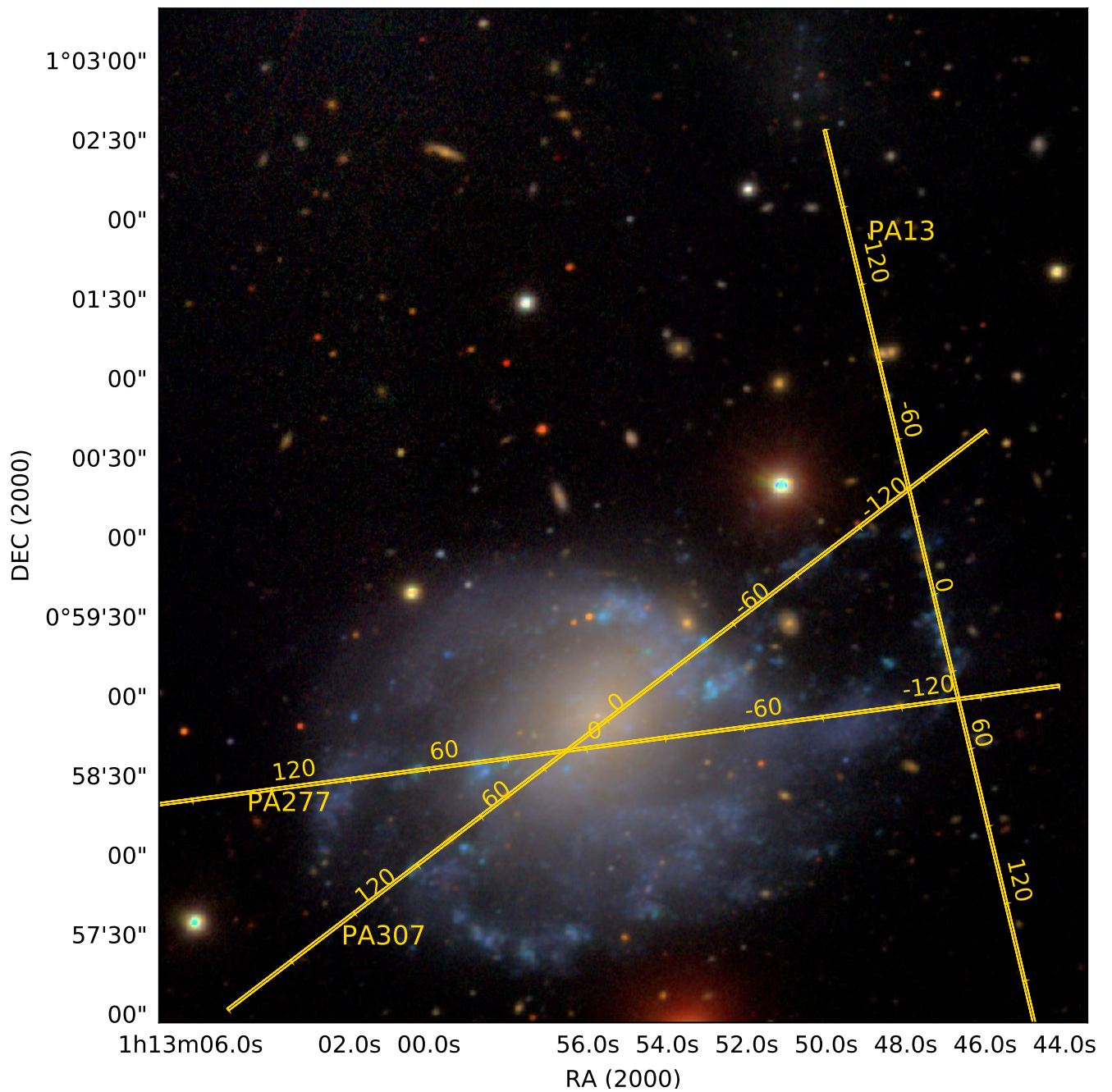


Рис. 5.2 — Комбинированное изображение галактики NGC 428 и ее окрестностей в фильтрах g (синий), r (зеленый) и i (красный) по данным из SDSS Stripe82. Желтыми линиями отмечены положения щелей во время спектральных наблюдений.

Таблица 5.2 Журнал наблюдений

Метод	Дата наблюдений	T_{exp} , с	Поле зрения	"/ px	θ , "	Спектр. диапазон	$\delta\lambda$, Å
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
LS PA=277	20.09.2015	1800	1" × 6,1'	0,36	2,0	3500-7500	13
LS PA=307	20.09.2015	3600	1" × 6,1'	0,36	2,0	3500-7500	13
LS PA=13	20.09.2015	3000	1" × 6,1'	0,36	2,0	3500-7500	13
ИФП	04.11.2015	40 × 90	6,1' × 6,1'	0,71	1,8	8,8Å вблизи H α	0,48 (22 км/с)

радиоинтерферометре GMRT. В обеих статьях авторы пришли к выводу, что галактика показывает признаки недавнего слияния.

Наблюдения HI, представленные в работе Смокера и др., 1996 [206], показали наличие “хвоста” HI к югу от NGC 428. Авторы предполагают, что это может быть результатом приливного взаимодействия между членами группы. Другой возможный сценарий состоит в том, что NGC 428 является результатом слияния галактик – в таком случае J0112+0102 также могла образоваться в ходе этого события.

NGC 428 – хороший кандидат для исследования процессов аккреции и взаимодействий галактик в войдах. Принятое расстояние до галактики составляет 17,6 Мпк по данным из работы [116] (а также см. Главу 2), и было рассчитано как V_{LG}/H (принимая постоянную Хаббла $H = 73$ км/с/Мпк), где V_{LG} — скорость удаления галактики в координатной системе Местной группы. На принятом расстоянии угловой масштаб составляет 85 пк/".

5.4 Используемые данные

Было получено три спектра для разных положений щели, показанных на Рис. 5.2. Журнал наблюдений представлен в Таблице 5.2: T_{exp} — время экспозиции, " px — размер пикселя на итоговом изображении, θ — качество изображения в угловых секундах (величины соответствуют итоговому угловому разрешению в суммарных изображениях), а $\delta\lambda$ — итоговое спектральное

разрешение. Описание обработки полученных данных приведено в п. 1.1.1, 1.1.2. Используемые методы оценки металличности обсуждаются в п. 1.2.

Далее использованы следующие сокращения для отношений потоков в эмиссионных линиях: $[S\ II]/H\alpha = F([S\ II]\ 6717,6731\text{\AA})/F(H\alpha)$; $[N\ II]/H\alpha = F([N\ II]\ 6584\text{\AA})/F(H\alpha)$; $[O\ III]/H\beta = F([O\ III]\ 5007\text{\AA})/F(H\beta)$.

Описание наблюдений с интерферометром Фабри-Перо и обработки полученных данных приведено в п. 1.1.3. Информация о наблюдениях приведена в Таблице 5.2.

Полученные карты с итоговым угловым разрешением $2,1''$ приведены на Рис. 5.3.

Для проведения поверхностной фотометрии NGC 428 были использованы архивные изображения из обзора Wide-field Infrared Survey Explorer [WISE; 207] на длине волны $3,4\ \mu\text{m}$ (полоса W1). База AllWISE включает данные, полученные в ходе криогенной и посткриогенной [208] фаз обзора¹.

Кроме того, для проведения апертурной фотометрии также были использованы изображения из обзора 2MASS [209] в полосе J и из обзора SDSS Stripe82 [64] в полосах g , r и i .

5.5 Результаты

5.5.1 Фотометрическая структура и глобальная кинематика ионизованного газа

Пекулярная оптическая морфология галактики ранее обсуждалась в предыдущих исследованиях (например, в работе [205]). Основываясь на цветных изображениях SDSS, приведенных на Рис. 5.2 и 5.3, можно предложить две интерпретации структуры NGC 428:

1. Классическая карликовая дисковая галактика с красным баром и двумя сильно асимметричными спиральными рукавами. Это общепринятое представление о галактике, которое обсуждается, например, в работах [206] и [210].

¹<https://irsa.ipac.caltech.edu/cgi-bin/Gator/nph-scan?submit=Select&projshort=WISE>

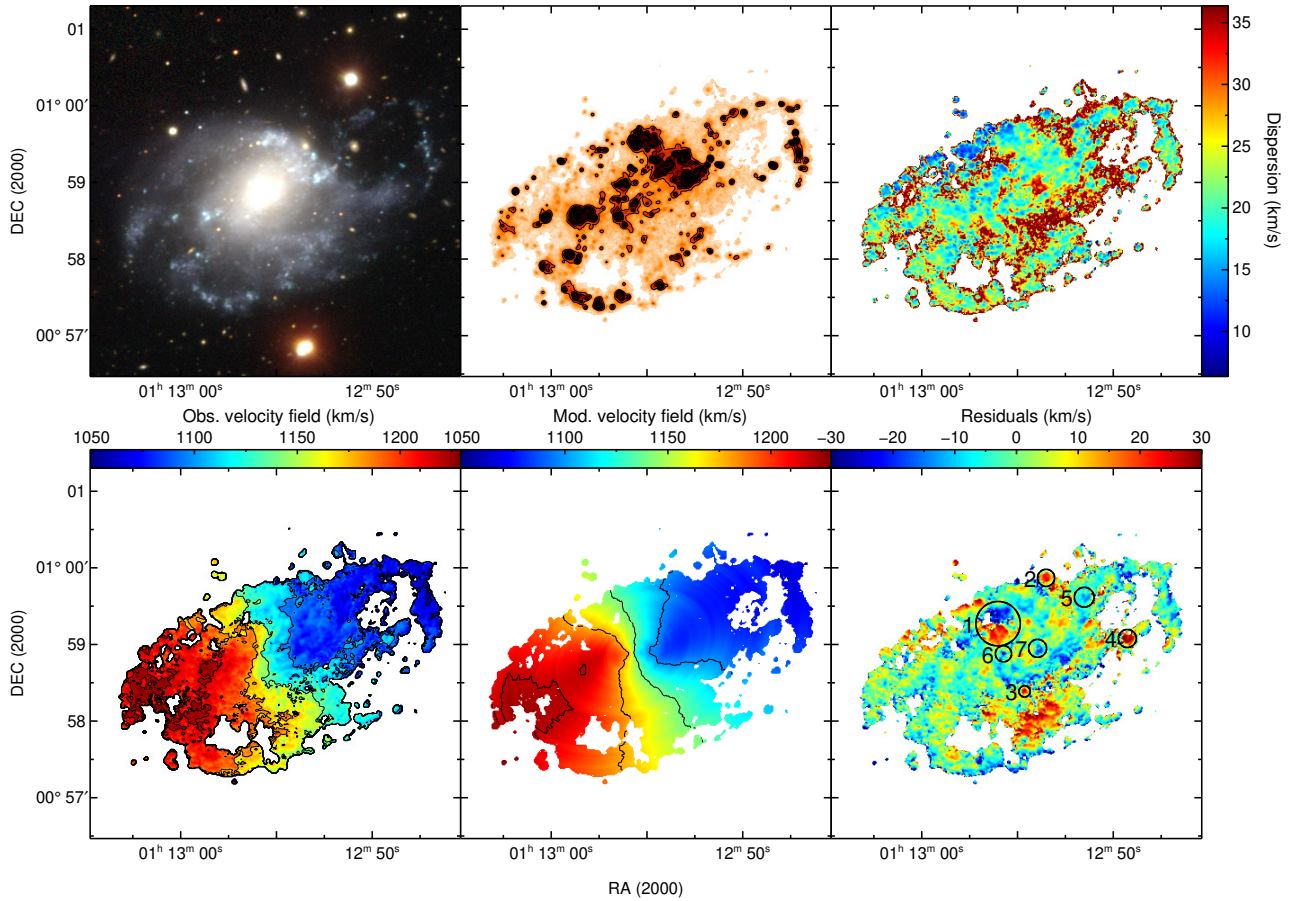


Рис. 5.3 — **Сверху**: цветное комбинированное изображение в полосах g , r и i из SDSS Stripe82 (слева); карта потоков в линии $H\alpha$ (в центре); карта дисперсий скоростей ионизованного газа (справа). **Снизу**: наблюдаемое поле скоростей ионизованного газа (слева); модельное поле скоростей, построенное с использованием метода наклонных колец (в центре); карта остаточных скоростей, полученная при вычитании модельного поля скоростей из наблюдаемого (справа). Кружками отмечены области с высокими остаточными скоростями, которые обсуждаются далее в п. 5.5.2 и также показаны на Рис. 5.5.

2. Система, включающая два компонента с различными спинами: центральный красный сфероид раннего типа, окруженный звездно-газовым диском, который образовался из вещества, аккрецировавшего с другой ориентацией углового момента. В этом случае оба компонента умеренно наклонены к лучу зрения, подобно некоторым галактикам-кандидатам в полярные кольца, таким как SPRC-125 или SPRC-241 (из Каталога полярных колец Моисеева и др., 2011 [211]). Среди подтвержденных галактик с полярными кольцами также известны спиральные и квазиспиральные структуры [212, 213].

Анализ двумерного поля скоростей позволяет сделать выбор в пользу одного из указанных выше сценариев, основываясь на поведении кинематического позиционного угла PA_{kin} вдоль радиуса. В случае круговых движений в полярном или искривленном диске PA_{kin} хорошо согласуется с позиционным углом эллиптических изофот PA_{phot} . Однако при наличии бара радиальные движения газа приводят к повороту PA_{kin} от линии узлов диска PA_0 в сторону, противоположную развороту большой оси внутренних изофот (PA_{phot}). Отклонение PA_{kin} от PA_0 зависит от силы бара и от угла между линией узлов диска и осью бара (см., например, результаты моделирования, а также ссылки на предыдущие работы в статье Моисеева, 2000 [214]).

Наблюдаемое поле скоростей в линии $H\alpha$ было проанализировано с использованием классического метода наклонных колец [215], адаптированного для исследования скоростей ионизированного газа в карликовых галактиках (см. работу Моисеева, 2014 [164]). Центр вращения галактики, определяемый как центр симметрии поля скоростей, хорошо совпадает (с точностью до 1 пикселя) с фотометрическим центром. Положение центра было зафиксировано, а поле скоростей было разбито на узкие эллиптические кольца, при этом для колец предварительно принимались угол наклона галактики i_0 и позиционный угол PA_0 , определенные из анализа фотометрии. В каждом кольце с помощью минимизации χ^2 определялись параметры модели кругового вращения: PA_{kin} , наклонение круговых орбит i_{kin} , скорость вращения V_{rot} и системная скорость V_{sys} . На следующей итерации системная скорость V_{sys} фиксировалась и принималась равной среднему значению по радиусу. Результаты моделирования не показали существенных изменений наклона круговых орбит по радиусу, так что параметр i_{kin} также был зафиксирован при построении финальной модели. Кривая вращения $V_{rot}(r)$ и распределение $PA_{kin}(r)$ представлены на Рис. 5.4.

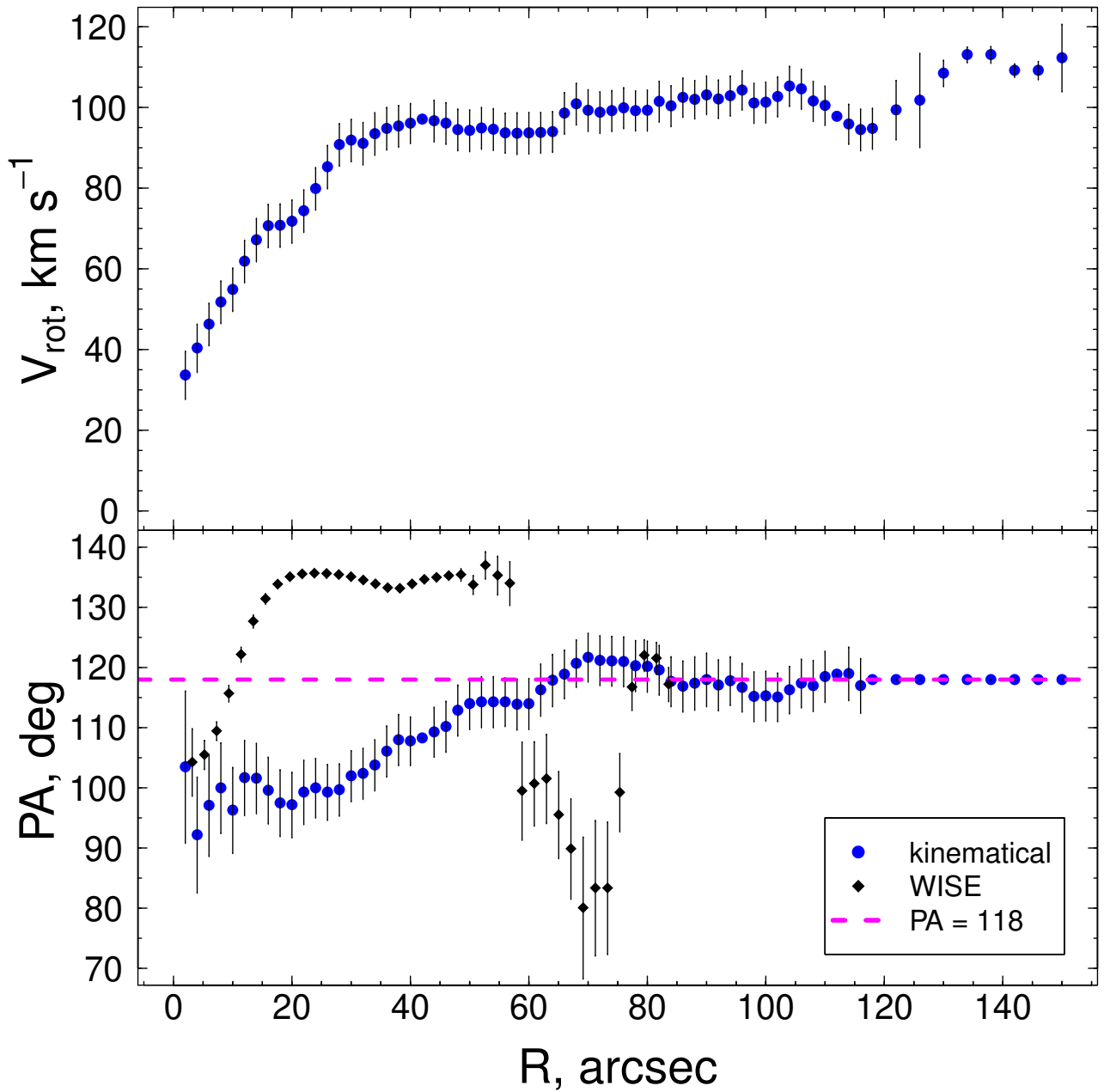


Рис. 5.4 — **Сверху:** Кривая вращения для NGC 428, полученная из наблюдаемого поля скоростей с использованием метода наклонных колец. **Снизу:** Распределение позиционных углов вдоль большой оси галактики. Кинематические позиционные углы, полученные из анализа наблюдаемого поля скоростей, отмечены синими кружками. Фотометрические позиционные углы, полученные из изофотного анализа данных WISE, отмечены черными ромбами. Позиционный угол $PA_0 = 118$, соответствующий начальному предположению о величине позиционного угла, отмечен розовой штриховой линией.

Таблица 5.3 Свойства газового диска NGC 428, полученные в данном исследовании

Параметр	Величина
i_0	47 ± 5 deg
PA_{kin}	118 ± 3 deg
V_{sys}	1149 ± 2 км/с

Как следует из этого рисунка, вариации PA_{kin} при $r > 65''$ пренебрежимо малы. Кинематические параметры ориентации внешнего диска перечислены в Таблице 5.3. Эти значения согласуются в пределах ошибок с предыдущими оценками в литературе [например, 206, 210].

Итоговые радиальные распределения V_{rot} и PA_{kin} , полученные при фиксированных значениях i и V_{sys} , приведены на Рис. 5.4. Ширина отдельных колец составляла $2''$ для основной части галактики и $4''$ для точек с $r > 116''$, где вносит вклад только северо-западная часть диска. Кроме того, мы предположили для этих внешних регионов $PA_{kin} = PA_0$. Во внутренней части газового диска ($r < 60''$) наблюдается существенный разворот PA_{kin} с максимальным отклонением от PA_0 около 20 градусов.

Далее радиальное поведение PA_{kin} сравнивалось с поведением фотометрического позиционного угла PA_{phot} , которое было получено в ходе поверхностной фотометрии. Поверхностная фотометрия проводилась при помощи ELLIPSE в среде IRAF. Распределение позиционных углов PA_{phot} вдоль большой оси, оцененное по изображению в полосе WISE W1, показано на Рис. 5.4. Аналогичным образом был проведен анализ изображений 2MASS и SDSS Stripe82. Поведение PA_{phot} вдоль радиуса не отличается от того, что было получено по данным WISE, за исключением самой внутренней части. На Рис. 5.4 приведено распределение PA_{phot} , полученное по данным WISE, поскольку в используемой полосе меньше вклад от ярких областей звездообразования.

Разворот PA_{phot} происходит на том же радиусе, но в противофазе с PA_{kin} (на Рис. 5.4 отмечен синим цветом). Как обсуждалось выше, такое поведение явно указывает на движение газа в трехосном гравитационном потенциале бара. В статье [210] авторы также пишут, что такое поведение поля скоростей в центральной части галактики можно рассматривать как признаки наличия бара.

В центральной области (на радиусах менее $10''$ или ~ 850 пк) большая ось изофот в ближнем инфракрасном диапазоне не совпадает с линией узлов

PA_0 , а PA_{phot} согласуется с PA_{kin} в пределах ошибок измерений. В статье [216] авторы объяснили такой же разворот изофот в околядерной области (а также локальный максимум эллиптичности ϵ) наличием внутреннего вторичного бара. Однако наблюдаемый разворот фотометрического и кинематического позиционных углов в одном направлении не согласуется с движениями газа во внутреннем баре. Более правдоподобным объяснением является наличие внутреннего звездно-газового диска, наклоненного по отношению к внешнему диску. Подобные наклоненные и даже полярные диски в околядерных областях хорошо известны как в галактиках с барами, так и в галактиках без баров [217, 218].

Еще одной особенностью является резкое увеличение скорости вращения примерно на 15 км/с при $r > 120''$. На первый взгляд, это не согласуется с плавным распределением масс в диске галактики; однако это можно объяснить небольшим (на ~ 3 градуса) наклоном диска на этих радиусах. Это согласуется с наблюдениями в радиодиапазоне, приведенными в работе [206], в которой было обнаружено искривление внешнего диска HI NGC 428.

5.5.2 Мелкомасштабные некруговые движения

Высокие остаточные скорости в некоторых областях, полученные после вычитания построенной модели из наблюдаемого поля скоростей (см. Рис. 5.3), могут быть связаны с влиянием ветра от массивных звезд или взрывов сверхновых, либо могут указывать на наличие потоков ионизованного газа. Ниже приведен анализ профилей эмиссионной линии $H\alpha$ и распределения ионизированного газа в этих областях.

Большинство регионов с высокими остаточными скоростями соответствуют областям низкой яркости между яркими H II-областями и/или демонстрируют асимметричный профиль линии $H\alpha$ или повышенную дисперсию скоростей по сравнению с соседними яркими областями. На Рис. 5.3 отмечено несколько таких областей, представляющих наибольший интерес, а также области с высокими остаточными скоростями, не связанные с регионами низкой яркости вблизи областей HII. На Рис. 5.5 для каждой из этих областей приведены: карты потоков в линии $H\alpha$, карты дисперсии скоростей и карты остаточных скоро-

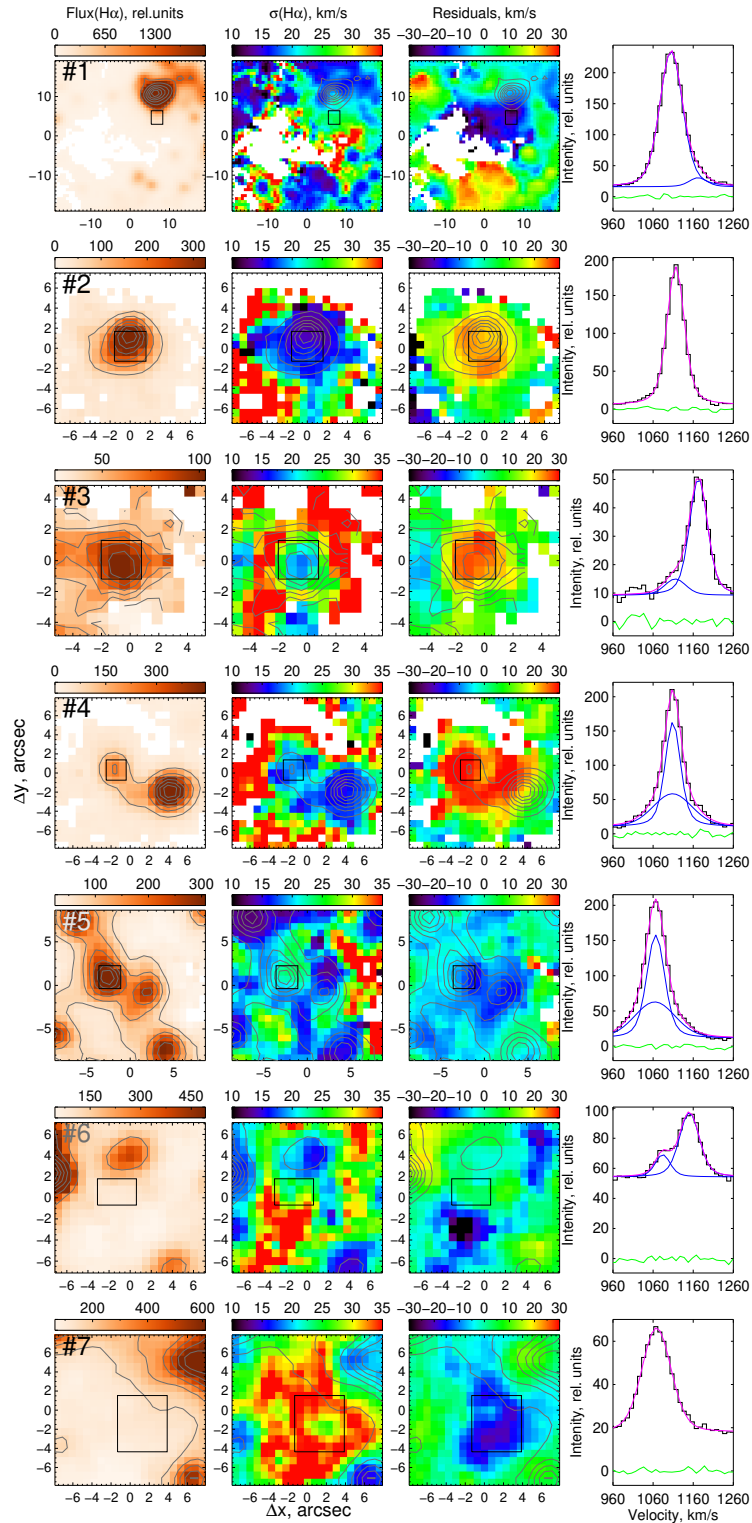


Рис. 5.5 — Области с высокими остаточными скоростями, отмеченные на Рис. 5.3. Слева направо: поток в линии $H\alpha$ (показан также контурами); карта дисперсий скоростей; карта остаточных скоростей; наблюдаемый профиль линии $H\alpha$ (черная кривая), интегрированный по области, отмеченной черным квадратом, а также результат его декомпозиции. Каждый из компонентов показан синим цветом; пурпурной кривой показан их суммарный профиль; зеленой кривой отмечены остатки после вычитания модели.

стей вместе с примерами профилей линий $H\alpha$ и результатами их разложения на несколько компонент.

В регионе #1 наблюдаются как положительные, так и отрицательные остаточные скорости, в областях, расположенных в основном в среде низкой плотности между областями III. Однако самая яркая H II-область в южной части также показывает компоненту, смещенную в сторону отрицательных остаточных скоростей. Также в крыле профиля линии $H\alpha$ на краю области наблюдается смещенная в сторону положительных остаточных скоростей компонента, которая, вместе с наблюдаемым распределением дисперсии скоростей может быть следствием истечения из этой H II-области.

Регионы #2 и #3 выглядят как компактные H II-области с типичным распределением дисперсии скоростей и с узкими профилями линий $H\alpha$. В интегральном спектре региона #3 появляется компонент линии $H\alpha$, смещенный в синюю сторону на 60 км/с. Эта область, вероятно, представляет собой сверхоболочку, расширяющуюся в неоднородной среде – это позволяет объяснить наблюдаемый двухкомпонентный профиль линии с компонентами, сильно различающимися по интенсивности. В таком случае скорость расширения сверхоболочки должна быть 30 км/с, что согласуется с остаточными скоростями в этой области. Согласно аналитической модели сверхоболочки, расширяющейся под действием звездного ветра и остатков сверхновых [219], это соответствует кинематическому возрасту $t = 0,6R(\text{пк})/V(\text{км/с}) \simeq 3$ млн. лет, принимая размер области 160 пк. Эти значения типичны для ионизованных сверхоболочек вокруг массивных ОВ-ассоциаций, наблюдаемых в близких карликовых галактиках [см., например, 220, 221]. В области #2, наоборот, отчетливо видна одиночная яркая симметричная компонента линии $H\alpha$. Вероятно, вся область #2 имеет пекулярную составляющую скорости относительно кругового вращения диска галактики.

Регион #4 соответствует двум ярким H II-областям, соединенным друг с другом “перемычкой”. Наиболее высокие остаточные скорости наблюдаются между этими H II областями, ближе к более слабой из них. Несмотря на то, что профиль линии $H\alpha$ в ярком клампе узкий и симметричный, также наблюдается широкий подстилающий компонент с дисперсией скоростей $\sigma \simeq 43$ км/с, что в четыре раза больше, чем в окрестностях клампа. Аналогично, яркая компактная область #5, которая показывает высокие остаточные скорости, также демонстрирует широкую ($\sigma \simeq 45$ км/с) подстилающую компоненту в профиле

линии $H\alpha$. Повышенное отношение $[S II]/H\alpha$ в этой области указывает на наличие ударных волн. Причиной наблюдаемой турбулентности межзвездной среды в этих двух регионах, вероятно, может быть высокоэнергетичный источник типа остатка сверхновой или звезды WR.

Регион #6 соответствует ядерному скоплению и показывает большие остаточные скорости со смещением в синюю часть, а также повышенную дисперсию скоростей $H\alpha$. Однако наиболее интересная кинематика ионизованного газа наблюдается между этим регионом и соседними HII-областями – профиль линии $H\alpha$ раскладывается на две узкие компоненты ($\sigma \simeq 12 - 17$ км/с) с большой разницей по скоростям (67 км/с), и с высоким уровнем подстилающего континуума. Эти особенности можно интерпретировать как указание на истечение вещества из массивного ядерного скопления или на наличие вокруг него расширяющейся сверхоболочки. Кроме того, высокоскоростные движения также могут быть связаны с наклонным внутренним диском, упомянутым в п. 5.5.1.

Наиболее протяженная область повышенной дисперсии скоростей в центральной части галактики (область #7) также показывает высокие остаточные скорости со смещением в синюю часть. Наблюдаемый профиль линии $H\alpha$ в отдельных пикселях слегка асимметричен везде в окрестности области #7, но интегральный профиль хорошо аппроксимируется одной широкой ($\sigma \simeq 31$ км/с) компонентой. Вероятно, за наблюдаемую картину ответственна повышенная турбулентность среды с низкой плотностью, и одним из возможных объяснений является падение газа в этом регионе.

Таким образом, для большей части областей высокие остаточные скорости можно объяснить асимметричными или слегка смещенными профилями линий из-за локальных некруговых движений, вызванных действием медленных ударных волн от звездного ветра и сверхновых в разреженной межзвездной среде [221, 222]. Однако область #2, вероятно, может быть связана с потоком газа на периферии галактики. Кроме того, высокоскоростные движения в области #6 могут быть связаны с наклонным внутренним диском.

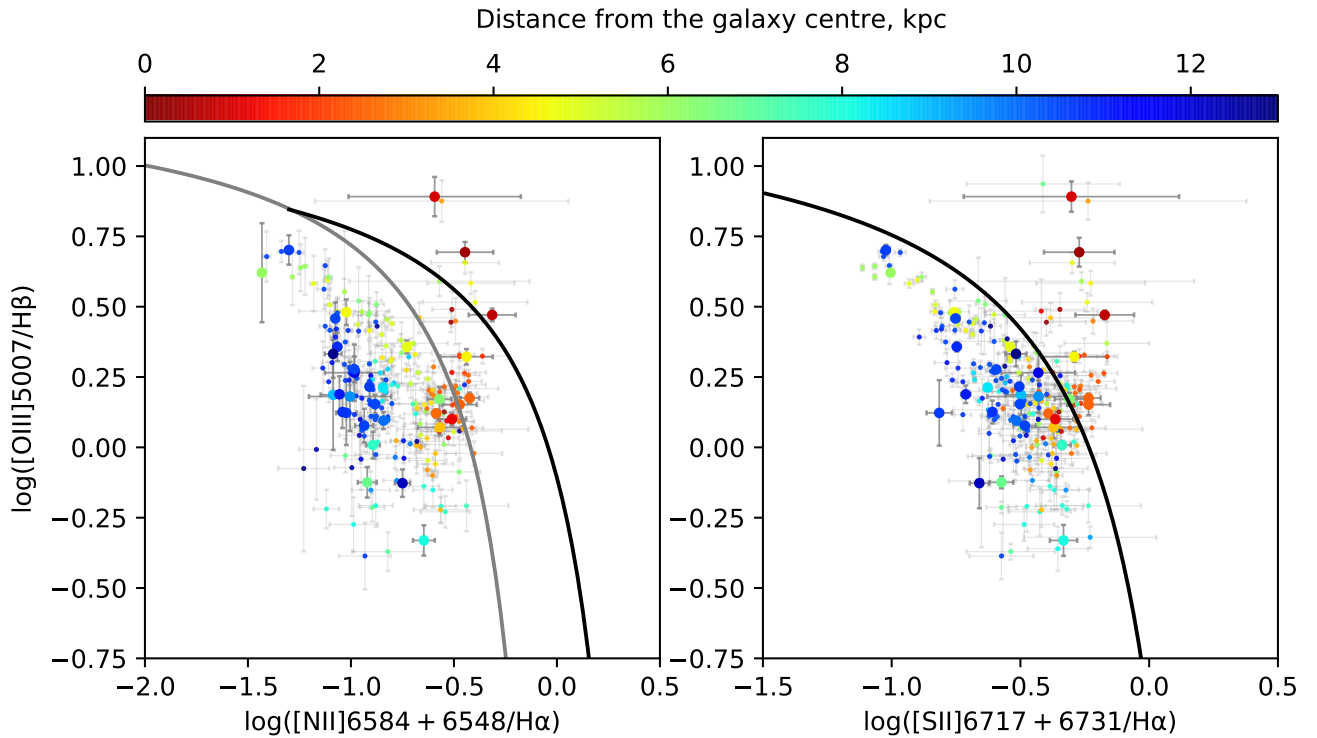


Рис. 5.6 — Диагностические диаграммы $[\text{O III}]/\text{H}\beta - [\text{N II}]/\text{H}\alpha$ (слева) и $[\text{O III}]/\text{H}\beta - [\text{S II}]/\text{H}\alpha$ (справа), построенные для интегральных спектров индивидуальных HII-областей (большие кружки) и для индивидуальных бинированных пикселей (маленькие кружки) в галактике NGC 428. Цветом закодировано расстояние от центра галактики. Черная сплошная кривая из работы [223] на обеих диаграммах и серая сплошная кривая из работы [224] на левой диаграмме отделяют области с фотоионизацией от областей с другими механизмами возбуждения (ударные волны, активные ядра галактик, и т.д.).

5.5.3 Возбуждение газа и содержание химических элементов

Для анализа механизмов возбуждения в разных областях галактики, а также для оценки параметра содержания кислорода $12 + \log(\text{O}/\text{H})$, который является индикатором металличности газа, были проведены спектральные наблюдения с длинной щелью. Были проанализированы отношения эмиссионных линий вдоль щели для каждого спектра. Также для увеличения отношения сигнал/шум были рассмотрены интегральные спектры отдельных HII-областей или протяженных диффузных областей, через которые проходила щель (результаты, полученные для таких областей, показаны большими кружками на Рис. 5.6 и квадратами на Рис. 5.7–5.9).

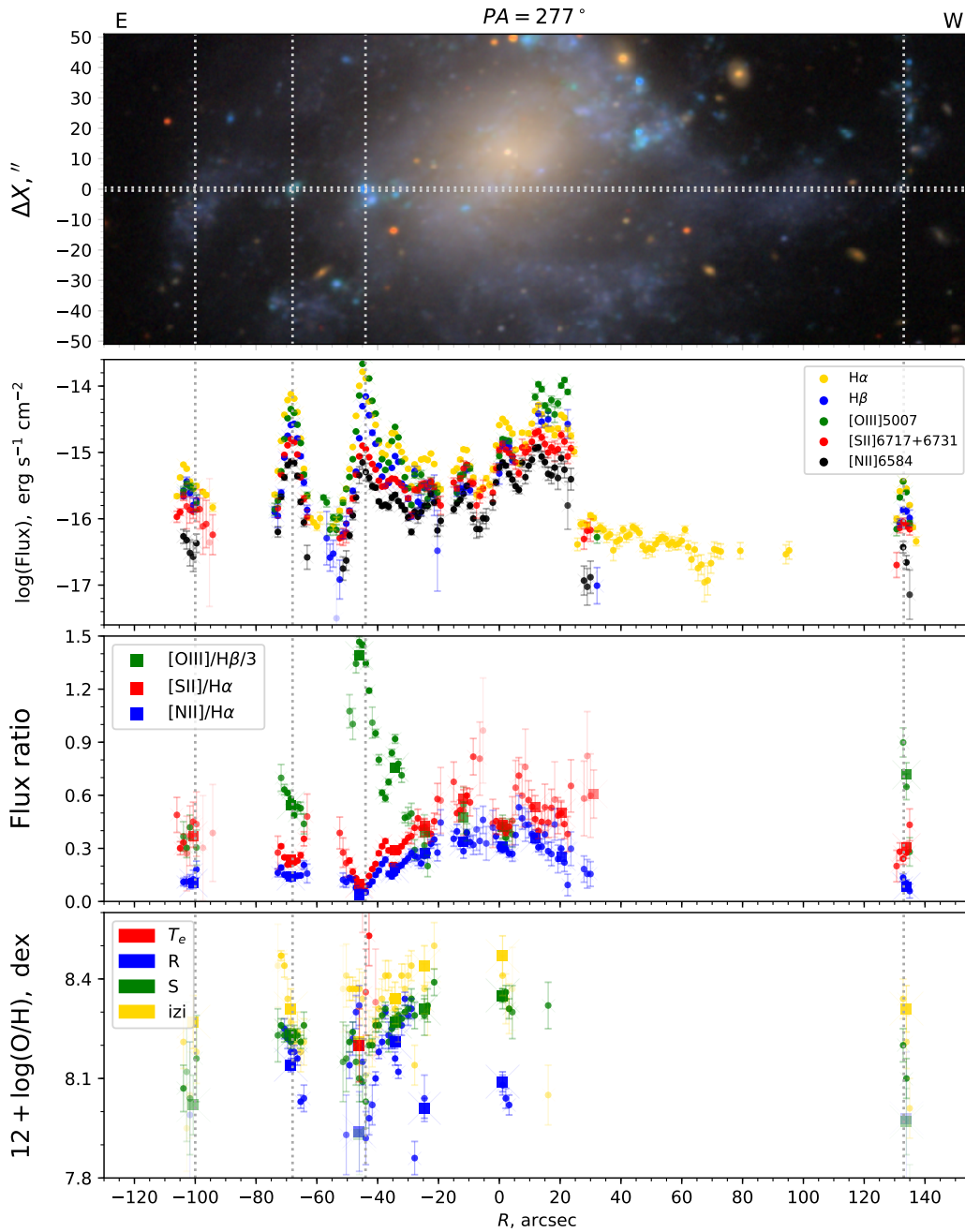


Рис. 5.7 — На первой панели сверху показано цветное изображение галактики NGC 428 в полосах SDSS- g,r,i , горизонтальной пунктирной линией отмечено положение щели. На второй панели сверху приведено распределение потоков в эмиссионных линиях, на третьей сверху панели — распределение их отношений, на нижней панели — распределение содержания кислорода, оцененного несколькими методами вдоль щели с $PA=277$. Квадраты на двух нижних панелях соответствуют значениям, полученным из интегральных спектров отдельных HII-областей, а кружками отмечены значения, полученные для каждого бинированного пикселя вдоль щели. Все точки, соответствующие нефотоионизационному механизму возбуждения согласно Рис. 5.6, замаскированы.

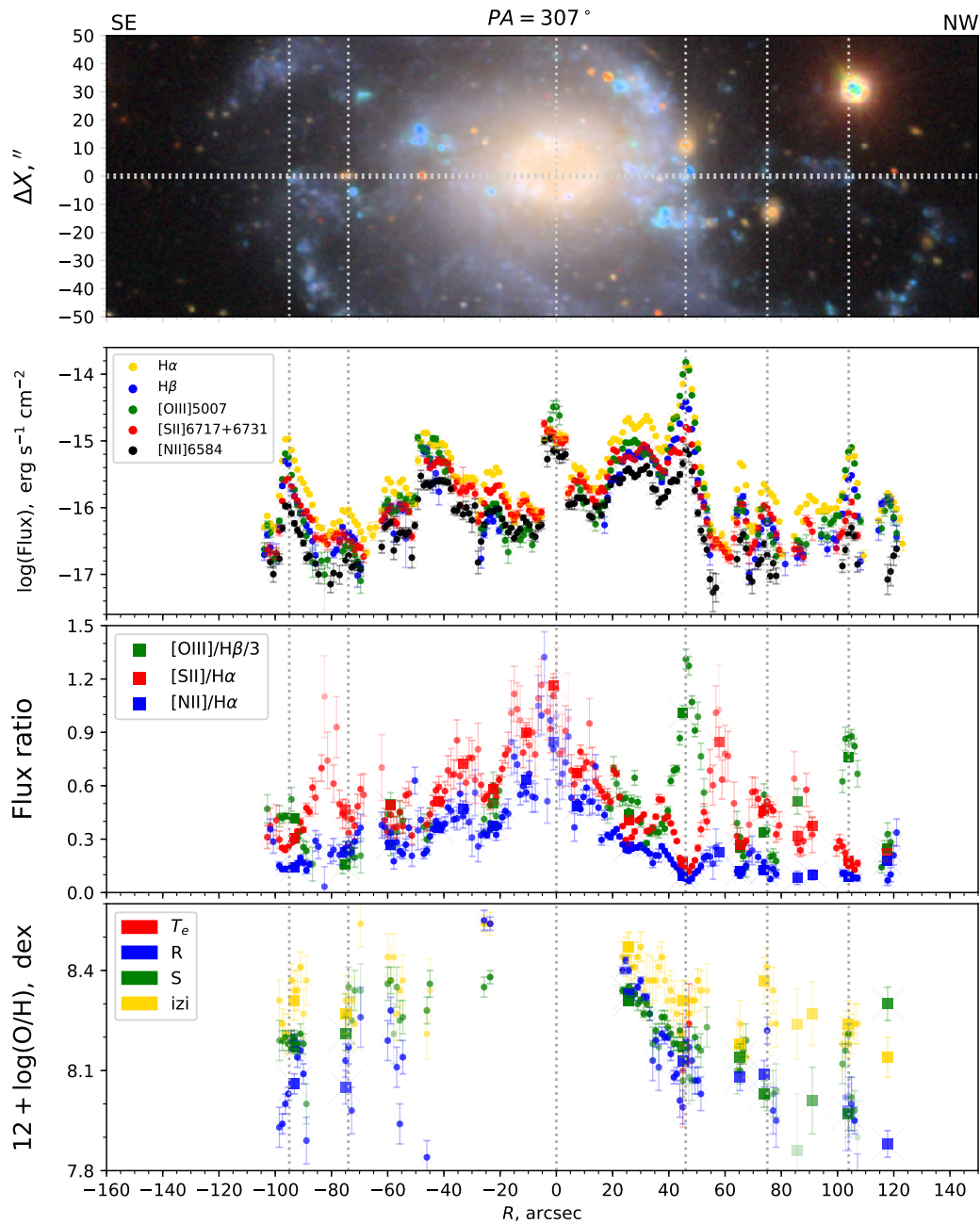


Рис. 5.8 — То же, что на Рис. 5.7 для положения щели с $PA=307$.

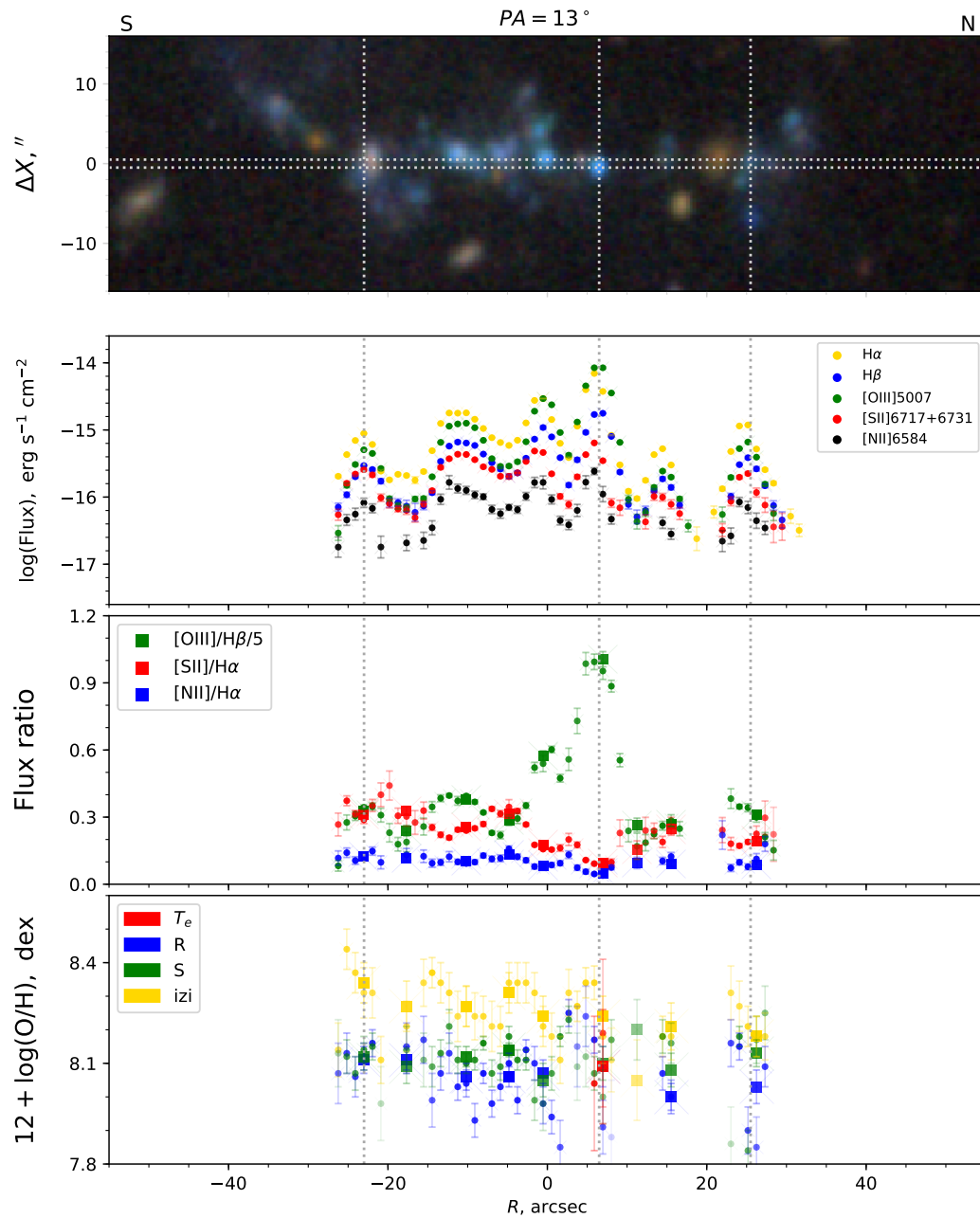


Рис. 5.9 — То же, что на Рис. 5.7 для положения щели с PA=13.

На Рис. 5.6 показано положение областей, через которые проходят щели, на классической диагностической ВРТ-диаграмме [101]. Черная сплошная кривая из работы Кьюли и др., 2001 [223] отделяет регион с фотоионизацией молодыми массивными звездами, от региона со значительным вкладом других источников возбуждения (ударные волны, активные ядра галактик, и т.д.). Точки, лежащие между кривой из [223] и кривой из работы [224] (серая сплошная на рис. 5.6), соответствуют смешанному механизму возбуждения. Области, которые попадают в этот регион диаграммы, вероятно, ионизованы более жестким излучением (в том числе диффузный ионизованный газ, см. [225]), либо связаны с действием ударных волн. Положение всех областей на галактоцентрическом расстоянии $R > 3$ кпк, кроме одной, на ВРТ-диаграммах, соответствует фотоионизационному механизму возбуждения. Ближе к центру галактики наблюдается смешанный механизм возбуждения, и вклад ударных волн должен играть здесь существенную роль. Ударные волны могут быть вызваны столкновением газовых облаков в околоядерном наклонном диске с газом, лежащим в основной плоскости галактики (см. п. 5.6). Несколько точек внутри 1 кпк от центра находятся выше “линии максимального звездообразования” и указывают на влияние активного ядра галактики в этой области.

Как следует из Рис. 5.7–5.9, отношения потоков в линиях для большинства областей за пределами центральной части типичны для НII-областей. Тем не менее, в нескольких нецентральных областях (соответствуют положениям -90, 60 и 75 угловых секунд на Рис. 5.8) наблюдается повышенное отношение потоков $[S II]/H\alpha$. Первые две области соответствуют комплексам звездообразования у концов бара, т.е. регионам, где происходит накопление газа под действием неосесимметричного потенциала бара [см., например, 226]. Однако на карте остаточных скоростей эти области не показывают каких-либо кинематических особенностей, поскольку проекция возможных радиальных движений газовых потоков на луч зрения вблизи большой оси диска пренебрежимо мала. Третья область соответствует НII-области #5, в которой наблюдается подстилающая широкая компонента в линии $H\alpha$ (см. п. 5.5.2).

Поскольку все методы, используемые в настоящей Диссертации для оценки металличности, калибруются по НII-областям или с использованием моделей чистой фотоионизации, из дальнейшего анализа были исключены все области, лежащие выше “линии максимального звездообразования” или в зоне смешанного механизма возбуждения. Распределения содержания кислорода вдоль щелей,

Таблица 5.4 Содержание кислорода и его градиент для NGC 428, оцененные различными методами

Метод	$12+\log(\text{O}/\text{H})_0$, dex	$12+\log(\text{O}/\text{H})^*$, dex	$\Delta(\text{O}/\text{H})$, dex/кпк	$\Delta(\text{O}/\text{H})$, dex/ R_{25}	$\Delta(\text{O}/\text{H})$, dex/ R_e
T_e^{**}	8.35 ± 0.35	8.22 ± 0.15	-0.02 ± 0.05	-0.25 ± 0.47	-0.09 ± 0.17
R	8.23 ± 0.06	8.13 ± 0.07	-0.02 ± 0.01	-0.20 ± 0.07	-0.07 ± 0.03
S	8.33 ± 0.05	8.22 ± 0.06	-0.02 ± 0.01	-0.22 ± 0.06	-0.08 ± 0.02
IZI	8.46 ± 0.04	8.36 ± 0.04	-0.02 ± 0.01	-0.21 ± 0.04	-0.08 ± 0.02

* Оценка содержания кислорода на расстоянии $R_{25}/2$ от центра галактики

** Поскольку оценку содержания кислорода T_e -методом удалось получить только для двух областей, ошибки итоговых величин были рассчитаны из ошибок, оцененных для этих двух точек

полученные с использованием различных методов, приведены на Рис. 5.7–5.9. Все методы показывают сходное поведение металличностей вдоль щелей, но с ожидаемым систематическим смещением. Значительные отличия величин, полученных R -методом, от результатов, полученных другими методами для центральной области галактики, вероятно, вызваны неопределенностью отношения $[\text{O II}]/\text{H}\beta$ из-за значительных вариаций поглощения и его повышения в этом регионе: избыток цвета здесь (полученный из наблюдаемого бальмеровского декремента) составляет $E(B - V) = 0,5 - 1,3^m$, в то время как для других областей галактики более характерны величины $E(B - V) = 0,07 - 0,3^m$. Оценки, полученные эмпирическим S -методом, очень хорошо согласуются с оценками, полученными T_e -методом для двух областей, ярких в $[\text{O III}]$.

Содержание кислорода практически не меняется во внешней части западного кольца звездообразования (см. Рис. 5.9), однако в целом в галактике наблюдается градиент содержания кислорода по радиусу (см. Рис. 5.7–5.8). На Рис. 5.10 отмечены все оценки $12 + \log(\text{O}/\text{H})$, полученные вдоль трех щелей, в зависимости от расстояния данной области от центра галактики. Расстояние от центра было пересчитано с использованием угла наклона и позиционного угла, полученных в п. 5.5.1 для диска NGC 428. Несмотря на большой разброс отдельных измерений, все использованные методы показывают заметный и схожий градиент металличности около $-0,02$ dex/кпк или $-0,21$ dex/ R_{25} ($R_{25} = 122'' \approx 10,5$ кпк, согласно информации из базы данных NED).

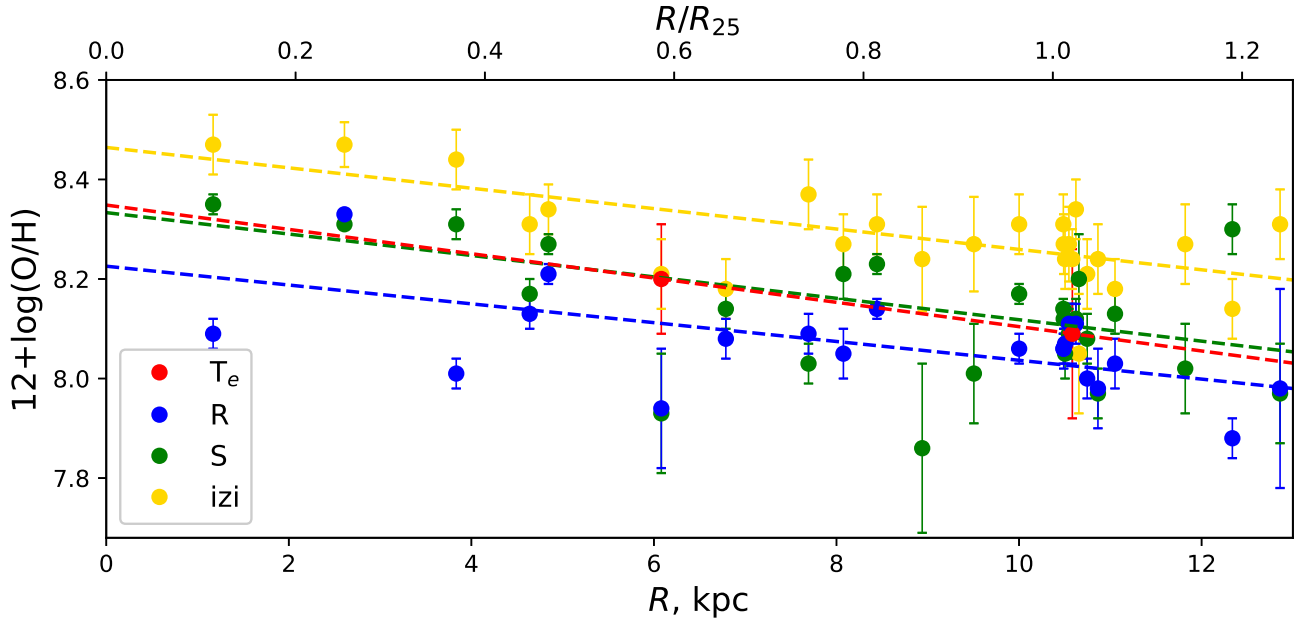


Рис. 5.10 — Радиальное распределение содержания кислорода для галактики NGC 428, полученное с использованием четырех методов. Цветными пунктирными линиями показаны результаты линейной аппроксимации методом наименьших квадратов.

Содержание кислорода в NGC 428 ранее было исследовано в работах Пилюгина и др., 2014 [100] и Князева и др., 2018 [116] с использованием спектров SDSS. В статье Пилюгина и др., 2014 [100] авторы пишут, что в галактике не наблюдается градиента металличности, содержание кислорода в центре галактики $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8,20 \pm 0,06$, однако эта величина получена по данным для небольшого количества областей, сосредоточенных в основном на одинаковом расстоянии от центра галактики. Значение $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8,12 \pm 0,06$, полученное в [116] для одной яркой области HII, согласуется со оценками из работы Пилюгина и др., 2014 [100] в пределах ошибок. Полученная в данной Главе оценка содержания кислорода на радиусе $R = 0,5R_{25}$ согласуется с величинами из указанных выше работ, а наличие оценок для большого числа областей на разных расстояниях от центра галактики позволило измерить градиент металличности (см. Табл. 5.4).

5.6 Обсуждение результатов

На оптических изображениях NGC 428 показывает пекулярную морфологию, которая может указывать на приливные возмущения и взаимодействия галактики. Несмотря на это, крупномасштабная кинематика ионизованного газа не демонстрирует признаков каких-либо существенных возмущений. Действительно, если учесть радиальные движения газа вдоль бара на галактоцентрических расстояниях 1–4 кпк, то поле скоростей хорошо описывается моделью кругового вращения плоского тонкого диска. Круговое вращение преобладает также в районе кольца звездообразования на западной периферии галактики. В этой области был обнаружен лишь небольшой наклон на несколько градусов относительно плоскости диска внутри оптического радиуса R_{25} . Однако тщательный анализ нового глубокого поля скоростей в линии $H\alpha$ позволил обнаружить две кинематические особенности в газовом диске NGC 428, которые могут быть связаны с внешним событием:

- (i) Наклонный диск в околядерных ($r < 10'' = 0,85$ кпк) областях.
- (ii) НII-область #2 с высокими остаточными скоростями.

В работах Корсини и др., 2003 [217] и Моисеева, 2012 [218] рассматривались свойства внутренних наклонных дисков и обсуждалось, что происхождение большинства таких структур связано с захватом внешней материи со спином, отличным от спина родительской галактики. Около 2/3 объектов в каталоге галактик с внутренними полярными дисками и кольцами показывают различные признаки недавнего взаимодействия или слияния [218]. Хорошей иллюстрацией является NGC 7217, для которой в статье Сильченко и др., 2011 [227] было показано, что наблюдаемые свойства галактики согласуются с результатами моделирования из базы данных GalMer для случая малого слияния с богатым газом карликовым компаньоном.

Если принять $PA = 105 \pm 5$ градусов и $\epsilon = 0,2 \pm 0,05$ для этого внутреннего диска в NGC 428, то взаимный угол между внутренним и внешним дисками будет либо 13 ± 7 , либо 83 ± 8 градусов, согласно уравнению (1) из работы [218]. Неоднозначность решения вызвана тем, что только величин PA и i недостаточно для того, чтобы однозначно задать ориентацию диска в пространстве — также необходимо знать, какая часть диска находится ближе к наблюдателю. Если спиральные ветви в NGC 428 “отстающие”, то можно сделать вывод, что

юго-западная часть внешнего диска находится ближе к нам. При этом ориентация внутреннего диска относительно внешнего неизвестна.

В случае, если верно первое решение для взаимной ориентации дисков, внутренний наклонный диск должен быть динамически неустойчивым к прецессии на масштабе нескольких периодов обращения внутренних областей (< 100 млн. лет). Однако, стоит отметить, что стабильность полярных и наклонных околядерных дисков пока что является предметом обсуждений, в отличие от хорошо исследованного случая крупномасштабных полярных колец [228].

Дополнительным указанием на наличие наклонного ядерного диска является распределение условий возбуждения газа вдоль $PA = 277$ градусов, что близко к положению большой оси предполагаемого наклонного диска (Рис. 5.7). Из рисунка видно, что отношения линий $[N II]/H\alpha$ и $[S II]/H\alpha$ показывают пики на расстоянии ~ 10 угловых секунд по обе стороны от ядра. Это является признаком ударного возбуждения и может быть связано с взаимодействием газовых облаков во внешнем и внутреннем дисках. Подобная картина наблюдалась, например, в галактике *Arg 212* [229].

Еще одним регионом, выделяющимся по кинематике, является НII-область #2 (см. п. 5.5.2 и Рис. 5.3, 5.5). Эта яркая компактная область демонстрирует узкий невозмущенный профиль линии $H\alpha$ с лучевой скоростью, которая существенно отличается от предсказанной из модели вращения галактики. Такую кинематику ионизованного газа можно объяснить наличием потока газа, вызванного внешней аккрецией. К сожалению, никаких оценок химического состава для этой области нет.

Градиент содержания кислорода, оцененный для NGC 428 ($-0,21 \text{ dex } R_{25}^{-1}$ или $-0,08 \text{ dex } R_e^{-1}$, принимая эффективный радиус $R_e = 44,68$ угловых секунд из [230]), хорошо согласуется с медианным значением, полученным для большой выборки галактик из обзора MANGA ($\sim -0,08 \text{ dex}/R_e$ согласно [231]), но ниже величины, полученной по данным обзора CALIFA ($\sim -0,11 \text{ dex } R_e^{-1}$, согласно [232]). В работе [233] авторы получили средний градиент металличности $\sim -0,39 \text{ dex}/R_{25}$ для большой выборки близких галактик со звездообразованием, что также существенно выше величины, полученной для NGC 428. В работе [234] было показано, что существует линейная зависимость градиента металличности от $1/R_d$, где $R_d = R_e/1,6783$ — шкала диска. Согласно рис. 3 из этой работы, ожидаемое значение градиента металличности для NGC 428 $\sim -0,04 \text{ dex кпк}^{-1}$, что вдвое больше наблюдаемого.

Наряду с наличием наклонного околоядерного диска и НII-области #2, выделяющейся по кинематике, наблюдаемый небольшой градиент металличности указывает на возможный недавний эпизод аккреции низкометаллического газа на диск галактики (например, малое слияние с богатым газом спутником или захват внешних газовых облаков). Такое событие могло привести к уменьшению наблюдаемого градиента металличности и может также объяснить наблюдаемые особенности морфологии и кинематики.

5.7 Выводы

В данной Главе Диссертации описана выборка, составленная для изучения процессов взаимодействия и аккреции газа в войдах. В выборку вошли галактики поздних типов с пониженной металличностью (по сравнению с зависимостью “светимость-металличность”, полученной для реперной выборки галактик в Местном объеме из [25]) и/или возмущенной морфологией. Десять из восемнадцати объектов оказались изолированными галактиками, а остальные в основном являются членами групп и пар.

В данной Главе представлено исследование самой яркой галактики выборки, NGC 428. На первый взгляд она выглядит как обычная спиральная галактика с довольно однородным радиальным распределением химического состава. В крупномасштабной кинематике ионизованного газа преобладает чисто круговое вращение с радиальными потоками в области бара. Локальные ($\sim 0,5-1$ кпк) возмущения кинематики (двухкомпонентные профили эмиссионных линий H α , высокие остаточные скорости и дисперсии скоростей) однозначно связаны с действием массивных звезд в областях активного звездообразования.

Однако более тщательный анализ имеющихся данных позволил выявить несколько интересных особенностей:

1. Околоядерный ($r < 850$ пк) диск, погруженный в крупномасштабный бар и наклоненный на 13 ± 7 или 83 ± 8 градусов по отношению к диску галактики.
2. НII-область #2 показывает узкий однокомпонентный профиль эмиссионной линии H α и высокие остаточные скорости.

3. Градиент содержания кислорода по радиусу несколько ниже, чем ожидается для подобных галактик.

Все эти особенности, вместе с возмущенной периферией галактики, указывают на аккрецию газа или малое слияние в недавней истории NGC 428, на временной шкале не более ~ 500 млн. лет (что соответствует нескольким оборотам внешнего диска галактики). Результаты исследования представлены в статье [235].

Глава 6. Детальное исследование галактики Ark 18

6.1 Введение

В Главе 5 описана выборка галактик, составленная для поиска и изучения взаимодействий и аккреции в войдах. В данной Главе Диссертации представлен подробный анализ одного из объектов выборки – маломассивной галактики Arakelian 18 [Ark 18; 236]. Ark 18 находится в войде Eridanus (см. Главу 2 и работу [116]) на расстоянии $D \simeq 24,1$ Мpc (расстояние было оценено как $V_{LG}/73$, принимая постоянную Хаббла $H = 73$ км/с/Мпк, V_{LG} — скорость удаления галактики в координатной системе Местной группы из базы данных NED). На принятом расстоянии угловой масштаб составляет 117 пк/". Согласно работе Караченцева и др., 2011 [111] галактика считается изолированной и не имеет каких-либо известных компаньонов. На глубоких оптических изображениях SDSS Stripe 82 [63–65] видны голубые клочковатые спирали низкой поверхностной яркости вокруг яркого, более красного центрального компонента эллиптической формы.

Ark 18 — галактика низкой поверхностной яркости (LSB, low surface brightness) с умеренными массой и размером диска. Галактика не является ни карликовой, ни гигантской, ни ультрадиффузной (UDG, ultra diffuse galaxy). Подобно гигантским галактикам низкой поверхностной яркости (gLSBG, giant LSB galaxies), она имеет выраженную спиральную структуру, но не обладает массивным балджем. Еще одна особенность, которая делает Ark 18 похожей на gLSBG, заключается в том, что она обладает сложной структурой, и включает центральный компонент с высокой поверхностной яркостью, погруженный в протяженный LSB-диск [см., например, 237–239]. Однако диск низкой поверхностной яркости в Ark 18 имеет более умеренный размер по сравнению с gLSBG, ее эффективный радиус составляет ~ 5 кпк (по сравнению с > 21 кпк для gLSBG). Эффективный радиус центрального компонента Ark 18 равен ~ 1 кпк.

На Рис. 6.1 показано положение Ark 18 на диаграмме “размер – светимость”, по сравнению с другими галактиками ранних и поздних типов, галактиками низкой поверхностной яркости, ультрадиффузными, и компактными эллиптическими галактиками (cEs). Поскольку яркий центральный

компонент вносит основной вклад в светимость системы, он определяет положение всей галактики на диаграмме. Для того чтобы исследовать природу не только яркого центра, но и структуры низкой поверхностной яркости в Ark 18, на диаграмме отдельно показано положение LSB-диска, центрального компонента и всей галактики кружками разного цвета. Здесь не учитывается, что галактики из эталонных выборок могут также обладать протяженными компонентами с низким вкладом в их полную светимость, и свойства Ark 18 сравниваются с их глобальными свойствами. Звездная величина в полосе V для Ark 18 была взята из базы данных Hyperleda [94], отношение светимости балджа к диску и эффективные радиусы – из анализа результатов поверхностной фотометрии, приведенного далее в данной Главе. Центральный компонент имеет параметры, близкие к параметрам карликовых галактик ранних типов. В то же время LSB-диск Ark 18 находится близко к области ультрадиффузных и типичных LSB-галактик.

Голубой цвет спиралей Ark 18 указывает на присутствие молодых звезд, которые могли образоваться из аккрецированного на галактику газа. Ark 18 – богатая газом галактика, что также согласуется со сценарием внешней аккреции газа. Масса нейтрального водорода HI, $\log M_{HI}/M_{\odot} = 9,3$, была рассчитана для галактики с использованием потока в линии 21см (HI) из каталога HIPASS [240] и расстояния, принятого для Ark 18 в данном исследовании.

Основные свойства Ark 18, полученные в данном исследовании или взятые из литературы, приведены в Таблице 6.1: координаты RA, Dec (J2000); принятое до галактики расстояние D ; видимая звездная величина m_B в полосе B , оцененная по изображениям SDSS Stripe82 (п. 6.3.1); абсолютная звездная величина M_B , скорректированная за межзвездное поглощение в Галактике [96]; темп звездообразования (SFR) (п. 6.3.1); полная масса атомарного водорода $\log(M_{HI})$; отношение массы водорода к светимости в полосе B M_{HI}/L_B ; системная скорость V_{sys} , а также углы наклона i и позиционные углы PA отдельных компонентов, оцененные из анализа фотометрии и кинематики (п. 6.3.2); содержание кислорода $12 + \log(O/H)$ (п. 6.3.4).

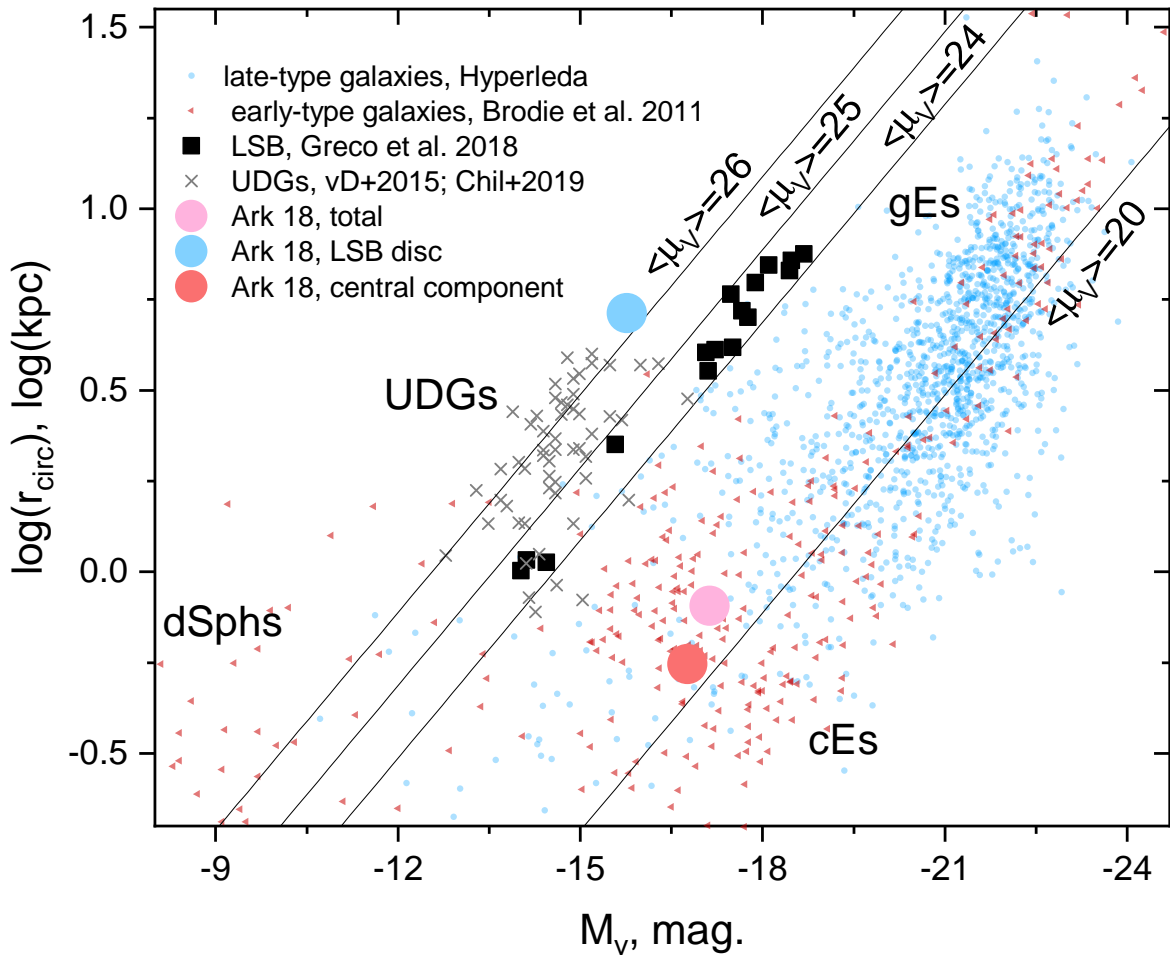


Рис. 6.1 — Положение Ark 18 на диаграмме “размер – светимость” (большие кружки). По оси ординат отложен логарифм циркуляризованного эффективного радиуса, оцененного в соответствии с формулой из [241] $r_{circ} = (1 - \epsilon)^{1/2} r_{eff}$, где ϵ – эллиптичность, r_{eff} – радиус, содержащий половину светимости галактики. По оси абсцисс отложена абсолютная звездная величина в полосе V. Красный, розовый и синий кружки относятся к центральному компоненту, всей галактике и LSB-диску, соответственно. Черными квадратами отмечено положение LSB-галактик из работы [241], для которых были доступны красные смещения в базе данных Simbad. Небольшими красными треугольниками отмечено положение галактик ранних типов из работы [242]. Маленькие синие кружки соответствуют галактикам позднего типа (с $t > 2$, где t – морфологический тип) из базы данных Hyperleđa. Серые кресты отмечают положение ультрадиффузных галактик из [243], [244] и [245]. Прямые линии соответствуют линиям постоянной средней поверхностной яркости.

Таблица 6.1 Основные свойства Ark 18

Параметр	Величина
RA (J2000) ^a	00:51:59.62
Dec (J2000) ^a	-00:29:12.2
D ^a , Мпк	24.1
m_B	14.85
M_B	-17.2
SFR, M_\odot /год	0.1
$\log M_{HI}^b$	9.3
M_{HI}/L_B	2.3
i , deg	67 ± 1 (внутренний ^c) 58 ± 3 (внешний ^d)
PA, deg	358 ± 3 (внутренний ^c) 344 ± 5 (внешний ^d)
V_{sys} , км/с	1627 ± 9
$12 + \log(O/H)$	8.20 ± 0.04

Все величины получены в рамках данного исследования, если иное не указано в дополнительной информации в комментариях к Таблице.

^a По данным NASA/IPAC Extragalactic Database (NED)

^b Рассчитана с использованием потока в линии 21см (HI) из каталога HIPASS [240] и расстояния, принятого в данном исследовании

^c Оценено из фотометрии, для $r < 30''$

^d Оценено из кинематики, для $r > 30''$

6.2 Используемые данные

Наблюдения проводились в прямом фокусе 6-м телескопа БТА с использованием многорежимного фокального редуктора первичного фокуса SCORPIO-2 [49], в длиннощелевом режиме, а также в режиме сканирующего интерферометра Фабри-Перо (ИФП). Описание наблюдений и обработки полученных данных приведено в п. 1.1.3 Также были использованы доступные архивные изображения и спектры SDSS для двух областей галактики.

Журнал наблюдений приведен в Таблице 6.2, и содержит следующие данные: (1) информация о типе полученных данных, а также позиционный угол

Таблица 6.2 Журнал наблюдений

Метод	Дата наблюдений	T_{exp} , с	Поле зрения	"/рх	θ , "	Спектр. диапазон	$\delta\lambda$, Å
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
LS PA=145	19.11.2019	7200	1" × 6.1'	0.36	1.2	3650–7250	5.3
LS PA=171	20.11.2019	6000	1" × 6.1'	0.36	2.5	3650–7250	5.3
LS PA=118	19.12.2019	10800	1" × 6.1'	0.36	2.5	3650–7250	5.3
ИФП	23.12.2016	11430	6.1' × 6.1'	0.71	2.4	8.7Å вблизи H α	0.4 (18 км/с)

в случае наблюдений с длинной щелью; (2) дата наблюдений; (3) общее время экспозиции T_{exp} ; (4) поле зрения (или ширина и длина щели); (5) угловой размер пикселя; (6) качество изображения, соответствующее конечному угловому разрешению; (7) доступный спектральный диапазон; и (8) итоговое спектральное разрешение $\delta\lambda$.

Наблюдения в эмиссионной линии H α проводились со сканирующим ИФП высокого разрешения. В процессе сканирования было последовательно получено 40 интерферограмм при различных расстояниях между пластинами ИФП. Наблюдения проводились для двух позиционных углов, для того чтобы убрать блики, согласно работе [54]. Экспозиция для каждого отдельного канала составляла 150 с, однако для 19 каналов для второй ориентации поля были получены экспозиции только по 120 с.

В ходе наблюдений качество изображения составляло 1,1–1,8". Итоговое пространственное разрешение после сглаживания в процессе обработки данных составило $\sim 2,4''$.

Профили линии H α анализировались путем вписывания однокомпонентного профиля Фойгта [54], что позволяет получить поток, лучевую скорость и дисперсию скоростей с учетом инструментального уширения для каждого компонента. На итоговых картах были замаскированы области с низким отношением сигнал/шум ($S/N < 3$). Типичная ошибка оценки скорости для этого S/N соответствует ~ 9 км/с и уменьшается до ~ 2 км/с при $S/N = 10$ [56]. В результате было получено глубокое изображение в линии H α , на котором видно большое количество областей звездообразования в LSB-диске Ark 18 (см. Рис. 6.2). Анализ полученных данных по кинематике ионизованного газа приведен в п. 6.3.2. Полученное изображение в линии H α было откалибровано при помощи карты H α , полученной на Паломарском телескопе и представленной в работе [246]. Была построена линейная регрессия между значениями потока

для ярких в $H\alpha$ областей на обеих картах, затем она была экстраполирована на всю карту.

Было получено три спектра при разных положениях щели. На Рис. 6.2 показаны положения щелей, наложенные на цветное изображение SDSS Stripe 82 и на карту $H\alpha$. Одна из щелей, с $PA = 171^\circ$, пересекает центр галактики и самое яркое звездное скопление, смещенное относительно центра галактики (здесь и далее обозначается как звездное сверхскопление, или SSC, super star cluster). При двух других положениях ($PA = 118^\circ$ и $PA = 145^\circ$) щель проходит через некоторые из самых ярких областей звездообразования в LSB-диске, которые были обнаружены при наблюдениях с ИФП. Щель с $PA = 118^\circ$ также проходит через относительно яркий “хвост” $H\alpha$ вблизи центральной части галактики с минимальной измеренной дисперсией скоростей газа (см. Рис. 6.3). Эти данные используются далее для анализа механизма возбуждения и химического состава газа (см. п. 6.3.4).

6.3 Результаты

6.3.1 Морфология и темп звездообразования Ark 18

На цветном изображении gri , построенном с использованием данных из SDSS Stripe 82 (Рис. 6.2, сверху), хорошо заметен голубой диск низкой поверхностной яркости с флоккулентной спиральной структурой, в который погружен более яркий и более красный центральный компонент. В южной части центрального компонента расположена яркая голубая область звездообразования, обозначенная в данном исследовании как “SSC”. Она является самой яркой областью звездообразования в галактике, на ее долю приходится около 55% всего излучения центрального компонента в $H\alpha$. Вторая по яркости HII-область с вкладом около 26% расположена в фотометрическом центре галактики (“centre”).

На карте потоков в линии $H\alpha$, полученной из данных ИФП (Рис. 6.2, внизу), видно, что многие HII-области низкой светимости находятся в диске низкой поверхностной яркости на разных расстояниях от центра галактики. Они

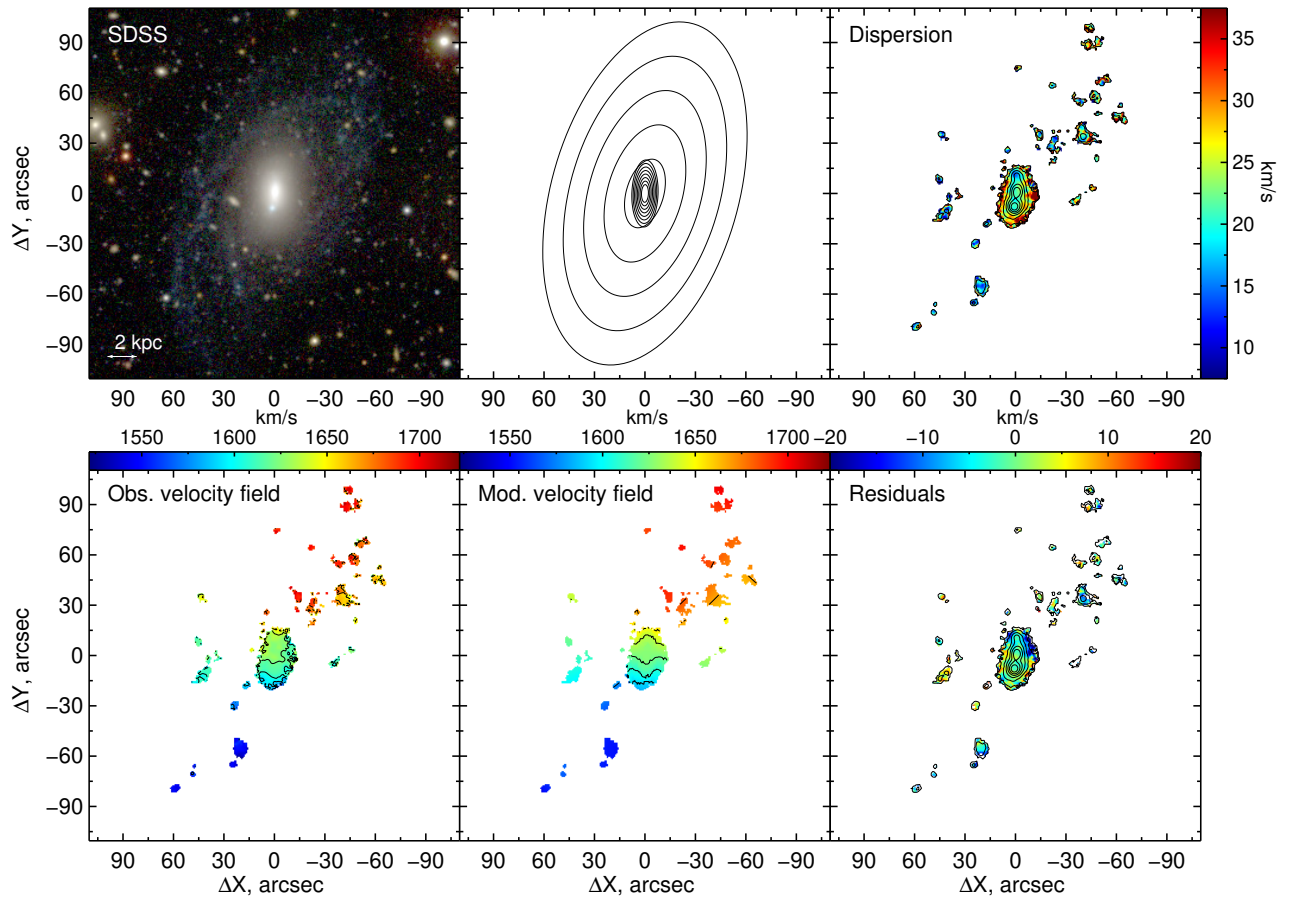


Рис. 6.3 — **Сверху:** цветное комбинированное изображение в полосах g , r и i из SDSS Stripe82 (слева); принятые ориентации газовых орбит для внутренних и внешних областей диска (в центре); карта дисперсий скоростей ионизованного газа, контурами нанесены уровни поверхностной яркости в линии $H\alpha$ (справа). **Снизу:** наблюдаемое поле скоростей ионизованного газа (слева); модельное поле скоростей, построенное с использованием метода наклонных колец (в центре); карта остаточных скоростей, полученная при вычитании модельного поля скоростей из наблюдаемого (справа). На последних четырех панелях области с $S/N < 3$ были замаскированы.

относятся к голубым спиральным рукавам. Поток в линии $H\alpha$ от LSB-диска составляет примерно $1,7 \times 10^{-14}$ эрг/с/см², в то время как полный измеренный поток $H\alpha$ от галактики $1,9 \times 10^{-13}$ эрг/с/см². Таким образом, вклад LSB-диска в общую светимость Ark 18 в $H\alpha$ составляет около 9% (не учитывая областей, которые могли наложиться на центральный компонент). Наблюдаемые потоки в линии $H\alpha$ соответствуют полному темпу звездообразования $SFR \simeq 0,1 M_{\odot}/\text{год}$, если использовать соотношение из работы [247]. Темпы звездообразования для SSC и центра равны $\sim 0,05$ и $\sim 0,023 M_{\odot}/\text{год}$, соответственно.

Севернее центра галактики расположен протяженный “хвост” ионизованного газа с III-областью на конце (эта структура лучше видна на Рис. 6.3 и 6.6). Этот “хвост” заметно изгибается по мере удаления от центра галактики. Он почти неразличим на изображениях SDSS, однако хорошо заметен на картах $H\alpha$, несмотря на довольно низкую яркость (около 3% от общего потока $H\alpha$). Вблизи “хвоста” наблюдается минимальное значение дисперсии скоростей σ_{gas} в линии $H\alpha$ в центральной части Ark 18, при этом поле скоростей не показывает никаких особенностей в этой области (см. Рис. 6.3).

Видимая звездная величина в полосе B , приведенная в Таблице 6.1, была получена при проведении апертурной фотометрии изображений SDSS Stripe 82 в полосах g и r . Для пересчета из звездных величин в полосах g и r в звездную величину в полосе B было использовано преобразование из [58]. При проведении апертурной фотометрии объекты переднего и заднего фона были замаскированы.

Чтобы проверить, как фотометрический позиционный угол и угол наклона Ark 18 изменяются с радиусом, был проведен изофотный анализ изображений SDSS Stripe 82 в полосах g , r и i с использованием процедуры ELLIPSE из IRAF. Фоновые объекты и яркие области звездообразования Ark 18 были замаскированы. Аналогичным образом был проведен анализ данных WISE [207] на 3,4 мкм и Spitzer на 3,6 мкм. Поведение углов наклона и позиционных углов вдоль радиуса, полученных из анализа разных данных, согласуются между собой, за исключением самой центральной части, из-за низкого разрешения изображений WISE и Spitzer. Для последующего анализа были использованы значения, полученные для более глубоких данных SDSS Stripe 82. В п. 6.3.2 радиальные вариации позиционного угла, полученные из изофотного анализа, сравниваются с вариациями позиционного угла, оцененного из анализа кинематики.

Декомпозиция двумерного изображения SDSS Stripe 82 в полосе i проводилась при помощи пакета GALFIT [248] с использованием двухкомпонентной модели, включающей внутренний компонент с профилем Серсика и внешний экспоненциальный диск. Были получены следующие параметры компонентов: эффективный радиус $r_e = 6,98''$, эффективная поверхностная яркость $\mu_e = 20,76 \text{ mag/arcsec}^2$, индекс Серсика $n = 1,69$ для центрального компонента; эффективный радиус $r_e = 39,25''$, эффективная поверхностная яркость $\mu_e = 25,59 \text{ mag/arcsec}^2$, индекс Серсика $n = 1$ для диска (последний при декомпозиции фиксировался). Согласно критериям, приводимым, например, в работе [249], внутренний компонент является псевдобалджем, поскольку имеет низкий индекс Серсика¹ $n < 2$, показывает активное звездообразование и не выглядит более круглым, чем окружающий его диск. В то же время высокое отношение светимости балджа к полной светимости, наблюдаемое в Ark 18, не характерно для псевдобалджей [249]. Поскольку известно, что формальные статистические ошибки GALFIT значительно занижены [см., например, 250], в данной Главе они не приводятся. Для того, чтобы убедиться в надежности полученных результатов, была также выполнена декомпозиция одномерного азимутально усредненного профиля поверхностной яркости, полученного с использованием процедуры ELLIPSE для изображения i SDSS Stripe 82. Результаты, полученные для центрального компонента, согласуются в пределах 10%, для диска низкой поверхностной яркости – в пределах 23%. Эти значения могут быть использованы в качестве ошибок полученных величин.

6.3.2 Глобальная кинематика ионизованного газа

На Рис. 6.3 приведены карты лучевых скоростей и дисперсии скоростей (σ_{gas}), полученные из данных ИФП в линии $\text{H}\alpha$. Поле скоростей показывает вращение диска низкой поверхностной яркости в том же направлении, что и центральная яркая часть галактики, однако амплитуда лучевой скорости в центральных областях ниже (около 20 – 30 км/с). Наблюдаемая дисперсия скоростей $\text{H}\alpha$ в Ark 18 является типичной для карликовых галактик [251].

¹При декомпозиции одномерных профилей поверхностной яркости, полученных из изофотного анализа, были получены еще более низкие значения $n \sim 1.4$

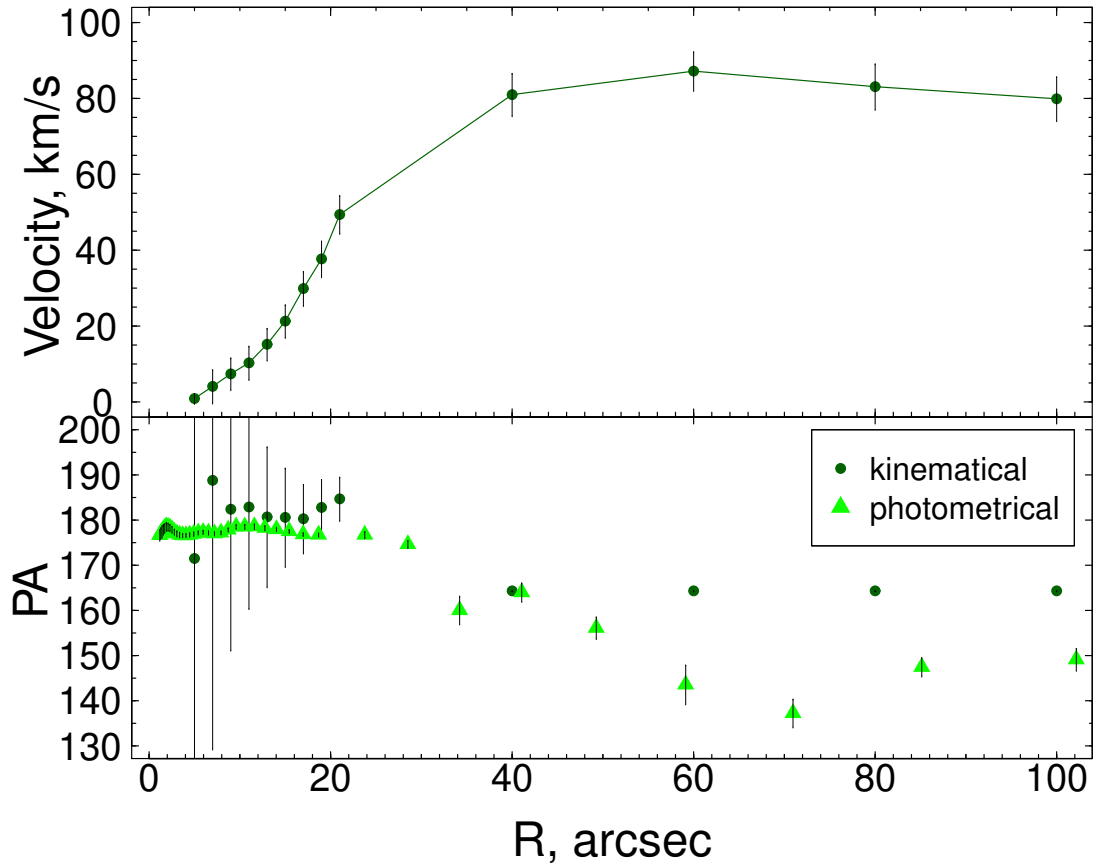


Рис. 6.4 — **Сверху:** Кривая вращения для Ar 18, полученная из наблюдаемого поля скоростей с использованием метода наклонных колец. **Снизу:** Распределение позиционных углов вдоль большой оси галактики. Кинематические позиционные углы, полученные из анализа наблюдаемого поля скоростей, отмечены темно-зелеными кружками (с использованием метода наклонных колец на $r < 30''$ и модели плоского диска для внешних областей). Фотометрические позиционные углы, полученные из изофотного анализа данных Stripe 82 в полосе r , отмечены светло-зелеными треугольниками.

Согласно результатам проведенного изофотного анализа, позиционный угол большой оси центрального компонента Ark 18 составляет $PA \sim -2^\circ$ (на $r < 30''$), в то время как для внешнего диска $PA = 150 - 160^\circ$ (или $330 - 340^\circ$). Эллиптичность внешнего диска меньше, чем эллиптичность внутренней области. Такие отличия можно интерпретировать в рамках двух возможных сценариев:

1. Диск низкой поверхностной яркости со звездным баром в центре. В таком случае должен наблюдаться разворот линий равных скоростей из-за некруговых (радиальных) движений, отражающих движение газовых потоков в гравитационном потенциале бара [см., например, 252, 253].
2. Многокомпонентная система, в которой вращение внутреннего и внешнего компонента происходит в двух разных плоскостях, как, например, в случае галактик с полярными кольцами [см., например, 254].

Как обсуждалось в Главе 5, анализ двумерного поля скоростей ионизованного газа и сравнение радиального поведения кинематического (PA_{kin}) и фотометрического (PA_{phot}) позиционных углов большой оси галактики позволяет различить два этих сценария. В случае диска со звездным баром ожидается разворот PA_{kin} в направлении, противоположном развороту большой оси внутренних изофот PA_{phot} . В случае многокомпонентной системы с несколькими спинами они должны хорошо согласоваться [см., например, 214, 255]. Такой анализ, приведенный в Главе 5, а также в соответствующей статье [235], позволил сделать однозначный вывод о наличии бара в галактике NGC 428.

Поле скоростей в линии H α было проанализировано с использованием метода “наклонных колец” [215], модифицированного для исследования полей скоростей ионизованного газа карликовых галактик, как описано в работе [164]. Положение центра было зафиксировано, а поле скоростей было разбито на узкие эллиптические кольца, при этом для колец предварительно принимались угол наклона галактики i_0 и позиционный угол PA_0 , определенные из анализа фотометрии (п. 6.3.1). В предположении, что Ark 18 представляет собой систему с несколькими спинами, в качестве начального приближения i и PA_{kin} использовались два набора i_0 и PA_0 (отдельно для внутреннего и внешнего диска). В предположении сценария “бар + диск” была использована только ориентация внешнего диска. В каждом кольце с помощью χ^2 -минимизации определялись параметры модели кругового вращения: PA_{kin} , скорость вращения V_{rot} и си-

стемная скорость V_{sys} . На следующей итерации V_{sys} фиксировалось на среднем значении по радиусу. Угол наклона круговых орбит также фиксировался на значении i_0 , поскольку некруговые движения газа во внутренних областях и плохое заполнение поля скоростей внешнего диска не позволили напрямую оценить i из кинематики газа. Кривая вращения $V_{rot}(r)$ и распределение $PA_{kin}(r)$ представлены на Рис. 6.4.

Построение модельных полей скоростей в рамках обоих предположений о структуре галактики и их анализ привели к одному и тому же выводу: значения PA_{kin} во внутренней области ($r < 30''$) хорошо согласуются с PA_{phot} , и повернуты (на $15 - 25^\circ$), относительно PA_0 внешнего диска. Такое радиальное поведение PA_{kin} невозможно в случае движений газа в гравитационном потенциале бара – в этом случае разворот PA_{kin} должен происходить в направлении, противоположном развороту большой оси внутренних изофот PA_{phot} [214, 255].

Таким образом, можно сделать вывод, что Ark 18 представляет собой двухкомпонентную систему, в которой вращение внутреннего и внешнего компонента происходит в разных плоскостях. Чтобы лучше оценить кинематические параметры внешнего диска, наблюдаемое поле скоростей на $r = 30 - 100''$ было аппроксимировано моделью “плоского диска” с постоянными PA_{kin} и i . Полученная кривая вращения и распределение PA_{kin} и PA_{phot} по радиусу приведены на Рис. 6.4. Модельное поле скоростей (полученное с использованием метода “наклонных колец” для внутреннего компонента и модели “плоского диска” для внешнего) и карта остаточных скоростей, после вычитания модельного поля скоростей из наблюдаемого, приведены на Рис. 6.3. Также на этом рисунке показаны принятые ориентации газовых орбит для внутренних и внешних областей, согласно величинам из Таблицы 6.1.

В качестве кинематического центра была принята “центральная” НII-область, которая была обозначена выше как “centre” (см. Рис. 6.2) и совпадает с фотометрическим центром галактики в полосе i SDSS. Эта область также совпадает с центром симметрии поля скоростей внутреннего диска. Также отдельно в качестве кинематического центра (либо внутреннего, либо внешнего диска) была рассмотрена яркая область звездообразования SSC. Это предположение приводит к аналогичным выводам о кинематике газа, однако появляется больший разброс PA_{kin} в центральных областях и разница в значениях V_{sys} между внутренним и внешним компонентами на ~ 15 км/с. Это

позволяет сделать вывод, что область SSC смещена относительно кинематического центра галактики.

Из значений PA и i , приведенных в Таблице 6.1, можно оценить угол между внутренним и внешним компонентами в диапазоне $\Delta i = 20 - 30^\circ$, в зависимости от взаимной ориентации спинов [см. уравнение (1) в 229]. Исходя из этого, можно заключить, что в Ark 18 наблюдается не полярный, а искривленный внешний диск. К сожалению, поле скоростей внешнего диска недостаточно хорошо заполнено для изучения радиального изменения угла наклона диска и позиционного угла во внешних областях. Для более детального исследования этого вопроса потребуются данные о распределении и кинематике атомарного водорода HI с высоким разрешением.

6.3.3 Оценка возрастов звезд из широкополосной фотометрии

Для анализа цветов Ark 18 использовались эволюционные треки из пакета PEGASE.2 [140]. Для оценки цветов была проведена апертурная фотометрия центрального компонента и внешнего диска низкой поверхностной яркости на изображениях в фильтрах u, g, r, i SDSS Stripe 82, фотометрия проводилась вне ярких областей звездообразования. После этого цвета $u-g, g-r, r-i$, исправленные за покраснение, сравнивались с синтетическими эволюционными треками для металличности $Z=0,004$ (что соответствует $\sim 0,2Z_\odot$) – эта величина близка к оценкам, полученным для Ark 18 (см. п. 6.3.4). В качестве двух крайних случаев использовались треки для двух законов звездообразования: непрерывное звездообразование с постоянным темпом ЗО, и мгновенная вспышка ЗО, в предположении двух начальных функций масс – Солпитера [165] и Кроупы [166]. Соответствующие диаграммы приведены на Рис. 6.5.

Из Рис. 6.5 видно, что цвета центрального компонента (исключая самый центральный регион и область SSC) довольно красные. Они соответствуют времени $\sim 13-14$ млрд.лет, прошедшему с начала ЗО для модели непрерывного ЗО (т.е. цвета соответствуют цветам старого звездного населения), либо, что более вероятно, наблюдается смесь старого и молодого звездного населения. При этом центральный компонент находится в “голубом облаке”, куда попадают галактики с нормальной историей звездообразования в трехмерном пространстве

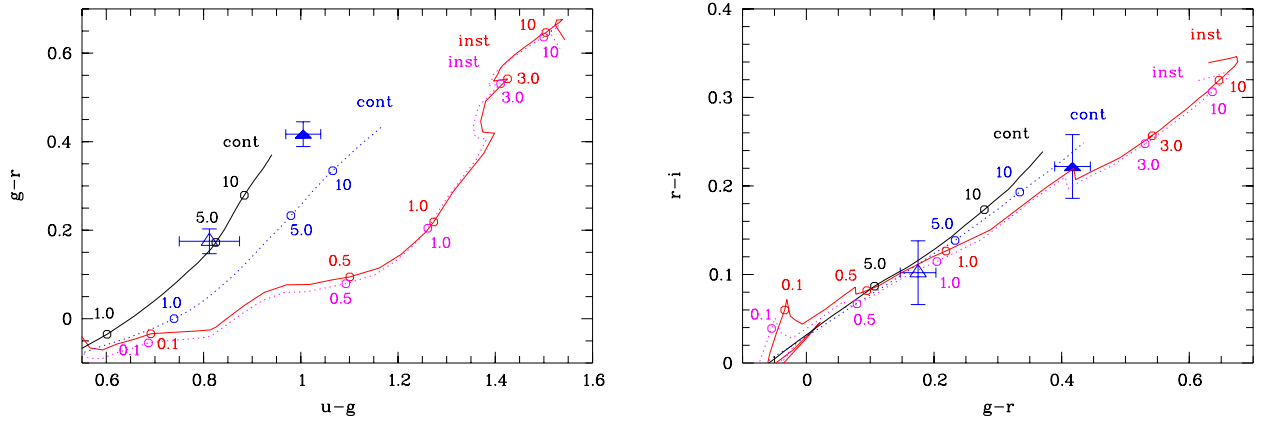


Рис. 6.5 — Диаграммы “цвет – цвет”. Слева: $(g - r) - (u - g)$; Справа: $(r - i) - (g - r)$. Синими заполненными треугольниками отмечены цвета центрального компонента Ark 18, синими незаполненными треугольниками отмечены цвета внешнего диска низкой поверхностной яркости. Все цвета были исправлены за покраснение. Цветными линиями отмечены эволюционные треки из пакета PEGASE.2 [140] для $Z = 0,004$, для двух крайних случаев законов звездообразования – мгновенная (inst) вспышка звездообразования для двух начальных функций масс (IMF): Солпитер [165] (красная сплошная линия) и Кроупа [166] (красная пунктирная линия); непрерывное звездообразование (cont) для тех же IMF: Солпитер (черная сплошная линия) и Кроупа (черная пунктирная линия). Значения вдоль треков – время от начала звездообразования в миллиардах лет.

параметров “ $(g - r) - (NUV - r) - M_r$ ” [256]. Цвета внешнего диска низкой поверхностной яркости (за исключением относительно ярких областей ЗО) соответствуют значительно более молодому возрасту звездного населения, ~ 5 млрд. лет, для модели непрерывного ЗО.

6.3.4 Условия возбуждения газа и содержание химических элементов

Химический состав межзвездной среды в Ark 18 ранее подробно не изучался. Оценка содержания кислорода, которое является наиболее широко используемым индикатором металличности газа, была получена в работе [116] и представлена также в Главе 2 данной Диссертации. Согласно этой оценке,

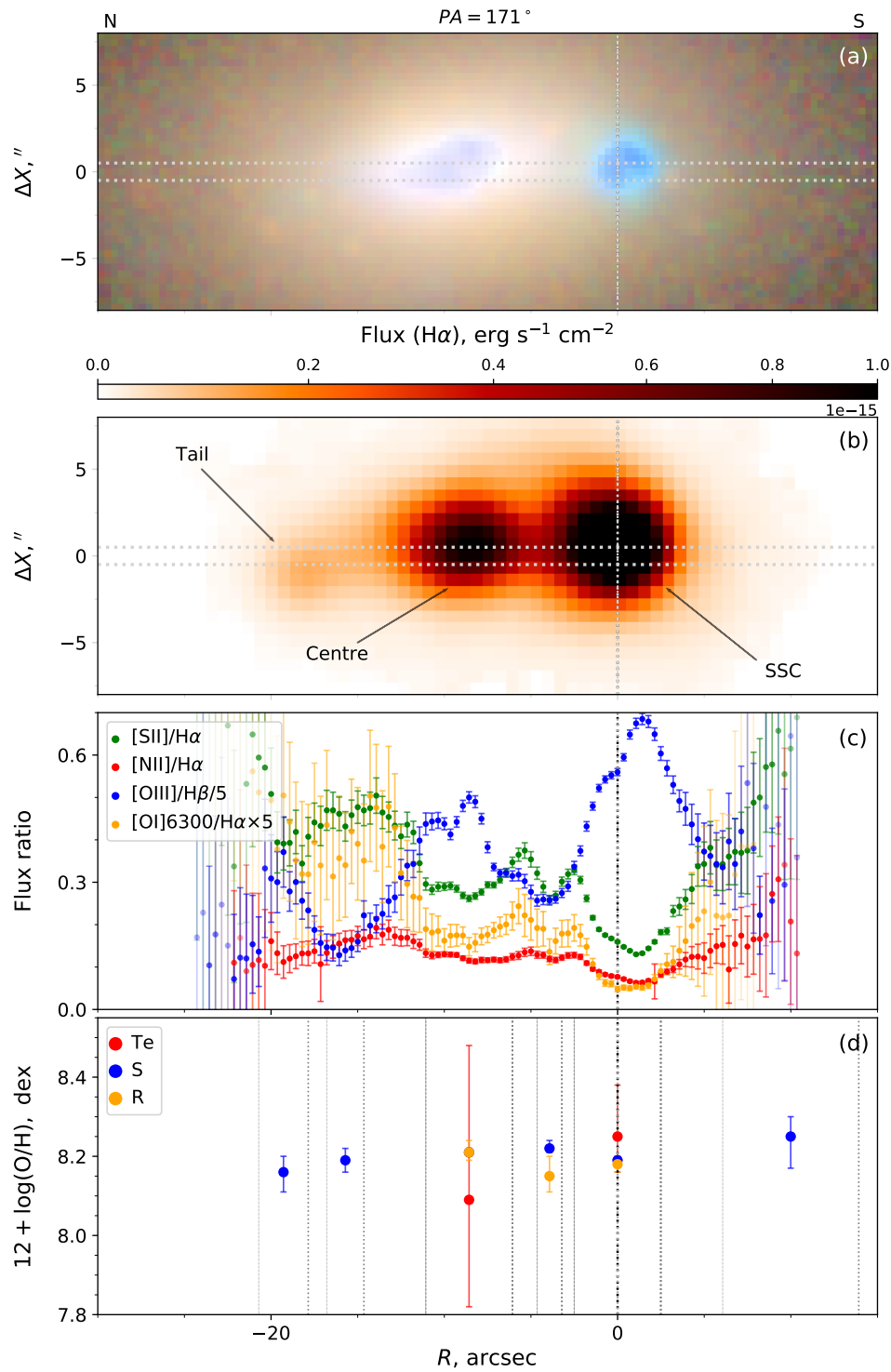


Рис. 6.6 — Результаты анализа эмиссионного спектра (PA=171). Положение щели нанесено горизонтальными пунктирными линиями на цветное изображение в фильтрах *gri* SDSS (a), а также на карту потоков в линии $H\alpha$ (b). На панели (c) показано распределение вдоль щели отношений потоков в эмиссионных линиях, на панели (d) – распределение содержания кислорода, оцененного несколькими методами (см. п. 6.3.4). Вертикальными линиями на панели (d) отмечены границы, в пределах которых интегрировался спектр для оценки содержания кислорода.

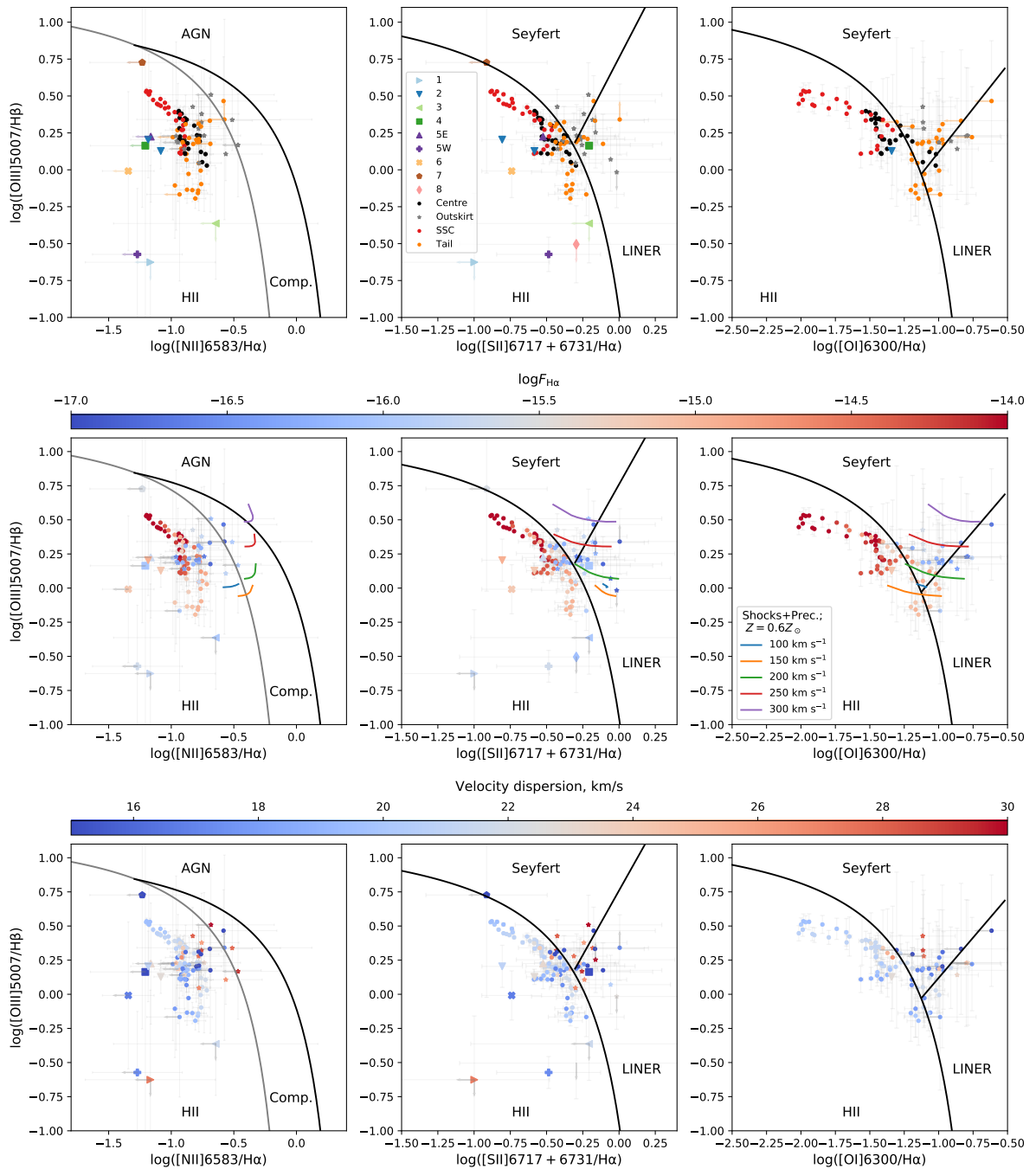


Рис. 6.7 — Диагностические диаграммы для HII-областей в Ark 18, цветом закодированы: регионы (верхний ряд; названия даны согласно Рис. 6.2 и Таблицам 6.3, 6.4), поверхностная яркость в линии H α (средний ряд) и дисперсия скоростей H α (нижний ряд). Кружками и звездочками показаны значения для регионов SSC, “tail” и “outskirt”, полученные для каждого пикселя вдоль щели в пределах соответствующей области. Значения, отмеченные другими символами, получены из интегральных спектров для соответствующей области. Черные и серые изогнутые линии разделяют области с разным механизмом возбуждения, из [223] и [224], соответственно, прямая линия - из [257]. Цветные линии на средних панелях соответствуют линиям постоянной скорости смоделированных ударных волн для $Z = 0,6Z_{\odot}$, согласно работе [102].

полученной по спектру SDSS для области SSC, $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8,08 \pm 0,12$ dex. Для центра галактики было получено (также из спектра SDSS) значительно более низкое значение $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \sim 7,55$ dex, однако к этой оценке стоит относиться с осторожностью из-за ограничений, обсуждаемых ниже. Далее в этом разделе приводится более детальный анализ распределения металличности в этой галактике, с использованием собственных длиннощелевых наблюдений.

На Рис. 6.2 показаны положения щелей во время спектральных наблюдений, наложенные на изображения SDSS и карту $\text{H}\alpha$, а также даны обозначения областей, через которые прошли щели и которые будут использоваться в последующем анализе. Щель с $PA = 171^\circ$ проходит через область SSC и центр галактики, а щели $PA = 118^\circ$ и $PA = 145^\circ$ пересекают 8 областей звездообразования в диске низкой поверхностной яркости (они обозначены цифрами²), а также периферию центрального компонента (эта область обозначена как “outskirt”). Щели с $PA = 171^\circ$ и $PA = 118^\circ$ также пересекают слабый “хвост” ионизованного газа (обозначен как “tail”), который заметен на карте $\text{H}\alpha$ в северной части центрального компонента галактики – ранее он упоминался в п. 6.3.1. Из полученных спектров удалось извлечь пространственное распределение отношений потоков и содержания кислорода вдоль щели только для центральной части галактики (включая “хвост”) – они приведены на Рис. 6.6 для щели $PA = 171^\circ$. Для областей в диске низкой поверхностной яркости оценки были получены по спектрам, интегрированным в заданных границах (см. Таблицу 6.4). Потоки в эмиссионных линиях, измеренные по интегральным спектрам для III-областей в центральном компоненте и в диске низкой поверхностной яркости и исправленные за поглощение, приведены в Таблицах 6.3 и 6.4, соответственно.

Условия возбуждения газа

На Рис. 6.6 хорошо заметны значительные вариации отношений потоков основных диагностических эмиссионных линий в центральном компоненте Ark 18. В частности, отношение $[\text{O III}]/\text{H}\beta$ растет к центру и особенно к обла-

²Западная и восточная части области #5 рассматривались отдельно как 5W и 5E, поскольку их потоки в линии $[\text{O III}]$ сильно различаются.

сти SSC, где достигает максимального значения в галактике ($[O III]/H\beta \sim 3,5$). Стоит также отметить, что как область “centre”, так и SSC демонстрируют двойные пики в распределениях $[O III]/H\beta$ что указывает на то, что за ионизацию каждой из этих областей ответственны, вероятно, по крайней мере два основных источника. На архивных изображениях VISTA VHS в области SSC удается разрешить два звездных скопления. Интенсивность линий низкого возбуждения растет на окраинах и в направлении “хвоста”. Отношение $[S II]/H\alpha > 0,4$ типично для диффузного ионизированного газа (diffuse ionised gas, DIG) – протяженного компонента ионизированного газа низкого возбуждения, на долю которого может приходиться до 50% полной $H\alpha$ светимости галактики [258]. Среди возможных источников ионизации DIG – утекающие из HII-областей ионизирующие кванты, ударные волны в среде с низкой плотностью, ионизация горячими маломассивными проэволюционировавшими звездами [см., например, 225, 259]. Как будет показано ниже, несколько из этих механизмов могут быть ответственны за возбуждение DIG в Ark 18.

Все исследуемые области были нанесены на диагностические диаграммы (введенные в работе [101]), представленные на Рис. 6.7. В верхнем ряду панелей разными цветами и символами обозначены различные области, согласно Рис. 6.2 и Таблицам 6.3, 6.4. Для областей, относящихся к центральному компоненту (SSC, “centre”, “tail” и “outskirt”) приведены значения, измеренные для отдельных пикселей вдоль щелей. Каждая обозначенная область, кроме #4 в диске низкой поверхностной яркости, лежит ниже “линии максимального звездообразования” из работы [223] и даже ниже линии из работы [224], ограничивающей область, где чистая фотоионизация массивными звездами может быть ответственна за возбуждение газа. То же самое верно для областей SSC и “centre”, а часть “хвоста” (“tail”) и большая часть региона “outskirt” попадают в область иных механизмов возбуждения (например, активные ядра галактик, ударные волны, ионизация проэволюционировавшими звездами низких масс). Особенно хорошо это видно на диагностических диаграммах, использующих отношения линий $[S II]/H\alpha$ и $[O I]/H\alpha$, которые более чувствительны к ударным волнам, чем $[N II]/H\alpha$.

В среднем ряду панелей на Рис. 6.7 цветом закодирована поверхностная яркость, а символы те же, что на верхнем ряду панелей. Из этих диаграмм видно, что все области, лежащие выше черной и серой линий из работ [223] и [224] на диагностических диаграммах с $[N II]/H\alpha$ и $[S II]/H\alpha$ имеют низкую поверхност-

ную яркость и скорее соответствуют излучению DIG (исходя из ограничения на предельную яркость $L(\text{H}\alpha) < 10^{39}$ эрг/с/см²/кпс⁻² из работы [225]). Отметим, что модели ударных волн с низкими скоростями для металличности $Z = 0,6Z_{\odot}$ вполне могут объяснить эти области DIG. Однако в нижнем ряду панелей, показывающем, как меняется дисперсия скоростей в линии $\text{H}\alpha$ на диаграмме ВРТ (так называемая диаграмма ВРТ- σ , см. [260]), видно, что повышенная дисперсия скоростей наблюдается только в регионе “outskirt”, но не в “хвосте”. Кроме того, она увеличивается вблизи области #1, которая также имеет поверхностную яркость в $\text{H}\alpha$, характерную для DIG, и, как следует из Рис. 6.3, такое высокое значение σ_{gas} наблюдается только на периферии области. Из этого анализа можно сделать вывод, что эмиссия, которая наблюдается на периферии центрального компонента, вероятно, вызвана ударными волнами, на что указывает ее положение на диагностической диаграмме и повышенная дисперсия скоростей. DIG в “хвосте” имеет несколько иное происхождение и, вероятно, возбуждается фотонами, утекающими из близлежащих HII-областей. SSC и “centre”, а также большинство областей в диске низкой поверхностной яркости ионизованы излучением массивных звезд. Область #4, вероятно, расположена очень близко к периферии центрального компонента, поэтому отношения потоков ее эмиссионных линий можно было бы объяснить значительным вкладом от окружающего DIG.

Содержание химических элементов в газе

Для точной оценки содержания химических элементов в газе необходимо измерить хотя бы одну из слабых линий, чувствительных к электронной температуре (T_e): $[\text{O III}] 4363\text{\AA}$, $[\text{N II}] 5755\text{\AA}$, или $[\text{S III}] 6312\text{\AA}$ (вместе с линией $[\text{S III}] 9069\text{\AA}$). Зная электронную температуру, можно оценить содержание различных ионов при помощи “прямого” T_e -метода. В случае Ark 18 удалось измерить слабые авроральные линии только в областях SSC и “centre”. В SSC были детектированы линии $[\text{O III}] 4363\text{\AA}$ и $[\text{N II}] 5755\text{\AA}$, что позволило оценить T_e в зонах низкого и высокого возбуждения независимо друг от друга. Для области “centre” удалось детектировать только линию $[\text{O III}] 4363\text{\AA}$ и оценка ее потока была очень неуверенной. Также был проанализирован имеющийся архивный

Таблица 6.3 Потоки в линиях (скорректированные за покраснение), нормированные на поток в линии $H\beta = 100$, и содержание кислорода для НП-областей центрального компонента Ark 18

Параметр	“Tail”	“Tail”	SSC	“Centre”	“Outskirt”	“Outskirt”
Щель	PA=171°	PA=118°	PA=171°	PA=171°	PA=171°	PA=145°
Координаты	-20.7...-17.9	-6.7...4.7	-2.5...2.5	-11.1...-6.1	6.1...13.9	-69.1...-46.3
[O II] 3727Å	–	–	273.6 ± 13.8	428.9 ± 25.2	–	–
[Ne III] 3869Å	–	–	18.2 ± 2.0	11.6 ± 4.9	–	–
H γ	37.4 ± 13.1	–	45.2 ± 0.8	42.9 ± 2.0	45.0 ± 35.2	–
[O III] 4363Å	–	–	1.7 ± 0.4	1.4 ± 1.3	–	–
He I 4471Å	–	–	3.0 ± 0.3	–	–	–
[Fe III] 4658Å	–	–	0.8 ± 0.3	–	–	–
He II 4686Å	–	–	0.7 ± 0.3	–	–	–
H β	100.0 ± 7.2	100.0 ± 11.1	100.0 ± 0.4	100.0 ± 0.7	100.0 ± 15.7	100.0 ± 73.5
[O III] 5007Å	136.6 ± 6.0	189.5 ± 10.1	287.7 ± 2.2	210.6 ± 1.7	192.8 ± 12.7	201.7 ± 49.6
He I 5015Å	–	–	2.4 ± 0.5	–	–	–
[N I] 5200Å	–	–	0.9 ± 0.2	1.9 ± 0.6	–	–
[N II] 5755Å	–	–	0.4 ± 0.1	–	–	–
He I 5876Å	–	–	10.6 ± 0.2	9.2 ± 0.6	–	–
[O I] 6300Å	21.8 ± 5.5	36.8 ± 11.5	3.8 ± 0.2	9.8 ± 0.7	17.6 ± 11.9	–
[S III] 6312Å	–	–	1.1 ± 0.1	1.6 ± 0.7*	–	–
H α	280.9 ± 6.1	257.9 ± 7.1	281.0 ± 3.6	281.2 ± 11.4	281.2 ± 11.4	268.6 ± 43.2
[N II] 6583Å	35.3 ± 3.9	44.1 ± 6.1	20.9 ± 0.4	33.2 ± 0.7	47.5 ± 7.6	< 36.3 ± 35.9
[S II] 6717Å	68.9 ± 4.6	81.1 ± 7.2	27.0 ± 0.2	47.1 ± 0.5	76.2 ± 8.3	134.5 ± 45.9
[S II] 6731Å	45.4 ± 4.3	59.4 ± 7.0	19.2 ± 0.1	33.8 ± 0.4	55.8 ± 8.1	35.2 ± 37.7
[Ar III] 7136Å	–	–	6.5 ± 0.1	4.3 ± 0.5	–	–
[S III] 9069Å	–	–	–	16.5 ± 3.1*	–	–
E(B-V), mag	0.01 ± 0.06	0.00 ± 0.10	0.07 ± 0.01	0.17 ± 0.04	0.14 ± 0.14	0.00 ± 0.65
EW(H α), Å	16.4	7.9	224.2	31.8	22.1	8.9
σ (H α), км/с	17.1 ± 0.2	20.0 ± 4.6	20.7 ± 0.3	21.2 ± 0.2	29.8 ± 2.4	14.5 ± 5.5
n_e , см ⁻³	–	58 ⁺²¹³ ₋₁₆	28 ⁺¹³ ₋₉	37 ⁺¹⁶ ₋₁₈	58 ⁺²⁹⁹ ₋₁₈	–
T_e ([O III]), К	–	–	9663 ⁺⁶⁵³ ₋₆₁₅	12293 ^{+3936*} ₋₃₁₉₀	–	–
12 + log(O/H) _{Te}	–	–	8.25 ^{+0.13} _{-0.09}	8.09 ^{+0.39} _{-0.27}	–	–
12 + log(O/H) _S	8.16 ^{+0.04} _{-0.05}	8.22 ^{+0.05} _{-0.07}	8.19 ^{+0.01} _{-0.01}	8.21 ^{+0.01} _{-0.01}	8.25 ^{+0.05} _{-0.08}	8.14 ^{+0.12} _{-0.24}
12 + log(O/H) _R	–	–	8.18 ^{+0.02} _{-0.02}	8.21 ^{+0.02} _{-0.02}	–	–
log(N/O) _R	–	–	-1.33 ^{+0.04} _{-0.03}	-1.32 ^{+0.05} _{-0.04}	–	–
log(N/O) _{Te}	–	–	-1.24 ^{+0.24} _{-0.01}	-0.76 ^{+0.1} _{-0.31}	–	–
log(S/O) _{Te}	–	–	-1.64 ^{+0.23} _{-0.07}	-1.44 ^{+0.23} _{-0.07}	–	–
log(Ne/O) _{Te}	–	–	-0.75 ^{+0.29} _{-0.02}	-0.36 ^{+0.32} _{-0.44}	–	–
log(Ar/O) _{Te}	–	–	-2.46 ^{+0.07} _{-0.17}	-2.45 ^{+0.15} _{-0.13}	–	–

*Оценка получена из спектра SDSS, для всей области “centre”

Таблица 6.4 То же, что в Таблице 6.3, для областей в диске низкой поверхностной яркости

Параметр	1	2	2	3	4
Щель	PA=118°	PA=145°	PA=118°	PA=118°	PA=118°
Координаты	-78.1...-67.4	-114.1...-107.0	-51.7...-44.6	-33.5...-20.6	12.2...20.1
H β	100.0 \pm 37.4	100.0 \pm 29.7	100.0 \pm 10.5	100.0 \pm 88.0	100.0 \pm 81.6
[O III] 5007Å	< 23.7	160.2 \pm 19.9	134.2 \pm 9.2	< 43.3	145.8 \pm 86.7
[O I] 6300Å	–	–	12.2 \pm 9.1	–	–
H α	190.1 \pm 24.7	281.6 \pm 15.4	268.4 \pm 7.1	236.5 \pm 51.8	273.6 \pm 68.6
[N II] 6583Å	< 12.9	18.4 \pm 10.9	22.1 \pm 6.1	< 53.6	< 17.0
[S II] 6717Å	7.1 \pm 12.3	31.5 \pm 11.5	38.8 \pm 6.1	54.8 \pm 50.8	88.8 \pm 53.9
[S II] 6731Å	12.0 \pm 16.2	12.5 \pm 10.2	31.2 \pm 6.4	92.1 \pm 67.4	81.3 \pm 55.5
E(B-V), mag	0.00 \pm 0.34	0.36 \pm 0.26	0.00 \pm 0.09	0.00 \pm 0.78	0.00 \pm 0.74
EW(H α), Å	197.5	361.0	299.5	28.0	8.1
σ (H α), км/с	27.3 \pm 8.7	20.9 \pm 1.9	22.8 \pm 6.9	21.6 \pm 6.9	13.0 \pm 4.7
12 + log(O/H) _S	< 8.45	8.28 ^{+0.06} _{-0.54}	8.15 ^{+0.07} _{-0.33}	8.37 ^{+0.12} _{-0.25}	8.1 ^{+0.14} _{-0.29}
Параметр	5E	5W	6	7	8
Щель	PA=118°	PA=118°	PA=145°	PA=145°	PA=118°
Координаты	47.6...53.3	41.8...46.1	-6.3...3.7	6.6...12.3	26.8...34.0
H β	100.0 \pm 29.0	100.0 \pm 27.4	100.0 \pm 38.9	100.0 \pm 89.0	100.0 \pm 68.1
[O III] 5007Å	167.8 \pm 26.6	26.7 \pm 20.8	98.1 \pm 26.7	533.3 \pm 84.8	< 31.3
H α	232.7 \pm 18.5	272.3 \pm 17.0	281.3 \pm 18.9	281.6 \pm 52.0	197.8 \pm 52.2
[N II] 6583Å	< 16.0	< 14.6	< 12.8	< 16.5	–
[S II] 6717Å	43.1 \pm 21.0	51.3 \pm 16.7	30.6 \pm 15.2	< 23.1	60.0 \pm 38.9
[S II] 6731Å	26.5 \pm 20.0	37.6 \pm 16.1	20.5 \pm 14.4	< 11.2	40.3 \pm 37.6
E(B-V), mag	0.00 \pm 0.26	0.00 \pm 0.24	0.24 \pm 0.34	0.38 \pm 0.84	0.00 \pm 0.63
EW(H α), Å	169.2	438.1	227.7	274.8	9.5
σ (H α), км/с	23.0 \pm 4.4	17.3 \pm 1.4	16.7 \pm 3.6	10.6 \pm 3.6	–
12 + log(O/H) _S	8.1 ^{+0.08} _{-0.39}	8.04 ^{+0.02} _{-1.01}	8.19 ^{+0.03} _{-0.79}	8.35 ^{+0.1} _{-0.24}	–

спектр SDSS – оказалось, что поток в линии [O III] 4363Å там существенно отличается, а отношение сигнал/шум также очень низкое (~ 2). По этой причине линия не использовалась для оценки электронной температуры области “centre”, а T_e было оценено из отношения потоков в линиях [S III] 9069Å и [S II] 6312Å (обе линии наблюдаются в спектре SDSS). Полученное значение T_e соответствует областям высокого возбуждения для ионов S²⁺ и Ar²⁺, но из него можно пересчитать T_e для других ионов, используя соотношения из работы [261]:

$$T_e([\text{S III}]) = 0.83T_e([\text{O III}]) + 1700, \quad (6.1)$$

$$T_e([\text{N II}]) = 0.7T_e([\text{O III}]) + 3000 \quad (6.2)$$

Для области SSC электронная температура T_e была оценена по данным спектральных наблюдений на 6-м телескопе БТА, для области “centre” - из спектра SDSS. Электронная плотность n_e оценивалась по соотношению линий [S II] 6717 Å и 6731 Å. С этими параметрами было получено содержание кислорода $12 + \log(\text{O}/\text{H})$, а также относительные содержания N/O, S/O, Ar/O и Ne/O с использованием пакета PYNEB [262]. Чтобы учесть вклад ненаблюдаемых ионов и скорректировать измеренное содержание ионов для N, S, Ar, N, были использованы поправочные коэффициенты из работы [69]. Полученные в итоге содержания химических элементов приведены в Таблице 6.3, а содержание кислорода также показано на Рис. 6.6.

Для оценки содержания кислорода во всех исследованных регионах, где были измерены только сильные эмиссионные линии, применялись эмпирические калибровки R и S из [83]. Оба эти метода применимы в диапазоне металличностей, который наблюдается в Ark 18, и дают значения, хорошо согласующиеся с оценками, полученными T_e -методом.

Для оценки точности измерений методом Монте-Карло была сгенерирована выборка синтетических спектров с потоками в линиях, соответствующими наблюдаемым и случайно распределенными вокруг наблюдаемых значений в пределах их ошибок. Для некоторых областей в диске низкой поверхностной яркости отношение S/N в линии [N II] (а в некоторых случаях и в линии [O III]) оказалось недостаточным для ее надежной оценки, и измеренные потоки использовались скорее в качестве верхнего предела. Значения $12 + \log(\text{O}/\text{H})$, пересчитанные из наблюдательных данных, хорошо согласуются с наиболее вероятными значениями, полученными с использованием метода Монте-Карло, для всех областей, за исключением областей #4, 5W, 6, а также #2 для щели с PA=145°. Для них распределение вероятностей $12 + \log(\text{O}/\text{H})_S$ является бимодальным, а формально измеренные значения соответствуют его вторичному максимуму, который дает значительно (на 0,3 – 0,9 dex) более низкое содержание кислорода, чем наиболее вероятное значение. Для первых трех областей такое поведение, вероятно, связано с очень ненадежными измерениями потоков в линии [N II]. В таких случаях для областей принимались значения $12 + \log(\text{O}/\text{H})$, соответствующие максимуму распределения вероятностей, а не полученные из наблюдаемых потоков.

Металличность была оценена для 7 областей в диске низкой поверхностной яркости и 3 областей, относящихся к центральному компоненту и к его

периферии. В галактике не было обнаружено никакого градиента металличности, она меняется незначительно (учитывая большую протяженность диска LSB) – по оценкам, сделанным S-методом, $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8,1 - 8,3 \text{ dex}$. Оценки $12 + \log(\text{O}/\text{H})$, полученные при помощи T_e и двух остальных методов для двух ярких областей, хорошо согласуются между собой.

Относительные содержания других элементов (N/O, S/O, Ne/O, Ar/O) для области SSC хорошо согласуются с общими зависимостями от металличности, наблюдаемыми в других галактиках [см., например, 69], что указывает на нормальную химическую эволюцию этого региона в недавнем прошлом. Однако это не так для области “centre”, которая показывает значительно большие значения этих отношений (за исключением аргона), оцененные при помощи T_e -метода. В целом это можно интерпретировать как признак недавней аккреции бедного металлами газа, однако в данном случае ошибки отношений потоков слишком велики для того, чтобы можно было сделать надежный вывод. Однако даже в пределах погрешностей измеренное значение $(\text{N}/\text{O})_{T_e}$ выше, чем для области SSC, и выше, чем ожидается для данной металличности. Этот эффект может быть связан со сложной структурой области, как следует из распределения отношений потоков (Рис. 6.6) и изображений SDSS и VISTA VHS. Как было показано в статье [78], T_e -метод может давать несколько заниженные оценки металличности, что будет приводить к искусственному завышению отношения N/O, в то время как для эмпирических методов такой эффект не наблюдается.

Таким образом, в Ark 18 не наблюдается градиента металличности, в центре галактики содержание кислорода, полученное с использованием S-метода, согласующимся с методом T_e , составляет $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8,20 \pm 0,04 \text{ dex}$. Однако, стоит отметить, что нельзя полностью исключить наличия низкометаллического газа в диске низкой поверхностной яркости. По крайней мере, “формальные” оценки для нескольких областей, полученные S-методом, отличаются от наиболее вероятных значений (принятых в качестве окончательных величин) в сторону меньшей металличности. Для устранения этой неопределенности необходимы более глубокие спектры диска низкой поверхностной яркости, которые обеспечили бы достаточно хорошее соотношение сигнал/шум для эмиссионных линий [N II] или [O II].

6.4 Обсуждение результатов

Из анализа, представленного выше, были получены следующие важные характеристики Ark 18, на основе которых далее обсуждаются возможные сценарии эволюции:

- Анализ морфологической структуры (по изображениям SDSS), а также кинематики ионизованного газа (по данным ИФП) показывает, что диск низкой поверхностной яркости и центральный компонент умеренно наклонены друг относительно друга, а крупномасштабная кинематика обоих компонентов может быть объяснена чисто круговым вращением. Локальные некруговые движения связаны с действием массивных звезд в самых ярких областях звездообразования. Внешний диск может быть немного искривлен. Из кривой вращения было оценено динамическое время (как период одного оборота на радиусе $\sim 40''$, где кривая вращения выходит на “плато”), которое составляет около 300 – 350 млн лет.
- Галактика не показывает градиента содержания кислорода. Такая картина часто наблюдается во взаимодействующих и сливающихся системах [см., например, 263–265] и указывает на эффективное перемешивание межзвездной среды.
- Цвета центрального компонента соответствуют времени ~ 13 -14 млрд.лет, прошедшему с начала ЗО, либо, что более вероятно, наблюдается смесь старого и молодого звездного населения. Цвета внешнего диска низкой поверхностной яркости соответствуют значительно более молодому возрасту звездного населения.
- Большая часть текущего звездообразования происходит в двух центральных областях (SSC и “centre”), которые вносят около 80% в общий поток H α в галактике. Относительные содержания N/O, S/O, Ne/O, Ar/O указывают на нормальную химическую эволюцию, однако наблюдается некоторый рост этих отношений в области “centre”, что может быть связано с недавней аккрецией бедного металлами газа.

В Ark 18 яркий центральный компонент показывает круговое вращение и погружен в протяженный голубой диск низкой поверхностной яркости с позиционным углом и углом наклона, отличными от позиционного угла и

угла наклона центрального компонента. Представленное сравнение фотометрических и кинематических свойств компонентов свидетельствует о внешнем происхождении диска низкой поверхностной яркости. Таким образом, внешний компонент Ark 18 мог образоваться в результате аккреции холодного газа, либо в результате слияния галактик. В случае аккреции из газовых филаментов крупномасштабной структуры можно было бы ожидать радиального градиента металличности и низкой металличности на периферии Ark 18, поскольку в таком сценарии аккрецируемый газ должен быть бедным металлами. Однако такой картины в Ark 18 не наблюдается, содержание кислорода слабо меняется по радиусу и его значение типично для светимости и массы звезд Ark 18. Это говорит о том, что диск низкой поверхностной яркости был сформирован из предварительно обогащенного материала на масштабе времени, превышающем динамическое время, чтобы обеспечить хорошее перемешивание межзвездной среды.

Также возможно, что газ относится к богатой газом галактике, которая слилась с прародительницей Ark 18. Поскольку градиента металличности не наблюдается, это указывает на то, что металличность газа аккрецированного спутника была близка к металличности газа прародителя, либо на то, что почти весь газ Ark 18 был связан со спутником (это означает, что прародителем Ark 18 была карликовая эллиптическая галактика). Однако в последнем случае изначальная масса аккрецируемого спутника должна быть слишком велика, поскольку весь H I, который является доминирующим компонентом в Ark 18, должен быть связан с ним.

Сценарий, согласно которому масса спутника в несколько раз меньше массы галактики-прародителя, лучше согласуется с представленными наблюдательными данными. Отсутствие значительного градиента металличности предполагает, что это событие произошло раньше, чем ~ 300 млн лет назад (эта величина соответствует динамическому времени для Ark 18), поэтому газ успел перемешаться. Морфологическая структура Ark 18 напоминает структуру некоторых гигантских LSB галактик с дисками низкой поверхностной яркости, простирающимися за пределы более яркой центральной области. Таким образом, Ark 18 может быть аналогом gLSB меньшей массы. Относительно небольшая масса может быть связана с более разреженным окружением Ark 18, поскольку gLSB в основном входят в бедные группы и не принадлежат войдам [266]. Слияния галактик рассматриваются как один из возможных сценариев

формирования структур низкой поверхностной яркости в этих объектах [см., например, модели, предложенные в 266—268], аналогичный сценарий может работать и для Ark 18.

Ark 18 морфологически очень похож на близкую галактику NGC 404. В работе [269] авторы проанализировали данные HI для NGC 404 и пришли к выводу, что галактика является результатом слияния с богатой газом карликовой неправильной галактикой, которое произошло 0,5—1 млрд. лет назад. Мы обнаружили еще несколько галактик с морфологией, напоминающей Ark 18, в том числе два объекта в том же войде: UM 40 (с диском, который хорошо видно по данным GALEX) и PGC3080241.

Также есть указания на недавнее падение газового облака с низкой металличностью на центральную часть Ark 18, которое привело к локальному понижению металличности в месте падения и окончательному выравниванию градиента. Яркая область SSC, которая находится вблизи центра Ark 18, может быть остатком такого события. Таким образом, свойства Ark 18 можно объяснить результатом двух событий. Первое – слияние двух карликовых галактик с промежуточным отношением масс, произошедшее более 300 млн лет назад, которое привело к образованию диска низкой поверхностной яркости. Вторым событием было малое слияние или падение массивного газового облака, и оно привело к пекулярной внутренней морфологии и началу звездообразования в этой области.

В настоящее время галактика считается изолированной, но результаты, полученные в представленном исследовании, позволяют предположить, что в недавнем прошлом у нее были спутники. Войды могут содержать группы галактик (например, группа NGC 428, см. Главу 5 и [235]), пары и триплеты [93, 106], взаимодействующие и сливающиеся системы [108, 161]. В частности, в работе [270] была исследована другая галактика войда – UGC 4722, которая, несмотря на свою пекулярную морфологию, считалась одной из самых изолированных галактик в Местном сверхскоплении. Авторы пришли к выводу, что это сливающаяся система, второй компонент которой, очень богатый газом карлик, практически полностью разрушился. Таким образом, предложенный выше сценарий слияния карликов для образования галактики Ark 18 не выглядит невероятным, несмотря на низкую плотность окружения.

6.5 Выводы

В данной Главе Диссертации представлено исследование маломассивной галактики Ark 18 с диском низкой поверхностной яркости, находящейся в войде Eridanus. Был проведен анализ наблюдательных данных, полученных с длиннощелевым спектрографом и сканирующим интерферометром Фабри-Перо на 6-м телескопе БТА. Также были использованы архивные изображения и спектры SDSS.

Как яркий центральный компонент, так и внешний диск галактики показывают круговое вращение ионизованного газа. Локальные некруговые движения объясняются действием массивных звезд в ярких областях звездообразования. Поведение позиционных углов (а также углов наклона) двух компонентов, полученных из анализа кинематических и фотометрических данных, указывают на внешнее происхождение диска низкой поверхностной яркости. В галактике не наблюдается градиента содержания кислорода вдоль радиуса.

На основании представленного анализа был сделан вывод о формировании диска низкой поверхностной яркости в результате слияния двух карликовых галактик, произошедшем не менее 300млн. лет назад, для необычной галактики войда Ark18. Вероятно, что в прошлом галактика могла также испытать малое слияние или падение массивного газового облака, что объясняет пекулярную внутреннюю морфологию. Результаты работы представлены в статье [271].

Заключение

В Диссертационной работе проведено детальное исследование свойств и особенностей эволюции галактик в разреженном окружении (войдах). Наблюдательный материал, на основе которого проводилось исследование, включает наблюдения на 6м телескопе БТА САО РАН с фокальными редукторами SCORPIO и SCORPIO-2 в режимах длинноцелевой спектроскопии и интерферометра Фабри-Перо, спектральные данные, полученные на телескопе SALT, а также данные в линии HI 21см, полученные на индийском радиоинтерферометре GMRT.

В ЗаклЮчении диссертации сформулированы наиболее важные результаты, представленные в предыдущих главах. Они включают следующие пункты:

1. Формирование выборки из 66 галактик в экваториальной зоне войда Eridanus. Результаты спектроскопии, выполненной на телескопах SALT и БТА для 23 галактик выборки. Оценка содержания кислорода по этим данным, а также по спектрам SDSS для 3 объектов. Результаты анализа данных о содержании кислорода в 36 галактиках с имеющимися оценками O/H в войде Eridanus. Вывод о пониженном в среднем содержании кислорода в галактиках войда относительно реперной выборки галактик в более плотном окружении в Местном Объемe.
2. Формирование выборки из 60 галактик близких войдов для систематического поиска богатых газом объектов с экстремально низкой металличностью газа. Результаты спектроскопии 44 из этих галактик, полученной на телескопах SALT и БТА. Обнаружение 10 новых галактик с экстремально низкой металличностью $Z_{gas} \lesssim Z_{\odot}/30$, а также 13 новых низкометаллических галактик с $Z_{\odot}/30 \lesssim Z_{gas} \lesssim Z_{\odot}/20$. Вывод о пониженном в 2,5-4 раза содержании кислорода в половине новых галактик войдов с $Z_{gas} \lesssim Z_{\odot}/30$ относительно реперной выборки галактик в более плотном окружении в Местном Объемe. Вывод о признаках эволюционной молодости для половины новых галактик с $Z_{gas} \lesssim Z_{\odot}/30$.
3. Результаты анализа данных о морфологии и кинематике нейтрального водорода HI, полученных на индийском радиоинтерферометре GMRT для галактики UGC3672, находящейся в войде Lynx-Cancer. Исследование экстремально богатого газом ($M(\text{HI})/L_B = 17$) спутни-

- ка низкой поверхностной яркости, свойства которого указывают на его возможную эволюционную молодость. Вывод о том, что UGC3672 представляет собой систему из трех карликовых галактик.
4. Развитие метода поиска и исследования процессов аккреции и взаимодействия в галактиках войдов с использованием панорамной и длиннощелевой спектроскопии ионизованного газа, дополненными фотометрическими данными. Результаты исследования данным методом галактики NGC428. Вывод о возможном недавнем эпизоде аккреции газа или малого слияния на шкале времени не более ~ 500 млн. лет в NGC428.
 5. Результаты поверхностной фотометрии, панорамной и длиннощелевой спектроскопии для галактики войда Ark18. Вывод о формировании диска низкой поверхностной яркости в результате слияния двух карликовых галактик, произошедшем не менее 300млн. лет назад, для необычной галактики войда Ark18.

Благодарности

Автор выражает огромную благодарность своему научному руководителю Пустильнику Семену Ароновичу, за руководство, постановку очень интересной научной задачи, наставления и большое терпение, а также Моисееву Алексею Валерьевичу за поддержку, полезные научные дискуссии, и за плодотворную совместную работу, которая позволила существенно обогатить как диссертацию, так и навыки автора.

Также хочется поблагодарить Засова Анатолия Владимировича, за руководство курсовой и дипломной работами автора, за вдохновение и за то, что передал любовь и интерес к внегалактической астрономии, Сильченко Ольгу Касьяновну за интересные научные идеи и дискуссии, Расторгуева Алексей Сергеевича за поддержку и постоянное мотивирование к написанию диссертации, а также соавторов работ: Князева Алексея Юрьевича, Перепелицину Юлию Александровну, Теплякову Арину Леонидовну, Сабурову Анну Станиславовну, Егорова Олега Владимировича, Чилингаряна Игоря Владимировича, Гришина Кирилла Алексеевича.

За всестороннюю поддержку автор также благодарит своих родителей, Галину и Сергея Шалденковых, и брата, Юрия Шалденкова.

Автор отдельно благодарит своего супруга Егорова Олега Владимировича за неизменную поддержку, помощь, а также интересные научные и ненаучные дискуссии и обсуждения.

Список литературы

1. Jõeveer M., Einasto J., Tago E. Spatial distribution of galaxies and of clusters of galaxies in the southern galactic hemisphere // MNRAS. 1978. Т. 185. С. 357—370.
2. Gregory S. A., Thompson L. A. The Coma/A1367 supercluster and its environs. // ApJ. 1978. Т. 222. С. 784—799.
3. Kirshner R. P., Oemler A. J., Schechter P. L., Sackett P. A. A million cubic megaparsec void in Bootes ? // ApJ. 1981. Т. 248. С. L57—L60.
4. de Lapparent V., Geller M. J., Huchra J. P. A Slice of the Universe // ApJ. 1986. Т. 302. С. L1.
5. Colless M., Peterson B. A., Jackson C. [и др.]. The 2dF Galaxy Redshift Survey: Final Data Release // arXiv e-prints. 2003. astro-ph/0306581.
6. van de Weygaert R. Voids and the Cosmic Web: cosmic depression & spatial complexity // The Zeldovich Universe: Genesis and Growth of the Cosmic Web. Т. 308. 2016. С. 493—523.
7. Zel'dovich Y. B. Fragmentation of a homogeneous medium under the action of gravitation // Astrophysics. 1970. Т. 6, № 2. С. 164—174.
8. Zeldovich I. B. The Theory of the Large Scale Structure of the Universe // Large Scale Structures in the Universe. Т. 79. 1978. С. 409.
9. Davis M., Efstathiou G., Frenk C. S., White S. D. M. The evolution of large-scale structure in a universe dominated by cold dark matter // ApJ. 1985. Т. 292. С. 371—394.
10. Aragon-Calvo M. A., Szalay A. S. The hierarchical structure and dynamics of voids // MNRAS. 2013. Т. 428. С. 3409—3424.
11. Einasto J., Suhhonenko I., Hütsi G. [и др.]. Towards understanding the structure of voids in the cosmic web // A&A. 2011. Т. 534. A128.
12. Peper M., Roukema B. F. The role of the elaphrocentre in void galaxy formation // MNRAS. 2021. Т. 505, № 1. С. 1223—1238.

13. Rojas R. R., Vogeley M. S., Hoyle F., Brinkmann J. Photometric Properties of Void Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey // *ApJ*. 2004. T. 617, № 1. C. 50–63.
14. Rojas R. R., Vogeley M. S., Hoyle F., Brinkmann J. Spectroscopic Properties of Void Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey // *ApJ*. 2005. T. 624, № 2. C. 571–585.
15. Moorman C. M., Moreno J., White A. [и др.]. On the Star Formation Properties of Void Galaxies // *ApJ*. 2016. T. 831, № 2. C. 118.
16. Ricciardelli E., Cava A., Varela J., Quilis V. The star formation activity in cosmic voids // *MNRAS*. 2014. T. 445, № 4. C. 4045–4054.
17. Kreckel K., Croxall K., Groves B. [и др.]. The Metallicity of Void Dwarf Galaxies // *ApJ*. 2015. T. 798, № 1. C. L15.
18. Kunth D., Östlin G. The most metal-poor galaxies // *A&ARv*. 2000. T. 10. C. 1–79.
19. Filho M. E., Sánchez Almeida J., Muñoz-Tuñón C. [и др.]. Extremely Metal-poor Galaxies: The Environment // *ApJ*. 2015. T. 802, № 2. C. 82.
20. Izotov Y. I., Thuan T. X. Heavy-Element Abundances in Blue Compact Galaxies // *ApJ*. 1999. T. 511, № 2. C. 639–659.
21. Annibali F., Tosi M. Chemical and stellar properties of star-forming dwarf galaxies // *Nature Astronomy*. 2022. T. 6. C. 48–58.
22. Searle L., Sargent W. L. W. Inferences from the Composition of Two Dwarf Blue Galaxies // *ApJ*. 1972. T. 173. C. 25.
23. Papaderos P., Östlin G. I Zw 18 as morphological paradigm for rapidly assembling high-z galaxies // *A&A*. 2012. T. 537. A126.
24. Tweed D. P., Mamon G. A., Thuan T. X. [и др.]. The frequency of very young galaxies in the local Universe: I. A test for galaxy formation and cosmological models // *MNRAS*. 2018. T. 477, № 2. C. 1427–1450.
25. Berg D. A., Skillman E. D., Marble A. R. [и др.]. Direct Oxygen Abundances for Low-luminosity LVL Galaxies // *ApJ*. 2012. T. 754. C. 98.
26. Mac Low M.-M., Ferrara A. Starburst-driven Mass Loss from Dwarf Galaxies: Efficiency and Metal Ejection // *ApJ*. 1999. T. 513, № 1. C. 142–155.

27. Brooks A. M., Governato F., Booth C. M. [и др.]. The Origin and Evolution of the Mass-Metallicity Relationship for Galaxies: Results from Cosmological N-Body Simulations // *ApJ*. 2007. T. 655, № 1. С. L17–L20.
28. Ekta B., Chengalur J. N. When are extremely metal-deficient galaxies extremely metal deficient? // *MNRAS*. 2010. T. 406. С. 1238–1247.
29. Izotov Y. I., Guseva N. G., Fricke K. J., Papaderos P. SBS 0335-052E+W: deep VLT/FORS+UVES spectroscopy of the pair of the lowest-metallicity blue compact dwarf galaxies // *A&A*. 2009. T. 503, № 1. С. 61–72.
30. Pustilnik S. A., Kniazev A. Y., Pramskij A. G. Study of DDO 68: nearest candidate for a young galaxy? // *A&A*. 2005. T. 443, № 1. С. 91–102.
31. Hirschauer A. S., Salzer J. J., Skillman E. D. [и др.]. ALFALFA Discovery of the Most Metal-poor Gas-rich Galaxy Known: AGC 198691 // *ApJ*. 2016. T. 822, № 2. С. 108.
32. Izotov Y. I., Thuan T. X., Guseva N. G. J1234+3901: an extremely metal-deficient compact star-forming dwarf galaxy at redshift 0.133 // *MNRAS*. 2019. T. 483, № 4. С. 5491–5498.
33. Izotov Y. I., Thuan T. X., Guseva N. G., Liss S. E. J0811+4730: the most metal-poor star-forming dwarf galaxy known // *MNRAS*. 2018. T. 473, № 2. С. 1956–1966.
34. Sánchez Almeida J., Elmegreen B. G., Muñoz-Tuñón C., Elmegreen D. M. Star formation sustained by gas accretion // *A&ARv*. 2014. T. 22. С. 71.
35. Bekki K. Formation of blue compact dwarf galaxies from merging and interacting gas-rich dwarfs // *MNRAS*. 2008. T. 388. С. L10–L14.
36. Pustilnik S. A., Tepliakova A. L., Makarov D. I. Void galaxies in the nearby Universe - I. Sample description // *MNRAS*. 2019. T. 482, № 4. С. 4329–4345.
37. Buckley D. A. H., Swart G. P., Meiring J. G. Completion and commissioning of the Southern African Large Telescope // *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. T. 6267. 2006. 62670Z.
38. O'Donoghue D., Buckley D. A. H., Balona L. A. [и др.]. First science with the Southern African Large Telescope: peering at the accreting polar caps of the eclipsing polar SDSS J015543.40+002807.2 // *MNRAS*. 2006. T. 372. С. 151–162.

39. Burgh E. B., Nordsieck K. H., Kobulnicky H. A. [и др.]. Prime Focus Imaging Spectrograph for the Southern African Large Telescope: optical design // *Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes*. T. 4841. 2003. C. 1463–1471.
40. Kobulnicky H. A., Nordsieck K. H., Burgh E. B. [и др.]. Prime focus imaging spectrograph for the Southern African large telescope: operational modes // *Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes*. T. 4841. 2003. C. 1634–1644.
41. Crawford S. M., Still M., Schellart P. [и др.]. PySALT: the SALT science pipeline // *Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems III*. T. 7737. 2010. C. 773725.
42. Kniazev A. V. Pipeline Reduction of Long-Slit Spectra Obtained with the SALT Telescope // *Astrophysical Bulletin*. 2022. T. 77, № 3. C. 334–346.
43. Kniazev A. Y., Pustilnik S. A., Grebel E. K. [и др.]. Strong Emission Line H II Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. I. Catalog of DR1 Objects with Oxygen Abundances from T_e Measurements // *ApJS*. 2004. T. 153. C. 429–445.
44. Koleva M., Prugniel P., Bouchard A., Wu Y. ULySS: a full spectrum fitting package // *A&A*. 2009. T. 501. C. 1269–1279.
45. Afanasiev V. L., Moiseev A. V. The SCORPIO Universal Focal Reducer of the 6-m Telescope // *Astronomy Letters*. 2005. T. 31. C. 194–204.
46. Filippenko A. V. The importance of atmospheric differential refraction in spectrophotometry. // *PASP*. 1982. T. 94. C. 715–721.
47. Haynes M. P., Giovanelli R., Kent B. R. [и др.]. The Arecibo Legacy Fast ALFA Survey: The ALFALFA Extragalactic H I Source Catalog // *ApJ*. 2018. T. 861, № 1. C. 49.
48. Izotov Y. I., Thuan T. X., Lipovetsky V. A. The Primordial Helium Abundance from a New Sample of Metal-deficient Blue Compact Galaxies // *ApJ*. 1994. T. 435. C. 647.
49. Afanasiev V. L., Moiseev A. V. Scorpio on the 6 m Telescope: Current State and Perspectives for Spectroscopy of Galactic and Extragalactic Objects // *Baltic Astronomy*. 2011. T. 20. C. 363–370.

50. Markwardt C. B. Non-linear Least-squares Fitting in IDL with MPFIT // *Astronomical Data Analysis Software and Systems XVIII*. T. 411. 2009. C. 251.
51. Le Borgne D., Rocca-Volmerange B., Prugniel P. [и др.]. Evolutionary synthesis of galaxies at high spectral resolution with the code PEGASE-HR. Metallicity and age tracers // *A&A*. 2004. T. 425. C. 881–897.
52. Cardelli J. A., Clayton G. C., Mathis J. S. The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction // *ApJ*. 1989. T. 345. C. 245.
53. Fitzpatrick E. L. Correcting for the Effects of Interstellar Extinction // *PASP*. 1999. T. 111, № 755. C. 63–75.
54. Moiseev A. V., Egorov O. V. Reduction of CCD observations made with the Fabry-Perot scanning interferometer. II. Additional procedures // *Astrophysical Bulletin*. 2008. T. 63. C. 181–192.
55. Moiseev A. V. Reduction of CCD observations with scanning Fabry-Perot interferometer // *Bulletin of the Special Astrophysics Observatory*. 2002. T. 54. C. 74–88.
56. Moiseev A. V. Reduction of CCD observations made with a scanning Fabry-Perot interferometer. III. Wavelength scale refinement // *Astrophysical Bulletin*. 2015. T. 70. C. 494–500.
57. Prasad J., Chengalur J. FLAGCAL: a flagging and calibration package for radio interferometric data // *Experimental Astronomy*. 2012. T. 33, № 1. C. 157–171.
58. Lupton R. 2005. URL: <http://classic.sdss.org/dr4/algorithms/sdssUBVRITransform.html#Lupton2005>.
59. Fukugita M., Ichikawa T., Gunn J. E. [и др.]. The Sloan Digital Sky Survey Photometric System // *AJ*. 1996. T. 111. C. 1748.
60. Lupton R., Gunn J. E., Ivezić Z. [и др.]. The SDSS Imaging Pipelines // *Astronomical Data Analysis Software and Systems X*. T. 238. 2001. C. 269.
61. Alam S., Albareti F. D., Allende Prieto C. [и др.]. The Eleventh and Twelfth Data Releases of the Sloan Digital Sky Survey: Final Data from SDSS-III // *ApJS*. 2015. T. 219, № 1. C. 12.

62. van Zee L. The Evolutionary Status of Isolated Dwarf Irregular Galaxies. I. UBV and H α Imaging Observations // *AJ*. 2000. T. 119, № 6. C. 2757–2779.
63. Abazajian K. N., Adelman-McCarthy J. K., Agüeros M. A. [и др.]. The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey // *ApJS*. 2009. T. 182. C. 543–558.
64. Fliri J., Trujillo I. The IAC Stripe 82 Legacy Project: a wide-area survey for faint surface brightness astronomy // *MNRAS*. 2016. T. 456. C. 1359–1373.
65. Román J., Trujillo I. The IAC Stripe82 Legacy Survey: Improved Sky-rectified Images // *Research Notes of the American Astronomical Society*. 2018. T. 2, № 3. C. 144.
66. Pustilnik S. A., Perepelitsyna Y. A., Kniazev A. Y. Study of galaxies in the Lynx-Cancer void - VII. New oxygen abundances // *MNRAS*. 2016. T. 463. C. 670–683.
67. Kniazev A. Y., Zijlstra A. A., Grebel E. K. [и др.]. The metallicity extremes of the Sagittarius dSph: SALT spectroscopy of PNe // *MNRAS*. 2008. T. 388, № 4. C. 1667–1678.
68. Aller L. H. *Physics of thermal gaseous nebulae*. 1984.
69. Izotov Y. I., Stasińska G., Meynet G. [и др.]. The chemical composition of metal-poor emission-line galaxies in the Data Release 3 of the Sloan Digital Sky Survey // *A&A*. 2006. T. 448, № 3. C. 955–970.
70. Whitford A. E. The law of interstellar reddening. // *AJ*. 1958. T. 63. C. 201–207.
71. Izotov Y. I., Thuan T. X. MMT Observations of New Extremely Metal-poor Emission-Line Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey // *ApJ*. 2007. T. 665, № 2. C. 1115–1128.
72. Stasińska G., Izotov Y. Modeling the emission line sequence of H II galaxies // *A&A*. 2003. T. 397. C. 71–85.
73. Pilyugin L. S., Thuan T. X. Oxygen Abundance Determination in H II Regions: The Strong Line Intensities–Abundance Calibration Revisited // *ApJ*. 2005. T. 631, № 1. C. 231–243.

74. Yin S. Y., Liang Y. C., Hammer F. [и др.]. Empirical strong-line oxygen abundance calibrations from galaxies with electron-temperature measurements // *A&A*. 2007. Т. 462, № 2. С. 535—546.
75. Pilyugin L. S., Vilchez J. M., Thuan T. X. New Improved Calibration Relations for the Determination of Electron Temperatures and Oxygen and Nitrogen Abundances in H II Regions // *ApJ*. 2010. Т. 720, № 2. С. 1738—1751.
76. Pilyugin L. S., Mattsson L. Abundance determination in HII regions from spectra without the [OII] λ 3727+ λ 3729 line // *MNRAS*. 2011. Т. 412, № 2. С. 1145—1150.
77. Sánchez Almeida J., Pérez-Montero E., Morales-Luis A. B. [и др.]. Search for Extremely Metal-poor Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. (II). High Electron Temperature Objects // *ApJ*. 2016. Т. 819, № 2. С. 110.
78. Pilyugin L. S., Grebel E. K., Mattsson L. 'Counterpart' method for abundance determinations in H II regions // *MNRAS*. 2012. Т. 424. С. 2316—2329.
79. Kniazev A. Y., Grebel E. K., Hao L. [и др.]. Discovery of Eight New Extremely Metal Poor Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey // *ApJ*. 2003. Т. 593. С. L73—L76.
80. Pustilnik S. A., Tepliakova A. L., Kniazev A. Y. Study of galaxies in the Lynx-Cancer void. II. Element abundances // *Astrophysical Bulletin*. 2011. Т. 66. С. 255—292.
81. Izotov Y. I., Guseva N. G., Fricke K. J., Henkel C. Low-redshift lowest-metallicity star-forming galaxies in the SDSS DR14 // *A&A*. 2019. Т. 623. A40.
82. Pustilnik S. A., Egorova E. S., Kniazev A. Y. [и др.]. XMP gas-rich dwarfs in nearby voids: results of BTA spectroscopy // *MNRAS*. 2021. Т. 507, № 1. С. 944—962.
83. Pilyugin L. S., Grebel E. K. New calibrations for abundance determinations in H II regions // *MNRAS*. 2016. Т. 457. С. 3678—3692.
84. Blanc G. A., Kewley L., Vogt F. P. A., Dopita M. A. IZI: Inferring the Gas Phase Metallicity (Z) and Ionization Parameter (q) of Ionized Nebulae Using Bayesian Statistics // *ApJ*. 2015. Т. 798. С. 99.

85. Levesque E. M., Kewley L. J., Larson K. L. Theoretical Modeling of Star-Forming Galaxies. I. Emission-Line Diagnostic Grids for Local and Low-Metallicity Galaxies // *AJ*. 2010. T. 139. C. 712–727.
86. Kewley L. J., Ellison S. L. Metallicity Calibrations and the Mass-Metallicity Relation for Star-forming Galaxies // *ApJ*. 2008. T. 681. C. 1183–1204.
87. López-Sánchez Á. R., Dopita M. A., Kewley L. J. [и др.]. Eliminating error in the chemical abundance scale for extragalactic H II regions // *MNRAS*. 2012. T. 426. C. 2630–2651.
88. Guseva N. G., Papaderos P., Meyer H. T. [и др.]. An investigation of the luminosity-metallicity relation for a large sample of low-metallicity emission-line galaxies // *A&A*. 2009. T. 505. C. 63–72.
89. Guseva N. G., Izotov Y. I., Fricke K. J., Henkel C. Searching for metal-deficient emission-line galaxy candidates: the final sample of the SDSS DR12 galaxies // *A&A*. 2017. T. 599. A65.
90. Pustilnik S. A., Martin J.-M., Lyamina Y. A., Kniazev A. Y. Properties of the most metal-poor gas-rich LSB dwarf galaxies SDSS J0015+0104 and J2354-0005 residing in the Eridanus void // *MNRAS*. 2013. T. 432. C. 2224–2230.
91. Book Review: Large-scale structures in the universe / Wiley/Praxis, 1997 1998 // *Journal of the British Astronomical Association*. 1998. T. 108. C. 172.
92. Kauffmann G., Fairall A. P. Voids in the distribution of galaxies - an assessment of their significance and derivation of a void spectrum // *MNRAS*. 1991. T. 248. C. 313–324.
93. Pustilnik S. A., Tepliakova A. L. Study of galaxies in the Lynx-Cancer void - I. Sample description // *MNRAS*. 2011. T. 415. C. 1188–1201.
94. Makarov D., Prugniel P., Terekhova N. [и др.]. HyperLEDA. III. The catalogue of extragalactic distances // *A&A*. 2014. T. 570. A13.
95. Hill D. T., Driver S. P., Cameron E. [и др.]. The ugrizYJHK luminosity distributions and densities from the combined MGC, SDSS and UKIDSS LAS data sets // *MNRAS*. 2010. T. 404. C. 1215–1230.
96. Schlafly E. F., Finkbeiner D. P. Measuring Reddening with Sloan Digital Sky Survey Stellar Spectra and Recalibrating SFD // *ApJ*. 2011. T. 737. C. 103.

97. Blum R. D., Burleigh K., Dey A. [и др.]. The DECam Legacy Survey // American Astronomical Society Meeting Abstracts #228. Т. 228. 2016. С. 317.01.
98. Gunn J. E., Carr M., Rockosi C. [и др.]. The Sloan Digital Sky Survey Photometric Camera // AJ. 1998. Т. 116. С. 3040—3081.
99. York D. G., Adelman J., Anderson Jr. J. E. [и др.]. The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary // AJ. 2000. Т. 120. С. 1579—1587.
100. Pilyugin L. S., Grebel E. K., Kniazev A. Y. The Abundance Properties of Nearby Late-type Galaxies. I. The Data // AJ. 2014. Т. 147. С. 131.
101. Baldwin J. A., Phillips M. M., Terlevich R. Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects // PASP. 1981. Т. 93. С. 5—19.
102. Allen M. G., Groves B. A., Dopita M. A. [и др.]. The MAPPINGS III Library of Fast Radiative Shock Models // ApJS. 2008. Т. 178, № 1. С. 20—55.
103. van Zee L., Haynes M. P., Salzer J. J. Optical Colors and the Metallicities of Gas-Rich Quiescent Dwarf Galaxies // AJ. 1997. Т. 114. С. 2479.
104. Izotov Y. I., Thuan T. X., Guseva N. G. Hunting for extremely metal-poor emission-line galaxies in the Sloan Digital Sky Survey: MMT and 3.5 m APO observations // A&A. 2012. Т. 546. A122.
105. Pustilnik S. A., Martin J.-M. Study of galaxies in the Lynx-Cancer void. VI. H I-observations with Nançay Radio Telescope // A&A. 2016. Т. 596. A86.
106. Chengalur J. N., Pustilnik S. A. Discovery of an extremely gas rich dwarf triplet near the centre of the Lynx-Cancer void // MNRAS. 2013. Т. 428, № 2. С. 1579—1586.
107. Pustilnik S. A., Martin J. .-, Tepliakova A. L., Kniazev A. Y. Study of galaxies in the Lynx-Cancer void - III. New extreme low surface brightness dwarf galaxies // MNRAS. 2011. Т. 417, № 2. С. 1335—1349.
108. Chengalur J. N., Pustilnik S. A., Egorova E. S. UGC 3672: an unusual merging triplet of gas-rich galaxies in the Lynx-Cancer void // MNRAS. 2017. Т. 465. С. 2342—2351.
109. Allende Prieto C., Lambert D. L., Asplund M. The Forbidden Abundance of Oxygen in the Sun // ApJ. 2001. Т. 556. С. L63—L66.

110. Asplund M., Grevesse N., Sauval A. J., Scott P. The Chemical Composition of the Sun // *ARA&A*. 2009. T. 47. C. 481–522.
111. Karachentsev I. D., Makarov D. I., Karachentseva V. E., Melnyk O. V. Catalog of nearby isolated galaxies in the volume $z < 0.01$ // *Astrophysical Bulletin*. 2011. T. 66. C. 1–27.
112. Nuza S. E., Kitaura F.-S., Heß S. [и др.]. The cosmic web of the Local Universe: cosmic variance, matter content and its relation to galaxy morphology // *MNRAS*. 2014. T. 445, № 1. C. 988–1001.
113. Tojeiro R., Eardley E., Peacock J. A. [и др.]. Galaxy and Mass Assembly (GAMA): halo formation times and halo assembly bias on the cosmic web // *MNRAS*. 2017. T. 470, № 3. C. 3720–3741.
114. Hahn O., Carollo C. M., Porciani C., Dekel A. The evolution of dark matter halo properties in clusters, filaments, sheets and voids // *MNRAS*. 2007. T. 381, № 1. C. 41–51.
115. Kreckel K., Joung M. R., Cen R. Simulated Void Galaxies in the Standard Cold Dark Matter Model // *ApJ*. 2011. T. 735, № 2. C. 132.
116. Kniazev A. Y., Egorova E. S., Pustilnik S. A. Study of galaxies in the Eridanus void. Sample and oxygen abundances // *MNRAS*. 2018. T. 479. C. 3842–3857.
117. Izotov Y. I., Thuan T. X., Lipovetsky V. A. The Primordial Helium Abundance: Systematic Effects and a New Determination // *ApJS*. 1997. T. 108, № 1. C. 1–39.
118. Aver E., Olive K. A., Skillman E. D. An MCMC determination of the primordial helium abundance // *J. Cosmology Astropart. Phys.* 2012. T. 2012, № 4. C. 004.
119. Abolfathi B., Aguado D. S., Aguilar G. [и др.]. The Fourteenth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Spectroscopic Data from the Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey and from the Second Phase of the Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment // *ApJS*. 2018. T. 235, № 2. C. 42.
120. Izotov Y. I., Guseva N. G., Fricke K. J., Henkel C. The bursting nature of star formation in compact star-forming galaxies from the Sloan Digital Sky Survey // *MNRAS*. 2016. T. 462, № 4. C. 4427–4434.

121. Cannon J. M., Giovanelli R., Haynes M. P. [и др.]. The Survey of H I in Extremely Low-mass Dwarfs (SHIELD) // *ApJ*. 2011. T. 739, № 1. C. L22.
122. McQuinn K. B. W., Cannon J. M., Dolphin A. E. [и др.]. Distance Determinations to SHIELD Galaxies from Hubble Space Telescope Imaging // *ApJ*. 2014. T. 785, № 1. C. 3.
123. Haurberg N. C., Salzer J. J., Cannon J. M., Marshall M. V. Oxygen Abundance Measurements of SHIELD Galaxies // *ApJ*. 2015. T. 800, № 2. C. 121.
124. Skillman E. D., Salzer J. J., Berg D. A. [и др.]. ALFALFA Discovery of the nearby Gas-rich Dwarf Galaxy Leo P. III. An Extremely Metal Deficient Galaxy // *AJ*. 2013. T. 146, № 1. C. 3.
125. Janowiecki S., Leisman L., Józsa G. [и др.]. (Almost) Dark HI Sources in the ALFALFA Survey: The Intriguing Case of HI1232+20 // *ApJ*. 2015. T. 801, № 2. C. 96.
126. Brunner S. W., McQuinn K. B. W., Salzer J. J. [и др.]. The Enigmatic (Almost) Dark Galaxy Coma P: Distance Measurement and Stellar Populations from HST Imaging // *AJ*. 2019. T. 157, № 2. C. 76.
127. James B. L., Kuposov S. E., Stark D. P. [и др.]. Blue diffuse dwarf galaxies: a clearer picture // *MNRAS*. 2017. T. 465, № 4. C. 3977–4015.
128. Hsyu T., Cooke R. J., Prochaska J. X., Bolte M. The Little Cub: Discovery of an Extremely Metal-poor Star-forming Galaxy in the Local Universe // *ApJ*. 2017. T. 845, № 2. C. L22.
129. Hsyu T., Cooke R. J., Prochaska J. X., Bolte M. Searching for the Lowest-metallicity Galaxies in the Local Universe // *ApJ*. 2018. T. 863, № 2. C. 134.
130. Sánchez Almeida J., Filho M. E., Dalla Vecchia C., Skillman E. D. On the Dearth of Ultra-faint Extremely Metal-poor Galaxies // *ApJ*. 2017. T. 835, № 2. C. 159.
131. Perepelitsyna Y. A., Pustilnik S. A., Kniazev A. Y. Study of galaxies in the Lynx-Cancer void. IV. Photometric properties // *Astrophysical Bulletin*. 2014. T. 69. C. 247–265.
132. Cooke R. J., Pettini M., Steidel C. C. Discovery of the most metal-poor damped Lyman- α system // *MNRAS*. 2017. T. 467, № 1. C. 802–811.

133. Robert P. F., Murphy M. T., O'Meara J. M. [и др.]. Exploring the origins of a new, apparently metal-free gas cloud at $z = 4.4$ // MNRAS. 2019. Т. 483, № 2. С. 2736—2747.
134. Pustilnik S. A., Tepliakova A. L., Kniazev A. Y. [и др.]. SDSS J092609.45+334304.1: a nearby unevolved galaxy // MNRAS. 2010. Т. 401, № 1. С. 333—341.
135. Ekta B., Chengalur J. N., Pustilnik S. A. HI and star formation in the most metal-deficient galaxies // MNRAS. 2008. Т. 391. С. 881—890.
136. Makarov D. I., Makarova L. N., Pustilnik S. A., Borisov S. B. Unusual void galaxy DDO 68: implications of the HST-resolved photometry // MNRAS. 2017. Т. 466, № 1. С. 556—563.
137. Annibali F., La Torre V., Tosi M. [и др.]. Chemical abundances and radial velocities in the extremely metal-poor galaxy DDO 68 // MNRAS. 2019. Т. 482, № 3. С. 3892—3914.
138. Izotov Y. I., Papaderos P., Guseva N. G. [и др.]. Two extremely metal-poor emission-line galaxies in the Sloan Digital Sky Survey // A&A. 2006. Т. 454, № 1. С. 137—141.
139. Moiseev A. V., Pustilnik S. A., Kniazev A. Y. Very metal-poor galaxies: ionized gas kinematics in nine objects // MNRAS. 2010. Т. 405. С. 2453—2470.
140. Fioc M., Rocca-Volmerange B. PEGASE.2, a metallicity-consistent spectral evolution model of galaxies: the documentation and the code // arXiv e-prints. 1999. astro-ph/9912179.
141. Pustilnik S. A., Tepliakova A. L., Kniazev A. Y. Study of the galaxy DDO 68: New evidence for its youth // Astronomy Letters. 2008. Т. 34, № 7. С. 457—467.
142. Tully R. B., Shaya E. J., Karachentsev I. D. [и др.]. Our Peculiar Motion Away from the Local Void // ApJ. 2008. Т. 676, № 1. С. 184—205.
143. Zibetti S., Charlot S., Rix H.-W. Resolved stellar mass maps of galaxies - I. Method and implications for global mass estimates // MNRAS. 2009. Т. 400, № 3. С. 1181—1198.

144. Hoeft M., Yepes G., Gottlöber S., Springel V. Dwarf galaxies in voids: suppressing star formation with photoheating // *MNRAS*. 2006. T. 371, № 1. C. 401–414.
145. Nicholls D. C., Jerjen H., Dopita M. A., Basurah H. Nebular Metallicities in Two Isolated Local Void Dwarf Galaxies // *ApJ*. 2014. T. 780, № 1. C. 88.
146. Flewelling H. A., Magnier E. A., Chambers K. C. [и др.]. The Pan-STARRS1 Database and Data Products // *ApJS*. 2020. T. 251, № 1. C. 7.
147. Abbott T. M. C., Abdalla F. B., Allam S. [и др.]. The Dark Energy Survey: Data Release 1 // *ApJS*. 2018. T. 239, № 2. C. 18.
148. Gurovich S., Freeman K., Jerjen H. [и др.]. The Slope of the Baryonic Tully-Fisher Relation // *AJ*. 2010. T. 140, № 3. C. 663–676.
149. Kirby E. M., Jerjen H., Ryder S. D., Driver S. P. Deep Near-Infrared Surface Photometry of 57 Galaxies in the Local Sphere of Influence // *AJ*. 2008. T. 136, № 5. C. 1866–1888.
150. Kreckel K., Peebles P. J. E., van Gorkom J. H. [и др.]. KK 246: A Dwarf Galaxy with an Extended H I Disk in the Local Void // *AJ*. 2011. T. 141, № 6. C. 204.
151. Karachentsev I. D., Kaisina E. I., Makarov D. I. Suites of Dwarfs around nearby Giant Galaxies // *AJ*. 2014. T. 147, № 1. C. 13.
152. Izotov Y. I., Thuan T. X., Guseva N. G. J2229+2725: an extremely low metallicity dwarf compact star-forming galaxy with an exceptionally high $[\text{O III}]\lambda 5007/[\text{O II}]\lambda 3727$ flux ratio of 53 // *MNRAS*. 2021. T. 504, № 3. C. 3996–4004.
153. Garnett D. R. The Luminosity-Metallicity Relation, Effective Yields, and Metal Loss in Spiral and Irregular Galaxies // *ApJ*. 2002. T. 581, № 2. C. 1019–1031.
154. Thuan T. X., Lecavelier des Etangs A., Izotov Y. I. Abundances in the H I Envelope of the Extremely Low Metallicity Blue Compact Dwarf Galaxy SBS 0335-052 from Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer Observations // *ApJ*. 2005. T. 621, № 1. C. 269–277.
155. Rieder S., van de Weygaert R., Cautun M. [и др.]. Assembly of filamentary void galaxy configurations // *MNRAS*. 2013. T. 435, № 1. C. 222–241.

156. Pustilnik S. A., Egorova E. S., Perepelitsyna Y. A., Kniazev A. Y. XMP gas-rich dwarfs in nearby voids: candidate selection // MNRAS. 2020. T. 492, № 1. C. 1078–1090.
157. Pustilnik S. A., Kniazev A. Y., Perepelitsyna Y. A., Egorova E. S. XMP gas-rich dwarfs in nearby voids: results of SALT spectroscopy // MNRAS. 2020. T. 493, № 1. C. 830–846.
158. Dubinski J., da Costa L. N., Goldwirth D. S. [и др.]. Void Evolution and the Large-Scale Structure // ApJ. 1993. T. 410. C. 458.
159. Sheth R. K., van de Weygaert R. A hierarchy of voids: much ado about nothing // MNRAS. 2004. T. 350, № 2. C. 517–538.
160. Sahni V., Sathyaprakah B. S., Shandarin S. F. The Evolution of Voids in the Adhesion Approximation // ApJ. 1994. T. 431. C. 20.
161. Beygu B., Kreckel K., van de Weygaert R. [и др.]. An Interacting Galaxy System along a Filament in a Void // AJ. 2013. T. 145, № 5. C. 120.
162. Springob C. M., Haynes M. P., Giovanelli R., Kent B. R. A Digital Archive of H I 21 Centimeter Line Spectra of Optically Targeted Galaxies // ApJS. 2005. T. 160, № 1. C. 149–162.
163. Begum A., Chengalur J. N., Karachentsev I. D. [и др.]. FIGGS: Faint Irregular Galaxies GMRT Survey - overview, observations and first results // MNRAS. 2008. T. 386, № 3. C. 1667–1682.
164. Moiseev A. V. Ionized gas rotation curves in nearby dwarf galaxies // Astrophysical Bulletin. 2014. T. 69. C. 1–20.
165. Salpeter E. E. The Luminosity Function and Stellar Evolution. // ApJ. 1955. T. 121. C. 161.
166. Kroupa P. The Initial Mass Function of Stars: Evidence for Uniformity in Variable Systems // Science. 2002. T. 295, № 5552. C. 82–91.
167. Yun M. S., Ho P. T. P., Lo K. Y. A high-resolution image of atomic hydrogen in the M81 group of galaxies // Nature. 1994. T. 372, № 6506. C. 530–532.
168. Hibbard J. E., Bianchi L., Thilker D. A. [и др.]. Ultraviolet Morphology and Star Formation in the Tidal Tails of NGC 4038/39 // ApJ. 2005. T. 619, № 1. C. L87–L90.

169. Neff S. G., Thilker D. A., Seibert M. [и др.]. Ultraviolet Emission from Stellar Populations within Tidal Tails: Catching the Youngest Galaxies in Formation? // *ApJ*. 2005. T. 619, № 1. С. L91—L94.
170. Bekki K. Formation of Ultra-compact Blue Dwarf Galaxies and Their Evolution into Nucleated Dwarfs // *ApJ*. 2015. T. 812, № 1. С. L14.
171. Bekki K. Formation of emission line dots and extremely metal-deficient dwarfs from almost dark galaxies // *MNRAS*. 2015. T. 454, № 1. С. L41—L45.
172. Sánchez Almeida J., Elmegreen B. G., Muñoz-Tuñón C. [и др.]. Localized Starbursts in Dwarf Galaxies Produced by the Impact of Low-metallicity Cosmic Gas Clouds // *ApJ*. 2015. T. 810, № 2. С. L15.
173. Guseva N. G., Izotov Y. I., Fricke K. J., Henkel C. New candidates for extremely metal-poor emission-line galaxies in the SDSS/BOSS DR10 // *A&A*. 2015. T. 579. A11.
174. McQuinn K. B. W., Berg D. A., Skillman E. D. [и др.]. The Leoncino Dwarf Galaxy: Exploring the Low-metallicity End of the Luminosity-Metallicity and Mass-Metallicity Relations // *ApJ*. 2020. T. 891, № 2. С. 181.
175. Toomre A., Toomre J. Galactic Bridges and Tails // *ApJ*. 1972. T. 178. С. 623—666.
176. Hernquist L. Structure of Merger Remnants. I. Bulgeless Progenitors // *ApJ*. 1992. T. 400. С. 460.
177. Barnes J. E., Hernquist L. Transformations of Galaxies. II. Gasdynamics in Merging Disk Galaxies // *ApJ*. 1996. T. 471. С. 115.
178. Springel V., Hernquist L. Formation of a Spiral Galaxy in a Major Merger // *ApJ*. 2005. T. 622, № 1. С. L9—L12.
179. Robertson B., Bullock J. S., Cox T. J. [и др.]. A Merger-driven Scenario for Cosmological Disk Galaxy Formation // *ApJ*. 2006. T. 645, № 2. С. 986—1000.
180. Hopkins P. F., Cox T. J., Younger J. D., Hernquist L. How do Disks Survive Mergers? // *ApJ*. 2009. T. 691, № 2. С. 1168—1201.
181. Bournaud F., Chapon D., Teyssier R. [и др.]. Hydrodynamics of High-redshift Galaxy Collisions: From Gas-rich Disks to Dispersion-dominated Mergers and Compact Spheroids // *ApJ*. 2011. T. 730, № 1. С. 4.

182. Bigiel F., Leroy A., Walter F. [и др.]. The Star Formation Law in Nearby Galaxies on Sub-Kpc Scales // *AJ*. 2008. Т. 136. С. 2846–2871.
183. Leroy A. K., Walter F., Brinks E. [и др.]. The Star Formation Efficiency in Nearby Galaxies: Measuring Where Gas Forms Stars Effectively // *AJ*. 2008. Т. 136. С. 2782–2845.
184. Bigiel F., Leroy A. K., Walter F. [и др.]. A Constant Molecular Gas Depletion Time in Nearby Disk Galaxies // *ApJ*. 2011. Т. 730. С. L13.
185. Leroy A. K., Walter F., Sandstrom K. [и др.]. Molecular Gas and Star Formation in nearby Disk Galaxies // *AJ*. 2013. Т. 146. С. 19.
186. Lilly S. J., Carollo C. M., Pipino A. [и др.]. Gas Regulation of Galaxies: The Evolution of the Cosmic Specific Star Formation Rate, the Metallicity-Mass-Star-formation Rate Relation, and the Stellar Content of Halos // *ApJ*. 2013. Т. 772. С. 119.
187. L’Huillier B., Combes F., Semelin B. Mass assembly of galaxies. Smooth accretion versus mergers // *A&A*. 2012. Т. 544. A68.
188. Di Matteo P., Bournaud F., Martig M. [и др.]. On the frequency, intensity, and duration of starburst episodes triggered by galaxy interactions and mergers // *A&A*. 2008. Т. 492. С. 31–49.
189. Fraternali F., Binney J. J. A dynamical model for the extraplanar gas in spiral galaxies // *MNRAS*. 2006. Т. 366. С. 449–466.
190. Fraternali F., Binney J. J. Accretion of gas on to nearby spiral galaxies // *MNRAS*. 2008. Т. 386. С. 935–944.
191. Marinacci F., Binney J., Fraternali F. [и др.]. The mode of gas accretion on to star-forming galaxies // *MNRAS*. 2010. Т. 404. С. 1464–1474.
192. Semelin B., Combes F. New multi-zoom method for N-body simulations: application to galaxy growth by accretion // *A&A*. 2005. Т. 441. С. 55–67.
193. Kereš D., Katz N., Weinberg D. H., Davé R. How do galaxies get their gas? // *MNRAS*. 2005. Т. 363. С. 2–28.
194. Dekel A., Birnboim Y. Galaxy bimodality due to cold flows and shock heating // *MNRAS*. 2006. Т. 368. С. 2–20.

195. Dekel A., Birnboim Y., Engel G. [и др.]. Cold streams in early massive hot haloes as the main mode of galaxy formation // *Nature*. 2009. T. 457. C. 451–454.
196. Wang J., Navarro J. F., Frenk C. S. [и др.]. Assembly history and structure of galactic cold dark matter haloes // *MNRAS*. 2011. T. 413. C. 1373–1382.
197. van de Voort F., Schaye J., Booth C. M. [и др.]. The rates and modes of gas accretion on to galaxies and their gaseous haloes // *MNRAS*. 2011. T. 414. C. 2458–2478.
198. Montuori M., Di Matteo P., Lehnert M. D. [и др.]. The dilution peak, metallicity evolution, and dating of galaxy interactions and mergers // *A&A*. 2010. T. 518. A56.
199. Birnboim Y., Dekel A. Virial shocks in galactic haloes? // *MNRAS*. 2003. T. 345. C. 349–364.
200. Finkelman I., Moiseev A., Brosch N., Katkov I. Hoag’s Object: evidence for cold accretion on to an elliptical galaxy // *MNRAS*. 2011. T. 418. C. 1834–1849.
201. Brosch N., Finkelman I., Oosterloo T. [и др.]. H I in HO: Hoag’s Object revisited // *MNRAS*. 2013. T. 435. C. 475–481.
202. Karachentseva V. E., Karachentsev I. D., Sharina M. E. Isolated dwarf galaxies in the local supercluster and its surroundings // *Astrophysics*. 2010. T. 53. C. 462–474.
203. Karachentsev I. D., Makarov D. I., Kaisina E. I. Updated Nearby Galaxy Catalog // *AJ*. 2013. T. 145. C. 101.
204. Hutchings J. B. Star Formation Knots in IRAS Galaxies // *AJ*. 1996. T. 111. C. 712.
205. Eskridge P. B., Frogel J. A., Pogge R. W. [и др.]. Near-Infrared and Optical Morphology of Spiral Galaxies // *ApJS*. 2002. T. 143. C. 73–111.
206. Smoker J. V., Davies R. D., Axon D. J. H I and optical observations of the NGC 428 field. // *MNRAS*. 1996. T. 281. C. 393–405.
207. Wright E. L., Eisenhardt P. R. M., Mainzer A. K. [и др.]. The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission Description and Initial On-orbit Performance // *AJ*. 2010. T. 140. C. 1868–1881.

208. Mainzer A., Bauer J., Grav T. [и др.]. Preliminary Results from NEOWISE: An Enhancement to the Wide-field Infrared Survey Explorer for Solar System Science // *ApJ*. 2011. T. 731. C. 53.
209. Skrutskie M. F., Cutri R. M., Stiening R. [и др.]. The Two Micron All Sky Survey (2MASS) // *AJ*. 2006. T. 131. C. 1163–1183.
210. Garrido O., Marcelin M., Amram P. [и др.]. GHASP: an H α kinematic survey of spiral and irregular galaxies - IV. 44 new velocity fields. Extension, shape and asymmetry of H α rotation curves // *MNRAS*. 2005. T. 362. C. 127–166.
211. Moiseev A. V., Smirnova K. I., Smirnova A. A., Reshetnikov V. P. A new catalogue of polar-ring galaxies selected from the Sloan Digital Sky Survey // *MNRAS*. 2011. T. 418. C. 244–257.
212. Iodice E., Arnaboldi M., De Lucia G. [и др.]. The Puzzle of the Polar Structure in NGC 4650A // *AJ*. 2002. T. 123. C. 195–206.
213. Brosch N., Kniazev A. Y., Moiseev A., Pustilnik S. A. On the nature of the apparent ring galaxy SDSS J075234.33+292049.8 // *MNRAS*. 2010. T. 401. C. 2067–2080.
214. Moiseev A. V., Mustsevoi V. V. The Effect of Projection on the Observed Gas Velocity Fields in Barred Galaxies // *Astronomy Letters*. 2000. T. 26. C. 565–571.
215. Begeman K. G. H I rotation curves of spiral galaxies. I - NGC 3198 // *A&A*. 1989. T. 223. C. 47–60.
216. Cabrera-Lavers A., Garzón F. An Optical Study of a Sample of Spiral Galaxies // *AJ*. 2004. T. 127. C. 1386–1404.
217. Corsini E. M., Pizzella A., Coccato L., Bertola F. Minor-axis velocity gradients in spirals and the case of inner polar disks // *A&A*. 2003. T. 408. C. 873–885.
218. Moiseev A. V. Inner polar rings and disks: Observed properties // *Astrophysical Bulletin*. 2012. T. 67. C. 147–159.
219. Weaver R., McCray R., Castor J. [и др.]. Interstellar bubbles. II - Structure and evolution // *ApJ*. 1977. T. 218. C. 377–395.
220. Egorov O. V., Lozinskaya T. A., Moiseev A. V., Shchekinov Y. A. Complexes of triggered star formation in supergiant shell of Holmberg II // *MNRAS*. 2017. T. 464, № 1. C. 1833–1853.

221. Egorov O. V., Lozinskaya T. A., Moiseev A. V., Smirnov-Pinchukov G. V. Star formation complexes in the ‘galaxy-sized’ supergiant shell of the galaxy HolmbergI // MNRAS. 2018. T. 478. C. 3386–3409.
222. Moiseev A. V., Lozinskaya T. A. Ionized gas velocity dispersion in nearby dwarf galaxies: looking at supersonic turbulent motions // MNRAS. 2012. T. 423, № 2. C. 1831–1844.
223. Kewley L. J., Dopita M. A., Sutherland R. S. [и др.]. Theoretical Modeling of Starburst Galaxies // ApJ. 2001. T. 556. C. 121–140.
224. Kauffmann G., Heckman T. M., Tremonti C. [и др.]. The host galaxies of active galactic nuclei // MNRAS. 2003. T. 346. C. 1055–1077.
225. Zhang K., Yan R., Bundy K. [и др.]. SDSS-IV MaNGA: the impact of diffuse ionized gas on emission-line ratios, interpretation of diagnostic diagrams and gas metallicity measurements // MNRAS. 2017. T. 466, № 3. C. 3217–3243.
226. Renaud F., Bournaud F., Emsellem E. [и др.]. Environmental regulation of cloud and star formation in galactic bars // MNRAS. 2015. T. 454. C. 3299–3310.
227. Sil’chenko O. K., Chilingarian I. V., Sotnikova N. Y., Afanasiev V. L. Large-scale nested stellar discs in NGC 7217 // MNRAS. 2011. T. 414. C. 3645–3655.
228. Arnaboldi M., Sparke L. S. Self-gravitating polar rings in axisymmetric and triaxial galaxy potentials // AJ. 1994. T. 107. C. 958–970.
229. Moiseev A. V. Warped polar ring in the Arp 212 galaxy // Astrophysical Bulletin. 2008. T. 63. C. 201–215.
230. Vika M., Bamford S. P., Häußler B. [и др.]. MegaMorph - multiwavelength measurement of galaxy structure. Sérsic profile fits to galaxies near and far // MNRAS. 2013. T. 435. C. 623–649.
231. Belfiore F., Maiolino R., Tremonti C. [и др.]. SDSS IV MaNGA - metallicity and nitrogen abundance gradients in local galaxies // MNRAS. 2017. T. 469. C. 151–170.
232. Sánchez S. F., Rosales-Ortega F. F., Iglesias-Páramo J. [и др.]. A characteristic oxygen abundance gradient in galaxy disks unveiled with CALIFA // A&A. 2014. T. 563. A49.

233. Ho I.-T., Kudritzki R.-P., Kewley L. J. [и др.]. Metallicity gradients in local field star-forming galaxies: insights on inflows, outflows, and the coevolution of gas, stars and metals // MNRAS. 2015. T. 448. C. 2030–2054.
234. Bresolin F., Kennicutt R. C. Abundance gradients in low surface brightness spirals: clues on the origin of common gradients in galactic discs // MNRAS. 2015. T. 454. C. 3664–3673.
235. Egorova E. S., Moiseev A. V., Egorov O. V. Search for gas accretion imprints in voids - I. Sample selection and results for NGC 428 // MNRAS. 2019. T. 482, № 3. C. 3403–3414.
236. Arakelian M. A. The Galaxies of High Surface Brightness // Communications of the Byurakan Astrophysical Observatory. 1975. T. 47. C. 3–42.
237. Saburova A. S., Chilingarian I. V., Kasparova A. V. [и др.]. Observational insights on the origin of giant low surface brightness galaxies // MNRAS. 2021.
238. Saburova A. S., Chilingarian I. V., Kasparova A. V. [и др.]. UGC 1378 - a Milky Way sized galaxy embedded in a giant low surface brightness disc // MNRAS. 2019. T. 489, № 4. C. 4669–4678.
239. Lelli F., Fraternali F., Sancisi R. Structure and dynamics of giant low surface brightness galaxies // A&A. 2010. T. 516. A11.
240. Meyer M. J., Zwaan M. A., Webster R. L. [и др.]. The HIPASS catalogue - I. Data presentation // MNRAS. 2004. T. 350, № 4. C. 1195–1209.
241. Greco J. P., Greene J. E., Strauss M. A. [и др.]. Illuminating Low Surface Brightness Galaxies with the Hyper Suprime-Cam Survey // ApJ. 2018. T. 857, № 2. C. 104.
242. Brodie J. P., Romanowsky A. J., Strader J., Forbes D. A. The Relationships among Compact Stellar Systems: A Fresh View of Ultracompact Dwarfs // AJ. 2011. T. 142, № 6. C. 199.
243. van Dokkum P. G., Abraham R., Merritt A. [и др.]. Forty-seven Milky Way-sized, Extremely Diffuse Galaxies in the Coma Cluster // ApJ. 2015. T. 798, № 2. C. L45.

244. Chilingarian I. V., Afanasiev A. V., Grishin K. A. [и др.]. Internal Dynamics and Stellar Content of Nine Ultra-diffuse Galaxies in the Coma Cluster Prove Their Evolutionary Link with Dwarf Early-type Galaxies // *ApJ*. 2019. T. 884, № 1. C. 79.
245. Mancera Piña P. E., Fraternali F., Adams E. A. K. [и др.]. Off the Baryonic Tully-Fisher Relation: A Population of Baryon-dominated Ultra-diffuse Galaxies // *ApJ*. 2019. T. 883, № 2. C. L33.
246. Gil de Paz A., Madore B. F., Pevunova O. Palomar/Las Campanas Imaging Atlas of Blue Compact Dwarf Galaxies. I. Images and Integrated Photometry // *ApJS*. 2003. T. 147, № 1. C. 29–59.
247. Kennicutt Robert C. J. Star Formation in Galaxies Along the Hubble Sequence // *ARA&A*. 1998. T. 36. C. 189–232.
248. Peng C. Y., Ho L. C., Impey C. D., Rix H.-W. Detailed Decomposition of Galaxy Images. II. Beyond Axisymmetric Models // *AJ*. 2010. T. 139, № 6. C. 2097–2129.
249. Kormendy J., Bender R., Cornell M. E. Supermassive black holes do not correlate with galaxy disks or pseudobulges // *Nature*. 2011. T. 469, № 7330. C. 374–376.
250. Zhao D., Aragón-Salamanca A., Conselice C. J. The link between morphology and structure of brightest cluster galaxies: automatic identification of cDs // *MNRAS*. 2015. T. 448, № 3. C. 2530–2545.
251. Moiseev A. V., Tikhonov A. V., Klypin A. What controls the ionized gas turbulent motions in dwarf galaxies? // *MNRAS*. 2015. T. 449, № 4. C. 3568–3580.
252. Lindblad P. A. B., Kristen H. Hydrodynamical simulations of the barred spiral galaxy NGC 1300. Dynamical interpretation of observations // *A&A*. 1996. T. 313. C. 733–749.
253. Lin L.-H., Wang H.-H., Hsieh P.-Y. [и др.]. Hydrodynamical Simulations of the Barred Spiral Galaxy NGC 1097 // *ApJ*. 2013. T. 771, № 1. C. 8.
254. Sparke L. S., van Moorsel G., Schwarz U. J., Vogelaar M. The Remarkable Warped and Twisted Gas Disk in NGC 3718 // *AJ*. 2009. T. 137, № 4. C. 3976–3992.

255. Moiseev A. V., Valdés J. R., Chavushyan V. H. Structure and kinematics of candidatedouble-barred galaxies // *A&A*. 2004. T. 421. C. 433–453.
256. Chilingarian I. V., Zolotukhin I. Y. A universal ultraviolet-optical colour-colour-magnitude relation of galaxies // *MNRAS*. 2012. T. 419, № 2. C. 1727–1739.
257. Kewley L. J., Groves B., Kauffmann G., Heckman T. The host galaxies and classification of active galactic nuclei // *MNRAS*. 2006. T. 372. C. 961–976.
258. Oey M. S., Meurer G. R., Yelda S. [и др.]. The Survey for Ionization in Neutral Gas Galaxies. III. Diffuse, Warm Ionized Medium and Escape of Ionizing Radiation // *ApJ*. 2007. T. 661, № 2. C. 801–814.
259. Haffner L. M., Dettmar R. .-, Beckman J. E. [и др.]. The warm ionized medium in spiral galaxies // *Reviews of Modern Physics*. 2009. T. 81, № 3. C. 969–997.
260. Oparin D. V., Moiseev A. V. Diagnostics of Ionized Gas in Galaxies with the “BPT-Radial Velocity Dispersion” Relation // *Astrophysical Bulletin*. 2018. T. 73, № 3. C. 298–309.
261. Garnett D. R. Electron Temperature Variations and the Measurement of Nebular Abundances // *AJ*. 1992. T. 103. C. 1330.
262. Luridiana V., Morisset C., Shaw R. A. PyNeb: a new tool for analyzing emission lines. I. Code description and validation of results // *A&A*. 2015. T. 573. A42.
263. Rupke D. S. N., Kewley L. J., Chien L. .-. Gas-phase Oxygen Gradients in Strongly Interacting Galaxies. I. Early-stage Interactions // *ApJ*. 2010. T. 723, № 2. C. 1255–1271.
264. Zasov A., Saburova A., Katkov I. [и др.]. Outer regions of the merging system Arp 270 // *MNRAS*. 2015. T. 449, № 2. C. 1605–1613.
265. Zasov A. V., Saburova A. S., Egorov O. V., Dodonov S. N. Spectral observations of the systems with the disturbed spiral arms: Arp 42, Arp 82, and Arp 58 // *MNRAS*. 2019. T. 486, № 2. C. 2604–2617.
266. Saburova A. S., Chilingarian I. V., Katkov I. Y. [и др.]. A Malin 1 ‘cousin’ with counter-rotation: internal dynamics and stellar content of the giant low surface brightness galaxy UGC 1922 // *MNRAS*. 2018. T. 481, № 3. C. 3534–3547.

267. Peñarrubia J., McConnachie A., Babul A. On the Formation of Extended Galactic Disks by Tidally Disrupted Dwarf Galaxies // *ApJ*. 2006. T. 650, № 1. С. L33—L36.
268. Zhu Q., Xu D., Gaspari M. [и др.]. Formation of a Malin 1 analogue in IllustrisTNG by stimulated accretion // *MNRAS*. 2018. T. 480, № 1. С. L18—L22.
269. del R₁₀ M. S., Brinks E., Cepa J. High-Resolution H I Observations of the Galaxy NGC 404: A Dwarf S0 with Abundant Interstellar Gas // *AJ*. 2004. T. 128, № 1. С. 89—102.
270. Chengalur J. N., Pustilnik S. A., Makarov D. I. [и др.]. Study of the Lynx-Cancer void galaxies. - V. The extremely isolated galaxy UGC 4722 // *MNRAS*. 2015. T. 448, № 2. С. 1634—1643.
271. Egorova E. S., Egorov O. V., Moiseev A. V. [и др.]. Search for gas accretion imprints in voids: II. The galaxy Ark 18 as a result of a dwarf-dwarf merger // *MNRAS*. 2021. T. 504, № 4. С. 6179—6197.

Приложение А

А.1 Выборка галактик войда Eridanus

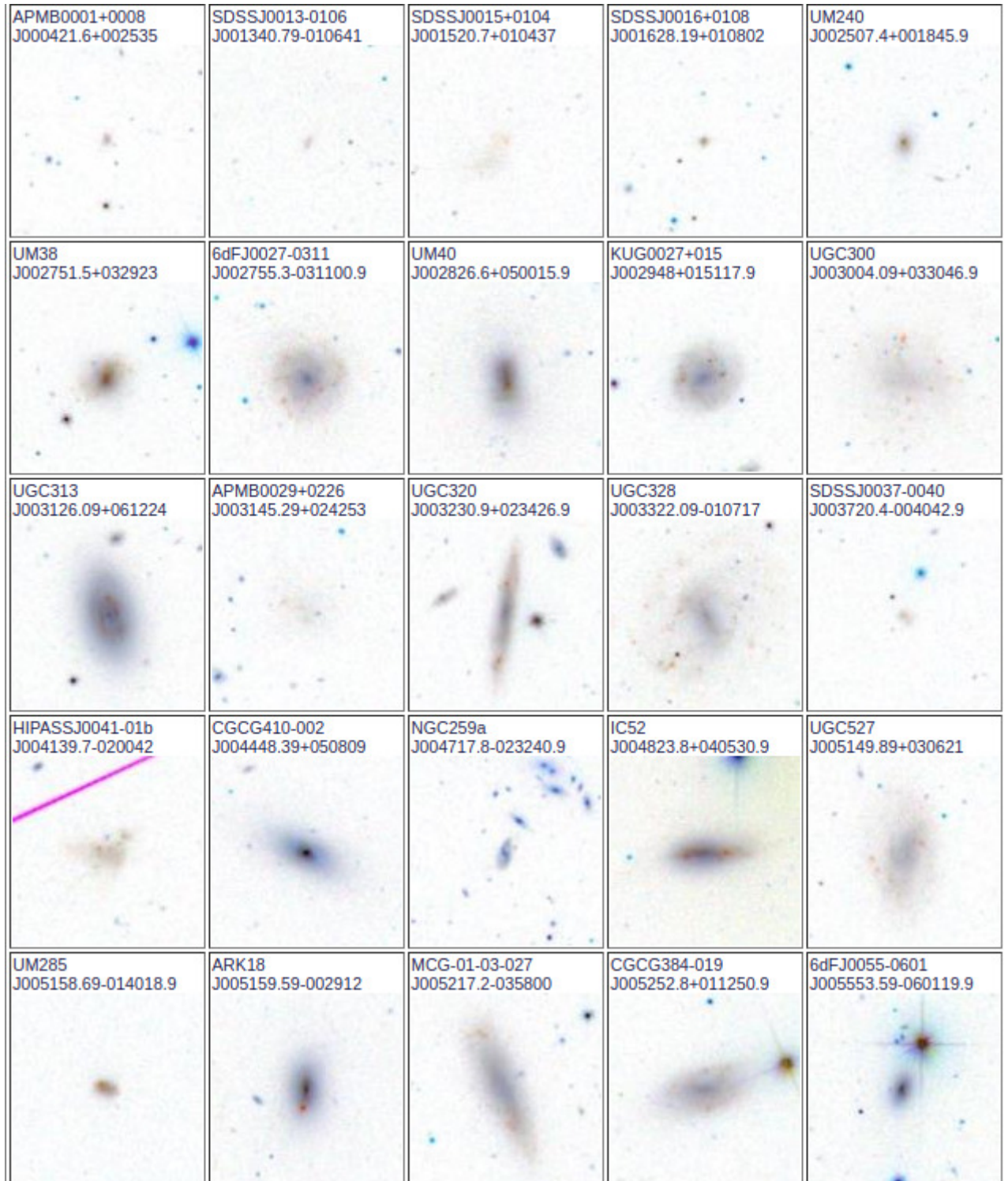


Рис. А.1 — Изображения 25 галактик из выборки войда Eridanus (см. Табл. 2.1). Изображения взяты из базы данных SDSS DR12, приведены в инвертированных цветах (*griz*).

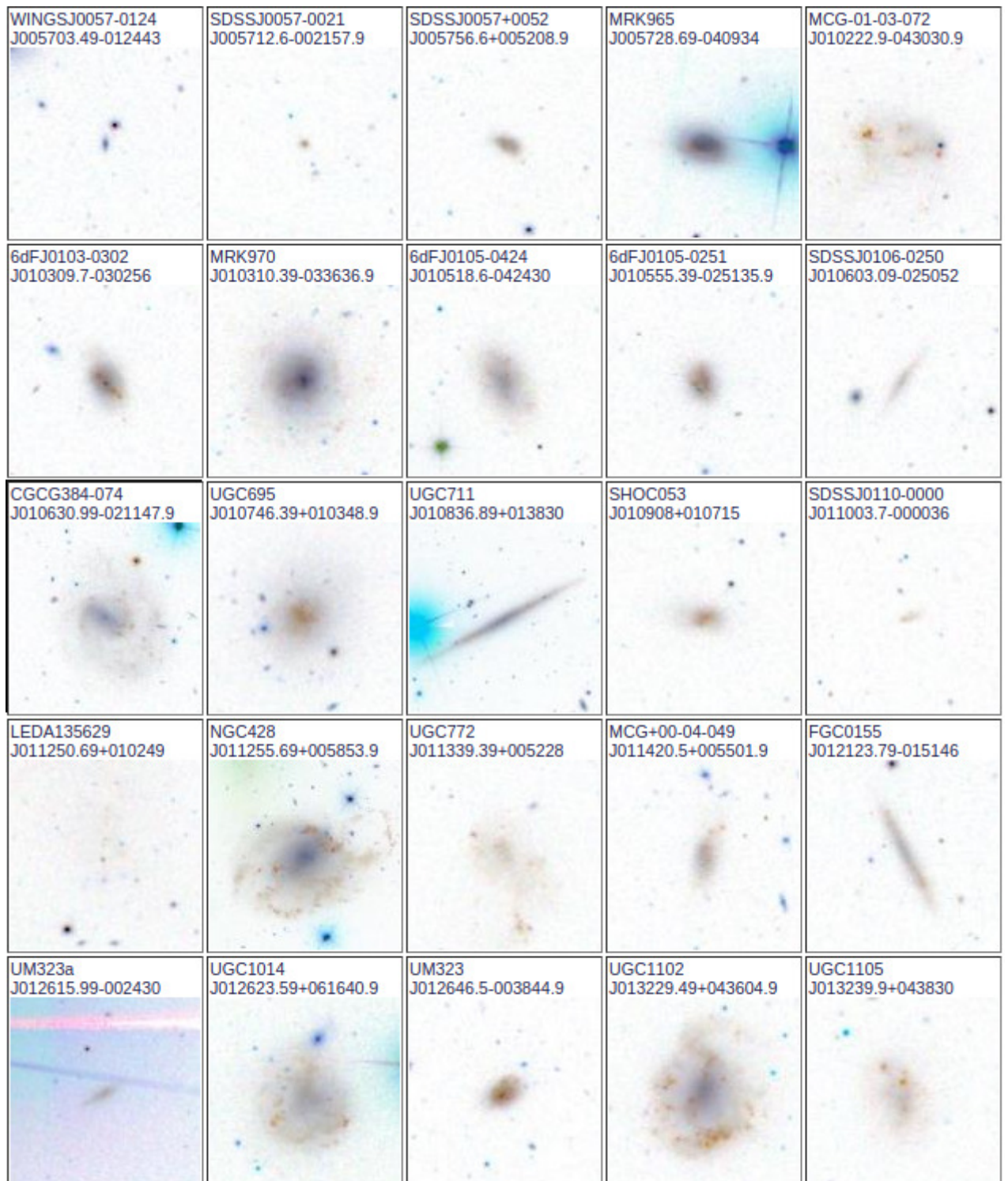


Рис. А.2 — То же, что на Рис. А.1 для следующих 25 галактик выборки.

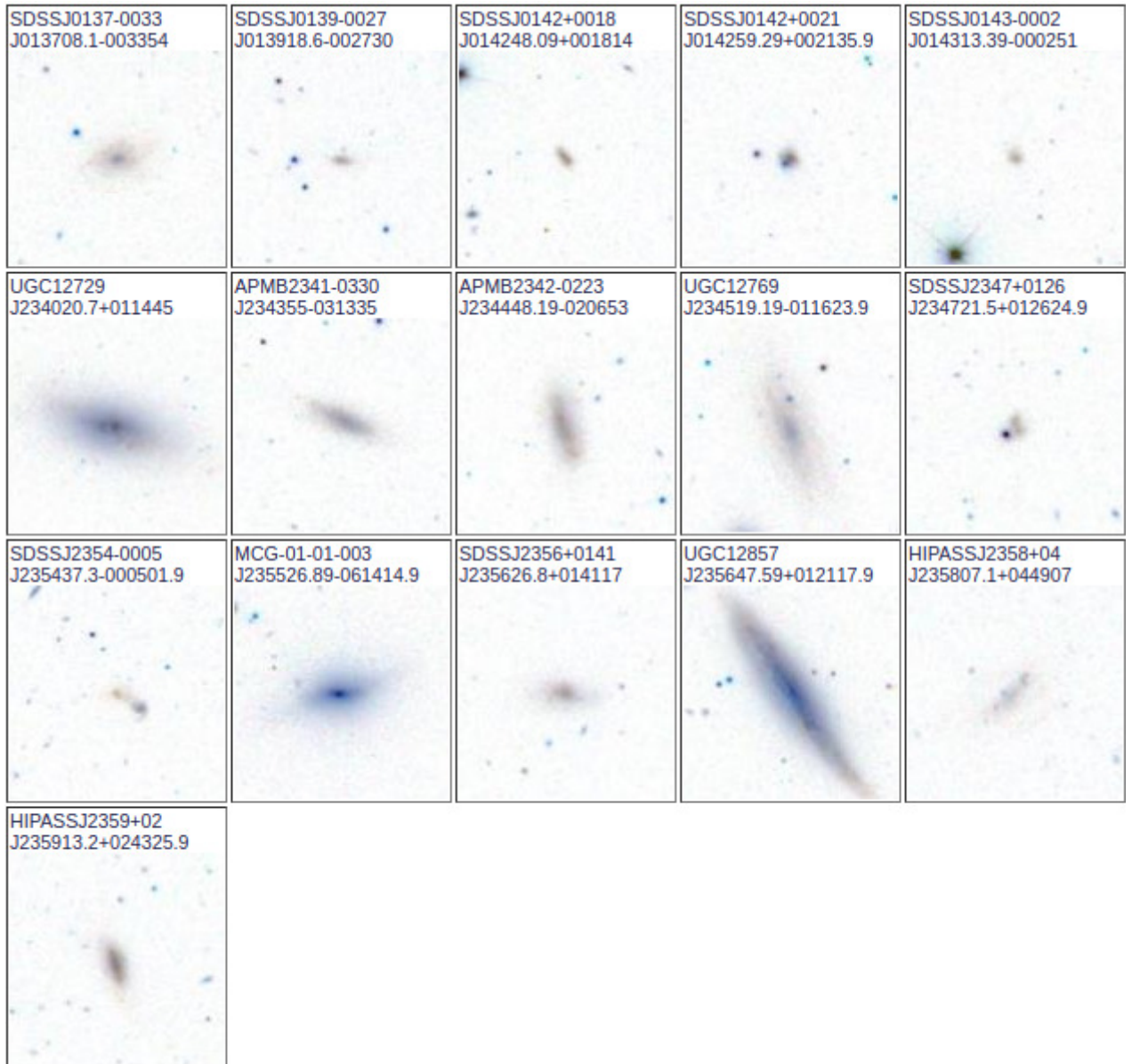


Рис. А.3 — То же, что на Рис. А.1 для оставшихся 16 галактик выборки.

Таблица А.1 Галактики с оценками скоростей, полученными по данным с телескопов БТА и SALT

#	Название или обозначение (1)	Координаты (J2000)		g (4)	Дата наблюдений (5)	V_{hel} , км/с (6)	Телескоп (7)
		RA (2)	Dec (3)				
1	SDSS J0001+1350	00 01 41.3	+13 50 33.2	17.4	2012.11.16	6332±19	БТА
2	SDSS J0005-0035	00 05 10.2	-00 35 14.3	19.1	2012.11.16	9937±3	SALT
3	SDSS J0006-0027	00 06 51.4	-00 27 53.8	19.4	2012.12.03	9875±2	SALT
4	SDSS J0008+1611	00 08 37.1	+16 11 32.7	18.7	2012.11.17	20904±10	БТА
5	SDSS J0013+1523	00 13 31.3	+15 23 25.2	18.5	2012.11.17	10951±10	БТА
6	SDSS J0014+1351	00 14 06.7	+13 51 43.3	17.8	2012.11.17	1783±8	БТА
7	SDSS J0019+1515	00 19 12.4	+15 15 01.3	18.8	2012.11.17	7534±11	БТА
8	SDSS J0038+0106	00 38 23.8	+01 06 22.3	19.0	2012.09.22	5849±5	SALT
9	SDSS J0107+0110	01 07 50.9	+01 10 20.3	18.5	2012.11.15	15786±8	SALT
10	PGC 135629	01 12 50.7	+01 02 48.5	18.7	2012.11.17	1103±8	БТА
11	SDSS J2340+1607	23 40 52.9	+16 07 21.4	16.6	2012.11.17	4025±7	БТА
12	SDSS J2340+1355	23 40 58.7	+13 55 00.8	18.9	2012.11.17	18342±3	БТА
13	SDSS J2341+1354	23 40 59.5	+13 54 42.9	19.0	2012.11.17	18271±3	БТА
14	SDSS J2341+1515	23 41 43.8	+15 15 20.9	19.4	2012.11.17	7656±8	БТА
15	SDSS J2344-0106	23 44 27.1	-01 06 31.6	20.1	2012.09.08	6706±5	SALT
16	SDSS J2344-0041	23 44 37.9	-00 41 23.4	19.3	2012.11.17	6979±2	SALT
17	SDSS J2347+0126	23 47 21.5	+01 26 25.4	18.3	2012.07.28	2674±10	SALT
18	SDSS J2355-0126	23 55 39.2	-01 26 26.8	17.6	2012.07.10	9391±13	SALT
19	SDSS J2355-0140	23 55 48.9	-01 40 27.6	17.9	2012.07.25	8177±4	SALT
20	SDSS J2356+0141	23 56 26.8	+01 41 17.4	17.2	2012.07.25	2496±13	SALT
21	SDSS J2359-0052	23 59 32.7	-00 52 50.6	19.3	2012.12.04	10075±5	SALT

А.2 Галактики с новыми оценками скоростей

А.3 Спектры галактик из выборки в войде Eridanus

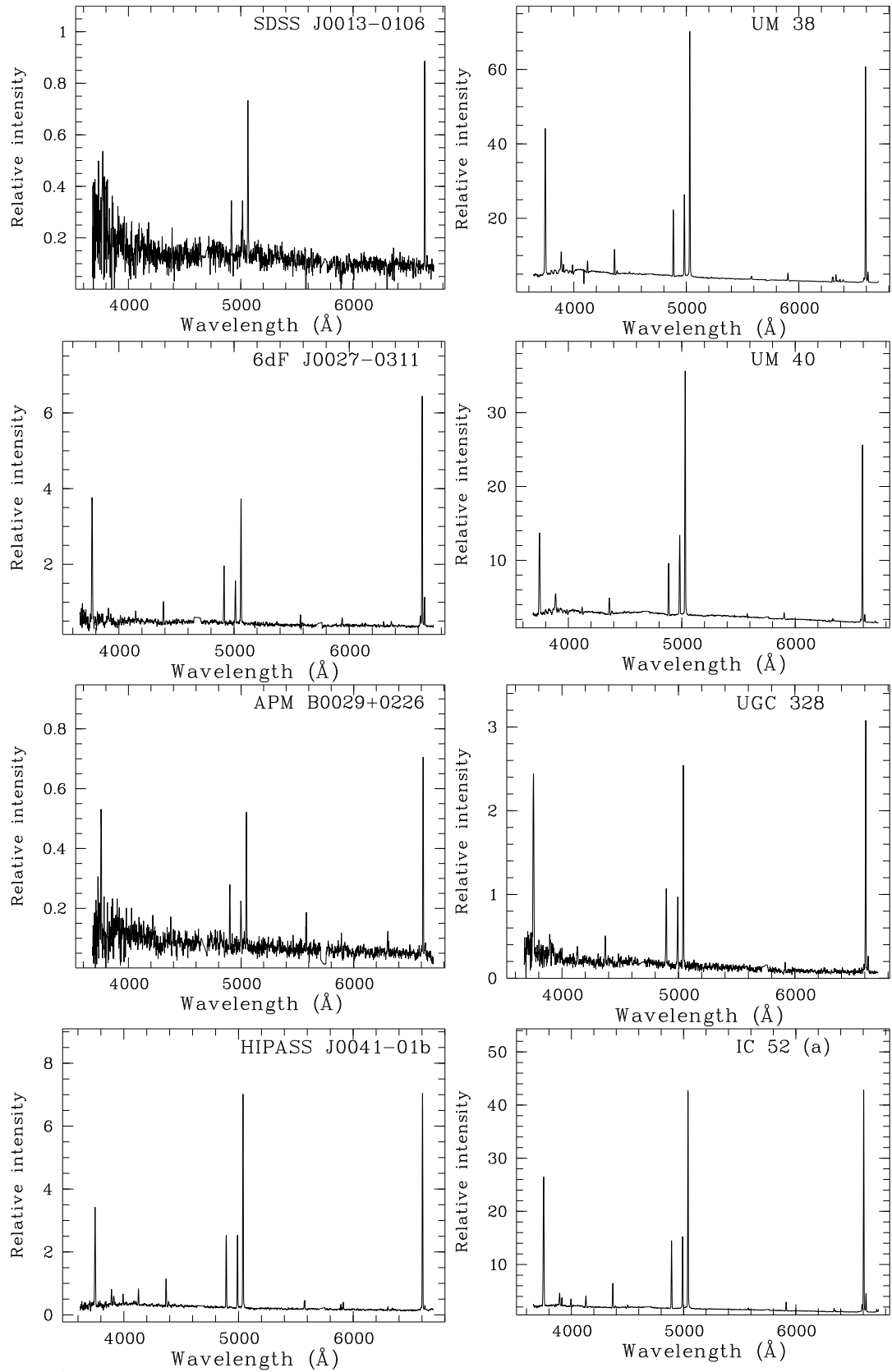


Рис. А.4 — Спектры 8 HII-областей в 8 галактиках войда Eridanus, полученных на телескопе SALT.

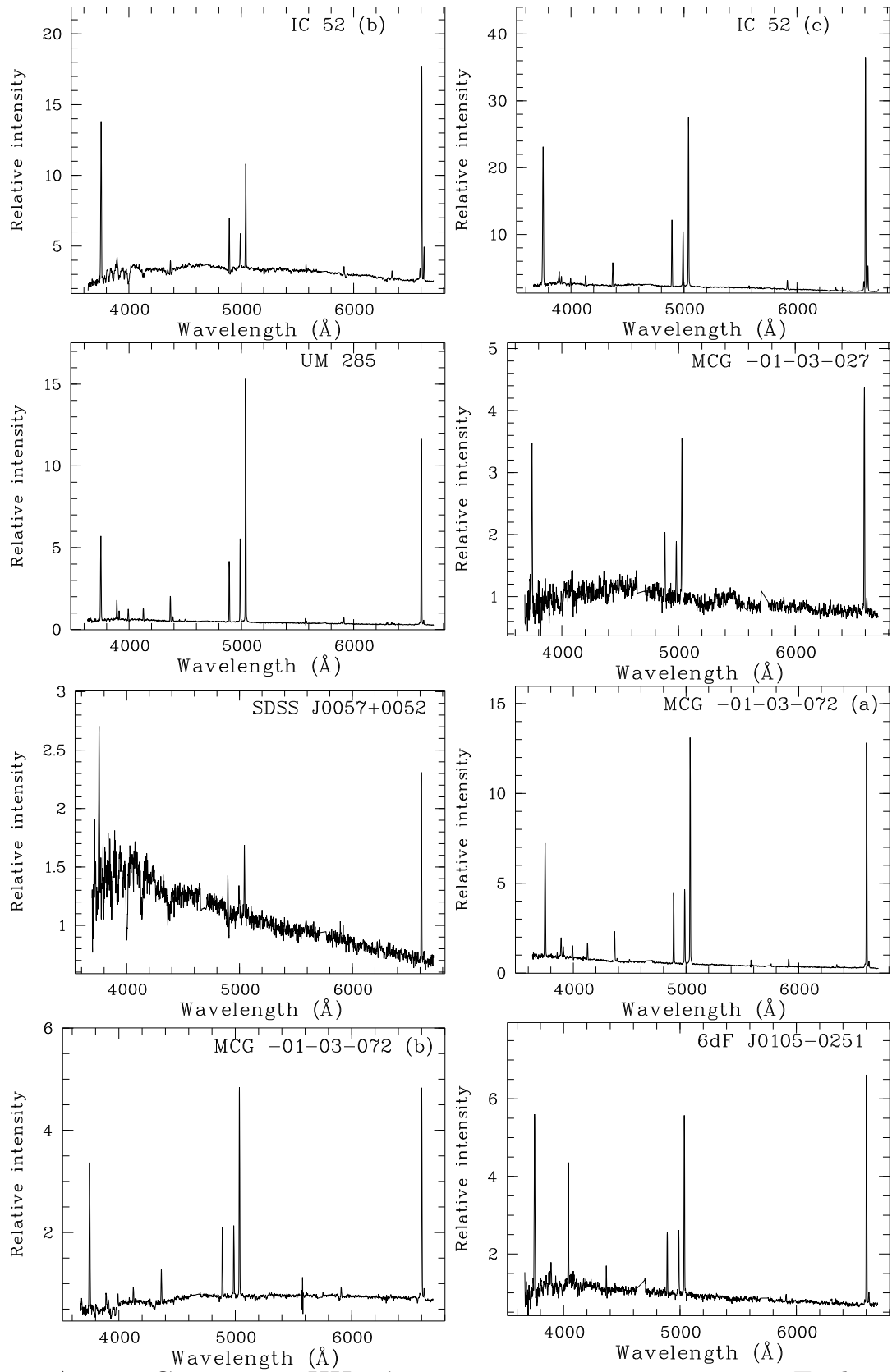


Рис. А.5 — Спектры 8 НII-областей в 6 галактиках войда Eridanus, полученных на телескопе SALT.

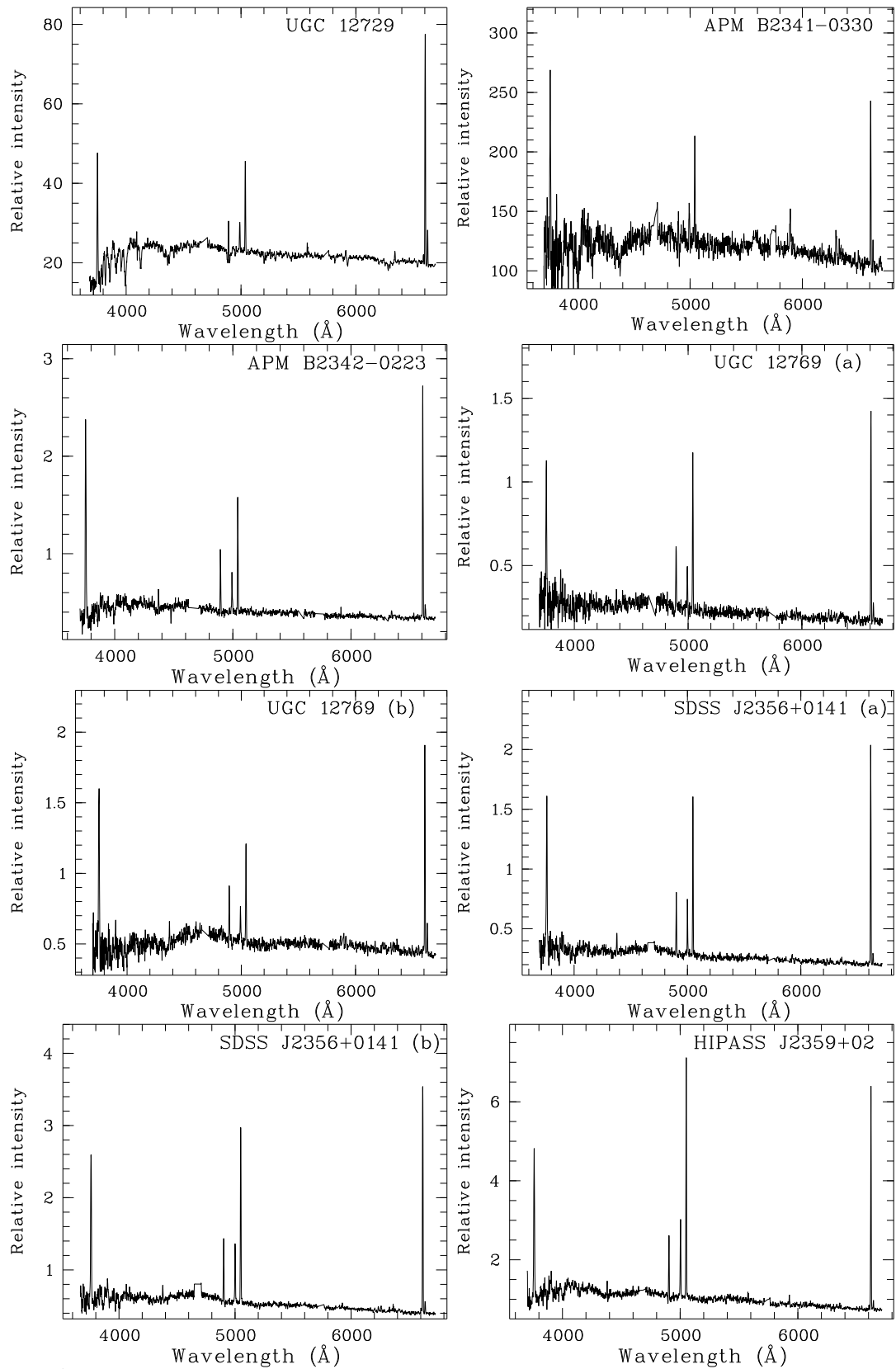


Рис. А.6 — Спектры 8 НII-областей в 6 галактиках войда Eridanus, полученных на телескопе SALT.

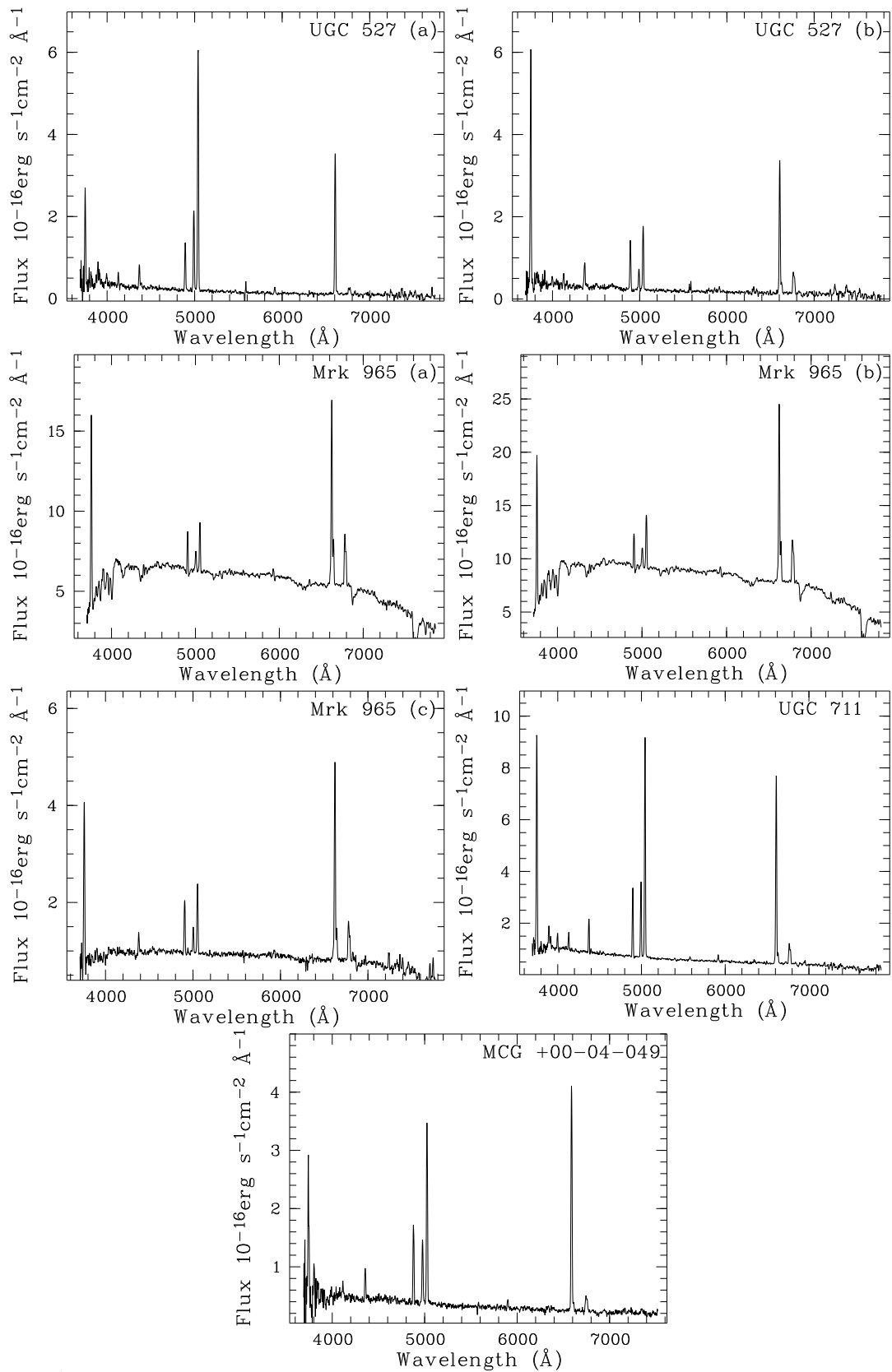


Рис. А.7 — Спектры 7 НП-областей в 4 галактиках войда Eridanus, полученных на телескопе БТА.

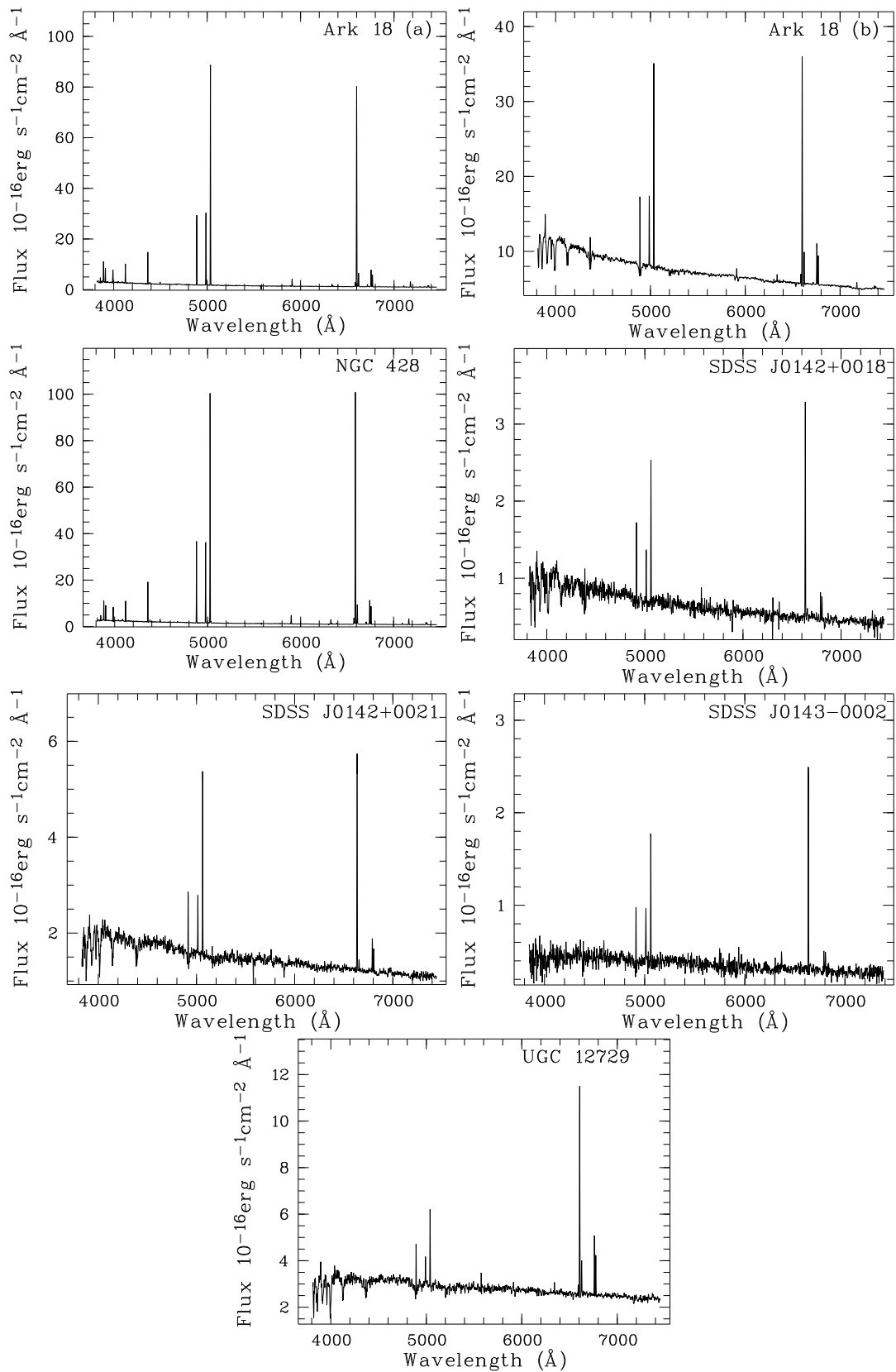


Рис. А.8 — Спектры 7 HII-областей в 6 галактиках войда Eridanus, из базы данных SDSS DR12.