

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.Ломоносова

На правах рукописи

Егорова Евгения Сергеевна

Наблюдательное исследование галактик в войдах

Специальность 1.3.1.
«Физика космоса, астрономия»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2022

Работа выполнена в лаборатории внегалактической астрофизики и космологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук.

Научный руководитель: Пустильник Семен Аронович,
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: Вибе Дмитрий Зигфридович,
доктор физико-математических наук, профессор РАН, ИНАСАН, отдел физики и эволюции звезд, заведующий

Гусев Александр Сергеевич,
доктор физико-математических наук, ГАИШ МГУ, отдел внегалактической астрономии, ведущий научный сотрудник

Каратаева Гульнара Мирсатовна,
кандидат физико-математических наук, Санкт-Петербургский государственный университет, кафедра астрофизики, доцент

Защита состоится 09 февраля 2023 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.013.1 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, Университетский проспект, дом 13, конференц-зал.

E-mail: eshaldenkova@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27) и на сайте ИАС "ИСТИНА": <https://istina.msu.ru/dissertations/514254372/>

Автореферат разослан 23 декабря 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

О.М. Белова

Общая характеристика работы

Актуальность темы

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. Немного позже, при анализе данных обзора красных смещений CfA в работе Де Лаппаран и др., 1986 [3] 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. 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 [4].

Указания на сложную, ячеистую крупномасштабную структуру Вселенной были получены еще в моделях Я.Б.Зельдовича и его группы [5], – согласно этому приближению, разработанному в рамках космологической модели с горячей темной материей, такая структура возникает из малых возмущений плотности после рекомбинации. Модели, в рамках которых получалась подобная картина, разрабатывались также и другими группами [например, 6].

Считается, что войды «содержат» информацию о космологических параметрах и сценарии эволюции Вселенной. Они позволяют тестировать различные космологические модели, исследовать свойства темной энергии и темной материи. Помимо того, 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 (в разреженном окружении 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.

Согласно численным космологическим моделям в рамках парадигмы холодной темной материи с лямбда-членом, в разреженном окружении гравитационно-связанные гало могут формироваться позже [7, 8]. Это значит, что галактики в войдах могут быть более молодыми объектами и обладать свойствами, отличными от свойств галактик в окружении умеренной плотности. Хотя в литературе нету полного согласия по поводу отличий

между галактиками войдов и галактиками в более умеренном окружении, в целом больше указаний на то, что галактики войдов обладают более высокими удельными темпами звездообразования и более высокой эффективностью звездообразования. Например, анализ данных из обзоров SDSS и 2dFGRS показал, что галактики войдов могут быть более голубыми и с более высоким удельным темпом звездообразования и более поздними морфологическими типами [9].

Результаты космологических моделирований 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. При этом некоторое время считалось, что на молодость галактики может указывать ее низкая металличность [см., например, обзор 10].

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 [11]. 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.

В работе [12] авторы предположили, что все галактики с низкой металличностью ($12 + \log(O/H) < 7.6$) являются молодыми объектами, 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 13]. То есть они представляют собой проэволюционировавшие карликовые системы, которые в настоящий момент переживают сильную вспышку звездообразования. Однако для IZw18, известной галактики с экстремально низкой металличностью, в работе [14] было показано, что в ней не наблюдается существенного подстилающего диска из старого звездного населения. В более современных работах, например, Твид и др., 2018 [15], очень молодые галактики определяются как объекты, в которых за последний ~ 1 млрд. лет сформировалось более половины массы звезд. Согласно этим критериям IZw18 можно отнести к молодым объектам.

В целом галактики следуют зависимости «светимость-металличность»: 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, а также

менее эффективное звездообразование в маломассивных галактиках. 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. Пониженная металличность в подобных объектах может быть связана с разными механизмами, такими как аккреция низкометаллического газа (из газовых филаментов или из карликовых спутников), взаимодействия или слияния галактик, в результате которых слабообогатенный металлами газ 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.

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.

Целью данной работы является изучение популяции галактик войдов и особенностей их эволюции.

Для достижения поставленной цели 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 СО 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 длиннощелевой спектроскопии с привлечением фотометрии.
- Детальное исследование индивидуальных галактик войдов и процессов, влияющих на их эволюцию и наблюдаемые свойства.

Научная новизна:

- 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.

Теоретическая 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 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. В научных работах соискателя также 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). Результаты проведенных соискателем ученой степени исследований обладают высокой научной и практической значимостью и затрагивают фундаментальные вопросы формирования и эволюции галактик в целом.

Методология и методы исследования

Для решения поставленных в работу 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, методы математической статистики.

Основные положения, 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 обоим 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 Лупх-Сансег, по результатам картографирования нейтрального водорода HI на индийском радиоинтерферометра 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 околядерного 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.

Достоверность научных результатов

Все результаты исследований являются достоверными, что подтверждается их публикацией в ведущих рецензируемых журналах и успешным представлением на международных и российских научных конференциях и семинарах.

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, 27июня - 1 июля 2022, устный доклад «Probing galaxy population in the nearby voids: the current status», стендовый доклад «Ionized gas kinematics of void galaxies»

Публикации

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

- 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 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

Содержание работы

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.

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 $\text{H}\alpha$, полученным с интерферометром Фабри-Перо на 6м телескопе БТА САО РАН, **п. 1.1.4** – данным в линии H 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 архивных 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 Объем. 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). 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 XMP объекты. Затем была проведена спектроскопия на 6-м телескопе

БТА САО РАН и Южно-африканском большом телескопе (SALT) для оценки содержания кислорода О/Н. 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 $Z_{\odot}/30 \lesssim Z_{gas} \lesssim Z_{\odot}/20$. Был сделан вывод о признаках эволюционной молодости для половины новых галактик с $Z_{gas} \lesssim Z_{\odot}/30$. В п. **3.8** представлены основные выводы.

В **Главе 4** Диссертации представлено исследование системы UGC 3672, которая находится в центральных 8% объема войда Lync-Sagser. В первой части **Главы 4** представлен анализ карт 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 α , 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 О/Н в Главе 2.

Заключение

В Диссертационной работе представлено 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 длиннощелевой спектроскопии и интерферометра Фабри-Перо, спектральные данные, полученные на телескопе SALT, а также данные в линии HI 21см, полученные на индийском радиоинтерферометре GMRT.

Ниже сформулированы наиболее важные результаты:

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 О/Н в войде Eridanus. Вывод о пониженном в среднем содержании кислорода в галактиках войда относительно реперной выборки галактик в более плотном окружении в Местном Объеме.
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 низкометалличных галактик с $Z_{\odot}/30 \lesssim Z_{gas} \lesssim Z_{\odot}/20$. 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 Lync-Sagser. Исследование экстремально богатого газом ($M_{HI}/L_B = 17$) спутника 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.

Список литературы

1. Jöeveer M., Einasto J., Tago E. // MNRAS. 1978. Т. 185. С. 357–370.
2. Gregory S. A., Thompson L. A. // ApJ. 1978. Т. 222. С. 784–799.
3. de Lapparent V., Geller M. J., Huchra J. P. // ApJ. 1986. Т. 302. С. L1.
4. van de Weygaert R. // The Zeldovich Universe: Genesis and Growth of the Cosmic Web. Т. 308. 2016. С. 493–523.
5. Zel'dovich Y. B. // Astrophysics. 1970. Т. 6, № 2. С. 164–174.
6. Davis M., Efstathiou G., Frenk C. S., White S. D. M. // ApJ. 1985. Т. 292. С. 371–394.
7. Einasto J., Suhhonenko I., Hütsi G. [и др.] // A&A. 2011. Т. 534. A128.
8. Aragon-Calvo M. A., Szalay A. S. // MNRAS. 2013. Т. 428. С. 3409–3424.
9. Rojas R. R., Vogeley M. S., Hoyle F., Brinkmann J. // ApJ. 2004. Т. 617, № 1. С. 50–63.
10. Kunth D., Östlin G. // A&ARv. 2000. Т. 10. С. 1–79.
11. Filho M. E., Sánchez Almeida J., Muñoz-Tuñón C. [и др.] // ApJ. 2015. Т. 802, № 2. С. 82.
12. Izotov Y. I., Thuan T. X. // ApJ. 1999. Т. 511, № 2. С. 639–659.
13. Annibali F., Tosi M. // Nature Astronomy. 2022. Т. 6. С. 48–58.
14. Papaderos P., Östlin G. // A&A. 2012. Т. 537. A126.
15. Tweed D. P., Mamon G. A., Thuan T. X. [и др.] // MNRAS. 2018. Т. 477, № 2. С. 1427–1450.