

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи
УДК 524.7-36;524.7-33

ПЕРЕПЕЛИЦЫНА Юлия Александровна

**ИЗУЧЕНИЕ КАРЛИКОВЫХ ГАЛАКТИК В БЛИЖАЙШИХ
ВОЙДАХ**

(01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Архыз – 2017

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

Научный доктор физико-математических наук,
руководитель: ведущий научный сотрудник
Пустильник Семен Аронович
(САО РАН)

Официальные доктор физико-математических наук,
оппоненты: профессор
Решетников Владимир Петрович
(Санкт-Петербургский государственный
университет)

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Катков Иван Юрьевич
(ГАИШ МГУ)

Ведущая Федеральное государственное автономное
организация: образовательное учреждение высшего образования
Южный федеральный университет

Защита состоится 14 апреля 2017 г. в 10.00 на заседании
Диссертационного совета Д 002.203.01 при Федеральном государственном
бюджетном учреждении науки Специальной астрофизической обсервато-
рии Российской академии наук по адресу: 369167, КЧР, Зеленчукский рай-
он, пос. Нижний Архыз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан " _____ " 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 002.203.01, к.ф.-м.н.

_____ Шолухова О.Н.

Актуальность темы исследования

Пустоты (или войды) в крупномасштабном распределении галактик открыты более 35-ти лет назад (например, [1, 2]). Наблюдательно они обычно определяются как области, лишенные галактик нормальной и высокой светимости, $M_B \geq -20$, что соответствует излому функции светимости галактик (к примеру, [3]). Войды занимают более половины объема современной Вселенной. При этом число галактик в них не превышает $\sim 20\%$ (согласно, [4]) от общего количества каталогизированных, что отражает значительно пониженную плотность материи в пустотах. В численных моделях эволюции материи в горячей Вселенной с темной материей (DM) войды возникают как естественные структуры и в целом неплохо напоминают наблюдаемые. С другой стороны, глубина современных обзоров уже позволяет очень детально видеть крупномасштабную структуру с достаточно слабыми объектами. Стали хорошо прорисовываться подструктуры войдов (филаменты, стенки, субвойды).

Современный взгляд на эти наблюдательные и теоретические данные приводит к постановке новых задач, не только с точки зрения наблюдений, но и в направлении моделирования и численных экспериментов. За последнее время появились десятки работ в крупных проектах по масштабному численному моделированию эволюции Вселенной в рамках парадигмы с холодной темной материей и Λ -членом (Λ CDM), с числом частиц до 10-ти млрд. и хорошим разрешением по массе, достигающим $(10^5 - 10^6) M_\odot$ на частицу темной материи (к примеру, Millennium [5, 6], Horizon-MareNostrum [7], Horizon 4pie [8], CosmoGrid [9]). Все это в результате позволяет зондировать очень тонкие эффекты в формирующейся структуре. В том числе, искать взаимодействие сформировавшихся объектов с потоками газа в филаментах (холодная аккреция). По-видимому, лучше всего такие случаи могут наблюдаться в войдах, из-за того, что в них минимизировано влияние более плотных структур. Таким образом, феномен холодной аккреции можно наблюдать в пустотах в наиболее рафинированном виде.

Однако, все эти модели в основном касаются эволюции темных гало и их структур, а переход к моделированию реальных галактик сопряжен с трудностями учета всех процессов в барионном веществе, в первую очередь – звездообразования и его обратного влияния. Так что эти результаты, видимо, можно использовать как указания на наблюдательные проявления, но при этом учитывать то, что есть существенный фактор неопределенности

при переходе от гало темной материи к реальным галактикам.

В работе Арагон-Калво и Салай (2013) [10] была проведена первая попытка промоделировать подструктуры войдов и их динамику. Такие подструктуры, включающие в себя галактики меньших масс, по-видимому, соответствуют списку близких войдов из работы Элиева и др. (2012) [11]. Согласно авторам работы [10], поле скоростей внутри войдов плавное и нетурбулентное. Иерархия структур поля плотности отражается в подобной иерархии поля скоростей. Движения на масштабах войда не влияют на динамику гало в них. Когерентные потоки материи на малых масштабах имеют низкие скорости, поэтому могут эффективно питать гало войдов и определять свойства галактик в них на космологической шкале времени. Они также обнаружили, что анизотропная аккреция с низким темпом может быть эффективным механизмом подпитки, поддерживаемым длительное время. Это является одним из возможных объяснений необычных свойств галактик войдов.

Результаты современных численных моделей формирования галактик и их структур, основанные на Λ CDM космологии, предсказывают, что свойства галактик и их эволюция должны значительно зависеть от глобального окружения (например, [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19]). Однако, ситуация в наиболее разреженных структурах, таких как войды, в плане формирования и эволюции галактик, пока изучена недостаточно как с теоретической, так и с наблюдательной точки зрения.

Эволюция галактик в пустотах может быть замедлена по сравнению с тем, что происходит в областях с более плотным окружением. Поэтому свойства галактик в войдах давно привлекают внимание астрофизиков (например, [20, 21]). С появлением больших обзоров, таких как SDSS (The Sloan Digital Sky Survey, Слоуновский цифровой обзор неба) и 2dFGRS (Two-degree-Field Galaxy Redshift Survey, Мультифиберный обзор с 2-х градусным полем), с предельной видимой величиной $B \sim 18-19^m$, интерес к этой тематике усилился, и было опубликовано несколько работ, в которых изучались отличия свойств галактик в войдах и в более плотном окружении. Но из-за того, что авторы больших статистических исследований выбирали для них большие далекие войды ($D \sim 100-200$ Мпк), это автоматически приводило к ограничениям на минимальную светимость галактик ($M_B < -17$). Такие объекты представляют лишь вершину функции светимости галактик войдов, типично на $\sim 3-4^m$ слабее, чем L^* галактики, которые обычно принимаются в качестве границ войдов (например, для выборок на $z < 0.03-0.05$,

в работах Соррентино и др. (2006) [22], Патири и др. (2006) [23]). Оказалось, что для таких более массивных галактик войдов проявление эффектов окружения в их свойствах невелико.

Кроме того, упомянутые исследования не касались напрямую эволюционного статуса галактик в пустотах. Изучения свойств галактик из выборок SDSS, с красными смещениями $z < 0.025$ и абсолютными величинами $M_r \lesssim -14.0$ (например, [24, 25]), включали и менее яркие галактики. Но они тоже не имели дело с эволюционными параметрами. Новый проект подробного изучения свойств галактик (Void Galaxy Survey), расположенных исключительно в центрах войдов, описанный в работах Станоник и др. (2009) [26] и Ван де Вейгерт и др. (2009) [27], также включает преимущественно наиболее яркие карликовые галактики, а именно с $M_R < -16.0$, и лишь небольшое количество объектов с M_R от -15 до -13 .

Из общих соображений, если отличия в эволюции галактик из-за влияния глобального окружения имеют место, то наибольший эффект следует ожидать для галактик самых малых масс, так как с одной стороны, такие галактики наиболее подвержены внешним воздействиям (например, [28]), а с другой стороны, формирование гало темной материи малых масс сильно зависит от локальной плотности (к примеру, [29]). Поэтому именно наименее массивные галактики являются наилучшими зондами для проверки роли окружения в их эволюции и образовании.

Суммируя известные на сегодня результаты теоретических расчетов и численных моделей, можно ожидать, что на эволюционный статус маломассивных галактик в войдах влияют следующие факторы. С одной стороны, это формирование с заметным запаздыванием гравитационно-связанных гало ДМ с массами карликовых галактик в крупномасштабных структурах низкой плотности (войдах) (например, [29]) и замедленная эволюция структур внутри войдов, из-за их дополнительного расширения [10].

С другой стороны, модельные расчеты показывают, что доля маломассивных галактик в войдах повышена по сравнению с более плотными структурами (к примеру, [14]). А вследствие известной корреляции между светимостью и поверхностной яркостью (согласно, [30]), в войдах должна быть более высокая доля LSB. Модельные расчеты взаимодействий дисковых галактик низкой и нормальной (высокой, HSB, high surface brightness) поверхностной яркости (например, [31]), при их сближениях без слияния, показывают, что конечный отклик сильно отличается для двух типов галактик. В HSB галактике происходит формирование бара и полноценная вспышка

звездообразования, в то время как в LSB галактике отклик гораздо слабее, и темп звездообразования лишь незначительно увеличен. Поскольку число столкновений в войдах за время жизни галактик понижено во много раз (по сравнению с областями средней плотности), можно ожидать существование заметной доли галактик в войдах, не испытавших существенных взаимодействий. Однако эти общие соображения необходимо проверить в численных моделях, учитывающих многие нюансы формирования и эволюции галактик.

По результатам одного из таких модельных расчетов эволюции галактик в войдах, Крекел и др. (2011) [32] обнаружили указания на их отличия от галактик в областях более высокой плотности, но только для объектов наименьших масс моделируемого диапазона, что соответствовало светимостям M_r около -16 или чуть слабее.

Как было указано выше, исследования неглубоких выборок галактик в далеких войдах, основанные на SDSS, оставляют без ответа вопросы об эволюции галактик меньших масс в войдах. Поскольку наиболее значительный эффект окружения ожидается для наименее массивных галактик, то естественной является идея изучения галактик в близких войдах, где можно исследовать более слабые объекты.

В CAO РАН, под руководством С.А. Пустильника, на протяжении последних 13-ти лет проводится исследование галактик ближайших, не очень крупных войдов, в которых удастся наблюдать объекты с M_V до -12 и слабее, что соответствует галактикам со светимостями в десятки-сотню раз меньше по отношению к выборкам в далеких войдах. Одним из основных объектов исследования является войд Lynx-Cancer [33], с центром на расстоянии ~ 18 Мпк и радиусом более 8 Мпк, который почти полностью покрывается обзором SDSS. Это дает возможность использовать данные о красных смещениях для слабых галактик в этой области, получать поверхностную фотометрию в 4-х фильтрах u, g, r, i и, из сравнения цветов с моделями, оценивать возрасты наиболее старых видимых звезд. Для полноты картины для галактик войда Lynx-Cancer необходимы данные о металличности газа (или о содержании кислорода O/H в нем), которая является эволюционным параметром. Большая часть галактик имеет данные из литературы о потоке в линии H α 21 см, что позволяет определить массу газа и второй эволюционный параметр – массовую долю газа.

Для выборки около 100 карликовых галактик в войде Lynx-Cancer уже было получено несколько интересных результатов. Обнаружены первые

указания на особенности в эволюции для части объектов выборки. Согласно выводам Пустильника и др. (2011) [34] по подвыборке около полусотни объектов, исследованных в этой статье, галактики войда имеют систематически пониженную металличность (в среднем на $\sim 30\%$). В работах Пустильника и др. (2011) [35], Ченгалура и Пустильника (2013) [36] обнаружено, что небольшая, но вполне значимая ($\sim 10\%$), доля галактик войда имеет необычные свойства, характерные для “эволюционно-молодых” объектов. А именно, их характеризует:

- очень высокая массовая доля газа f_{gas} порядка (94-99)%;
- голубые цвета периферии, соответствующие небольшим временам от начала основного эпизода звездообразования $T_{\text{SF}} \lesssim 3.5$ млрд. лет;
- экстремально низкие металличности $12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 7.36$ ($Z \lesssim Z_{\odot}/20$), в разы ниже, чем для галактик такой светимости в более плотном окружении.

Еще одной областью, где получено достаточно много данных о галактиках в войде, является экваториальная часть пустоты Eridanus.

Наиболее необычные по своим свойствам карлики войдов являются ближайшими аналогами молодых галактик в ранней Вселенной. Благодаря достаточной близости, в них можно детально изучать процессы звездообразования в очень малометаллических и богатых газом объектах, что позволяет лучше понимать и моделировать галактики в ранние эпохи. Таким образом, более глубокое исследование галактик в войдах позволит пролить свет на значимость разного типа взаимодействий и роли окружения в эволюции галактик разных масс. Из сказанного выше вытекает актуальность темы данного исследования.

Цели и задачи исследования

Целями выполненного в диссертации исследования являются:

- Проведение спектральных наблюдений на БТА для галактик из близкого войда Lynx-Cancer. Оценки содержания кислорода по полученным спектрам, а также по спектрам из базы данных SDSS.
- Изучение фотометрических характеристик выборки галактик войда Lynx-Cancer по изображениям из базы данных SDSS. Определение

модельно-независимых параметров: светимостей, эффективных и изофотных размеров, поверхностных яркостей и интегральных цветов. Определение модельных параметров вписанных дисков, а также цветов внешних частей галактик.

- Анализ на большом статистическом материале, в том числе полученном автором работы, возможных особенностей эволюции галактик войдов. Сравнение с галактиками контрольной выборки из более плотного окружения.
- Детальные исследования некоторых необычных галактик, найденных в войдах, с целью лучше понять их природу, с привлечением данных фотометрии, спектроскопии и излучения в линии нейтрального водорода H I.

Научная новизна работы

Все основные результаты работы являются новыми и состоят в следующем:

1. Впервые был получен набор модельно-независимых (интегральных) и модельных фотометрических параметров, который охватывает 80% самой большой и глубокой выборки галактик в близком войде Lynx-Cancer. Показано, что LSB галактики составляют около половины выборки. Обнаружено, что $\sim 30\%$ LSB галактик низкой светимости ($M_B > -13.2$) имеют необычные свойства, характерные для “эволюционно молодых” галактик. А именно, газ имеет металличность $Z \lesssim Z_\odot/20$, в разы ниже ожидаемой для из светимости, массовая доля газа очень высока (94-99%), цвета внешних частей – голубые $(g-r) \lesssim 0.15$. На основе этих выводов предложен новый подход для поиска таких необычных объектов.
2. По спектрам БТА и SDSS получены новые оценки содержания кислорода для 30-ти галактик в войде Lynx-Cancer. Открыты 5 новых, очень низкометаллических, галактик, для которых $12+\log(\text{O}/\text{H})$ оценены в диапазоне [7.03-7.35].
3. По итогам комплексного исследования необычной изолированной галактики UGC4722 установлено, что этот объект является продуктом недавнего взаимодействия, а именно результатом первого пролета в процессе малого мерджинга. Впервые получены параметры маломассивного компонента. Обнаружено, что оба компонента очень богаты

газом. Впервые показано, что приливный шлейф состоит из молодого звездного населения с возрастом около 0.5 млрд. лет.

4. По изображениям из SDSS для двух карликовых наиболее низкометаллических LSB галактик в войде Eridanus были получены параметры их массовой доли газа и цветов периферии. По данным цветам, с помощью эволюционных треков PEGASE, установлено, что основной эпизод звездообразования для этих галактик начался $\sim 2-3$ млрд. лет назад. С учетом данных о содержании газа и очень низкой металличности, эти галактики отнесены к очень редким “эволюционно молодым” объектам.
5. На основе наших наблюдений на БТА, с привлечением данных SDSS и HST, а также данных из литературы, и использованием оценки светимости подстилающей HI области, впервые построена кривая блеска для уникальной LBV в галактике DDO 68. Впервые для этой LBV зарегистрирована амплитуда переменности $\Delta V \gtrsim 3.6^m$. С учетом ее абсолютной величины вблизи максимума $M_V \sim -10.5$, наши результаты показывают, что в 2008-2010 годах эта LBV находилась в фазе “гигантского выброса” (giant eruption).

Научная и практическая значимость

Полученные в данной работе выводы о свойствах изучаемых галактик существенно расширяют представление об эволюции галактик в войдах:

- В результате проведенных спектральных исследований доля галактик в выборке с известными O/H в близком войде Lynx-Cancer увеличена до 75%. Из анализа этих данных получен уверенный вывод о систематически пониженной металличности галактик в войде по сравнению с галактиками в более плотном окружении. Среди объектов с самыми низкими металличностями выделена группа со свойствами “эволюционно-молодых”. Предложен новый подход для эффективного поиска таких необычных объектов, который использует обнаруженный нами феномен: среди LSB галактик, слабее чем $M_B \sim -13$, доля необычных галактик сильно возрастает и достигает $\sim 30\%$.
- В данном исследовании были найдены или подтверждены 7 низкометаллических галактик со значениями $12 + \log(O/H) < 7.38$ ($Z \lesssim Z_\odot/20$). Считается, что такие объекты являются аналогами галактик на больших красных смещениях, поэтому их изучение важно именно в этом

контексте.

- Впервые на большом статистическом материале сделан вывод о том, что эволюция галактик малых масс в войде протекает существенно медленнее. Полученный в этой работе набор, как глобальных, так и эволюционных параметров данной выборки можно использовать для сопоставления с сетками моделей эволюции галактик.

Результаты спектроскопии и фотометрии внесены в базы данных HyperLEDA и Vizier, доступные для общего пользования. Полученный материал может быть использован для сравнения с галактиками выборок, отобранных по другим критериям.

Первые систематические исследования LBV, образовавшейся из массивной звезды главной последовательности с рекордно низкой металличностью в галактике DDO68, привели к обнаружению переменности с амплитудой $\Delta V \gtrsim 3.6^m$, что указывает на ее недавний “гигантский выброс”. Так как подобные объекты довольно быстро эволюционируют к вспышке сверхновой, то дальнейший мониторинг этой LBV является очень перспективным.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Результаты поверхностной фотометрии для 85 галактик в войде Lynx-Cancer, что составляет $\sim 80\%$ выборки, по изображениям из базы данных SDSS. Оценки массовой доли газа для части галактик с доступными данными по HI. Вывод о том, что 59% из них имеют очень высокие массовые доли газа $\sim (80-99)\%$. Вывод о том, что половина галактик выборки войда Lynx-Cancer относится к объектам низкой поверхностной яркости (LSB), около 15% из LSB галактик имеют свойства “эволюционно-молодых”, а для слабых LSB карликов, $M_B > -13.2$, доля таких галактик достигает $\sim 30\%$.
2. Результаты спектроскопии на БТА для 25 галактик войда Lynx-Cancer и оценки содержания кислорода по этим данным, а также по спектрам SDSS для 14 объектов. Результаты анализа металличностей для восьмидесяти одной галактики из войда Lynx-Cancer с известными O/H. Вывод о пониженной металличности, в среднем на 37% , для галактик в войде относительно реперной выборки Местного Объема в более плотном окружении.
3. Результаты фотометрического исследования по изображениям SDSS

для изолированной галактики UGC 4722 со шлейфом. Обнаружение взаимодействующего маломассивного спутника, определение его интегральных фотометрических параметров и массовой доли газа. Вывод о том, что приливной шлейф состоит из звезд возрастом ~ 0.5 млрд. лет.

4. Результаты фотометрии по изображениям SDSS для двух самых низкометаллических LSB карликовых галактик войда Eridanus. Их оценки массовой доли газа и времени от начала основного эпизода звездообразования. Вывод о том, что по сумме свойств эти галактики относятся к группе “эволюционно-молодых”.
5. Результаты спектроскопии и фотометрии, по полученным на БТА данным, для LBV в очень низкометаллической галактике DDO 68. Результаты детального анализа данных для этого объекта, взятых из архивов HST и SDSS, и публикаций по наблюдениям с ММТ и АРО. Обнаружение гигантского выброса (giant eruption) в 2008-2010 годах для данной LBV, на основе анализа впервые построенной кривой блеска.

Апробация работы

Результаты работ обсуждались на семинарах Специальной Астрофизической Обсерватории РАН, на семинарах кафедры Физики Космоса Южного Федерального Университета. Результаты докладывались на следующих конференциях:

- Международная конференция JENAM-2010: European Week of Astronomy and Space Science, Лиссабон, Португалия, 6-10 сентября 2010 г.
- Всероссийская астрономическая конференция (ВАК-2010) “От эпохи Галилея до наших дней”, пос. Нижний Архыз, Россия, 13-18 сентября 2010 г.
- VII ежегодная научная конференция студентов и аспирантов базовых кафедр Южного научного центра РАН, Ростов-на-Дону, Россия, 11-25 апреля 2011 г.
- VIII ежегодная научная конференция студентов и аспирантов базовых кафедр Южного научного центра РАН, Ростов-на-Дону, Россия, 11-26 апреля 2012 г.

- Конференция “Галактики привычные и неожиданные”, ЮФУ, Ростов-на-Дону, Россия, 6-8 мая 2013 г.
- Конкурс-конференция работ сотрудников САО, пос. Нижний Архыз, Россия, 6 февраля 2014 г.
- IAU Симпозиум 308 “The Zeldovich Universe Genesis and growth of the cosmic web”, Таллин, Эстония, 23-28 июня 2014 г.
- Конференция “Галактики”, Ессентуки, Россия, 24-27 ноября 2014 г.
- Конкурс-конференция работ сотрудников САО, пос. Нижний Архыз, Россия, 5 февраля 2016 г.
- Международная астрономическая конференция “Физика звезд: от коллапса до коллапса”, пос. Нижний Архыз, Россия, 3-7 октября 2016 г.

Публикации по теме Диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 5 статьях, общим объемом 68 страниц в рецензируемых журналах:

1. 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, V. 432, Is. 3, p.2224-2230 (2013).
2. Perepelitsyna Y. A., Pustilnik S. A., Kniazev A. Y. - Study of galaxies in the Lynx-Cancer void. IV. Photometrical properties, Astrophysical bulletin, V. 69, p.247-265 (2014).
3. Chengalur J. N., Pustilnik S. A., Makarov D. I., Perepelitsyna Y. A., Safonova E. S., Karachentsev I. D. - Study of the Lynx-Cancer void galaxies. - V. The extremely isolated galaxy UGC 4722. MNRAS, V. 448, Is. 2, p.1634-1643 (2014).
4. Pustilnik S. A., Perepelitsyna Y. A., Kniazev A. Y. - Study of galaxies in the Lynx-Cancer void. VII. New oxygen abundances, MNRAS, V. 463, Is. 1, p.670-683 (2016).
5. Pustilnik S.A., Makarova L.N., Perepelitsyna Y.A., Moiseev A.V., Makarov D.I. - Extremely metal-poor galaxy DDO 68: the LBV, the most luminous stars and H α shells, MNRAS, V. 465, Is. 4, p.4985-5002 (2017).

Статьи в сборниках трудов конференций:

- Lyamina Y.A., The study of the dwarf galaxies in the nearby voids, VII Ежегодная научная конференция студентов и аспирантов базовых кафедр Южного научного центра РАН, Ростов-на-Дону, ЮНЦ РАН, с.240-241 (2011).
- Pustilnik S. A., Kniazev A. Y., Lyamina Y. A., Tepliakova A. L., Dwarf Galaxies in the Nearby Lynx-Cancer Void: Photometry, Colours and Ages, Dwarf Galaxies, Keys to Galaxy Formation and Evolution, Astrophysics and Space Science Proceedings, ISBN 978-3-642-22017-3, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, V.28, p. 315-319 (2012).

Онлайн каталог VizieR:

Perepelitsyna Y. A., Pustilnik S. A., Kniazev A. Y. — VizieR Online Data Catalog: Galaxies in Lynx-Cancer void, VizieR Online Data Catalog, V. 330 (Perepelitsyna+, 2014)

Личный вклад автора

- Во всех работах автор внес равный вклад в подготовку публикаций и обсуждение результатов.
- Подготовка объектов программы для наблюдений на телескопе БТА. Спектроскопическая и фотометрическая обработка полученных данных.
- В работах (1,2,3,5) автором были проведены фотометрические измерения изображений из базы данных SDSS.
- Построение кривой вращения в работе (3) выполнено совместно с Егоровой Е.С.
- В работе (4) дополнительная калибровка методов определения металличности выполнена совместно с соавтором данной работы Пустильником С.А.
- В работе (5) для получения оценок потерь света на щели проводилась работа с данными HST, взятыми из архива.
- Автором был усовершенствован и дополнен комплекс программ в среде MIDAS, применявшихся в обработке и анализе данных.

Структура и объем диссертации

Диссертация содержит введение, пять глав, заключение, список цитируемой литературы из 196 наименований и приложение. Полный объем диссертации – 178 страниц, включая 44 рисунка и 32 таблицы.

Краткое содержание диссертации

Во Введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, обсуждаются цели исследования. Формулируются основные положения, выносимые на защиту. Кратко изложены структура и содержание работы, дается характеристика научной новизны и практической ценности полученных результатов. Приводится список работ, в которых опубликованы результаты данного исследования, с указанием личного вклада автора в совместных публикациях.

Первая глава посвящена описанию выборок, наблюдательного материала и основным методическим вопросам, относящимся к диссертации. В разделе 1.1 дается краткое описание близких войдов Lynx-Cancer и Eridanus. Рассматриваются выборки галактик в данных войдах и критерии отбора объектов в эти выборки. В разделе 1.2 речь идет о применении данных обзора SDSS в исследовании галактик в войдах. А именно, приводится краткое описание спектральных наблюдений в SDSS, их первичной обработки и нашей дальнейшей работы со спектрами, взятыми из этой базы данных. В этом же ключе рассматривается широкополосная фотометрия по изображениям SDSS в u, g, r, i фильтрах. Она дает возможность получать модельно-независимые параметры для исследуемых галактик. Кратко описана методика фотометрии в круговых апертурах. Приближение полученных радиальных профилей поверхностной яркости экспоненциальным законом, или законом Серсика, позволяет определить модельные параметры центральной поверхностной яркости для галактик.

В разделе 1.3 приводится описание наблюдательных данных, полученных на спектрографе SCORPIO телескопа БТА (САО РАН) в режиме длиннощелевой спектроскопии. Кратко рассматриваются основные этапы обработки полученных данных с применением пакетов MIDAS и IRAF. В разделе 1.4 рассматриваются методы, использованные в работе для определения оценок относительного содержания кислорода. А именно, рассмотрены классический T_e метод и полуэмпирический метод Изотова и Туана

(2007) [37], использующий зависимость T_e от суммы интенсивностей сильных кислородных линий [OII] λ 3727 и [OIII] λ 4959,5007, отнесенных к интенсивности H β . Приводятся методы эмпирических оценок O/H по формулам из работ Пилюгина и Туана (2005) [38] и Ина с соавторами (2007) [39], а также эмпирические методы с включением линии [NII] λ 6584 [40, 41]. Мы провели дополнительную калибровку полуэмпирического метода Изотова и Туана (2007) и эмпирических методов Пилюгина и Туана (2005) и Ина и др. (2007) для исключения возможной систематики в оценках O/H. Для этих методов были получены поправочные формулы оценки содержания кислорода в шкале прямого метода. В разделе 1.5 описывается метод определения возрастов самого старого видимого звездного населения, заключающийся в сравнении цветов периферийных областей галактик с модельными эволюционными треками из пакета PEGASE2 [42]. В разделе 1.6 рассмотрена возможность подключения данных H α , взятых из литературы, для определения массовой доли газа.

Во второй главе приведены результаты определения содержания кислорода O/H для 39 из 60 галактик войда Lynx-Cancer, у которых к этому моменту не было данных о металличности, они базируются на публикации (4) автора по теме диссертации. Новые оценки были получены с помощью длиннощелевой спектроскопии на 6-метровом телескопе CAO РАН (25 объектов) и на основе спектров SDSS из релизов DR7 и DR12 (14 галактик). В итоге, общее число галактик войда с известными O/H составляет 81, то есть 75% от текущей выборки галактик войда. Для некоторых галактик при получении оценок металличности потребовался отдельный подход. В частности, для карликовой LSB галактики KKH 38, во время наблюдений на БТА, в щель попали сразу 4 отдельные H α области, но с очень слабыми отношениями сигнал-шум для каждой. Учитывая тот факт, что вариации металличности для карликовых галактик достаточно малы, мы объединили эти 4 спектра в один интегральный, по которому затем оценивали O/H.

Кроме того, с использованием собственных калибровок методов нами были пересмотрены и обновлены уже имеющиеся оценки из литературы. Для \sim 20% галактик имеются оценки O/H как наши, так и по данным из других исследований. Поскольку они согласуются в пределах ошибок, мы в таких случаях использовали взвешенные средние значения для того, чтобы получать более надежные оценки O/H.

Определение параметров, которые обуславливают эволюцию галактик, очень важно для понимания их формирования и эволюции. В настоящее

время, установлено, что темп обогащения межзвездной среды в галактиках зависит от их массы. Это было обнаружено еще в работе Лекё и др. (1979) [43], где они по соотношению масса-металличность показали, что металличности в галактике коррелируют с ее массой. Уже на большей статистике эту зависимость показали Скиллман и др. (1989) [44] на их соотношении светимость-металличность. Полученный набор данных о металличностях для галактик войда Lynx-Cancer мы использовали для сравнения зависимости “ $\log(\text{O}/\text{H})-M_B$ ” с аналогичной зависимостью для выборки галактик позднего типа из более плотного окружения. В качестве контрольной выборки были взяты 38 галактик Местного Объема из работы Берг и др. (2012) [45], для которых есть оценки расстояний по TRGB или цефеидам, а также значения O/H , полученные прямым методом. На соотношении “ $\log(\text{O}/\text{H})-M_B$ ” для галактик войда Lynx-Cancer наблюдается сдвиг вниз по отношению к реперной выборке. В частности, в середине диапазона M_B ($M_B = -14.5$) металличности ниже на ~ 0.2 dex. На основе этого сделан вывод об уверенном, статистически достоверном понижении металличности O/H для галактик войда Lynx-Cancer (в среднем на 37% или фактор ~ 1.6), по сравнению с галактиками той же светимости в контрольной выборке галактик Местного Объема. Это подтверждает и усиливает вывод, сделанный в работе Пустильника и др. (2011) [34]. Кроме того, мы подтверждаем наличие галактик, сильно отклоняющихся от зависимости (их доля – около 10%), имеющих оценки O/H в 2-5 раз меньше, чем ожидаемые для данной светимости.

В данной главе также рассматривается возможность влияния оценок расстояний на соответствующие ошибки светимостей. И обосновывается, что неопределенность расстояний для галактик войда не может вызвать наблюдаемый эффект пониженной металличности O/H относительно реперной выборки.

В третьей главе представлены результаты поверхностной фотометрии для галактик войда Lynx-Cancer по изображениям в фильтрах u, g, r, i из базы данных SDSS DR7. Они соответствуют содержанию статьи (2) из списка публикаций по теме диссертации. Для изучения фотометрических свойств галактик войда с максимально возможной полнотой за основу была взята дополненная выборка галактик в войде Lynx-Cancer. Из них для 85 галактик были доступны изображения SDSS для фотометрии. Из собственной апертурной фотометрии по изображениям в фильтрах u, g, r, i получены модельно-независимые параметры галактик, такие как интегральные

величины и цвета, эффективные радиусы и соответствующие поверхностные яркости, оптические радиусы и радиусы Холмберга. По результатам анализа радиальных профилей поверхностной яркости получены их значения в центре и масштабные длины модельных дисков. Изучены и сопоставлены с модельными эволюционными треками пакета PEGASE2 цвета внешних частей галактик. Это позволило получить оценки времени от начала звездообразования T_{SF} , которые для подавляющего числа исследованных галактик оказываются порядка космологического времени T_0 . Однако, для 13-ти объектов выборки T_{SF} не превышают $T_0/2 \sim 7 \text{ Gyr}$, а для 7-ми из них $T_{\text{SF}} \lesssim 3.5 \text{ Gyr}$. Среди последних, в основном представлены эволюционно-молодые объекты и доминируют объекты низких светимостей с $M_B > -13.2$. Интегральные величины и цвета использованы для оценки массы звезд галактик. Для галактик войда с доступными потоками в линии H I получен параметр $\mathfrak{M}(\text{H I})/L_B$ и оценка массовой доли газа. Небольшая подгруппа наиболее богатых газом галактик войда ($\sim 10\%$), с величиной $\mathfrak{M}(\text{H I})/L_B \gtrsim 2.5$, имеет массовую долю газа, достигающую (94-99)%. Многие из них показывают нетипично голубые цвета внешних областей.

Полученные для галактик выборки параметры использованы для изучения статистических свойств галактик войдов и для сравнения с другими выборками похожих галактик в более плотном окружении, или отобранными по другим критериям. Для понимания полного диапазона изменения, типа распределения и характерных величин наиболее важных параметров изучаемой выборки были построены их наблюдаемые распределения: абсолютной величины $M_{B,0}$, центральной поверхностной яркости $\mu_{0,c,i}(B)$ в фильтре B с учетом экстинкции в Галактике и коррекции за наклон к лучу зрения, отношения массы водорода к светимости $\mathfrak{M}(\text{H I})/L_B$, массовой доли газа f_{gas} и другие. Для проверки возможных статистических различий свойств галактик войда и галактик выборок, сформированных по более общим критериям, проведено сравнение некоторых их параметров с аналогичными данными для выборки 195 галактик из экваториального обзора (ES) [46], полученной по части слепого H I обзора HIPASS. В общем диапазоне светимостей $-18.5 < M_g < -13.5$ свойства сравниваемых выборок достаточно близки. Для наиболее слабых галактик войда наблюдаются отличия от галактик обзора ES. Однако и в ES обзоре имеется порядка 7% слабых, так называемых "рудиментарных" галактик, с повышенным отношением $\mathfrak{M}(\text{H I})/L_B$, большая часть которых находится далеко от массивных соседей и, вероятно, является аналогами галактик войдов.

В четвертой главе рассматриваются комплексные исследования отдельных галактик в войдах. Раздел 4.1 посвящен детальному исследованию чрезвычайно изолированной Sdm галактики UGC 4722 ($M_B = -17.4$), расположенной в близком войде Lynx-Cancer. Его содержание соответствует статье (3) из списка публикаций по теме диссертации. UGC 4722 является одной из самых изолированных галактик Местного Сверхскопления. При этом на ее изображениях видно пекулярную морфологию, включающую вытянутый шлейф длиной ~ 14 кпк. Предполагалось, что эта система представляет собой взаимодействие между обычной и “темной” галактиками [47]. В результате нашего исследования обнаружено, что это система состоит из двух взаимодействующих галактик: основной галактики UGC 4722 и слабого спутника UGC 4722C. Нами проведена поверхностная фотометрия по изображениям базы данных SDSS. Мы не обнаружили вариаций цвета вдоль длины шлейфа. Эти цвета соответствуют эволюционным трекам звезд из пакета PEGASE2, для одномоментной вспышки, примерно одного возраста, порядка ~ 0.5 млрд. лет.

По динамическим соображениям, шлейф, состоящий из звезд и газа, является частью менее массивного спутника, вытянутой из него в результате приливного воздействия намного более массивной галактики UGC 4722. По данным наших наблюдений на БГА исследована кинематика системы и оценены металличности для двух компонент. Совокупность полученных данных, с включением информации о распределении полной массы HI, позволяет оценить параметры взаимодействующих компонент этой системы. Маломассивным компонентом оказывается маленькая, практически полностью разрушенная, очень богатая газом карликовая галактика ($M_B = -15.2$, $M(\text{HI})/L_B \sim 4.3$). Изучаемая система является первым известным случаем заметного приливного хвоста, состоящего из молодого звездного населения.

В разделе 4.2 ставилась задача получить красное смещение для оптического компаньона очень богатого газом карлика около центра войда Lynx-Cancer – J0723+3624, который является самым слабым оптическим объектом этого войда ($M_B = -9.7$). Содержание этого раздела базируется на секции из статьи (4) в списке публикаций по теме диссертации. Для того чтобы полностью исключить возможную проекцию, было принципиальным получить скорость оптического объекта. Мы измерили гелиоцентрическую скорость 943 ± 23 км с^{-1} по H α эмиссии для очень слабого голубого оптического спутника HI компонента SDSS J0723+3624 в очень богатом газом триплете J0723+36 (согласно, [36]). Таким образом, этот голубой диффуз-

ный объект оказался карликовой галактикой войда Lynx-Cancer, наиболее богатой газом и имеющей самую низкую светимость.

В разделе 4.3 исследуются две низкометаллические LSB карликовые галактики в войде Eridanus. Он соответствует содержанию статьи (1) из списка публикаций по теме диссертации. На основе изображений SDSS для обеих галактик были получены их радиальные профили поверхностной яркости и основные фотометрические параметры. Полученные полные величины и цвета использованы для оценки массы звезд в галактиках, а также их возрастов. Оцененные массовые доли газа $\sim 0.97-0.98$, в совокупности с экстремально низкими металличностями (на фактор 2-3 ниже, чем для их более типичных аналогов с той же светимостью), указывают на эволюционно-молодой статус этих LSB карликов из пустоты Eridanus. Мы сравниваем их с необычной LSB карликовой галактикой J0926+3343 в войде Lynx-Cancer. По совокупности всех известных свойств две обсуждаемые галактики очень похожи на необычный LSB карлик в более близком войде Lynx-Cancer. Это дает дополнительное указание на нахождение в пустотах значимой доли “эволюционно-молодых” галактик малых масс. Их целенаправленный поиск может привести к существенному увеличению числа таких объектов в Местной Вселенной и к лучшему пониманию их природы.

Пятая глава посвящена изучению уникальной массивной голубой переменной (LBV) звезды в галактике DDO 68 войда Lynx-Cancer, открытой на БТА в 2008 году Пустильником и др. [48]. Содержание этой главы основано на статье (5) из списка публикаций по теме диссертации. Исследуемая LBV находится в области текущего звездообразования с экстремально низкой металличностью $12+\log(O/H)\sim 7.14$. Для нее получен новый спектр и фотометрия на 6-метровом телескопе CAO (БТА). Фотометрические данные дополнены данными из архивов SDSS и космического телескопа Хаббла (HST). Предыдущие оценки блеска LBV допускали амплитуды переменности на уровне $\Delta V\sim 1.5-2.0^m$ [49]. По нашим новым данным, с использованием оценки светимости подстилающей III области (как по данным БТА, так и HST), построена кривая блеска LBV за период с 2004 по 2016 годы. По ней получено значение амплитуды переменности, достигающее $\Delta V\gtrsim 3.6^m$. С учетом ее абсолютной величины вблизи максимума, $M_V=-10.5$, наши результаты показывают, что в 2008-2010 годах эта LBV находилась в фазе “гигантского выброса” (giant eruption).

В заключении сформулированы основные результаты работы.

В приложении к диссертации приводятся: таблицы с интенсивностями

ми линий и содержаниями кислорода, полученными для галактик, которые исследовались в главе 2; мозаики одномерных спектров для галактик, по которым получены оценки O/H в главе 2; таблицы с фотометрическими параметрами, описание которых приводится в главе 3.

Список литературы

- [1] M. Jöeveer, J. Einasto, and E. Tago, “Spatial distribution of galaxies and of clusters of galaxies in the southern galactic hemisphere,” *MNRAS*, vol. 185, pp. 357–370, Nov. 1978.
- [2] R. P. Kirshner, A. Oemler, Jr., P. L. Schechter, and S. A. Shectman, “A million cubic megaparsec void in Bootes,” *ApJ*, vol. 248, pp. L57–L60, Sept. 1981.
- [3] A. D. Montero-Dorta and F. Prada, “The SDSS DR6 luminosity functions of galaxies,” *MNRAS*, vol. 399, pp. 1106–1118, Nov. 2009.
- [4] O. G. Nasonova and I. D. Karachentsev, “Kinematics of the Local cosmic void,” *Astrophysics*, vol. 54, pp. 1–14, Mar. 2011.
- [5] V. Springel, “The cosmological simulation code GADGET-2,” *MNRAS*, vol. 364, pp. 1105–1134, Dec. 2005.
- [6] B. Pandey, S. D. M. White, V. Springel, and R. E. Angulo, “Exploring the non-linear density field in the Millennium Simulations with tessellations - I. The probability distribution function,” *MNRAS*, vol. 435, pp. 2968–2981, Nov. 2013.
- [7] C. Pichon, D. Pogosyan, T. Kimm, A. Slyz, and et al., “Rigging dark haloes: why is hierarchical galaxy formation consistent with the inside-out build-up of thin discs?,” *MNRAS*, vol. 418, pp. 2493–2507, Dec. 2011.
- [8] S. Codis, C. Pichon, J. Devriendt, A. Slyz, and et al., “Connecting the cosmic web to the spin of dark haloes: implications for galaxy formation,” *MNRAS*, vol. 427, pp. 3320–3336, Dec. 2012.
- [9] S. Rieder, R. van de Weygaert, M. Cautun, B. Beygu, and S. Portegies Zwart, “Assembly of filamentary void galaxy configurations,” *MNRAS*, vol. 435, pp. 222–241, Oct. 2013.
- [10] M. A. Aragon-Calvo and A. S. Szalay, “The hierarchical structure and dynamics of voids,” *MNRAS*, vol. 428, pp. 3409–3424, Feb. 2013.
- [11] A. A. Elyiv, I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, O. V. Melnyk, and D. I. Makarov, “Low-density structures in the Local Universe. II. Nearby cosmic voids,” *Astrophysical Bulletin*, vol. 68, pp. 1–13, Jan. 2013.
- [12] P. J. E. Peebles, “The Void Phenomenon,” *ApJ*, vol. 557, pp. 495–504, Aug.

- 2001.
- [13] R. B. Tully, R. S. Somerville, N. Trentham, and M. A. W. Verheijen, “Squelched Galaxies and Dark Halos,” *ApJ*, vol. 569, pp. 573–581, Apr. 2002.
 - [14] S. Gottlöber, E. L. Lokas, A. Klypin, and Y. Hoffman, “The structure of voids,” *MNRAS*, vol. 344, pp. 715–724, Sept. 2003.
 - [15] M. Hoeft, G. Yepes, S. Gottlöber, and V. Springel, “Dwarf galaxies in voids: suppressing star formation with photoheating,” *MNRAS*, vol. 371, pp. 401–414, Sept. 2006.
 - [16] O. Hahn, C. M. Carollo, C. Porciani, and A. Dekel, “The evolution of dark matter halo properties in clusters, filaments, sheets and voids,” *MNRAS*, vol. 381, pp. 41–51, Oct. 2007.
 - [17] O. Hahn, C. Porciani, A. Dekel, and C. M. Carollo, “Tidal effects and the environment dependence of halo assembly,” *MNRAS*, vol. 398, pp. 1742–1756, Oct. 2009.
 - [18] M. Hoeft and S. Gottlöber, “Dwarf Galaxies in Voids: Dark Matter Halos and Gas Cooling,” *Advances in Astronomy*, vol. 2010, pp. 87–104, 2010.
 - [19] S. Rieder, R. van de Weygaert, M. Cautun, B. Beygu, and S. Portegies Zwart, “The cosmic web in CosmoGrid void regions,” in *The Zeldovich Universe: Genesis and Growth of the Cosmic Web*, vol. 308 of *IAU Symposium*, pp. 575–579, Oct. 2016.
 - [20] A. Szomoru, J. H. van Gorkom, and M. Gregg, “An HI survey of the Bootes void,” in *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, vol. 25, p. 1438, Dec. 1993.
 - [21] N. A. Grogin and M. J. Geller, “An Imaging and Spectroscopic Survey of Galaxies within Prominent Nearby Voids. I. The Sample and Luminosity Distribution,” *AJ*, vol. 118, pp. 2561–2580, Dec. 1999.
 - [22] G. Sorrentino, V. Antonuccio-Delogu, and A. Rifatto, “Galaxy properties from voids to clusters in the SDSS-DR4,” *A&A*, vol. 460, pp. 673–679, Dec. 2006.
 - [23] S. G. Patiri, F. Prada, J. Holtzman, A. Klypin, and J. Betancort-Rijo, “The properties of galaxies in voids,” *MNRAS*, vol. 372, pp. 1710–1720, Nov. 2006.
 - [24] R. R. Rojas, M. S. Vogeley, F. Hoyle, and J. Brinkmann, “Photometric Properties of Void Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey,” *ApJ*, vol. 617, pp. 50–63, Dec. 2004.
 - [25] R. R. Rojas, M. S. Vogeley, F. Hoyle, and J. Brinkmann, “Spectroscopic Properties of Void Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey,” *ApJ*, vol. 624, pp. 571–585, May 2005.

- [26] K. Stanonik, E. Platen, M. A. Aragón-Calvo, J. H. van Gorkom, and et al., “Polar Disk Galaxy Found in Wall Between Voids,” *ApJ*, vol. 696, pp. L6–L9, May 2009.
- [27] R. van de Weygaert, E. Platen, E. Tigrak, J. Hidding, and et al., “The Cosmically Depressed: Life, Sociology and Identity of Voids,” in *Galaxies in Isolation: Exploring Nature Versus Nurture*, vol. 421 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, p. 99, Oct. 2010.
- [28] A. Boselli and G. Gavazzi, “On the origin of the faint-end of the red sequence in high-density environments,” *A&A Rev.*, vol. 22, p. 74, Nov. 2014.
- [29] J. Einasto, I. Suhhonenko, G. Hütsi, E. Saar, and et al., “Towards understanding the structure of voids in the cosmic web,” *A&A*, vol. 534, p. A128, Oct. 2011.
- [30] N. Cross and S. P. Driver, “The bivariate brightness function of galaxies and a demonstration of the impact of surface brightness selection effects on luminosity function estimations,” *MNRAS*, vol. 329, pp. 579–587, Jan. 2002.
- [31] J. C. Mihos, S. S. McGaugh, and W. J. G. de Blok, “Dynamical Stability and Environmental Influences in Low Surface Brightness Disk Galaxies,” *ApJ*, vol. 477, pp. L79–L83, Mar. 1997.
- [32] K. Kreckel, M. R. Joung, and R. Cen, “Simulated Void Galaxies in the Standard Cold Dark Matter Model,” *ApJ*, vol. 735, p. 132, July 2011.
- [33] S. A. Pustilnik and A. L. Tepliakova, “Study of galaxies in the Lynx-Cancer void - I. Sample description,” *MNRAS*, vol. 415, pp. 1188–1201, Aug. 2011.
- [34] S. A. Pustilnik, A. L. Tepliakova, and A. Y. Kniazev, “Study of galaxies in the Lynx-Cancer void. II. Element abundances,” *Astrophysical Bulletin*, vol. 66, pp. 255–292, July 2011.
- [35] S. A. Pustilnik, J.-M. Martin, A. L. Tepliakova, and A. Y. Kniazev, “Study of galaxies in the Lynx-Cancer void - III. New extreme low surface brightness dwarf galaxies,” *MNRAS*, vol. 417, pp. 1335–1349, Oct. 2011.
- [36] J. N. Chengalur and S. A. Pustilnik, “Discovery of an extremely gas rich dwarf triplet near the centre of the Lynx-Cancer void,” *MNRAS*, vol. 428, pp. 1579–1586, Jan. 2013.
- [37] Y. I. Izotov and T. X. Thuan, “MMT Observations of New Extremely Metal-poor Emission-Line Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey,” *ApJ*, vol. 665, pp. 1115–1128, Aug. 2007.
- [38] L. S. Pilyugin and T. X. Thuan, “Oxygen Abundance Determination in H II Regions: The Strong Line Intensities-Abundance Calibration Revisited,” *ApJ*, vol. 631, pp. 231–243, Sept. 2005.

- [39] S. Y. Yin, Y. C. Liang, F. Hammer, J. Brinchmann, and et al., “Empirical strong-line oxygen abundance calibrations from galaxies with electron-temperature measurements,” *A&A*, vol. 462, pp. 535–546, Feb. 2007.
- [40] L. S. Pilyugin, J. M. Vílchez, and T. X. Thuan, “New Improved Calibration Relations for the Determination of Electron Temperatures and Oxygen and Nitrogen Abundances in HII Regions,” *ApJ*, vol. 720, pp. 1738–1751, Sept. 2010.
- [41] L. S. Pilyugin and L. Mattsson, “Abundance determination in H II regions from spectra without the [O II] λ 3727+ λ 3729 line,” *MNRAS*, vol. 412, pp. 1145–1150, Apr. 2011.
- [42] M. Fioc and B. Rocca-Volmerange, “PEGASE.2, a metallicity-consistent spectral evolution model of galaxies: the documentation and the code,” *ArXiv Astrophysics e-prints*, Dec. 1999.
- [43] J. Lequeux, M. Peimbert, J. F. Rayo, A. Serrano, and S. Torres-Peimbert, “Chemical composition and evolution of irregular and blue compact galaxies,” *A&A*, vol. 80, pp. 155–166, Dec. 1979.
- [44] E. D. Skillman, R. C. Kennicutt, and P. W. Hodge, “Oxygen abundances in nearby dwarf irregular galaxies,” *ApJ*, vol. 347, pp. 875–882, Dec. 1989.
- [45] D. A. Berg, E. D. Skillman, A. R. Marble, L. van Zee, and et al., “Direct Oxygen Abundances for Low-luminosity LVL Galaxies,” *ApJ*, vol. 754, p. 98, Aug. 2012.
- [46] D. A. Garcia-Appadoo, A. A. West, J. J. Dalcanton, L. Cortese, and M. J. Disney, “Correlations among the properties of galaxies found in a blind HI survey, which also have SDSS optical data,” *MNRAS*, vol. 394, pp. 340–356, Mar. 2009.
- [47] I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, and W. K. Huchtmeier, “Disturbed isolated galaxies: indicators of a dark galaxy population?,” *A&A*, vol. 451, pp. 817–820, June 2006.
- [48] S. A. Pustilnik, A. L. Tepliakova, A. Y. Kniazev, and A. N. Burenkov, “Discovery of a massive variable star with $Z = Z_{solar}/36$ in the galaxy DDO 68,” *MNRAS*, vol. 388, pp. L24–L28, July 2008.
- [49] Y. I. Izotov and T. X. Thuan, “Luminous Blue Variable Stars in the two Extremely Metal-Deficient Blue Compact Dwarf Galaxies DDO 68 and PHL 293B,” *ApJ*, vol. 690, pp. 1797–1806, Jan. 2009.

Бесплатно

Пеперелицына Юлия Александровна

Изучение карликовых галактик в ближайших войдах