

На правах рукописи

УДК 524.7-36; 524.82

ПУСТИЛЬНИК Семен Аронович

**ПОИСК И ИССЛЕДОВАНИЕ
НЕОБЫЧНЫХ МАЛОМАССИВНЫХ ГАЛАКТИК**

(01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия)

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

Нижний Архыз – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном
учреждении науки Специальной Астрофизической Обсерватории
Российской академии наук

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Сильченко Ольга Касьяновна
(ГАИШ МГУ)

доктор физико-математических наук
Тихонов Николай Александрович
(САО РАН)

профессор,
доктор физико-математических наук
Щекинов Юрий Андреевич
(Южный федеральный университет)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
Институт Астрономии РАН

Защита состоится 18 апреля 2013 г. в 10 часов на заседании
Диссертационного совета Д 002.203.01 при Специальной Астрофизической
Обсерватории РАН по адресу: 369167, КЧР, Зеленчукский район, пос.
Нижний Архыз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан "____" марта 2013 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
кандидат физ.- мат. наук

Шолухова О.Н.

Общая характеристика работы

Представляемая работа посвящена поиску и исследованию маломассивных галактик, значительно отличающихся по своим свойствам от подавляющего большинства более типичных карликов. Первое направление связано с галактиками, в которых темп *текущего* звездообразования (ЗО) намного выше, чем средний за время жизни галактики. Такие галактики имеют специфические наблюдательные проявления и позволяют изучать как вопросы, связанные с физикой областей ЗО, так и вопросы эволюции и связи с другими, более типичными галактиками. Эпизоды интенсивного ЗО длятся недолго по сравнению с полным временем жизни галактики (типично, десятки–сотни млн. лет). Их часто называют "вспышки" ЗО. Вспышки ЗО наблюдаются иногда и в массивных галактиках вследствие сильных взаимодействий с другими галактиками. Характерный масштаб времени таких событий порядка сотни млн. лет.

Вторая часть работы связана с поиском и исследованием галактик с активным ЗО и очень низкой металличностью газа - аналогов знаменитой галактики IZw18 (она же MKN 116). Такие объекты являются ближайшими локальными аналогами формирующихся галактик в ранней Вселенной (в период времени от начала Большого Взрыва порядка 0.5–2 млрд. лет). Изучение этих очень редких галактик и их окружения дает, с одной стороны, указание на вероятную эволюционную молодость части из них, а с другой стороны – на их связь с наиболее разреженными областями Вселенной – большими пустотами.

Как логическое продолжение предыдущего направления, часть работы посвящена изучению в более общем контексте роли разреженного окружения в эволюции маломассивных галактик. А именно, изучению не только галактик со вспышкой ЗО, но всех доступных галактик близких войдов. В частности, в одной из ближайших пустот в области неба Lynx-Cancer создана большая и глубокая выборка галактик (в первой опубликованной версии – 79 объектов, в увеличенной позднее – около 100), для которой статистически изучаются возможные отличия эволюционных параметров маломассивных галактик и таких же (похожих) галактик в более плотном окружении. Кроме того, около полудюжины наиболее необычных галактик в этой пустоте изучены более детально.

В ранний период поиска и изучения галактик с интенсивным ЗО (1960-1970-е, каталоги голубых галактик Цвикки, Аро, галактик с УФ избытком Маркаряна) с использованием фотопластинок, их морфология казалась

достаточно необычной. Их изображения выглядели как яркие компактные массивные области ЗО на слабом фоне более протяженного звездного тела галактики невысокой поверхностной яркости. Последнее, при не очень глубоких снимках, могло вообще не обнаруживаться. Таким образом, по историческим причинам, маломассивные объекты со вспышкой ЗО называют обобщенно голубые компактные галактики (BCGs - blue compact galaxies) или, из-за того, что их спектры похожи на спектры H II областей, их также часто называют H II галактиками. Чтобы не возникало ложного представления, отметим, что не все объекты, выделенные морфологически как BCG, показывают сильные эмиссии. В таких галактиках наиболее массивные звезды могли уже закончить свой жизненный цикл, а менее массивные голубые звезды не дают достаточной ионизации газа. Кроме того, значительная часть объектов из списков Цвикки, Аро и Маркаряна относятся к галактикам с активными ядрами.

Благодаря специфическим наблюдательным свойствам, поиск BCG с помощью обзоров с объективной призмой является достаточно эффективным до расстояний, значительно превышающих размер Местного Сверхскопления. Для более типичных карликовых галактик на таких расстояниях определение их лучевых скоростей до самого последнего времени (т.е. появления таких глубоких спектральных обзоров как SDSS и 2dFRS, а также слепых обзоров в линии H I – HIPASS/JPASS и ALFALFA) было трудной задачей. Поэтому BCG и подобные галактики представляли большой интерес и с точки зрения понимания общего распределения маломассивных галактик в пространстве. Большие выборки таких галактик позволяют более детально изучать распределение материи в больших объемах близкой Вселенной. С другой стороны, ЗО является универсальным процессом во Вселенной, а вспышечное ЗО, в отличие от ситуации в локальной Вселенной, по-видимому, являлось одной из основных форм ЗО в эпоху, когда Вселенная была в 5–10 раз моложе и когда большая часть современных галактик еще только формировалась и проходила ранние стадии эволюции. Т.о., детальное изучение отдельных близких галактик со вспышкой ЗО дает важные сведения о физических процессах в разных типах галактик, и, в частности, о процессах в галактиках в молодой Вселенной.

Среди близких галактик со вспышкой ЗО имеется порядка 2% объектов с очень низкой металличностью ($Z < Z_{\odot}/10$)¹ межзвездной среды (МС) и повышенной массовой долей газа. Такие низкометаллические объекты по

¹Для дальнейшего, мы принимаем, согласно Asplund et al. (2004), уточненное значение солнечного содержания кислорода $12 + \log(O/H) = 8.66$.

своим свойствам наиболее близки к молодым галактикам, сформировавшимся в ранней Вселенной. Изучение именно этих, очень редких в локальной Вселенной галактик, позволяет нам лучше понять раннюю эволюцию галактик, так как в момент образования в молодой Вселенной галактики состоят из вещества с очень низким содержанием металлов. В частности, необычные свойства одной из наиболее низкометаллических галактик IZw18, связанные с большой ролью небулярной эмиссии газа, ионизованного мощной вспышкой ЗО, могут быть довольно типичными в галактиках на больших красных смещениях (Papaderos & Östlin 2012), и поэтому понимание свойств этой очень редкой галактики важно для правильной интерпретации данных по галактикам в более ранней Вселенной.

В работе представлены результаты поиска таких галактик в рамках двух больших обзоров. Большая часть работы сделана по кандидатам, отобранным нами по базе призмных спектров Гамбургского обзора квазаров. Другая часть поиска использовала кандидаты в эмиссионные галактики, найденные и опубликованные в каталоге обзора Case. Так как эта работа начиналась около 20 лет назад, то значимость и новизну результатов, полученных за этот период, нужно соотносить с уровнем понимания в этой области в соответствующие годы.

Изучение связи эволюции галактик с глобальным окружением является актуальным направлением, так как современные космологические модельные расчеты достаточно глубоко продвинулись по разрешению и пытаются предсказывать свойства галактик с полными массами порядка $10^9-10 M_{\odot}$. (Gottlöber et al., 2003) В частности, свойства карликов в войдах и их полное число являются важными параметрами для сравнения моделей и наблюдений (Hoeft, Gottlöber, 2010). В рамках предлагаемой работы мы детально описываем геометрию одного из ближайших войдов, а также создание в нем большой выборки галактик с абсолютными величинами до $M_B = -12$. Наше исследование галактик этого войда позволило открыть около полутора десятков галактик с металличностью $Z < Z_{\odot}/10$ и показать, что галактики войда имеют Z систематически ниже, чем аналогичные галактики в более плотных областях близкой области Вселенной. Более того, найдено, что восемь галактик войда имеют необычные свойства, указывающие на их эволюционно-молодой статус. Они являются очень низкометаллическими для своей светимости и массы ($Z_{\odot}/35 < Z < Z_{\odot}/20$), экстремально богаты газом (до 95-99% по массовой доле барионов) и часть из них является весьма голубыми, что указывает на небольшой возраст их

видимого звездного населения.

Актуальность темы

Звздообразование в галактиках является универсальным процессом, который определяет как их эволюцию, так и многие наблюдательные проявления. В то время, как в большинстве галактик в современную эпоху глобальное ЗО происходит лишь с относительно небольшими вариациями, в части галактик "активное" ЗО может радикально изменять видимую морфологию галактики, особенно при наблюдении в УФ или голубом участке оптического диапазона. Голубые компактные галактики (BCG) - маломассивные, богатые газом объекты, являются типичными представителями галактик с "активным" ЗО. С ними связана несколько актуальных проблем: причины таких глобальных "вспышек" ЗО, обратное влияние вспышки ЗО на родительскую галактику, галактические сверхветры и обогащение межгалактической среды металлами, эволюция маломассивных галактик и связь BCG с другими типами карликовых галактик. Их типичные металличности Z находятся в диапазоне от $Z_{\odot}/10$ до $Z_{\odot}/2$. Небольшая доля известных BCG ($\sim 2\%$) имеет металличность ниже $Z_{\odot}/10$. Доля известных галактик с еще меньшими Z быстро уменьшается. Лишь несколько галактик из тысяч известных на сегодня BCG имеет Z на уровне $\sim Z_{\odot}/30$.

Эти исключительно редкие галактики по многим свойствам похожи на молодые галактики во Вселенной в эпоху, когда она была в 5–10 раз моложе ($z \sim 4-10$). Такие объекты (с видимыми величинами $R \sim 27-29$ mag и слабее) с трудом обнаруживаются в самых глубоких на сегодня обзорах, так что говорить об их *детальном* изучении пока рано. Их локальные аналоги (на расстояниях от десятка до нескольких десятков Мпк), будучи на 10–15 величин (100–1000 раз) ярче, и имея угловые размеры в десятки–сотню раз больше, чем похожие объекты на больших красных смещениях, позволяют подробно изучить и понять многие процессы, связанные с ЗО в молодых галактиках. Поэтому поиск таких редких BCG и их комплексное исследование имеют непосредственное отношение к космогонии галактик и процессам ЗО в молодой Вселенной.

Проблема связи эволюции галактик с глобальным окружением также стала особенно актуальной в последнее десятилетие, благодаря накоплению большого объема данных по структуре местной Вселенной - с одной стороны, и благодаря развитию моделей формирования и эволюции галактик, и продвижению их в область параметров, характерных для карликовых

галактик. Именно для маломассивных галактик можно ожидать достаточно значимого влияния окружения на их вековую эволюцию. Важным требованием к такого рода исследованиям является минимизация эффектов наблюдательной селекции, которая обычно сильна для наименее массивных галактик. Понимание этого факта и требование достаточной глубины по выборкам галактик приводит к необходимости иметь дело с близкой окрестностью Местного Объема.

Цели исследования

Целями данной работы являлись следующие задачи:

1. Проведение систематического поиска голубых компактных галактик (BCG) в больших (тысячи кв.градусов) односвязных областях неба по спектрам с объективной призмой, полученным в Гамбургском обзоре квазаров в рамках обзора Гамбург-CAO (HSS), получение целевых спектров кандидатов, отобранных в этом обзоре и обзоре Case, их классификация и построение новой большой выборки BCG, пригодной для статистического изучения феномена вспышечного звездообразования и связанных проблем.
2. Спектральные исследования подвыборки голубых компактных галактик с сильными эмиссионными линиями для определения содержания кислорода и других тяжелых элементов.
3. Наблюдение интегрального излучения нейтрального водорода в радиолинии 21 см большой выборки BCG из Бюраканских и Case обзоров, а также галактик с очень низкой металличностью.
4. Исследование пространственного распределения BCG и связи свойств изучаемых галактик с их локальным и глобальным окружением.
5. Поиск новых BCG с наиболее низкими металличностями и комплексное исследование представителей этой группы галактик.
6. Детальное исследование в радиолинии 21 см нейтрального водорода структуры и кинематики газа подвыборки голубых компактных и иррегулярных галактиках с очень низкой металличностью.
7. Создание наиболее полной выборки карликовых галактик в близкой пустоте Lutz-Sancerg для последующего статистического исследования их эволюционного статуса.

8. Проведение многоволновых наблюдений галактик из выборки в пустоте Lynx-Cancer для получения параметров металличности ионизованного газа, массы и скоростей движения нейтрального водорода HI, массовой доли газа в этих объектах, а также анализ их изображений из базы данных SDSS.

Научная новизна

В данной работе впервые:

1. по результатам щелевой спектроскопии проведена классификация около 650 кандидатов в эмиссионные галактики, выделенных предварительно по призмным спектрам Гамбургского обзора квазаров (HQS) и 178 эмиссионных кандидатов из обзора с объективной призмой Case;
2. по результатам обзора эмиссионных галактик Гамбург/CAO (HSS) и из обзора Case, в односвязной области неба с площадью около 1700 кв. град. создана самая большая выборка VCG (506 галактик);
3. измерены параметры излучения в линии HI 21 см для выборки около 150 VCG и других маломассивных галактик (из них около 30-ти галактик с очень низкой металличностью);
4. изучено пространственное распределение VCG из выборки Второго Бюраканского обзора (SBS) относительно структур, формируемых массивными галактиками. Показано, что ~80% расположены в основном на периферии таких структур, в то время как остальные ~20% VCG находятся в больших войдах. Маломассивные галактики поздних типов также составляют часть населения войдов.
5. из анализа большой выборки VCG показано, что вспышки звездообразования более чем в половине из них вызываются приливными воздействиями ближайших галактик разных масс или слияниями (мержингом) карликовых галактик.
6. получено указание на более высокую массовую долю газа HI в VCG, расположенных внутри больших войдов.
7. найдено 10 новых VCG с очень низкой металличностью, соответствующей содержанию кислорода в диапазоне $(O/H)_{\odot}/35 - (O/H)_{\odot}/10$;

8. получены и изучены карты распределения плотности и поля скоростей нейтрального водорода для 6-ти галактик с очень низкой металличностью;
9. в галактике Местного Объемы DDO 68 открыта массивная звезда типа LBV, образовавшаяся из газа с рекордно низкой металличностью $Z = Z_{\odot}/36$. в 4–5 раз ниже, чем для LBV звезд в других низкометаллических галактиках.
10. открыт и описан близкий войд в Lynx-Cancer, примыкающий к Местному Объему; в этом войде отобраена самая глубокая и самая большая для индивидуальных войдов выборка маломассивных галактик (79 объектов), приведены их наблюдательные параметры, на БТА получены новые спектральные данные, оценены содержания кислорода для 60% объектов выборки.
11. впервые по анализу большой выборки карликовых галактик в близком войде Lynx-Cancer обнаружена систематически пониженная (по отношению к подобным галактикам в более плотном окружении) металличность газа. Кроме того, среди галактик этого войда найдена значительная доля (~10%) необычных, эволюционно-молодых галактик (включая LSB карлики с рекордно низкой металличностью газа, с массовой долей газа (98–99)% и необнаружимым вкладом излучения звезд с космологическими возрастами).

Достоверность результатов

Достоверность представленных в работе наблюдательных результатов основывается на тщательном отборе и обработке наблюдений и анализе возможных ошибок, подтверждением части наших результатов независимыми данными по некоторым из наших галактик, либо нашими повторными наблюдениями, либо данными других авторов. Достоверность статистического анализа, интерпретации результатов и выводов основывается на критических обсуждениях полученных результатов со специалистами и коллегами, в том числе и с рецензентами ведущих международных и российских журналов, в которых соответствующие статьи опубликованы.

Научная, методическая и практическая значимость работы

Следующие результаты представляемой работы несомненно имеют высокую научную и практическую значимость:

1. созданная самая большая и "плотная" выборка BCG (506) (~ 0.3 гал./кв.град) в зоне обзора HSS позволяет проводить статистические исследования свойств BCG, в частности в связи с их положением в элементах крупномасштабной структуры, а также проводить анализ их пространственного распределения;
2. большое количество новых наблюдательных данных по металличностям BCG и их интегральным параметрам в линии H α 21 см позволит использовать их как для статистического изучения свойств BCG, так и при планировании новых наблюдательных программ для их более глубокого изучения;
3. открытые в этой работе новые BCG с очень низкой металличностью дают возможность в деталях изучить вспышки ЗО в наиболее близких аналогах молодых маломассивных галактик в ранней Вселенной;
4. полученные карты распределения плотности и поля скоростей H α позволят сопоставить их с моделями спонтанного и индуцированного ЗО и лучше понять роль взаимодействий во вспышках ЗО.
5. наиболее глубокая выборка галактик в войде Lynx - Cancer, включая и часть наиболее эволюционно-молодых LSBG галактик, представляет большой интерес с точки зрения сравнения свойств галактик и их пространственного распределения и скучивания в пустоте с наиболее продвинутыми по разрешению и учету ЗО численными космологическими моделями формирования и эволюции галактик и их структур.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты щелевой спектроскопии примерно 60% всех отобранных кандидатов в эмиссионные галактики в зоне обзора Hamburg-SAO (списки 1,2,5,6 – около 600 объектов), 45-ти галактик в осенней зоне HSS и 178 объектов из обзора Case, приведшие к открытию около 450 новых BCG. Оценка содержания кислорода классическим T_e методом для более 40 новых BCG. Создание в северной галактической полусфере, в зоне обзора эмиссионных галактик Гамбург-CAO (HSS) (R.A. = $7^h 10^m - 17^h 30^m$, Dec. = $35^\circ - 50.5^\circ$) (частично на основе данных из других источников) крупнейшей выборки голубых компактных галактик, общим числом 506. Данные включают: координаты и лучевые скорости галактик, их видимые и абсолютные величины в B -полосе, а

- также информацию об относительных интенсивностях и эквивалентных ширинах сильных эмиссионных линий;
2. Результаты измерений интегральных параметров нейтрального водорода по излучению в линии 21 см H I для более чем 150 голубых компактных галактик из выборок Первого и Второго Бюраканских, Case и Гамбург-САО обзоров.
 3. Результаты анализа крупномасштабного пространственного распределения BCG по выборке из Второго Бюраканского Обзора (SBS) и анализа влияния локального окружения на включение "вспышек" звездообразования в голубых компактных галактиках по выборке из 86 таких объектов с лучевыми скоростями менее 6000 км с^{-1} и по выборке 40 BCG с очень низкими металличностями. Вывод о том, что порядка 20% BCG находятся в областях низкой плотности, вдали от массивных галактик, а остальные - в основном на периферии групп и больших агрегатов. Вывод о том, что взаимодействие с другими галактиками является одним из основных факторов, приводящим к *сильным* вспышкам звездообразования.
 4. Открытие и результаты изучения 10-ти голубых компактных и иррегулярных галактик с очень низким содержанием металлов (Z менее $Z_{\odot}/10$), что увеличило общее число таких редких галактик примерно на 20%. Обнаружение среди малометаллических галактик редкого объекта HS 0837+4717, с большим избытком азота, существование которого (наряду с несколькими аналогами) ставит серьезные ограничения на модели обогащения азотом в галактиках с активным ЗО.
 5. Оптическое отождествление западного компонента уникальной двойной системы галактик SBS 0335-052, являющейся на сегодня галактикой с рекордно низкой металличностью ($Z = Z_{\odot}/50$, $12+\log(\text{O}/\text{H})=6.9-7.12$) Результаты изучения этой системы с помощью картографирования в линии H I 21 см на радиотелескопах VLA и GMRT и глубокого фотометрического исследования на БТА. Построение ее модели на основе представления об индуцированных эпизодах звездообразования на шкале в сотни миллионов лет в результате первого близкого пролета в процессе идущего слияния (большого мержинга).
 6. Результаты детального изучения структуры и кинематики нейтрального водорода в линии 21 см и/или в линии H α в 8-ми галактиках с очень

низкой металличностью, вывод о значительной роли взаимодействий для вспышек 3O в этой подвыборке BCG.

7. Открытие и описание одной из ближайших областей с очень низкой плотностью вещества – войда Lynx-Cancer, создание большой и глубокой выборки 79-ти маломассивных галактик в этой пустоте. Спектроскопия на БТА 22-х галактик выборки, получение по этим данным и спектрам SDSS оценок содержания кислорода в газе для 60% галактик выборки, открытие или отождествление среди галактик войда 16-ти очень низкометаллических ($Z < Z_{\odot}/10$) объектов, для 6-ти из них металличность соответствует диапазону наиболее низких в местной Вселенной ($7.12 \leq 12 + \log(\text{O}/\text{H}) \leq 7.3$). Результаты сравнительного анализа галактик войда и более плотного окружения и вывод о замедленной эволюции значительной части галактик этой пустоты.
8. Комплексное изучение 6-ти необычных галактик этого войда – с рекордно-низкими металличностями ($7.12 \leq 12 + \log(\text{O}/\text{H}) \leq 7.3$) и/или с отсутствием следов старого населения во внешних частях. Открытие в галактике DDO 68 массивной звезды типа LBV, возникшей из газа с $Z \sim Z_{\odot}/35$. Открытие вблизи центра войда карликовых галактик с рекордно высоким отношением $M(\text{H I})/L_{\text{B}} \approx 10$ и 25, и массовой долей газа более 99%. Вывод о большой концентрации эволюционно-молодых галактик в области войда. Последнее является указанием на значительную задержку эпохи формирования и/или позднее включение звездообразования у части галактик этой пустоты.

Апробация результатов

Результаты диссертации представлялись и обсуждались:

- на семинарах 9-ти астрономических интституттов и обсерваторий: САО РАН, Нижний Архыз; Парижской обсерватории, Франция; Института астрофизики Андалусии, Гранада, Испания; Астрономического Института Макса Планка, Гейдельберг, Германия; Института теоретической физики и астрофизики Кильского университета, Киль, Германия; Страсбургской астрономической обсерватории, Франция; Обсерватории Вайз Тель-Авивского университета, Израиль; Национального центра радиоастрофизики, Пуна, Индия; Южно-Африканской Астрономической Обсерватории, Кейптаун, ЮАР

- на 5-ти всероссийских и 22-х международных конференциях:

Конф. "Panchromatic View on Galaxy Evolution", г. Киль, Германия, 1992; Конференция "Карликовые галактики", Обсерватория От Прованс, Франция, 1993; Симп. МАС 171 "New Light on Galaxy Evolution", Гейдельберг, Германия, 1995; Конф. "Interplay between massive stars formation, ISM and galaxy evolution", г. Париж, Франция, 1995; Объедин. дискуссии No.2 "Dwarf Galaxies: Probes for Galaxy Formation and Evolution", XXIII Ген.Ассамблея МАС, г. Киото, Япония, 1997; Конференция по эволюции галактик, г. Гранада, Испания, 2000; JENAM-2000, г. Москва, 2000; Конференция по обзорам неба, г. Престон, Великобритания, 2000; Конференция Cosmion-2001, г.Москва, Россия, 2001 Конференция по эволюции галактик, г. Киль, Германия, 2002; Международный семинар по химической эволюции карликовых галактик. Замок Рингберг, Бавария, Германия, 2002; Всероссийская астрономическая конференция-2004, Москва, 2004; Всероссийская астрономическая конференция-2005, Москва, 2005; Симп. МАС 232, "Scientific Requirements for Extremely Large Telescopes", Кейптаун, Южная Африка, 2005; Симп. МАС 235 "Evolution of Galaxies Across the Hubble Time", Прага, Чехия, 2006; Симп. МАС 237 "Triggered Star Formation in a Turbulent ISM", Прага, Чехия, 2006; Симп. МАС 244 "Dark Galaxies and Lost Baryons", Кардифф, Великобритания, 2007; Международная конференция "Dynamics of Galaxies", Санкт-Петербург, Россия, 2007; Всероссийский семинар "Первые объекты во Вселенной", Москва, Россия, 2007; Симп. МАС 255 "Low-Metallicity Star Formation: From the First Stars to Dwarf Galaxies", Рапалло, Италия, 2008; Международная конференция "Nearby Dwarf Galaxies", Нижний Архыз, Россия, 2009; JENAM-2010, Симп. "Environment and the Formation of Galaxies: 30 years later", Лиссабон. Португалия, 2010; JENAM-2010, Симп. "Dwarf Galaxies: Keys to Galaxy Formation and Evolution", Лиссабон, Португалия, 2010; Всероссийская астрономическая конференция-2010, Нижний Архыз, 2010; JENAM-2011, Спец.сессия "Minor merging as a driver of galaxy evolution", Санкт-Петербург, Россия, 2011; Semain Francais of Astronomy and Astrophysics, Paris, Франция, 2011; Международный семинар "An Odyssey in the Galaxy Archipelago", остров Ljustero, Швеция, 2012; Конференции-конкурсы САО РАН в 1998, 1999, 2003, 2004, 2005, 2006, 2008, 2010, 2011, 2012 гг.

Основные результаты диссертации опубликованы в 51 работе, из них 32 – в рецензируемых международных и 7 – в российских журналах, и 12 работ - в прочих изданиях, общим объемом 525 страниц, 50 работ написаны совместно с другими авторами.

Личный вклад автора

В работах 1, 4, 13-14, 17, 18, 20-25, 28-31, 34, 36-38 автор был постановщиком задачи и одним из основных исполнителей, включая этапы получения, обработки и анализа данных и написания статей, в работах 5-12, 15-16, 19, 26-27, 32-33, 35, 39 - автор на равных с другими соавторами участвовал в постановке задачи, анализе данных и написании статей, в работах 2-3 автор совместно с другими соавторами участвовал в анализе выборки BCG из SBS и в обсуждении результатов анализа применительно ко всем использованным галактикам.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из 7-ми глав, Введения и Заключения. Всего – 408 стр, 98 рисунков, 43 таблиц. Список литературы включает 360 ссылок.

1 Содержание работы

Во Введении дается исторический обзор сорокалетних исследований активного звездообразования в карликовых галактиках. Вводится термин "Голубые компактные галактики" (BCG) и описываются важнейшие результаты ранних этапов их изучения. Описаны первые обзоры с объективной призмой и этап накопление данных. В частности, кратко суммированы результаты обзоров в Бюракане, University of Michigan (UM) и Tololo. Кроме этого, описаны результаты обзора в линии H I 21 см, обзоры морфологии и цветов в оптическом и ближнем ИК диапазонах и первые модели ЗО в BCG.

Далее приводятся новые мотивации, наблюдательные возможности и идеи в период 1991 - 2010, обсуждается феномен BCG и возможные эволюционные связи с другими типами маломассивных галактик, природа вспышек ЗО, триггерные механизмы, молодые массивные скопления. Акцент сделан на BCG с наименьшим содержанием металлов: первичный гелий, возможность нахождения "молодых" галактик, природа предшественников

BCG и другие проблемы. Кратко рассказано о новых призмных обзорах: SBS, Case, HQS/HSS, KISS, а также о цифровом обзоре SDSS. Кроме того, кратко освещен многоволновый и комплексный подход к изучению феномена BCG, включающий поверхностную фотометрию, двумерную спектроскопию, наблюдения в линии H I 21 см и в радиоконтинууме, фотометрию и спектры в ближнем ИК диапазоне, исследование с космическими телескопами в ИК, УФ и рентгеновском диапазонах. Приведены аргументы в пользу необходимости и актуальности создания больших выборок голубых компактных галактик и их статистического исследования.

В конце Введения дается общая характеристика работы, в том числе описаны цель работы, научная новизна, научная и практическая ценность работы, ее апробация, краткое содержание и основные положения, выносимые на защиту. Описан личный вклад автора в списке работ, в которых изложено содержание диссертации.

В первой главе описаны методика поиска и создание выборок голубых компактных галактик (BCG) на основе базы данных призмных спектров Гамбургского обзора квазаров.

В §1.1 дано краткое введение по теме призмных обзоров галактик и общая информация содержании этой главы. В §1.2 посвящен поиску новых BCG в зоне обзора Case. Описаны выборка, наблюдения на БТА более 180 отобранных кандидатов в эмиссионные галактики и их результаты, включая классификацию. Также проводится анализ полученных данных для 142 эмиссионных галактики и формулируются полученные выводы. В §1.3 представлены результаты поиска BCG в обзоре эмиссионных галактик Гамбург/CAO (HSS). В нем описаны: первый этап – отбор кандидатов базе данных и пластинкам Гамбургского Обзора Квазаров, и второй этап – спектроскопия этих кандидатов на БТА и других телескопах, а также результаты спектральных наблюдений и их анализ. Отдельным пунктом описано и обсуждается создание по той же базе данных выборки BCG с очень сильными линиями в южной галактической полусфере. Описаны два этапа этой работы. Первый – отбор кандидатов по базе данных HQS, и второй – спектроскопия отобранных кандидатов на БТА и других телескопах. Далее приводятся результаты спектральных наблюдений и их анализ. В конце этого раздела подводятся итоги проведения обзора HSS и кратко описаны параметры новой большой выборки BCG в этой зоне неба. Для осенней зоны HSS, по измеренным в этой работе O/H для более чем 40 BCG построена и обсуждена зависимость $\log(O/H)$ от M_B . В §1.4

подводятся итоги и формулируются полученные в этой главе выводы.

Во второй главе описаны исследования интегральных параметров HI в большой выборке VCG по излучению в радиолинии 21 см.

В §2.1 дан обзор ранних результатов и представлены цели работы и используемые выборки VCG. В §2.2 описаны наблюдения и обработка данных по HI. В частности, кратко описаны использованные радиотелескопы и их параметры: Большой р/т в Нансэ (NRT, Франция), 43-м полноповоротная антенна в Грин Бэнк (США) и 100-м антенна в Эффельсберге (Германия), и соответствующая приемная аппаратура и ее параметры. Далее описаны использованные методики наблюдений и обработки полученных данных.

В §2.3 приведены результаты, их предварительный анализ и выводы по исследованию в линии HI выборки VCG из Бюраканских обзоров.

§2.4 посвящен VCG в войдах. Описана общая ситуация с теоретическим пониманием галактик в войдах, а также предыдущие подходы к их наблюдательному исследованию, обсуждается отобранная для наблюдений выборка, а затем – результаты наблюдений этих VCG на р/т в Нансэ и Эффельсберге, а также их обсуждение и полученные выводы. Получено указание (по результатам в Главе 3) на более высокое в среднем содержание HI для VCG в войдах.

§2.5 посвящен галактикам с очень низкой металличностью и их интегральным параметрам HI. Суммирована ситуация с исследованием таких галактик на начало 2000-х и обсуждена актуальность их изучения в HI. Далее описаны наблюдения 22-х XMD галактик на р/т NRT, а также представлены результаты и их обсуждения. Одним из интересных результатов оказалось наличие очень большой дисперсии в отношении массы HI и светимости для изучаемой группы, что указывает на вероятное разнообразие эволюционных сценариев. В §2.6 кратко суммированы выводы к этой главе.

В третьей главе, на основе больших выборок VCG изучаются некоторые статистические свойства этих галактик.

В §3.1 на примере полной выборки VCG из зоны Второго Бюраканского Обзора (SBS) (96 галактик с лучевыми скоростями от 2000 до 8000 км с⁻¹) (Pustilnik et al. 1995) рассмотрено их пространственное распределение по отношению к массивным галактикам (со светимостью $L > L^*$). Показано, что порядка 80% изученной выборки отслеживают в пространстве структуры, образованные массивными галактиками, хотя и располагаются на их периферии, имея преимущественно расстояния до ближайшей массивной галактики порядка или более 1 Мпк. В то же время обнаружено, что порядка 20%

BCG населяют области низкой плотности - войды. Для них расстояния до ближайшей массивной галактики составляет 5–10 Мпк. Этот результат подтвердил более ранний вывод из работы Salzer (1989), сделанный на основании изучения выборки похожих галактик из обзора UM.

В §3.2 кратко рассмотрены процессы звездообразования и роль окружения.

В §3.3 с использованием подвыборки BCG из зоны SBS мы исследовали вопрос о роли внешних воздействий на вспышки ЗО в маломассивных галактиках. Здесь приведен краткий обзор проблема триггерных механизмов вспышек ЗО в BCGs и описаны ранние результаты в этом направлении, проиллюстрирована роль взаимодействий (приливный триггер) для включения повышенного ЗО в газовых дисках, как в большом наборе модельных расчетов, так и в многочисленных наблюдениях вспышек ЗО в парах, плотных группах, и особенно при слияниях галактик. Суммированы результаты поиска богатых газом спутников у BCG и LSBG по работам Taylor et al. (1995).

Мы обсуждаем применяемую модель, которая позволяет количественно оценить силу возмущения и используемую формулу для порогового расстояния, рассчитанного исходя из гидродинамической модели Icke (1985). Далее описаны выборки, использованные в нашем исследовании. Они включают выборку 86 BCG из SBS с лучевыми скоростями $<6000 \text{ км с}^{-1}$, и контрольную выборку LSB галактик из работы Pildis et al. (1997) В завершение мы приводим результаты поиска близких галактик, которые оказывают достаточно сильное возмущение на исследуемые объекты выборок. Результаты для SBS BCGs сравниваются с полученными для контрольной выборки LSBGs. Для части BCG обнаружены морфологические свидетельства сильных возмущений при отсутствии возможных возмущающих галактик. Такие объекты с большой вероятностью являются результатом почти завершенного слияния (мержер). Суммарно порядка 65% BCG из этой выборки имеют более или менее очевидные возмущающие галактики в их окрестности, и еще 15% представляют более или менее слившиеся остатки недавнего мержинга.

В §3.4 представлено сравнение BCG в разных типах глобального окружения по параметру $M(\text{HI})/L_B$. BCG в войдах отобраны по выборкам в зоне обзоров SBS и Case. Результаты измерений потоков HI для галактик в войдах, общем поле и Местном Сверхскоплении взяты из наших статей Pustilnik et al. (2002) и Thuan et al. (1999), а также частично из литературы, также как и для BCG, найденных на периферии скопления Virgo. Анализ

собранных данных по VCG с измеренными потоками HI в четырех исследованных выборках дает указание (на доверительном уровне 0.95) на то, что объекты в войдах имеют большие массы HI при той же светимости L_B .

В §3.5 суммируются результаты статистического анализа некоторых свойств VCGs и формулируются соответствующие выводы.

В четвертой главе, посвященной уникальной паре карликовых галактик SBS 0335-052 E и W, в §4.1 дано краткое введение и перечислены цели исследования этой системы.

§4.2 посвящен собственно исследованию этой системы.

Приводятся результаты наблюдений SBS 0335–052 E,W на VLA и карта HI плотности и обсуждаются ее особенности. Описано отождествление западного HI пика плотности в SBS 0335–052 со слабой галактикой и получение ее первого спектра, который подтвердил что в этой системе имеются 2 карликовых галактики с очень низкой металличностью, расположенных в одном HI облаке, на взаимном расстоянии ~ 22 кпк в проекции на небесной сфере. На сегодня W компонент этой системы – самая низкометалличная из богатых газом галактик (Lipovetsky et al 1999, Izotov et al. 2009).

Далее описаны результаты многоцветной *UBVRI* и $H\alpha$ фотометрии этой системы на БТА и анализа полученных данных - сравнение с эволюционными треками пакета PEGASE2. Главный вывод этого анализа - цвета областей, свободных от небулярной эмиссии, соответствуют возрастам звезд не более 0.5 млрд лет. Затем приводятся результаты наблюдений SBS 0335-052 на GMRT. Карты плотности и скорости HI с более высокой чувствительностью и высоким разрешением по скорости, полученных на индийском радиотелескопе, показывает детали, характерные для потоков газа в процессе слияния галактик. Распределение пиков плотности HI сравнивается с областями ЗО, с тем, чтобы проверить, насколько в самых низкометаллических объектах может повышаться пороговая плотность. Кроме того, показаны результаты наблюдений движений ионизованного газа в линии $H\alpha$ с ИФП на БТА, которые демонстрируют сложную кинематику, обусловленную приливами и оболочками. Сравнение наблюдаемой картины плотности и скорости HI и ЗО в этой системе с сеткой современных численных моделей, в частности, "Identikit" (Barnes, Hibbard 2008) и "GalMer" (Di Matteo et al. 2008), позволяет оценить параметры столкновения, фазу взаимодействия и момент включения эпизода индуцированного ЗО.

В §4.3 суммированы основные результаты главы по комплексному изучению свойств этой выдающейся системы галактик с рекордно низким содержанием

металлов.

В пятой главе представлены результаты поиска галактик с очень низкой металличностью и результаты комплексного исследования нескольких таких галактик в оптическом и радио (линия $\text{H I } 21 \text{ см}$) диапазонах.

В §5.1 кратко рассмотрен вопрос о том, чем обусловлен интерес к этим редким в местной Вселенной галактикам, похожим на IZw18, и известным уже более 40 лет (Searle & Sargent, 1972), и что нам могут дать и дают их детальное исследование. Основными стимулами являются возможность очень детально изучать процесс ЗO и его обратное влияние на межзвездную среду галактики в условиях очень низкой металличности и большой доли газа, характерных для молодых галактик в ранней Вселенной, на красных смещениях $z \sim 5\text{--}10$. Несмотря на то, что изучение Вселенной в эти эпохи является приоритетным направлением многих больших наземных и космических телескопов, большинство галактик на этих красных смещениях имеют настолько слабые фотонные потоки, что об их детальном исследовании можно будет говорить только с вводом в строй гигантских инструментов следующего поколения. Поэтому изучение свойств их близких аналогов в ближней Вселенной вызывает энтузиазм астрономов.

В §5.2 обоснован метод поиска XMD галактик среди BCG с сильными линиями, приведены спектры и интенсивности линий, а также определенные по ним физические параметры и содержания тяжелых элементов для 10 новых низкометаллических BCG и dIrr, найденных в наших работах. Для части из этих BCG приводятся результаты их более детального изучения: морфология, одномерный срез поля скоростей ионизованного газа по эмиссии в линии $\text{H}\alpha$.

§5.3 посвящен необычной галактике Местного Объемы And IV. С помощью высококачественной спектроскопии на БТА было показано, что эта уникальная, очень богатая газом, LSBG имеет содержание кислорода в 2.5 раза ниже, чем определено в ее первом исследовании Ferguson et al. (2000).

В §5.4 приводятся результаты комплексного изучения необычной BCG HS 0837+4717 с очень большим избытком азота. Даны подробные описания 2-х наборов данных полученных на БТА и ММТ, которые вместе повышают уверенность в реальности необычных свойств этой галактики. В частности, кроме большого избытка N, эта галактика показывает широкие компоненты сильных эмиссионных линий с необычным отношением потоков, широкие детали WR. Кинематика ионизованного газа и морфология внешних частей указывают на сильные возмущения и на вероятное слияние.

В §5.5 приведены результаты изучения структуры и кинематики нейтрального водорода в пяти XMD BCG с помощью индийского синтезирующего р/т GMRT. Приведены и обсуждены карты распределения HI для XMD галактик из нашей программы. Карты HI позволяют увидеть сложную морфологию и в распределении плотности нейтрального газа и его поля скоростей, которые с большой вероятностью указывают на важную роль взаимодействий в изученных системах. Наиболее важные результаты анализа этих карт - приливные взаимодействия и слияния - один из главных каналов включения вспышек ЗО в XMD BCGs. Обсуждается вероятность значительного понижения металличности в области текущей вспышки ЗО за счет натекания при взаимодействиях в центральную часть галактик низкометаллического газа с периферии, как предложено в работе Eka, Chengaralur (2010).

В §5.6 приводятся и обсуждаются результаты изучения морфологии и поля скоростей ионизованного газа с помощью ИФП для семи BCG с очень низкой металличностью, которые также указывают на большую роль взаимодействий. Практически все галактики этой подвыборки показывают ясные следы взаимодействий или мерджинга, расширяя выборку XMD галактик с такими признаками.

В §5.7 суммированы основные результаты поиска и комплексного изучения свойств галактик с очень низкой металличностью, их приложения и перспективы более глубокого понимания феномена очень низкой металличности BCG и выводы этой главы.

В шестой главе В §6.1, основываясь на эмпирических данных изучения BCG с наименьшими металличностями, на результатах модельных расчетов и теоретических идеях о возможности замедленной эволюции карликовых галактик в пустотах, обоснована необходимость изучения эволюционного статуса галактик, попадающих внутрь войдов.

В §6.2 открыт и детально описан один из ближайших войдов, расположенный в области неба Lynx-Cancer ($D \sim 18$ Мпк, $R \gtrsim 8$ Мпк). По литературе, базам данных NED, HyperLEDA, и SDSS, а также частично по нашим собственным наблюдениям, создана самая большая и глубокая выборка галактик в индивидуальном войде – 79 галактик с M_B до -12 зв.величины. Описаны свойства выборки, построена нескорректированная функция светимости и проанализированы эффекты наблюдательной селекции, которые приводят к значительной потере галактик с абсолютными величинами M_B слабее -14.

§6.3 посвящен изучению металличности 48 галактик из этой выборки

и сравнению их по параметру O/H с галактиками из более плотного окружения. Для 22-х галактик содержание кислорода O/H в областях $H\text{II}$ (которое является аналогом металличности), получено из анализа спектров по собственным наблюдениям на БТА. Для большинства остальных O/H оценено из анализа спектров галактик войда, имеющихся в базе данных SDSS, и для меньшей части - по данным из литературы. Сопоставление свойств галактик в войде и их аналогов из более плотного окружения на диаграмме " $\log(O/H)$ - абсолютная величина M_B " (типа предложенной Skillman et al. 1989), приводит к выводу о систематически пониженной металличности карликов в войде (в среднем на $\sim 30\%$), и наличии в войде значимой доли (10–15 %) галактик с наименьшими известными металличностями и уклоняющимися в разы в область более низких значений O/H от стандартного O/H для данной светимости M_B .

В §6.3 кратко суммированы результаты работы по созданию большой выборки галактик в одном из близких войдов Lynx-Cancer, а также результаты изучению их свойств, и сформулированы полученные в этой главе выводы.

В седьмой главе представлены результаты комплексного изучения свойств 6-ти необычных карликовых галактик низкой поверхностной яркости (LSBD), представляющих небольшую, но значимую долю населения войда.

§7.1 посвящен результатам комплексного изучения галактики DDO 68 - аналога SBS 0335–052E,W по металличности, массе и стимулированному эпизоду $3O$, но находящемуся на границе Местного Объема, в 5.3 раз ближе, чем SBS 0335–052E,W. Для галактики DDO 68 анализ распределения и кинематики $H\text{I}$ подтверждает, что особенности оптической морфологии (в том числе большой хвост на южном краю) связаны с процессом почти законченного слияния. Анализ цветов тела галактики, в областях, где отсутствуют следы небулярной эмиссии, приводит к оценке возрастов самых старых видимых звезд не более 1 млрд лет, что согласуется с оценкой времени индуцированного эпизода $3O$ вследствие слияния богатых газом карликов. В процессе более подробного спектроскопического изучения DDO 68 в январе 2008 г. была впервые найдена LBV звезда в галактике на расстоянии ~ 10 Мпк, образовавшаяся из газа с рекордно-низкой металличностью $Z_{\odot}/36$, которая в десятки раз ниже, чем у LBV нашей Галактики и в несколько раз ниже, чем у LBV звезд, найденных в наиболее низко-металлическом окружении в галактиках SMC и PHL398B (Izotov & Thuan 2009).

В §7.2 описано открытие и комплексное исследование необычной LSBD галактики войда J0926+3343, приведены результаты спектральных наблюдений ее H II-областей и оценки физических условий и содержания кислорода O/H. А также фотометрии, цветов внешних областей, изучения в линии H I (NRT и GMRT) с указанием на возмущение неизвестным агентом.

В §7.3 описано изучение других необычных XMD LSBD в войде Lynx-Cancer. Описано определение их очень низких величин O/H, результаты наблюдений подвыборки необычных LSBDs в линии H I с помощью r/t NRT. Определение фотометрических параметров и цветов периферии и возрастов звезд получено по изображениям высокого качества, взятым из Слоуновского цифрового обзора неба (SDSS, York 2000). Кроме того, для 2-х галактик обнаружены слабые спутники на расстояниях 12 кпк. Большинство из этих LSBDs имеют высокое отношение $M(\text{H I})/L_B$ (от 2 до 3.2).

В §7.4 рассказано об открытии вблизи центра этого войда необычного карликового триплета с отношением $M(\text{H I})/L_B \sim 10$ и 25, что является рекордно-высокой величиной, указывающей на необычное состояние этих галактик. Комбинируя данные по их $M(\text{H I})$ и массе газа (с включением доли гелия) с данными по массе звезд (оцененной в следующей секции) мы получаем для этих LSBD галактик массовую долю газа до 99.7%. Вместе с данными о необычно низкой металличности нескольких подобных галактик это указывает на их эволюционную молодость. Остается дилеммой, образовались ли эти необычные объекты недавно, или по неизвестной пока причине, они давно формируют звезды, но в таком низком темпе, что их суммарное излучение, в отличие от подавляющего большинства других галактик, пока не обнаружено.

В §7.5 подводятся итог этому разделу и формулируются выводы, один из наиболее важных состоит в том, что войды обеспечивают специфические условия, в которых значимая часть их населения оказывается эволюционно-молодыми. Обнаружение в этом достаточно скромном по размерам войде 6-ти галактик с предельно низкими металличностями ($12 + \log(\text{O}/\text{H}) \lesssim 7.30$) явно не укладывается в случайное отклонение. Более того, большинство этих галактик оказываются необычно голубыми на периферии, с существенным преобладанием достаточно молодого звездного населения и очень богатыми газом. Сами эти редкие галактики являются хорошими лабораториями для изучения эволюции и ЗО в галактиках с очень низким содержанием металлов. Они изучаются более детально для лучшего понимания их эволюционного статуса. В то же время, сама концентрация эволюционно-

молодых галактик в близком войде является важным наблюдательным фактом, который указывает на специфическое влияние окружения типа войдов на темп химической эволюции и/или начало ЗО в галактиках.

В Заключении в первой части суммированы основные результаты, представленные в Диссертации, а также очерчена роль новых данных и идей в понимании феномена ВСГ, а также связи эволюции маломассивных галактик с их окружением. Во второй части кратко намечены нерешенные вопросы и ожидаемый прогресс в понимании физики и эволюции маломассивных галактик с активным звездообразованием.

2 Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность сотрудникам бывшей лаборатории "Структура" САО РАН Алексею Князеву, Андрею Угрюмову и Александру Прамскому, с которыми получена большая часть результатов совместных исследований по поиску и детальному изучению ВСГ, проведенных в САО за последние 20 лет. Их энергия, активный интерес, профессионализм и доброжелательная критика были важным стимулом совместной работы. Несколько работ последних лет выполнены в САО в соавторстве с Алексеем Моисеевым, Ариной Тепляковой и Александром Буренковым, а также с проф. Анатолием Засовым, которым автор также очень благодарен за тесное и плодотворное сотрудничество. Автор очень признателен за многолетнее сотрудничество Юрию Изотову и Наталии Гусевой, которые всегда щедро делились своим опытом и знаниями и были доброжелательными неформальными рецензентами многих наших статей. Большая часть результатов, представленных в диссертации, получена по наблюдениям на нескольких зарубежных инструментах. Пользуюсь случаем, чтобы выразить благодарность за плодотворное сотрудничество соавторам обзоров HSS Дитеру Энгельсу и Хансу-Юргену Хагену, а также Ульриху Хоппу, Ноаху Брошу, Хосефе Масегосе, Изабель Маркес и Ричарду Грину. Исследование ВСГ и карликовых галактик в линии H α проведено при активном участии Жан-Мишеля Мартена и Джаярама Ченгалура, а также Экты, Элиаса Бринкса и Трин Туана. Всем им автор выражает большую благодарность за плодотворное сотрудничество и науку. Исследования, представленные в диссертации, были неоднократно поддержаны грантами РФФИ (No. 96-02-16398, 97-02-16755, 06-02-16617, 10-02-92650-ИНД, 10-02-00261), и в рамках государственных

программ "Астрономия" и "Нестационарные явления в астрономии", а также несколькими международными грантами (ИНТАС No.94-2285, 96-0500, 97-0033). Комитет по тематике больших телескопов много раз выделял время на БТА для программ, значительная часть результатов которых вошла в эту работу. Без самоотверженной работы многих сотрудников САО, обеспечивших поддержание БТА в рабочем состоянии, улучшение его управления, развитие новых систем наблюдений, планировать и надеяться на успех этих исследований в САО было бы не возможно. Всем причастным хочется выразить свою искреннюю признательность. То же справедливо в отношении комитетов радиотелескопа NRT в Нансэ (Франция) и синтезирующего радиотелескопа GMRT (Индия). Всем им автор выражает признательность. Без такой поддержки большая часть данных и результатов не была бы получена. Особую благодарность автор выражает своей жене Наталье Пустильник за огромное долготерпение и постоянную поддержку во время работы над диссертацией, а также своим родителям – за горячее и постоянное желание увидеть эту работу завершённой еще при их жизни.

В заключение, с огромной благодарностью и признательностью я хотел бы отметить большую роль безвременно ушедшего в 1996 г. Валентина Липовецкого, который был основателем этого направления в САО, инициатором и увлеченным, активным участником многих новых исследований VCG в оптическом, радио и ИК диапазонах, в том числе и главным инициатором проекта "Обзор Гамбург-САО". Валентин оказал решающее влияние на мой приход и последующую работу в этой области. И хотя при его жизни у нас было только несколько совместных работ по тематике исследования VCG, ряд его инициатив и идей нашли воплощение в наших работах уже после его ухода. А само направление, несмотря на проблемы, достаточно успешно развивалось в САО. Я с благодарностью посвящаю эту работу его памяти.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

Публикации в рецензируемых журналах:

1. Pustilnik S.A., Ugryumov A.V., Lipovetsky V.A., Thuan T.X., Guseva N.G., Spatial Distribution of Blue Compact Galaxies in the Second Byurakan Survey. 1995, ApJ, 443, 499-513

2. Lindner U., Einasto M., Einasto J., Freudling W., Fricke K., Lipovetsky V., Pustilnik S., Izotov Y., Richter G., The Structure of Supervoids - II. The Distribution of Galaxies in Voids, 1996, A&A, 314, 1-12
3. Lindner U., Einasto M., Einasto J., Freudling W., Fricke K., Lipovetskij V., Pustilnik S., Izotov Y., Richter G., The concept of void hierarchy and the distribution of galaxies in voids. 1997, Astrophys. Lett. Commun., 36, 41-46
4. Pustilnik S.A., Lipovetsky V.A., Izotov Y.I., Brinks E., Thuan T.X., Kniazev A.Y., Neizvestny S.I., Ugryumov A.V., Detection of a second optical component in HI-cloud of the young dwarf galaxy SBS 0335-052: new data on observations with 6-m telescope, 1997, Astronomy Letters, 23, 308-311
5. Ugryumov A.V., Pustilnik S.A., Lipovetsky V.A., Izotov Y.I., Richter G., 1997, Spectral survey of Case emission line galaxies with 6-m Russian telescope, A&AS, 131, 285
6. Kniazev A.Y., Pustilnik S.A., Ugryumov A.V., New nearby very metal-deficient blue compact galaxies, 1998, Bulletin SAO, 46, 23-27
7. Ugryumov A.V., Engels D., Lipovetsky V.A., Hagen H.-J., Hopp U., Pustilnik S.A., Kniazev A.Y., Richter G., Izotov Y.I., Popescu C.C., 1999, The Hamburg/SAO Survey for Emission-Line Galaxies. I. A First List of 70 Galaxies, A&AS, 135, 511-529
8. Pustilnik S.A., Engels D., Ugryumov A.V., Lipovetsky V.A., Hagen H.-J., Kniazev A.Yu., Izotov Yu.I., Richter G., The Hamburg/SAO Survey for Emission-Line Galaxies. II. The Second List of 128 Galaxies, 1999, A&AS, 137, 299-304
9. Thuan T.X., Lipovetsky V.A., Martin J.-M., Pustilnik S.A., HI-observations of Blue Compact Galaxies from the First and Second Byurakan Surveys, 1999, A&AS, 139, 1-24
10. Hopp U., Engels D., R.Green, Ugryumov A.V., Izotov Yu.I., Hagen H.-J., Kniazev A.Y., Lipovetsky V.A., Pustilnik S.A., Brosch N., Martin J.-M., Masegosa J., Marquez I., The Hamburg/SAO Survey for Emission-Line Galaxies. III. The Third List of 81 Galaxies, 2000, A&AS, 142, 417-424

11. Kniazev A.Y., Pustilnik S.A., Ugryumov A.V., Kniazeva T.F., The 6-m telescope spectroscopy of candidate low-metallicity galaxies, *Astronomy Letters (Pis'ma v A.Zh.)*, 2000, 26, 163-179 (in English).
12. Kniazev A. Y., Pustilnik S. A., Masegosa J., et al., HS 0822+3542 - a new nearby extremely metal-poor galaxy, 2000, *A&A*, 357, 101
13. Pustilnik S.A., Brinks E., Thuan T.X., Lipovetsky V.A., Izotov Y.I., HI Line VLA Observations of Extremely Metal-poor Blue Compact Dwarf Galaxy SBS 0335-052, 2001, *AJ*, 121, 1413-1424
14. Pustilnik S.A., Kniazev A.Y., Lipovetsky V.A., Ugryumov A.V., Environment status of Blue Compact Galaxies and trigger of star formation, 2001, *A&A*, 373, 24-37
15. Kniazev A.Y., Engels D., Pustilnik S.A., Ugryumov A.V., Kniazeva T.F., Pramsky A.G., Brosch N., Hagen H.-J., Hopp U., Izotov Yu.I., Lipovetsky V.A., Masegosa J., Marquez I., Martin J.-M., The Hamburg/SAO Survey for Emission-Line Galaxies. IV. The Fourth List of 119 Galaxies, *A&A*, 2001, 366, 771-787
16. Ugryumov A.V., Engels D., Kniazev A.Y., Green R.F., Izotov Y.I., Hopp U., Pustilnik S.A., Pramsky A.G., Kniazeva T.F., Brosch N., Hagen H.-J., Lipovetsky V.A., Masegosa J., Marquez I., Martin J.-M., The Hamburg/SAO Survey for Emission-Line Galaxies. V. The Fifth List of 161 Galaxies, 2001, *A&A*, 374, 907-913
17. Pustilnik S.A., Martin J.-M., Huchtmeier W., Brosch N., Lipovetsky V., Richter G., Study of galaxies in voids. I. HI observations of Blue Compact Galaxies, 2002, *A&A*, 389, 405-418
18. Pustilnik S.A., Kniazev A.Y., Masegosa J., Marquez I., Pramsky A.G., Ugryumov A.V., The metallicities of UM 151, UM 408 and A 1228+12 revisited, 2002, *A&A*, 389, 779-786
19. Ugryumov A.V., Engels D., Pustilnik S.A., Kniazev A.Y., Pramsky A.G., Hagen H.-J., The Hamburg/SAO Survey for low metallicity blue compact/HII galaxies (HSS-LM). I. The first list of 45 strong-line galaxies, 2003, *A&A*, 397, 463-472

20. Pustilnik S.A., Kniazev A.Y., Pramsky A.G., Ugryumov A.V., Masegosa J., Starburst in HS 0822+3542 induced by the very blue LSB dwarf SAO 0822+3545 2003, *A&A*, 409, 917-932
21. Pustilnik S., Kniazev A., Pramskij A., Izotov Y., Foltz C., Brosch N., Martin J.-M., Ugryumov A., HS 0837+4717 – a metal-deficient blue compact galaxy with large nitrogen excess, 2004, *A&A*, 419, 469-484
22. Pustilnik S., Kniazev A., Pramskij A., SBS 0335–052 E and W: implications of new broad-band and H α photometry, 2004, *A&A*, 425, 51-65
23. Pustilnik S.A., Engels D., Masegosa J., Lipovetsky, V., Chaffee, F., Izotov, Y., Kniazev A.Y., Pramskij A.G., Ugryumov A.V., et al., Hamburg/SAO Survey for emission-line galaxies. VI. Sixth List of 126 galaxies, 2005, *A&A*, 442, 109-116
24. Pustilnik S.A., Kniazev A.Y., Pramskij A.G., Study DDO 68: nearest candidate for a young galaxy? 2005, *A&A*, 443, 91-102
25. Pustilnik S.A., Engels D., Kniazev A.Y., Pramskij A.G., Ugryumov A.V., Hagen H.-J., HS 2134+0400 - new very metal-poor galaxy, a representative of void population? 2006, *PAZh*, 32, 257 = *Astron.Lett.* 32, 228
26. Ekta, Chengalur J., Pustilnik S.A., HI studies of XMD galaxies. II. GMRT observations of SBS 1129+576, 2006, *MNRAS*, 372, 853
27. Chengalur J., Pustilnik S.A., Martin J.-M., Kniazev A.Y., HI studies of XMD galaxies. III. GMRT observations of BCG HS 0822+3542, 2006, *MNRAS*, 371, 1849
28. Pustilnik S.A., Martin J.-M., HI study of extremely metal-deficient dwarf galaxies. I. The Nançay Radio Telescope observations of twenty-two objects, 2007, *A&A*, 464, 859-869
29. Pustilnik S.A., Tepliakova A.L., Kniazev A.Y., Burenkov A.N., Discovery of a Massive Variable Star with $Z=Z_{\odot}/36$ in the Galaxy DDO 68, 2008, *MNRAS*, 388, L24-L28
30. Pustilnik S.A., Tepliakova A.L., Kniazev A.Y., Study of the Galaxy DDO 68: New Evidence for its Youth, 2008, *PAZh*, 34, 503-515 (*Astr.Letters*, 34, 457-467)

31. Pustilnik S.A., Tepliakova A.L., Kniazev A.Y., Burenkov A.N., Andromeda IV: a New Local Volume Very Metal-Poor Galaxy 2008, *Astrophys. Bulletin*, vol.63, No.2, pp.102-111
32. Ekta, Chengalur J., Pustilnik S.A., HI and Star Formation in the most metal-deficient galaxies, 2008, *MNRAS*, 391, 881-890.
33. Ekta B., Pustilnik S.A., Chengalur J.N., HI in very metal-poor galaxies: the SBS 0335–052 system, 2009, *MNRAS*, 397, 963-970
34. Pustilnik S.A., Tepliakova A.L., Kniazev A.Y., Martin J.-M., Burenkov A.N., SDSS J092609.45+334304.1: a nearby unevolved galaxy, 2010, *MNRAS*, 401, 333-341
35. Moiseev A.V., Pustilnik S.A., Kniazev A.Y., Very metal-poor galaxies: ionized gas kinematics in nine objects, 2010, *MNRAS*, 405, 2453
36. Pustilnik S.A., Tepliakova A.L., Study of galaxies in the Lynx-Cancer void. I. Sample Description, *MNRAS*, 2011, 415, 1188-1201
37. Pustilnik S.A., Tepliakova A.L., Kniazev A.Y., Study of galaxies in the Lynx-Cancer void. II. The element abundances, 2011, *Astrophys. Bulletin*, v. 66, No.3, 255-292
38. Pustilnik S.A., Tepliakova A.L., Martin J.-M., Kniazev A.Y., Study of galaxies in the Lynx-Cancer void. III. New extreme LSB dwarf galaxies, 2011, *MNRAS*, 417, 1335-1349
39. Chengalur J., Pustilnik S.A., Discovery of an extremely gas-rich dwarf triplet near the centre of the Lynx-Cancer void, 2013, *MNRAS*, 428, 1579-1586

Публикации в других изданиях:

1. Thuan T.X., Izotov Y.I., Lipovetsky V.A., Pustilnik S.A., Studies of a New Sample of Low-Metallicity Blue Compact Galaxies, 1994, *Proc. of ESO/OHP Workshop “Dwarf Galaxies”*, 421-432
2. Pustilnik S.A., Ugryumov A.V., Lipovetsky V.A., Spatial Distribution of Blue Compact Galaxies and Galaxy Formation Models, 1994, in: *Ya. Zel’dovich Memorial Conference, Moscow, Astron. Astrophys. Transactions*, 1994, 5, 135-140

3. Pustilnik S., Chaffee F., Foltz C., Izotov Yu., Kniazev A., Lipovetsky V., A Primeval Galaxy Just Round the Corner: Its Properties and Possible Cosmological Implications, 1998, Gravitation and Cosmology, v.4, Suppl., p.127-131
4. Pustilnik S.A., Kniazev A.Y., Lipovetsky V.A., Ugryumov A.V., The role of external trigger for SF in blue compact galaxies: implications from statistics of companion galaxies, in Proc. of Euroconference "The evolution of galaxies I. Observational clues", May 23-27, 2000, Granada, Spain, Eds. G.Stasinska, J.Vilchez & E.Perez 2001, Astrophysics and Space Sciences Supplement, 277, 445-449
5. Ugryumov A., Pustilnik S., Kniazev A.Y., Lipovetsky V., Engels D., Hagen H.-J., Brosch N., Hopp U., Izotov Y., Martin J.-M., Masegosa J., Marquez I., Pramsky A., The Hamburg/SAO Survey for emission-line galaxies: overview and preliminary results, 2001, in ASP Conf. Series, v.232, 205-207, "The New Era of Wide-Field Astronomy", August 21-24, 2000, Preston, UK, Eds. R.Clowes, A.Adamson & G.Bromage
6. Pustilnik S., Kniazev A., Ugryumov A., Pramskij A., Search for and study of extremely metal-deficient galaxies, in: The proceedings of Euroconference "The evolution of galaxies. III. From simple approaches to self-consistent models" Kiel, Germany, July 2002, Astrophysics and Space Science, 2003, 284, 795-798
7. Прамский А., Пустильник С., Князев А., Угрюмов А., Исследование 3-х новых галактик с экстремальным дефицитом металлов, Preprint SAO No. 189 (2003), 25 pp.
8. Kniazev A., Pustilnik S., ELTs and the study of individual, massive stars typical of "primordial" galaxies, in: Proc. of IAU Symposium 232 "The Scientific Requirements for Extremely Large Telescopes", Held in Cape Town, South Africa, November 14-18, 2005, Eds. P.A. Whitelock; M.Dennefeld; B. Leibundgut. Cambridge: Cambridge University Press, 2006, 306-307
9. Pustilnik S.A., Kniazev A.Y., Retarded Evolution of Low-Mass Galaxies in Voids? in: Galaxy Evolution Across the Hubble Time, Edited by F. Combes and J. Palous, Proceedings of the IAU Symposium 235, held 14-17 August, 2006 in Prague, Czech Republic. Cambridge: Cambridge University Press, 2007, 238

10. Pustilnik S.A., Ekta, Kniazev A.Y., Chengalur J.N., Vanzi L., Interaction/merger-induced starbursts in local very metal-poor dwarfs: link to the common SF in high-z young galaxies, in: Triggered Star Formation in a Turbulent ISM, Edited by B. G. Elmegreen and J. Palous. Proceedings of the IAU Symposium 237, held 14-18 August, 2006 in Prague, Czech Republic. Cambridge: Cambridge University Press, 2007, 466
11. Pustilnik S.A., Dark Galaxies and Local Very Metal-Poor Gas-Rich Galaxies: Possible Interrelations, in: Proc. of IAU Symposium 244 "Dark Galaxies and Lost Baryons" , held in Cardiff, UK, June 21-25, 2007, Eds. J.Davies and M.Disney. Cambridge: Cambridge University Press, 2007, 341-345
12. Kniazev A.Y., Pustilnik S.A., Tepliakova A.L., Burenkov A.N., Metallicities of galaxies in the nearby Lynx-Cancer void, in: Proc. JENAM-2010 Symposium 2 "Environment and the Formation of Galaxies: 30 years later" , held in Lisbon, Portugal, September 6-7, 2010, Ap.Spa.Sci. Proceedings, 2011, Springer-Verlag, Eds. I. Ferreras, A. Pascuali, pp.25-27

Список литературы

- Asplund M., Grevesse N., Sauval A.J., Allende Prieto C., & Kiselman D., 2004, *A&A*, 417, 751
- Barnes J.E., Hibbard J.E., 2009, *AJ*, 137, 3071
- Ekta B., Chengalur J.N., 2010, *MNRAS*, 406, 1238
- Di Matteo P., Bournaud F., Martig M., Combes F., Melchior A.-L., Semelin B., 2008, *A&A*, 492, 31
- Ferguson A., Gallagher J., Wyse R., 2000, *AJ*, 120, 821
- Fioc M., & Rocca-Volmerange B. 1999, *astro-ph/9912179*
- Gottlöber S., Lokas E., Klypin A., Hoffman Y., 2003, *MNRAS*, 344, 715
- Hoeft M., Gottlöber S., 2010, *Advances in Astronomy*, v.2010, Article ID 693968, 16 pp.
- Icke V., 1985, *A&A*, 144, 115
- Izotov Y.I., Guseva N.G., Fricke K.J., Papaderos P., 2009, *A&A*, 503, 61
- Izotov Y.I., & Thuan T.X., 2009, *ApJ*, 690, 1797
- Lipovetsky V.A., Chaffee F.H., Izotov Y.I., et al. 1999, *ApJ*, 519, 177
- Papaderos P., Östlin G., 2012, *A&A*, 537A.126
- Pildis R., Schombert J., Eder J.A., 1997, *ApJ*, 481, 157
- Pustilnik S.A., Ugryumov A.V., Lipovetsky V.A., Thuan T.X., Guseva N.G., 1995, *ApJ*, 443, 499-513

- Pustilnik S.A., Martin J.-M., Huchtmeier W., Brosch N., Lipovetsky V., Richter G., 2002, A&A, 389, 405-418
- Salzer J.J., 1989a, ApJ, 347, 152
- Searle L., & Sargent W.L.W., 1972, ApJ, 173, 25
- Skillman E., Kennicutt R., & Hodge P., 1989, ApJ, 347, 875
- Taylor C.L., Brinks E., Grashuis R.M., & Skillman E.D., 1995, ApJS, 99, 427
- Thuan T.X., Lipovetsky V.A., Martin J.-M., Pustilnik S.A., 1999, A&A Supplement Ser., 139, 1
- York D.G., Adelman J., Anderson J.E., et al., 2000, AJ, 120, 1579

Бесплатно

Семен Аронович Пустильник

Поиск и исследование необычных маломассивных галактик

Зак. № ???с Уч. изд. л. – 2.0 Тираж 100
Специальная астрофизическая обсерватория РАН