

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

Специальность 01.03.02 —
«Астрофизика и звёздная астрономия»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук Пустильник С.А.

Нижний Архыз – 2017

Оглавление

Введение	5
1 Выборка галактик. Фотометрические и спектральные данные. Методические вопросы	22
1.1 Выборки галактик в войдах Lynx-Cancer и Eridanus. Краткое описание	22
1.2 Использование обзора SDSS в исследовании галактик войдов	26
1.2.1 Работа со спектрами базы данных SDSS	26
1.2.2 Широкополосная фотометрия изображений базы данных SDSS	27
1.3 Наблюдения на БТА со SCORPIO	30
1.3.1 Методика обработки полученных спектров	30
1.4 Методы определения относительного содержания кислорода	31
1.4.1 Прямой T_e метод	32
1.4.2 Полуэмпирический метод Изотова и Туана (2007)	33
1.4.3 Эмпирические оценки O/H по формулам Пилюгина и Туана (2005), Ина и др. (2007)	35
1.4.4 Эмпирические методы с включением линии [NII] λ 6584	38
1.4.5 Использование линий [OII] λ 7320,7330	38
1.5 Определение возрастов старого звездного населения	39
1.6 Включение данных HI для определения массовой доли газа	41
2 Новые оценки металличности для галактик войда Lynx-Cancer	42
2.1 Введение и цели	42
2.2 Оценки содержания O/H для галактик выборки	43
2.2.1 Комментарии для некоторых галактик	46
2.2.2 Оценки O/H из литературы	48

ОГЛАВЛЕНИЕ	3
2.3 Обсуждение результатов	52
2.3.1 Контрольная выборка и ее соотношение “O/H – M_B ”	52
2.3.2 Соотношение “O/H – M_B ” для галактик войда Lynx-Cancer	53
2.3.3 Сравнение с другими результатами	56
2.3.4 Влияние точности расстояний на полученные выводы	57
2.4 Выводы	58
3 Фотометрия выборки карликовых галактик войда Lynx-Cancer	60
3.1 Введение и цели	60
3.2 Результаты и их анализ	61
3.2.1 Распределения параметров	62
3.2.2 Соотношения между параметрами галактик войда	67
3.2.3 Двухцветные диаграммы, эволюционные треки и оценки возрастов	75
3.3 Необычные галактики войда	77
3.4 Выводы	80
4 Комплексное исследование нескольких необычных галактик войдов	82
4.1 Изолированная галактика UGC 4722 войда Lynx-Cancer	82
4.1.1 Введение	82
4.1.2 Спектроскопия на БТА	83
4.1.3 Содержание кислорода	84
4.1.4 Кинематика ионизованного газа в линии H α по результатам длиннощелевых спектров	85
4.1.5 Фотометрические свойства	88
4.1.6 Особенности шлейфа	89
4.1.7 Обсуждение результатов	90
4.1.8 Сравнение с подобными системами	92
4.2 Самая богатая газом галактика войда J0723+3624: подтверждение природы оптического компонента	93
4.3 Свойства двух очень низкометаллических LSB карликов войда Eridanus	95
4.3.1 Введение	95
4.3.2 HI наблюдения и результаты	95
4.3.3 Фотометрические свойства и оценки возрастов	97

4.3.4	Сравнение с типичными LSB карликами	100
4.4	Выводы	103
5	Исследование переменности LBV в DDO 68, галактике войда с экстремально низкой металличностью	105
5.1	Введение	105
5.2	Наблюдения и данные из архивов	109
5.2.1	БТА данные	109
5.2.2	<i>HST</i> данные	110
5.2.3	SDSS данные	110
5.3	Кривая блеска LBV	111
5.3.1	Оценки вклада от подстилающей НП области по данным <i>HST</i> и БТА .	111
5.3.2	БТА фотометрия и метод восстановления блеска LBV	111
5.3.3	Оценки, полученные по SDSS	114
5.3.4	Переменность LBV в DDO 68	114
5.4	Спектры LBV	118
5.5	Обсуждение результатов	121
5.5.1	Сравнение спектральной переменности LBV в DDO 68 с другими LBV	123
5.6	Выводы	123
	Заключение	125
	Литература	130
	Приложение А	148

Введение

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 значимо 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 DM 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 ярко-

сти (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_B 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 ин-

тегральных 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 HI.

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 их 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 BTA и SDSS получены новые оценки содержания кислорода для 30-ти галактик в войде Lynx-Cancer. Открыты 5 новых, очень низкометаллических, галактик, для которых $12+\log(O/H)$ 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 HII 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 $12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 7.38$ ($Z \lesssim Z_\odot/20$). 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 Lync-Cancer и Eridanus. Рассматриваются выборки галактик в данных войдах и критерии отбора объектов в эти выборки. В разделе 1.2 речь идет о применении дан-

ных 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 $[\text{OII}]\lambda 3727$ и $[\text{OIII}]\lambda 4959, 5007$, отнесенных к интенсивности $\text{H}\beta$. 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 $[\text{NII}]\lambda 6584$ [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 HI , взятых из литературы, для определения массовой доли газа.

Во второй главе приведены результаты определения содержания кислорода O/H для 39 из 60 галактик войда Lync-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 САО 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 га-

лактик войда. Для некоторых галактик при получении оценок металличности потребовался отдельный подход. В частности, для карликовой LSB галактики ККН 38, во время наблюдений на БТА, в щель попали сразу 4 отдельные НИ 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 “ $\log(O/H)-M_B$ ” 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 “ $\log(O/H)-M_B$ ” 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 соот-

ветствующие 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 Lutz-Saenger 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 Lutz-Saenger. 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 $T_0/2 \sim 7$ Gyr, а для 7-ми из них $T_{SF} \lesssim 3.5$ 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 α получен параметр $\mathfrak{M}(H\alpha)/L_B$ и оценка массовой доли газа. Небольшая подгруппа наиболее богатых газом галактик войда ($\sim 10\%$), с величиной $\mathfrak{M}(H\alpha)/L_B \gtrsim 2.5$, 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 $\mathfrak{M}(H\alpha)/L_B$, 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 HI 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 $\mathfrak{M}(\text{HI})/L_B$, 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 БТА 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 H β компонента SDSS J0723+3624 в очень богатом газом триplete J0723+36 (согласно, [36]). Таким образом, этот голубой диффузный 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 HII 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 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.

Глава 1

Выборка галактик. Фотометрические и спектральные данные. Методические вопросы

1.1 Выборки галактик в войдах Lynx-Cancer и Eridanus. Краткое описание

Войд Lynx-Cancer был открыт в результате исследования очень низкометаллической голубой компактной галактики (BCG) HS 0822+3542¹ (Князев и др. (2000) [56]) и её спутника – карликовой галактики низкой поверхностной яркости (LSB) SAO 0822+3545. В работе Пустильника и др. (2003) [57] обнаружено, что эта пара находится в сильно разреженном окружении. Этот результат стал основанием для более тщательного анализа распределения галактик в этом объеме, который выявил один из самых близких войдов, сходных с теми, что описаны в работе Фэйрэлла и др. (1998) [58]. Южная часть войда Lynx-Cancer примыкает к войду Monoceros, и они вместе, возможно, представляют части еще более крупного “пустого” объема на отрицательных SGZ².

Эта довольно большая область низкой плотности вещества также хорошо просматривается на сглаженных 3D представлениях космографии Местной Вселенной [59]. Для исследования войда Lynx-Cancer важно учитывать большую отрицательную пекулярную скорость в этой области (~ 300 км с⁻¹), возникающую вследствие движения Местного Листа [60] из-за влияния гигантского Местного Войда [60], хорошо заметного на положительных SGZ.

По сравнению с другими близкими войдами, войд Lynx-Cancer имеет два преимущества: а) основная часть соответствующей области неба покрывается базами данных изображений и

¹Эта галактика — одна из многих подобных галактик, найденных в обзоре эмиссионных галактик Гамбург-CAO [50, 51, 52, 53, 54, 55]

²z – координата декартовой супергалактической системы координат

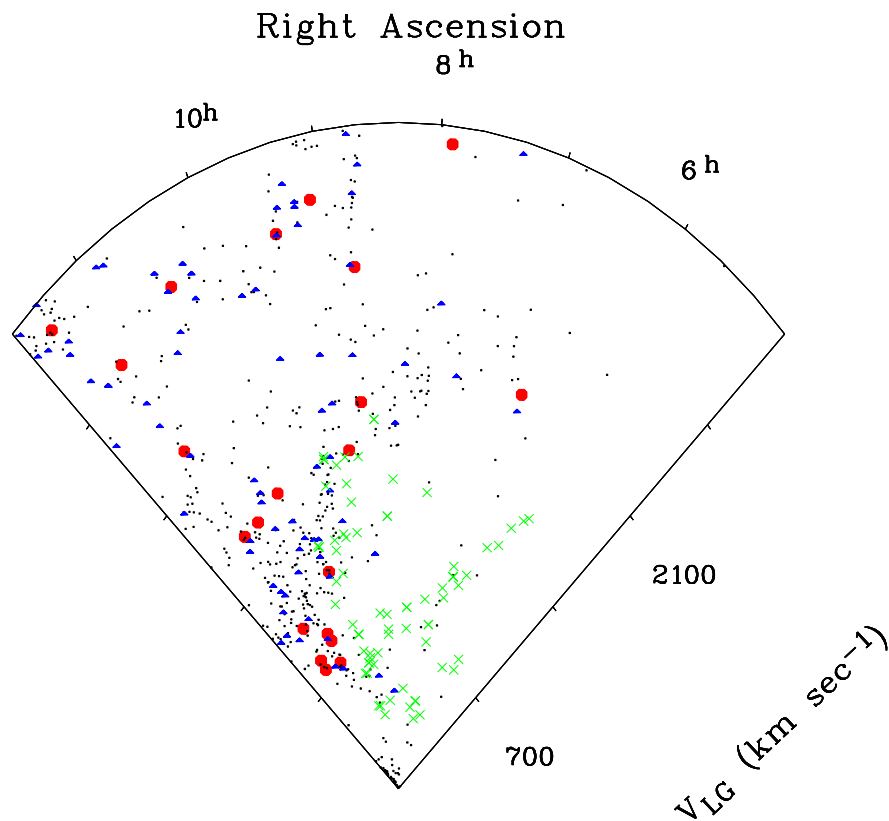
спектров обзора SDSS [61, 62], и b) практически вся область неба в этой области покрывается слепыми высокочувствительными HI обзорами, включая обзор ALFALFA³ на Аресибо⁴.

В этом объеме уже было найдено несколько очень низкометаллических карликовых галактик, включая два объекта с $Z \lesssim 1/30 Z_{\odot}$ (или $12+\log(O/H) \lesssim 7.16$) — DDO 68 и SDSS J0926+3343 [64, 37, 65, 35]. Эти и другие находки дают указание на значимое влияние окружения войда на формирование и эволюцию карликовых галактик. Однако, для того, чтобы изучать эволюционный статус галактик войдов статистически, необходимо более тщательное описание геометрии войда и его границ, это позволит лучше определить выборку карликовых галактик, попадающих внутрь войда, и сравнить их свойства со свойствами таких же галактик в более плотном окружении. Для близкого войда Lунх-Сансер такая выборка представлена в работе Пустильника и Тепляковой (2011) [33].

Первая версия выборки галактик войда включает 75 карликовых галактик ($-11.9 > M_B > -17.9$) и 4 галактики промежуточных светимостей ($M_B \sim -(18.0-18.3)$). Для получения выборки авторы [33] использовали следующий подход. Сначала в два шага отбирались все “изолированные” галактики внутри области войда. На первом шаге, галактики относились к изолированным, если они имели проекционное расстояние до ближайшего яркого ($L > L_*$, где $M_B^* = -19.5$) соседа более 1 Мпк. На втором шаге, для галактик войда с яркими соседями ближе, чем 1 Мпк в проекции, применялся дополнительный критерий, учитывающий разность радиальной скорости у галактики войда и ее ближайшего яркого соседа. Для этого использовались результаты массового исследования Прада и др. (2003) [66] зависимости скорости спутников массивных галактик от расстояния до родительской галактики и ее светимости. Если для рассматриваемой галактики разница скоростей с ближайшими большими галактиками оказывалась выше, чем ожидалось для спутников, она также относилась к изолированным. Далее, для всех галактик внутри войда, считающихся изолированными от массивных (ярких) соседей, применялся более строгий критерий: 3D расстояние до ближайшего яркого соседа должно быть более 2 Мпк. Последнее условие должно гарантировать, что галактики выборки располагаются далеко от так называемого “переходного слоя” на границе войда. В эту зону могут попадать объекты с менее определенными параметрами, в том смысле, что для них мы не можем на 100% гарантировать, что они представляют из себя чистый случай эволюции внутри войда за космологическое время. В итоге была сформирована выборка галактик войда для изучения их эволюционных параметров.

³The Arecibo Legacy Fast ALFA Survey [63]

⁴Обсерватория Аресибо, Пуэрто-Рико



$$0.0^\circ \leq \delta \leq 40.0^\circ$$

Рис. 1.1: Веерная диаграмма для войда Lynx-Cancer в указанном срезе по δ . Нанесены галактики поля: красные кружки – галактики с $M_B < -20$, синие треугольники – галактики с $-20 < M_B < -19$, черные точки – $M_B > -19$. Зеленые крестики – галактики выборки войда Lynx-Cancer.

Для наглядности, на рисунке 1.1 представлена веерная диаграмма для выборки галактик войда Lynx-Cancer для соответствующего среза по δ . В течение последних 5 лет опубликованная выборка галактик в войде Lynx-Cancer была расширена благодаря:

- новым открытиям ALFALFA;
- специальному поиску LSB карликовых галактик в войде, посредством оптической спектроскопии на БТА и HI наблюдений на радиотелескопах Нансе (NRT, Nançay Radio Telescope, Франция)⁵ и Аресибо;
- поиску и открытию спутников для известных объектов войда;
- более тщательному анализу пространственных позиций известных галактик в области неба, в которой расположен войд Lynx-Cancer.

В результате выборка войда увеличилась до 108 галактик. Более полное описание обнов-

⁵<http://www.obs-nancay.fr/nrt>

ленной выборки войда Lynx-Cancer появится в готовящейся статье (Пустильник и др., в подготовке).

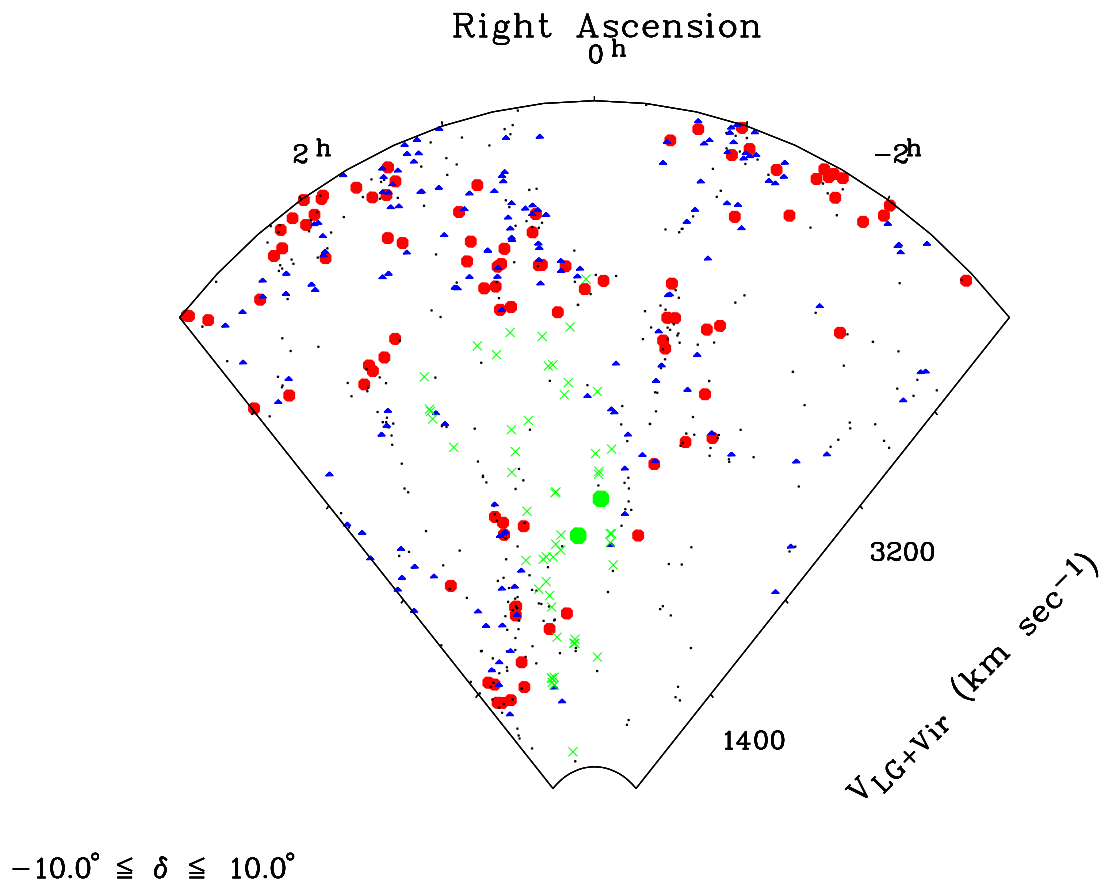


Рис. 1.2: Веерная диаграмма для войда Eridanus в указанном срезе по δ . Нанесены галактики поля: красные кружки – галактики с $M_B < -20$, синие треугольники – галактики с $-20 < M_B < -19$, черные точки – $M_B > -19$. Зеленые крестики – галактики выборки войда Eridanus. Два зеленых кружка – это исследованные в данной работе галактики J0015+0104 и J2354-0005.

Для более крупного войда Eridanus [58] ($RA = \sim 23^h - 02^h$, $V_{hel} \lesssim 4000$ км с⁻¹) на данный момент пока выделена только его экваториальная (Dec. = $-10^\circ \div +10^\circ$) часть (Князев и др., статья направлена в печать). Критерии отбора галактик выборки войда Eridanus аналогичны использованному для войда Lynx-Cancer. Отбирались галактики в пределах заранее установленной области пустоты, которые находятся на расстояниях более 2.0 Мпк от соседних ярких ($L > L^*$) галактик. Очевидно, что последний порог оставляет часть реальных галактик войда Eridanus за пределами созданной выборки. С другой стороны, это направлено на чистоту выборки, так как исключены случаи “чужаков”, принадлежащих к типичным группам вблизи ярких галактик на границах, и галактики неясного происхождения вблизи границ войда, которые могли мигрировать из регионов стен в течение нескольких последних

млрд. лет.

Выборка галактик войда Eridanus в настоящее время составляет 60 объектов в диапазоне $M_B = [-13.1, -18.8]$. Она основана на данных NED (NASA/IPAC Extragalactic Database), LEDA (Lyon-Meudon Extragalactic database), 6dFGS (Six-degree-Field Galaxy Survey) и UZC (Updated Zwicky Catalog). На рисунке 1.2 показана веерная диаграмма в области войда Eridanus в срезе $-10^\circ \leq \delta \leq +10^\circ$.

В готовящейся к печати работе Князев и др. из анализа новых спектральных наблюдений на SALT⁶ и БТА, дополненных имеющимися спектрами SDSS, обнаружили, что галактики войда Eridanus имеют систематически более низкие значения металличности O/H по отношению к подобным галактикам, находящимся в более плотном окружении. В данной работе, в контексте исследования интересных галактик внутри войдов, без упора на изучение остального населения, мы комплексно исследовали две очень низкометаллические карликовые галактики J0015+0104 и J2354-0005.

1.2 Использование обзора SDSS в исследовании галактик войдов

1.2.1 Работа со спектрами базы данных SDSS

SDSS (Sloan Digital Sky Survey, Слоуновский цифровой обзор неба) [61] – проект широкомасштабного исследования изображений и спектров звёзд и галактик. Данный обзор по изображениям и спектроскопии охватывает около одной четверти небесной сферы, определяя позиции и яркость сотен миллионов небесных объектов, а также измеряет расстояния до более чем миллиона галактик. SDSS использует специальный 2.5-метровый телескоп в АРО⁷, оснащенный специальными мощными инструментами. Пара спектрографов с ПЗС матрицами 2048×2048 , с помощью оптических волокон, обеспечивает получение спектров и, следовательно, расстояний до более 600 галактик и квазаров в одном наблюдении.

В SDSS спектрах разрешаются линии поглощения в галактиках и квазарах. Этого разрешения достаточно, чтобы отличить скорости 150 км с^{-1} в одном элементе данных. Для всего спектра галактик измерения скоростей проводятся с ошибками лучше, чем $\pm 20 \text{ км с}^{-1}$.

Обзор SDSS определяет кандидатов для мультиволоконной спектроскопии. Спектры SDSS были получены в круглых $3''$ апертурах с мультиобъектным фиберным спектрогра-

⁶Southern African Large Telescope, Южно-африканская астрономическая обсерватория (SAAO), ЮАР

⁷Apache Point Observatory, Обсерватория Апаче Поинт в Нью-Мексико, США

фом. Накопление для одного объекта составляет три 15-минутные экспозиции. Это позволяет эффективно убирать космические лучи, уменьшать потери данных в случае изменения погоды, избегать перенасыщения линий ночного неба, а также обеспечивать различные другие внутренние проверки и, в некоторых случаях, объединять экспозиции для наблюдений, выполненных более чем за одну ночь.

Обработка производится посредством стандартного автоматического пакета SPECTRO [67, 62]. Данный пакет включает в себя два этапа. На первом этапе обработки из сырых 2D спектральных кадров получают один 1D откалиброванный спектр для каждого объекта. При этом, для двумерных кадров сначала проводится удаление плохих пикселей, смещение, вычитание плоского поля. Далее идет процедура калибровки длин волн, ребининга к стандартному разрешению длины волны и вычитания неба. После этого, из 2D спектра наиболее оптимально получают одномерные спектры, которые затем объединяются. На втором этапе совмещаются красная и синяя половины спектра. Маскируются пиксели, загрязненные сильным излучением неба. Проводится континуум для спектра. Автоматически находятся все подходящие эмиссионные линии. Этот процесс включает в себя измерения центроидов длин волн, эквивалентных ширин и высот пиков. Определяются красные смещения эмиссионных линий, и отождествляются все обнаруженные эмиссионные линии. Проводится классификация спектров, с использованием набора шаблонов спектров в диапазоне от звезд до квазаров, и, наконец, калибровка потоков в спектре для получения сырой ($\sim 15\%$) спектрофотометрии, с применением калибровочных фотометрических изображений.

В данной работе мы использовали обработанные одномерные спектры SDSS. Нами проведен собственный континуум и измерены потоки эмиссионных линий. Далее, используя соотношения определенных линий для различных методов (описание ниже), мы получали значения металличности O/H . Таким образом, для 15 галактик войда Lynx-Cancer из обновленной выборки мы получили оценки содержания кислорода по их спектрам в базе данных SDSS из релизов DR (Data Release) 7 и 12.

1.2.2 Широкополосная фотометрия изображений базы данных SDSS

SDSS также хорошо подходит для фотометрических исследований различных выборок галактик, благодаря своей однородности, зоне покрытия и глубине (SDSS Project Book⁸). Изображения получены в режиме сканирования в пяти фильтрах u, g, r, i, z [68], с использованием

⁸<http://www.astro.princeton.edu/PBOOK/>

мозаичной ПЗС (прибор с зарядовой связью) камеры [67]. Полосы пропускания SDSS были тщательно выбраны, чтобы обеспечить широкую цветовую базу, избежать линий ночного неба и атмосферных ОН полос, соответствовать полосам пропускания фотографических обзоров и гарантировать хорошую совместимость с существующими внегалактическими исследованиями. Автоматизированная система обработки изображений астрономических источников обнаруживает и измеряет их фотометрические и астрометрические свойства [69, 70, 71]. В итоге SDSS предоставляет пользователям откалиброванные изображения высокого качества в фильтрах u, g, r, i, z со средними длинами волн: 355.1, 468.6, 616.5, 748.1 и 893.1 нм соответственно.

Данные SDSS уже использовались для множества исследований галактик, например, для определения с высокой точностью функции светимости галактик (Блантон и др. (2001) [72]), для измерения эффекта слабого линзирования галактик (Фишер и др. (2000) [73]), для исследования глубины потенциальных ям галактики (МакКей и др. (2002) [74]), для исследования статистических свойств ярких галактик (Шимасаки и др. (2001) [75]), и для изучения разделения типов галактик по цветам (Стратева и др. (2001) [76]).

При первичной обработке изображений необходим лишь один дополнительный шаг – качественное вычитание фона неба. Эта процедура проводится с помощью пакета `air` из MIDAS⁹, подобно тому, как описано в работе Князева и др. (2004) [77]. Все яркие звезды удаляются из изображений. Далее изучаемый объект закрывается маской, фон неба аппроксимируется двумерным полиномом. Полученная модель фона неба вычитается из изображения. При этом в области под маской проводится интерполяция фона из окружающей области. После этого, с помощью фотометрии в круговых апертурах, при которой производится суммирование отсчетов пикселей в каждой апертуре, измеряется поток внутри маски для u, g, r, i изображений с вычтенным фоном. Затем полученные потоки пересчитываются в полные звездные величины галактик. Для преобразования инструментальных потоков в звездные величины используется система фотометрических коэффициентов для каждого из полей базы данных SDSS. Точность нуль-пунктов составила $\sim 0.01^m$ во всех фильтрах.

Для всех галактик были получены следующие модельно-независимые параметры: интегральные звездные величины в фильтрах u, g, r, i , интегральные цвета $(u - g), (g - r), (r - i)$, а также интегральные величины B_{tot} , пересчитанные из g и r по соотношениям, предложенным в работе Лаптона и др. (2005) [78]. После создания профиля поверхностной яркости, для

⁹MIDAS - пакет программ Munich Image Data Analysis System Южной Европейской Обсерватории.

каждого объекта были оценены радиусы галактики R_{50} и R_{90} , внутри которых содержится 50% и 90% ее потока в фильтрах u, g, r, i . Кроме того, получены эффективные поверхностные яркости внутри R_{50} , наблюдаемое отношение малой и большой полуосей b/a , “оптический” и радиус Холмберга [79] (на уровнях $\mu(B) = 25.0$ и $26.5^m/\square''$ соответственно). Все полученные эффективные радиусы умножены на $\sqrt{(a/b)}$.

Приближение радиальных профилей поверхностной яркости экспоненциальным законом или законом Серсика [80] позволило определить модельные параметры в фильтрах u, g, r, i : центральную поверхностную яркость μ_0 , оценки масштабной (характеристической) длины диска α и индекс Серсика n . Распределение поверхностной яркости, согласно [80], выглядит следующим образом:

$$\mu(R) = \mu_0 + 1.086 \left(\frac{R}{\alpha} \right)^{1/n} \quad (1.1)$$

где μ_0 – центральная поверхностная яркость, α – экспоненциальный масштаб диска, n – индекс Серсика, который соответствует ~ 4 для ярких эллиптических галактик и в пределах от 1 до 4-х – для балджей и эллиптических галактик промежуточных светимостей. При $n=1$, как чаще всего наблюдается для карликовых галактик и дисков спиральных галактик, формула Серсика переходит к экспоненциальному закону.

Из $\mu_0(g)$ и $\mu_0(r)$ по формулам работы [78] пересчитана центральная поверхностная яркость $\mu_0(B)$ в B -полосе. Оценивались также центральные поверхностные яркости в фильтрах u, g, r, i и B , скорректированные за наклон дисков галактик к лучу зрения, а также за экстинкцию в нашей Галактике, согласно работе [81]. Поправка за наклон вычислялась по формуле:

$$\delta \mu = -2.5 \log \cos(i) \quad (1.2)$$

где i – угол наклона плоскости диска к лучу зрения. Для объектов с углом наклона $i > 70^\circ$ была взята поправка [82]:

$$\delta \mu = 2.5 \log(\alpha/\alpha_z)(1 - \exp(-\tan(i) \alpha/\alpha_z)) \quad (1.3)$$

где отношение масштабных длин α/α_z принималось равным 5 (следуя работе [83]). Обе поправки принимались в предположении пренебрежимо малого поглощения в галактиках. Угол i вычислялся по стандартному соотношению:

$$\cos(i)^2 = (p^2 - q^2)/(1 - q^2) \quad (1.4)$$

где $p=b/a$ и q – наблюдаемое отношение полуосей и отношение полуосей реального диска соответственно. Для сравнительно ярких галактик поздних типов – $q = 0.2$, а для слабых

объектов с $M_B > -14.8$ типичное значение q , согласно результатам работы [84], принималось равным 0.4.

Для параметров, зависящих от расстояния, принято значение постоянной Хаббла как $H_0 = 73 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$.

1.3 Наблюдения на БТА со SCORPIO

Спектральные наблюдения на 6-метровом телескопе САО РАН (БТА) проводились с помощью многорежимного редуктора светосилы SCORPIO [85], устанавливаемого в первичный фокус, с ПЗС приемником $2K \times 2K$ EEV 42-40. Гризма VPHG550G использовалась для получения спектров для оценок относительного содержания кислорода. Наблюдения с гризмой VPHG1200R проводились для исследования кинематики в объекте UGC 4722 (2012.11.17 г., подробнее в разделе 4.1), а также для проверки лучевой скорости самого слабого члена очень богатого газом триплета J0723+36 (17.11.2016 г., подробнее в разделе 4.2).

Спектральный диапазон и разрешение для гризмы VPHG550G составляют 3600–7200 Å и ~ 11 –12 Å. Для гризмы VPHG1200R – 6000–7500 Å и ~ 5.5 Å соответственно. Во всех случаях масштаб вдоль щели (после бинирования) был $0.36'' \text{ pixel}^{-1}$. Спектры каждого объекта дополнялись линейчатым эталонным спектром лампы He–Ne–Ar для привязки к длинам волн. Для калибровки потока несколько раз за ночь наблюдались спектральные стандартные звезды Feige 34, BD+28°4211 и G191B2B.

Ширина щели составляла $1''$, а её длина – около $6'$. Длинная щель позиционировалась по НИ областям, выделенным по изображениям с 1-2-минутной экспозицией со среднеполосным фильтром SED665 (FWHM=191 Å), центрированным на $\lambda_c = 6622 \text{ Å}$.

Фотометрические наблюдения на БТА также проводились при установленном в первичный фокус приборе SCORPIO. В режиме прямых снимков были использованы широкополосные фильтры B, V, R фотометрической системы Джонсона-Казинса. Основные характеристики с учетом квантовой эффективности SCORPIO и ПЗС: FWHM=970 Å и $\lambda_c = 4400 \text{ Å}$ для B , FWHM=790 Å и $\lambda_c = 5470 \text{ Å}$ для V , FWHM=1500 Å и $\lambda_c = 6620 \text{ Å}$ для R .

1.3.1 Методика обработки полученных спектров

Вся обработка спектральных данных (для наблюдений на БТА) и измерения интенсивностей эмиссионных линий проводились по стандартным методикам. Для этого, помимо спектров объекта, необходимы: “кадр смещения” (bias, считывание ПЗС с нулевой экспозицией), плос-

кое поле (flatfield, равномерная засветка от лампы непрерывного спектра), спектр сравнения (неон, калибровка шкалы длин волн), спектр стандартной звезды сравнения. Для выполнения всех операций над длиннощелевыми спектрами применялся стандартный пакет обработки с использованием IRAF¹⁰ и MIDAS, который включает в себя следующие шаги:

- удаление космических лучей;
- вычитание электронного нулевого уровня (bias);
- коррекция за мелкомасштабные вариации чувствительности ПЗС матрицы (flatfield);
- линейаризация спектра, а именно, переход от пиксельных координат к координатам, выраженным в длинах волн (неон);
- вычитание фона ночного неба;
- используя данные по спектрофотометрическим стандартным звездам, все спектры привязывались к абсолютным потокам;
- коррекция за атмосферное поглощение.

Наконец, отдельный одномерный спектр целевой НII-области вырезался из двумерного суммированием, без взвешивания, вдоль щели, для отдельных строк (типично 5-10, или $\sim 1.5''$ - $3''$), у которых важные линии (например, O[III] λ 4363) хорошо детектировались над шумом.

1.4 Методы определения относительного содержания кислорода

По вырезанному одномерному спектру проводился подстилающий континуум и измерялись интенсивности эмиссионных линий. Измеренные потоки эмиссионных линий, в одномерных спектрах, корректировались за экстинкцию, вызванную межзвездным поглощением Млечного Пути и внутренним поглощением в галактике. Для этого используется функция поглощения из работы Витфорда (1958) [86] и величина экстинкции около линии $H\beta$ ($C(H\beta)$). Для Бальмеровских линий также принималась поправка за эквивалентные ширины линий поглощения водорода в подстилающем звездном континууме (EW_{abs}). Коррекция наблюдаемых соотношений Бальмеровских линий к их рекомбинационным значениям проводилась с помощью итеративной процедуры одновременного определения коэффициента экстинкции $C(H\beta)$ и эквивалентной ширины линий водорода EW_{abs} по формуле из работы Изотова и др. (1994) [87]:

¹⁰IRAF — Image Reduction and Analysis Facility — пакет программ, распространяемый Национальной Обсерваторией Оптической Астрономии (NOAO).

$$\frac{I(\lambda)}{I(H\beta)} = \frac{EW_e(\lambda) + EW_{abs}(\lambda)}{EW_e(\lambda)} \cdot \frac{EW_e(H\beta)}{EW_e(H\beta) + EW_{abs}(H\beta)} \cdot \frac{F(\lambda)}{F(H\beta)} \cdot 10^{[C(H\beta) \cdot f(\lambda)]} \quad (1.5)$$

где $I(\lambda)$ – скорректированный поток в линии, $F(\lambda)$ – наблюдаемый поток в линии, $f(\lambda)$ – функция покраснения, нормированная к $H\beta$, из работы Витфорда (1958) [86], EW_e – эквивалентная ширина наблюдаемой эмиссионной линии.

Для остальных, не Бальмеровских, эмиссионных линий $EW_{abs}=0$, и формула имеет вид:

$$\frac{I(\lambda)}{I(H\beta)} = \frac{F(\lambda)}{F(H\beta)} \cdot 10^{[C(H\beta)f(\lambda)]} \quad (1.6)$$

Дальнейшая обработка спектров галактик подразумевает определение параметров эмиссионных линий и оценку по этим данным физических условий: определение электронной температуры, металличности газа (а именно, отношения O/H в III областях текущего звездообразования), а также красных смещений и ширин линий.

1.4.1 Прямой T_e метод

Для галактик с хорошо обнаружимой линией [OIII] λ 4363Å использовался классический T_e метод для двухзонной фотоионизационной модели для III областей, изначально предложенный Аллером (1984) [88]. В данной работе при расчетах полного обилия кислорода мы использовали обновленные формулы (с учетом уточненных атомных констант) из работы Изотова и др.(2006) [89]:

$$12 + \log O^+/H^+ = \log \frac{\lambda 3727}{H\beta} + 5.961 + \frac{1.676}{t} - 0.40 \log t - 0.034t + \log(1 + 1.35x), \quad (1.7)$$

$$12 + \log O^{2+}/H^+ = \log \frac{\lambda 4959 + \lambda 5007}{H\beta} + 6.200 + \frac{1.251}{t} - 0.55 \log t - 0.014t, \quad (1.8)$$

$$\frac{O}{H} = \frac{O^+ + O^{++} + O^{+++}}{H^+}. \quad (1.9)$$

где температура оценивается по формулам:

$$t = \frac{1.432}{\log[(\lambda 4959 + \lambda 5007)/\lambda 4363] - \log C_T}, \quad (1.10)$$

$$C_T = (8.44 - 1.09t + 0.5t^2 - 0.08t^3) \frac{1 + 0.0004x}{1 + 0.044x},$$

где $t = 10^{-4}T_e(O \text{ III})$ и $x=10^{-4} N_e t(O \text{ II})^{-0.5}$. $N_e(S \text{ II})$ - электронная плотность, вычисляемая из соотношения линий дублета [SII] $\lambda\lambda$ 6716,6730. При значениях $N_e \leq 100 \text{ см}^{-3}$, характерных для большинства известных карликовых галактик, это слабо влияет на температуру.

Когда данные об этих линиях отсутствовали, то электронная плотность принималась равной 10 см^{-3} .

Температура $t(\text{O II})$ определялась по формулам:

$$\begin{aligned} t(\text{O II}) &= -0.577 + t \times (2.065 - 0.498t), & 12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 7.2, \\ &= -0.744 + t \times (2.338 - 0.610t), & 7.2 < 12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 8.2, \\ &= 2.967 + t \times (-4.797 + 2.827t), & 12 + \log(\text{O}/\text{H}) > 8.2, \end{aligned} \quad (1.11)$$

где $t(\text{O II}) = 10^{-4}T(\text{O II})$ и $t = 10^{-4}T(\text{O III})$.

1.4.2 Полуэмпирический метод Изотова и Туана (2007)

В случае, когда линия $[\text{OIII}]\lambda 4363$ была слабой или необнаружимой, мы использовали так называемый “полуэмпирический” метод из работы Изотова и Туана (2007) [37]. Данный метод использует хорошо аппроксимируемую зависимость T_e от суммы интенсивностей сильных кислородных линий $[\text{OII}]\lambda 3727$ и $[\text{OIII}]\lambda 4959, 5007$, отнесенной к интенсивности $\text{H}\beta$. Эта зависимость была получена в работе Сташинской и Изотова (2003) [90] для сетки моделей, хорошо аппроксимирующих наблюдаемые соотношения между интенсивностями сильных линий и $\text{EW}(\text{H}\beta)$ для большой выборки внегалактических НII областей с целым рядом наблюдаемых металличностей. После оценки температуры T_e , последующие вычисления проводились идентично классическому T_e методу. Этот метод первоначально тестировался в работе [37] на спектрах для 13-ти НII областей в 9-ти галактиках с оценками O/H , определенными прямым T_e методом, в диапазоне $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 7.14 \div 7.75$. Внутренний разброс полуэмпирического метода был оценен в $\sim 0.07 \text{ dex}$.

Мы провели дополнительную калибровку этого метода для исключения возможной систематики в оценках O/H прямым методом и полуэмпирическим. Это дает возможность получать полуэмпирические оценки в той же шкале, что и прямые. Для такой проверки использованы данные о интенсивностях сильных линий для НII-областей галактик с оценками O/H по прямому методу с хорошей точностью ($\lesssim 0.1 \text{ dex}$) из работ [37, 91, 92, 93, 94, 95], а также из [96, 48, 65, 34]. В общей сложности их число составило ~ 150 объектов в диапазоне $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ от 7.02 до 8.40.

Далее, для этих галактик мы получили оценки металличностей $12 + \log(\text{O}/\text{H})$, которые для краткости далее будем обозначать, как Z (например, Z_{SE} , где SE – полуэмпирический метод, и Z_{Te} , где Te – прямой метод). Для того, чтобы понять, как может меняться соотношение

между этими оценками, мы разбили данную выборку из 150 объектов на 4 подвыборки, используя следующие критерии:

- ограничения на точность Z_{Te} : <0.06 dex и <0.10 dex;
- $Z_{\text{SE}} - Z_{\text{Te}} > 2.0 \sigma_{\text{diff}}$ и $> 1.7 \sigma_{\text{diff}}$, где σ_{diff} – комбинированная ошибка этой разницы, как производная квадратичная ошибка для Z_{SE} и Z_{Te} .

В итоге, получены схожие линейные регрессии между Z_{SE} и Z_{Te} для данных 4 подвыборок, коэффициенты которых равны в пределах их неопределенностей. Для дальнейшего анализа мы использовали среднее этих 4-х линейных регрессий в качестве наиболее надежного приближения.

Линейная регрессия между Z_{SE} и Z_{Te} для 115 объектов, показанная на рис. 1.3, соответствует:

$$Z_{\text{SE}} - Z_{\text{Te}} = 0.0345(\pm 0.015) \times Z_{\text{Te}} - 0.242(\pm 0.108) \quad (1.12)$$

со среднеквадратичным разбросом относительно линии регрессии – 0.08 dex. Как видно, разница близка к нулю для самых низких O/H и поднимается до $\sim +0.04$ dex для больших металличностей O/H в представленном диапазоне. То есть, чтобы получить правильное значение Z_{Te} от $Z_{\text{SE}} \gtrsim 8.0$, нужно вычесть ~ 0.04 dex. Для дальнейшего использования Z_{SE} , чтобы получить Z_{Te} , мы преобразуем вышеупомянутое отношение к рабочей формуле, которая учитывает полученный наклон:

$$Z_{\text{Te}} = 0.967 \times Z_{\text{SE}} + 0.234. \quad (1.13)$$

Для дальнейшего усреднения оценок металличностей O/H, полученных различными методами, мы используем последнюю формулу для оценки содержания кислорода в шкале прямого метода Z_{Te} .

Заметим, что в первоначальной подвыборке есть 30 галактик с $\Delta \log(\text{O}/\text{H}) > 2\sigma$, которые были исключены из расчета линейной регрессии. Анализ всей имеющейся информации об этих объектах показывает, что большинство из них попадают в категорию с нетипичными HII областями, в которых присутствуют дополнительные механизмы возбуждения (к примеру, ударные волны). Например, обнаружены линии с высоким потенциалом ионизации: [NeV]3426, [FeV]4227, и/или широкие компоненты эмиссионных линий и WR (например, [97]), и/или очень большие EW(H β) ($\gtrsim 280$ Å). Последний диапазон EW(H β) соответствует очень молодым вспышкам звездообразования и не захвачен модельной сеткой [90]. В таких объек-

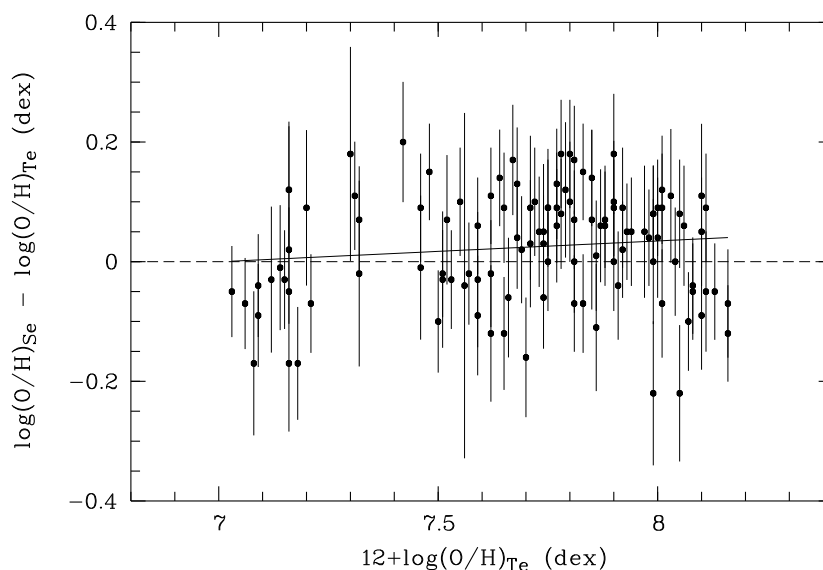


Рис. 1.3: Зависимость между $\log(\text{O}/\text{H})_{\text{SE}}$ и $\log(\text{O}/\text{H})_{\text{Te}}$, как функции $12+\log(\text{O}/\text{H})_{\text{Te}}$ для общего числа 115 точек. Сплошная линия показывает соответствующую линейную регрессию, со среднеквадратичным рассеянием 0.08 dex.

тах интенсивность $[\text{OIII}]\lambda 4363$ может быть выше, чем в более типичной модели возбуждения HII области.

1.4.3 Эмпирические оценки O/H по формулам Пилюгина и Туана (2005), Ина и др. (2007)

В данной работе был использован один и тот же набор данных для объектов с измерениями O/H по прямому методу, чтобы независимо проверить два известных эмпирических метода для получения оценок O/H, также рассмотренных в работе Изотова и Туана (2007) [37] на их небольшой выборке. Данные методы, из работ Пилюгина и Туана (2005) [38], Ина и др. (2007) [39] (далее PT05 и Yin07 соответственно), основаны на относительных интенсивностях сильных линий $[\text{OII}]\lambda 3727$ и $[\text{OIII}]\lambda\lambda 4959, 5007$.

В методе PT05 используются два параметра: R_{23} и параметр “возбуждения” $P = R_3/R_{23}$, включая относительные интенсивности тех же самых сильных линий кислорода, что и в полуэмпирическом методе [37]. Для метода PT05 используются различные формулы для так называемых *нижней* ($Z_{\text{Te}} < 8.0$) и *верхней* ветвей ($Z_{\text{Te}} > 8.2$), в результате чего диапазон $[8.0, 8.2]$ оказывается наиболее неопределенным. Поскольку лишь некоторые из изученных галактик попадают этот в диапазон, то для наших целей используем значения по их нижним ветвям.

Как и для полуэмпирического метода, применяем те же критерии отбора для исследуемых четырех подвыборок из общего числа 150 объектов с известными Z_{Te} . Единственное дополнительное ограничение связано с диапазоном использования *нижней* ветви. Поэтому выбраны только объекты с $Z_{\text{Te}} < 8.0$. Так как полученные параметры линейной регрессии для всех четырех подвыборок согласуются друг с другом в пределах их неопределенностей, принимаем их средние значение.

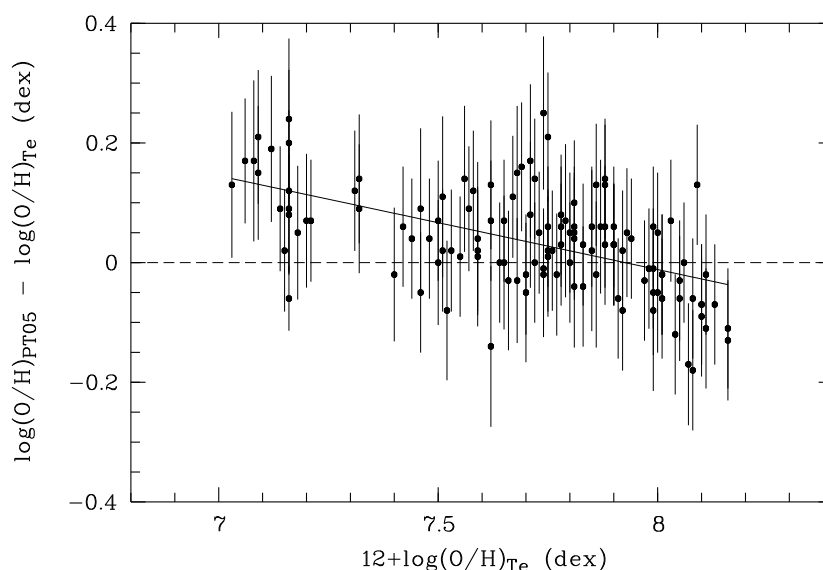


Рис. 1.4: Зависимость между $\log(\text{O}/\text{H})_{\text{PT05}}$ (нижняя ветвь, смотрите подробнее в тексте) и $\log(\text{O}/\text{H})_{\text{Te}}$, как функции $12 + \log(\text{O}/\text{H})_{\text{Te}}$ для 103 точек данных с $12 + \log(\text{O}/\text{H})_{\text{Te}} < 8.0$. Аналогично рис. 1.3, сплошная линия показывает соответствующую линейную регрессию, с рассеянием -0.064 dex.

Как видно на рис. 1.4, линейная регрессия по 103 точкам показывает довольно значительный наклон, с максимальной разностью для двух методов в диапазоне низких металлическихностей O/H:

$$Z_{\text{PT05}} - Z_{\text{Te}} = -0.091(\pm 0.029) \times Z_{\text{Te}} + 0.710(\pm 0.198) \quad (1.14)$$

со среднеквадратичным рассеянием относительно линии регрессии 0.064 dex. На краях используемого диапазона имеем следующие отличия: для $Z_{\text{Te}} \sim 8.00$, Z_{PT05} на 0.018 dex ниже, в то время как для $Z_{\text{Te}} \sim 7.00$, Z_{PT05} на 0.073 dex выше. Мы преобразуем полученную линейную регрессию в рабочую формулу:

$$Z_{\text{Te}} = 1.100 \times Z_{\text{PT05}} - 0.781 \quad (1.15)$$

Таким образом, мы получаем оценки O/H по методу PT05, в шкале прямого метода Z_{Te} , для дальнейшего усреднения O/H, полученных различными методами.

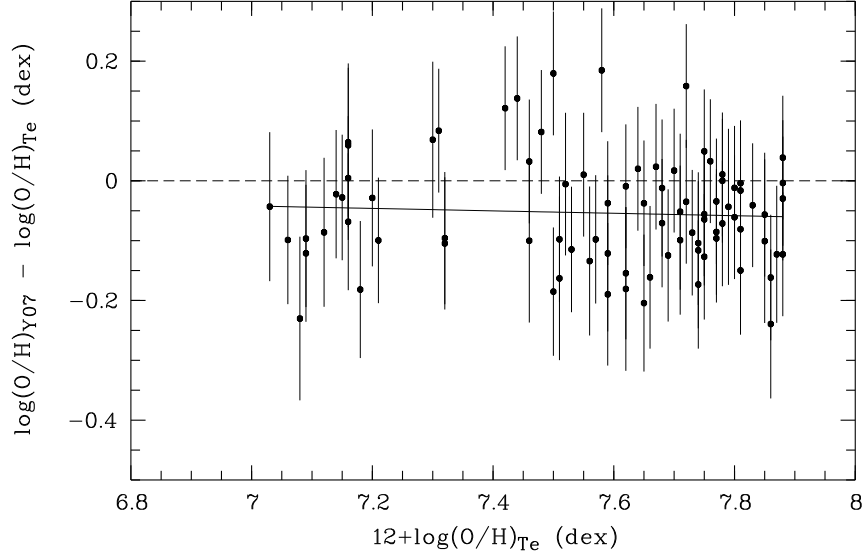


Рис. 1.5: Зависимость между $\log(\text{O}/\text{H})_{\text{Y07}}$ и $\log(\text{O}/\text{H})_{\text{Te}}$, как функции $12+\log(\text{O}/\text{H})_{\text{Te}}$ для 85 точек данных с $12+\log(\text{O}/\text{H})_{\text{Te}} < 7.90$. Аналогично рис. 1.3, сплошная линия показывает соответствующую линейную регрессию, с среднеквадратичным рассеянием -0.085 .

Известен еще один эмпирический метод Yin07, на основе параметра R_{23} для галактик с низкими металличностями [39]. Авторы используют большую выборку, отобранную из SDSS DR4 и из литературы с $[\text{OIII}]\lambda 4363$ с отношением сигнал/шум $> 5\sigma$. Нами использовано их эмпирическое соотношение между Z_{Y07} и $\log(R_{23})$ (их формула 8), полученное для 120 точек с $Z_{\text{Te}} < 7.90$ со среднеквадратичным разбросом 0.103 dex.

Сравнение полученных оценок Z_{Y07} и Z_{Te} показано на рис. 1.5, подобно рис. 1.3, 1.4. После аналогичной процедуры усреднения линейных регрессий, полученных для четырех различных подвыборок и сопоставимых в пределах их неопределенностей, получаем линию, показанную на рис. 1.5. Как видно на рисунке, есть небольшой отрицательный, почти постоянный сдвиг вдоль всего диапазона, около -0.05 dex. Средняя линейная регрессия:

$$Z_{\text{Y07}} - Z_{\text{Te}} = -0.007(\pm 0.013) \times Z_{\text{Te}} + 0.005(\pm 0.090) \quad (1.16)$$

Таким образом, собственная калибровка приводит к металличностям на 0.044 dex ниже для $Z_{\text{Te}} = 7.00$ и на 0.05 dex ниже для $Z_{\text{Te}} = 7.90$. Соответствующая рабочая формула:

$$Z_{\text{Te}} = 1.007 \times Z_{\text{Y07}} - 0.005 \quad (1.17)$$

Для дальнейшего усреднения оценок O/H, получаемых различными методами, использовалась последняя формула для оценок данных в той же шкале, что и Z_{Te} .

1.4.4 Эмпирические методы с включением линии [NII] λ 6584

Для расширения диапазона металличностей O/H, полученных с помощью эмпирических методов, были использованы методы, предложенные в работах Пилюгина и др. (2010) [40] и Пилюгина и Матсона (2011) [41]. Они используют интенсивности сильных линий кислорода и дублеты [NII] λ 6548,6584 и [SII] λ 6716,6730. Данные методы также показывают сравнительно небольшой внутренний разброс O/H $\sim 0.08 \div 0.10$ dex.

Тем не менее, при низком отношении сигнал/шум для линии [NII] λ 6584 точность этих оценок значительно снижается. К тому же, как показано в работе Санчес Альмейда и др. (2016) [98], $\sim 10\%$ галактик с низкими металличностями имеют повышенное отношение N/O для NII областей и усиленные потоки линий [NII]. Для таких случаев эти эмпирические оценки приводят к систематически более высоким значениям O/H. Поэтому используем их избирательно и, в основном, в качестве дополнительного контроля полуэмпирических оценок, которые не зависят от этой линии. Кроме того, использовалась последняя версия эмпирического метода, известного как метод “двойника”, который базируется на эмиссионных линиях сильной и средней интенсивности [99]. Последний метод приводит к большим неопределенностям O/H ($\gtrsim 0.2$ dex) при низких отношениях сигнал/шум для линии [NII] λ 6584.

1.4.5 Использование линий [OII] λ 7320,7330

Для определения содержания кислорода в спектрах SDSS для близких объектов ($z \lesssim 0.02$), для которых линия [OII] λ 3727 находится вне спектрального диапазона SDSS DR7, применялся модифицированный T_e метод, предложенный в работах Князева и др. (2003),(2004) [100, 101], который использует интенсивность слабого дублета [OII] λ 7320/7330, в случае хорошо измеряемой линии [OIII] λ 4363. В том случае, когда линия [OIII] λ 4363 слаба или необнаружима, в работе Пустильника и др. (2011) [34] был предложен дополнительный способ для итеративной оценки $I(3727)$, на основе $I(7320,7330)$, и дальнейшего использования полуэмпирического метода из работы Изотова и Туана (2007) [37]. Для спектров SDSS без обнаружимой [OIII] λ 4363 применялся последний вариант.

В работе Князева и др. (2004) [101] (раздел 4.2) опыт использования дублета [OII] λ 7320,7330 в SDSS спектрах, для получения содержаний кислорода в BCGs и NII областях спиральных галактик, показывает хорошее согласие с оценками O/H, полученными с помощью прямого метода с использованием [OII] λ 3727. Для подвыборки 159 объектов не было обнаружено систематики: $\Delta \log(O/H) = 0.002$ dex с разбросом ~ 0.02 dex. Здесь $\Delta \log(O/H)$

$= \log(\text{O}/\text{H})_{3727} - \log(\text{O}/\text{H})_{7325}$. Таким образом, в данной работе использование этого метода в основном ограничивается спектрами с более низкими отношениями сигнал/шум, в сравнении с теми, что изучены в работе Князева и др. (2004) [101].

1.5 Определение возрастов старого звездного населения

В стандартной картине формирования и эволюции галактик, именно звезды на периферии должны представлять наиболее старое звездное население. К сожалению, использование радиальных профилей цветов галактик для данной задачи затруднительно из-за возможного вклада от НII областей на свечение наружных частей галактик. Так же, фотометрия в кольцевой диафрагме для галактик с вытянутой формой может давать большой разброс цвета из-за смешивания света различных частей “диска”. Поэтому для анализа цветов внешних частей мы применили подход, уже опробованный для галактик этого войда: DDO 68 [64] и SDSS J0926+3343 [65]. Путем сравнения цветов периферийных областей галактик с модельными эволюционными треками из пакета PEGASE2 [42], мы получаем оценки времени от начала эпохи или “короткого эпизода” звездообразования, которую при определенных допущениях можно считать оценкой возраста самых старых видимых звезд.

Цвета внешних частей галактик оценивались с помощью дополнительной фотометрии, по набору маленьких (радиусом $\sim 4''$) круглых диафрагм на периферии галактик, чтобы избежать вклад от достаточно явных НII-областей. Затем поток в этих апертурах суммировался и пересчитывался в звездные величины и цвета. Для части объектов с неясным расположением НII областей мы использовали снимки в $\text{H}\alpha$, полученные на БТА.

Также при выборе участков периферии для определения цветов наиболее старого населения мы выбирали далекие от центра области, для которых потоки можно было измерять с приемлемой точностью. Поэтому для галактик с разной величиной центральной поверхностной яркости и/или характерным размером, поверхностная яркость изученных периферийных областей заметно менялась от $\mu(B)=24.5$ до $26.9^m/\square''$, при медианном значении $\mu(B) = 25.3^m/\square''$. Для перехода от значений $\mu(g)$, измеренных из радиальных профилей яркости, к параметру $\mu(B)$, мы использовали типичный для галактик войда цветовой индекс $B - g = 0.4^m$.

Пакет программ PEGASE2 предназначен для расчета моделей фотометрической эволюции галактик. Основными параметрами моделей являются: начальная функция масс звезд вида $\varphi(\mathfrak{M}) = \mathfrak{M}^{-\tau}$, закон звездообразования $SFR(t)$, металличность звезд z . Для нашего

анализа использованы начальные функции масс (IMF) из работы Солпитера (1955) [102] и Кроупа и др.(1993) [103], как описывающие наилучшим образом наблюдательные данные по распределению масс звезд в близких галактиках. Первая описывается законом: $\varphi(\mathcal{M}) = -1.596M^{-2.35}$, где значения масс звезд варьируются в интервале от 0.1 до $120 \mathcal{M}_{\odot}$. Вторая имеет вид: $\varphi(\mathcal{M}) \propto \mathcal{M}^{-\tau}$, где $\tau=2.7$ для звезд массой $1 \mathcal{M}_{\odot}$, $\tau=2.2$ для интервала $0.5 \leq \mathcal{M} \leq 1 \mathcal{M}_{\odot}$, и $0.70 < \tau < 1.85$ в пределах $0.08 < \mathcal{M} < 0.5 \mathcal{M}_{\odot}$.

Для законов звездообразования использованы два крайних сценария: одномоментный эпизод звездообразования – вспышка (*inst*) и непрерывное звездообразование с постоянной скоростью (*const*). Треки всех остальных неэкзотических сценариев будут располагаться между этими крайними. Для каждого фиксированного момента времени от начала звездообразования самые голубые цвета дает трек для сценария *const*, так как доля массивных голубых звезд для него уменьшается медленнее, чем для *inst* трека. В областях *ugr* диаграммы, где треки *const* и *inst* проходят достаточно близко (смотри рис. 3.16), время от начала звездообразования и, соответственно, возраст наиболее старых звезд, для трека *const* примерно в пять раз больше, чем для трека *inst*. Поэтому в случаях неопределенности, оценки возрастов наиболее старых звезд по трекам *const* дают сохраняющиеся верхние пределы и, таким образом, могут служить оценками сверху для возрастов самого старого видимого звездного населения. Все полученные данные для цветов внешних областей исследованных галактик наносятся на двухцветные диаграммы *ugr* и *gri* для сопоставления с описанными выше модельными треками.

При сравнении наблюдаемых цветов галактики и цветов модельных треков, за металличность звезд для треков принималась величина из дискретного набора, предлагаемого в PEGASE2, наиболее близкая к измеренной металличности газа для каждой галактики. В основном использована одна из трех: $Z=0.004$, $Z=0.002$ и $Z=0.001$ ($12+\log(\text{O}/\text{H}) \sim 8.0$, 7.70 и 7.35 соответственно).

Фактически кривые пропускания фильтров, применяемые при расчетах эволюционных треков PEGASE2, и фильтров *u, g, r, i*, использованных в SDSS наблюдениях, немного различаются. Чтобы устранить связанные с этим небольшие систематические сдвиги, мы использовали соотношения из работы Таккера и др. (2006) [104].

1.6 Включение данных HI для определения массовой доли газа

Для галактик выборки, с доступными данными об интегральных потоках в линии $F(\text{HI})$ атомарного водорода 21 см, можно получить оценку полной массы водорода $\mathfrak{M}(\text{HI})$ (в единицах масс Солнца), используя формулу для оптического тонкого слоя: $\mathfrak{M}(\text{HI}) = 2.36 \times F(\text{HI}) D^2 10^5$ [105], где D – расстояние до галактики в Мпк и $F(\text{HI})$ – поток в единицах Jy km s^{-1} . Для оценки полной массы газа $\mathfrak{M}_{\text{gas}}$ необходимо учесть вклад гелия (0.33 от $\mathfrak{M}(\text{HI})$). Вкладом массы молекулярного газа в карликовых галактиках в первом приближении можно пренебречь. Примерно для половины галактик данные $F(\text{HI})$ собраны из литературы, а для остальных получены по наблюдениям на радиотелескопе NRT [106].

Результаты фотометрии могут быть использованы для оценки полной массы звезд. Зная массу газа и звезд, можно получить такой эволюционный параметр, как массовая доля газа. Полная масса звезд \mathfrak{M}_* стандартно оценивается по интегральной светимости галактик в одном из широкополосных фильтров λ , с помощью соответствующего параметра $\Upsilon_\lambda = \mathfrak{M}_*/L_\lambda$, отношения масса-светимость для звездного населения, зависящего от цвета звездного континуума. Для оценок \mathfrak{M}_* мы использовали отношение масса-светимость Υ и его зависимость от цветовых индексов, выведенную в работе Зибетти и др. (2009) [107]. Конкретно, мы использовали $\Upsilon_g(g-i)$ и светимость в g -фильтре, как дающие наиболее устойчивые результаты в оптическом диапазоне. Отношение масса-светимость Υ из [107], на наш взгляд, наиболее адекватно учитывает сложную историю звездообразования в маломассивных галактиках, включая и относительно недавние эпизоды.

По оцененной таким образом массе звезд \mathfrak{M}_* вычислялась барионная масса галактики $\mathfrak{M}_{\text{bary}} = \mathfrak{M}_* + \mathfrak{M}_{\text{gas}}$, а затем и массовая доля газа f_{gas} , то есть отношение полной массы газа к полной барионной массе. Кроме этого, для сравнения с другими выборками, мы оценили часто используемый в менее детальных исследованиях модельно-независимый параметр $\mathfrak{M}(\text{HI})/L_B$ – отношение массы водорода к светимости в B полосе в солнечных единицах, где L_B вычислялось через звездную величину B_{tot} , рассчитанную по данным нашей независимой фотометрии в фильтрах g, r , с помощью соотношений из работы Лаптона и др. (2005) [78]. Для выборок галактик без информации о цветах этот параметр дает грубую оценку относительной массы газа.

Глава 2

Новые оценки металличности для галактик войда Lynx-Cancer

2.1 Введение и цели

Статистические исследования оптических свойств галактик в войдах по данным SDSS не дают дополнительного указания на эволюционный статус этих галактик, однако они подтверждают значительную долю голубых галактик и повышенный темп звездообразования [24, 25]. Последнее косвенно указывает на более высокое содержание газа для галактик в изученных пустотах. Единственным эволюционным параметром для галактик в войдах, изученным до недавнего времени, было отношение $\mathcal{M}(\text{H}\alpha)/L_B$. Это было проверено только для ограниченных выборок BCG [108, 109]. Исследование галактик в войдах, на основе полученных изображений в H α из работы Крекел и др. (2012) [110], менее избирательно, но всё еще является довольно ограниченным по светимостям объектов. Недавняя работа Мурмана и др. (2015) [111] является дальнейшим продвижением в направлении изучения выборок слабых галактик в войдах. Она основана на опубликованной части ALFALFA H α -обзора [63].

Есть основания считать, что условия в войдах более благоприятны для достаточно медленной эволюции. Следовательно, можно надеяться, что статистическое изучение выборок галактик войдов может быть хорошим инструментом для сравнения с предсказаниями космологических сценариев формирования галактик. Поэтому накопление информации о свойствах галактик в достаточно больших и глубоких выборках галактик в войдах станет важным продвижением для сравнения с космологическим численным моделированием (например, как в работе Тихонова и др. (2009) [112]).

Для построения выборок галактик в войдах с абсолютными звездными величинами до $M_B \sim -12$, основанных на обзорах с типичным пределом по видимой звездной величине $m_B \sim 19$, необходим предел на пространственные границы анализируемого объема, и этот пре-

дел составляет $D \sim 15\text{-}20$ Мпк. Ближайшие войды, описанные еще в монографии Фэйррелла (1998) [58], примыкающие к Местному Объему или даже частично заполняющие его (расстояния < 11 Мпк, см. [113]), хорошо подходят для этой задачи. Благодаря относительной близости ($D_{\text{center}} \sim 10\text{-}15$ Мпк), в них можно изучать галактики низкой светимости. В частности, слабые ($L_V \sim (2\text{-}4) \times 10^{40}$ эрг сек $^{-1}$) НII области (с несколькими десятками звезд) в этих галактиках становятся доступными для спектроскопического исследования содержания кислорода на современных больших телескопах, таких как 6-метровый телескоп БТА в САО РАН.

2.2 Оценки содержания O/H для галактик выборки

После первой публикации Пустильника и др. (2011) [34] оставалось 60 объектов без оценок O/H из выборки галактик в войде Lync-Cancer. В данной главе представлены результаты определений новых оценок металличности O/H для 39 галактик. Эти оценки содержания кислорода получены из наблюдений на БТА (25 галактик) и из спектров SDSS (14 галактик). В том числе среди результатов получены и новые значения O/H по спектрам SDSS из релиза DR12 для девяти галактик войда с известными ранее металличностями. Для небольшой части галактик с уже известными ранее значениями металличности, мы объединяем наши новые оценки O/H с оценками из других источников, чтобы получить более надежное значение металличности.

Спектральные данные на БТА были получены с прибором SCORPIO и гризмой VPHG550G в период с 2009 по 2016 годы. В таблице 2.1 представлен журнал наблюдений. В ней приведены соответствующие даты наблюдений, времена экспозиций, позиционные углы, качества изображений и воздушные массы.

После проведения измерений интенсивностей линий, все содержания кислорода рассчитывались способом, описанным в разделе 1.4, а также в работе Князева и др. (2008) [114]. Результаты наших измерений O/H по спектрам БТА и SDSS вместе с их основными параметрами сведены в таблицу 2.2: колонка **1** – имя или префикс для имен, содержащих координаты; колонки **2** и **3** – координаты центра галактики; колонки **4** и **5** – координаты (одной из) НII области, спектр которой был снят; колонка **6** – гелиоцентрическая скорость галактики; колонка **7** – принятое расстояние до галактики, с учетом коррекции за большую пекулярную скорость, как в статье [33]; колонка **8** – полная видимая звездная величина в полосе B ; колонка **9** – соответствующая абсолютная звездная величина в фильтре B , исправленная за

Таблица 2.1: Журнал спектральных наблюдений на БТА

Имя	Дата	Время эксп.(с)	Позиц. угол(°)	Кач-во изобр.(")	Воздушная масса
HIPASSJ0626+24	2015.01.14	4×900	144	2.2	1.19
PGC1689759	2015.01.14	3×900	62	2.5	1.08
UGC 3503	2015.01.14	2×900	116	2.3	1.15
UGC 3516	2013.12.29	3×1200	2	1.4	1.16
KKH 38	2013.12.28	6×1200	112	1.6	1.12
UGC 3587	2013.12.28	3×900	62	1.7	1.37
SDSS J0706+3020	2016.01.14	2×1200	14	1.7	1.04
UGC 3755	2015.01.14	2×900	165	2.5	1.19
SDSS J0723+3621	2012.11.18	3×1200	100	1.0	1.02
UGC 3853	2013.12.29	4×900	17	1.4	1.39
SDSS J0736+0959	2013.12.29	3×1200	95	1.3	1.22
SDSS J0737+4724	2012.11.18	4×1200	167	1.5	1.25
UGC 3966	2012.11.18	3×900	165	1.1	1.09
KK 65	2013.12.28	3×900	20	1.7	1.19
MCG 9-13-52	2013.01.15	2×900	40	2.0	1.01
UGC 4115	2013.01.15	2×900	170	2.0	1.29
UGC 4426	2013.01.15	2×900	130	1.5	1.09
UGC 4722	2013.01.15	3×900	13	2.0	1.05
SDSS J0929+2503	2012.11.18	3×1200	13	1.0	1.10
KUG0934+277	2016.01.15	3×900	13	2.4	1.10
UGC 5186	2009.01.21	4×900	59	1.4	1.10
SDSS J0947+3905	2013.12.29	3×1200	65	1.3	1.04
UZC J0947+3908	2013.01.15	2×900	134	2.0	1.22
IC 2520	2013.12.29	2×600	48	1.1	1.07
SDSS J0956+2716	2013.12.29	3×1200	158	1.1	1.04
SDSS J0957+2745	2016.01.15	3×900	135	3.5	1.05

экстинкцию в нашей Галактике [81]; колонка **10** – рассчитанное значение $12+\log(\text{O}/\text{H})$. Последняя величина учитывает как взвешенные средние значения по независимым измерениям от различных областей, так и измерения по различным наблюдениям (если таковые имеются). Когда имелись оценки O/H по прямому методу, то для разных III областей бралась средневзвешенная оценка. При наличии оценок полуэмпирическим или эмпирическими методами со сравнимой точностью, они тоже использовались, как средневзвешенные оценки.

Соответствующие физические параметры и содержания кислорода для галактик войда Лунх-Сансер представлены в нижних частях таблиц A1–A15 в Приложении А. Используемые методы определения относительного содержания кислорода более подробно описаны в разделе 1.4.

Таблица 2.2: Основные параметры галактик войда Lунх-Сансер с новыми и обновленными данными O/H

#	Имя или приставка (1)	Координаты (J2000) галактики		Координаты (J2000) HII-области		V_{hel} , км с ⁻¹ (6)	D, Mpc (7)	B_{tot} , mag (8)	M_B^I , mag (9)	12+ log(O/H) (10)
		(2)	(3)	(4)	(5)					
1	HIPASS	06 26 20.97	+24 39 20.0	06 26 20.87	+24 39 20.8	1485	23.2	17.98	-15.64	7.68±0.05
2	HIPASS	06 29 58.23	+23 34 28.5	06 29 58.16	+23 34 26.2	1452	22.9	17.10	-15.88	7.73±0.07
3	UGC3503	06 38 01.40	+22 39 06.0	06 38 01.44	+22 39 07.1	1380	22.0	15.10	-17.28	7.86±0.09
4	UGC3516	06 43 08.51	+22 52 24.9	06 43 08.48	+22 52 29.6	1287	20.4	16.97	-15.79	8.03±0.05
5	KKH38	06 47 54.88	+47 30 50.0	06 47 56.41	+47 30 38.9	451	9.9	17.40	-12.99	7.35±0.04
6	UGC3587	06 53 54.70	+19 17 59.0	06 53 48.76	+19 18 15.9	1267	20.1	13.84	-18.08	7.70±0.07
7	SDSS	07 06 23.43	+30 20 51.3	07 06 23.43	+30 20 51.2	952	16.9	19.00	-12.47	7.03±0.09
8	UGC3755	07 13 51.80	+10 31 19.0	07 13 51.55	+10 31 16.2	315	7.4	14.07	-15.66	7.78±0.03
9	SDSS	07 23 01.42	+36 21 17.1	07 23 01.79	+36 21 20.5	917	16.0	17.01	-14.24	7.39±0.05 ¹
10	UGC3853	07 27 39.26	+48 26 45.4	07 27 38.88	+48 26 39.4	936	16.9	15.96	-15.65	7.69±0.05
11	SDSS	07 36 10.30	+09 59 11.0	07 36 10.24	+09 59 10.6	357	7.1	17.90	-11.37	7.48±0.04
12	SDSS	07 37 28.47	+47 24 32.7	07 37 28.46	+47 24 30.5	476	10.4	18.02	-12.54	7.38±0.06 ²
13	UGC3966	07 41 26.00	+40 06 44.0	07 41 23.61	+40 06 11.3	361	8.6	15.32	-14.58	7.62±0.09
14	KK65	07 42 31.20	+16 33 40.0	07 42 31.79	+16 33 36.6	279	8.0	15.51	-14.15	7.93±0.03
15	MGC9-13-52	07 46 56.36	+51 17 42.8	07 46 57.41	+51 17 52.0	445	10.1	16.54	-13.75	7.36±0.04
16	UGC4115 ⁴	07 57 01.80	+14 23 27.0	07 57 00.29	+14 24 09.5	341	7.7	14.81	-14.75	7.58±0.03
17	UGC4426	08 28 28.53	+41 51 22.7	08 28 28.76	+41 51 15.6	397	10.3	15.35	-14.87	7.41±0.04
18	UGC4722	09 00 23.54	+25 36 40.6	09 00 24.91	+25 37 11.7	1789	27.8	14.86	-17.54	7.51±0.04
19	UGC4722C	09 00 26.11	+25 38 21.4	09 00 26.13	+25 38 21.3	1836	27.8	17.21	-15.18	7.35±0.04
20	SDSS	09 29 00.10	+25 02 57.0	09 28 59.70	+25 02 56.3	1661	25.7	19.24	-12.95	7.19±0.05
21	KUG0934+277	09 37 47.65	+27 33 57.7	09 37 47.57	+27 34 11.9	1588	25.1	16.50	-15.58	7.55±0.08
22	UGC5186	09 42 59.10	+33 16 00.2	09 42 58.66	+33 15 56.1	551	10.8	15.99	-14.23	7.59±0.08
23	UZCJ0947+390	09 47 50.25	+39 08 31.7	09 47 49.58	+39 08 41.2	1553	24.7	16.85	-15.19	7.72±0.03
24	SDSS	09 56 33.20	+27 16 49.0	09 56 33.25	+27 16 53.3	1074	17.6	18.13	-13.19	7.26±0.07
25	SDSS	09 57 29.40	+27 45 24.3	09 57 29.25	+27 45 26.2	1184	19.1	18.16	-13.33	7.61±0.03
26	CGCG035-007	09 34 44.72	+06 25 31.8	09 34 44.71	+06 25 31.9	574	9.2	15.22	-14.61	7.70±0.12
27	IC559 ³	09 44 43.96	+09 36 54.1	09 44 44.58	+09 36 49.1	541	9.4	14.98	-14.89	7.70±0.05
28	MRK407	09 47 47.60	+39 05 03.0	09 47 47.64	+39 05 03.2	1589	25.2	15.27	-16.82	7.68±0.05
29	UGC5288	09 51 16.77	+07 49 47.9	09 51 16.78	+07 49 48.0	556	9.5	14.42	-15.61	7.70±0.03
30	PC0956+4751	09 59 18.68	+47 37 02.3	09 59 18.71	+47 37 02.1	1093	18.7	17.14	-14.28	7.81±0.04
31	SDSS	10 15 47.87	+37 44 58.4	10 15 47.87	+37 44 58.4	1272	19.2	17.37	-14.11	7.61±0.04
32	UGC4115 ⁴	07 57 01.80	+14 23 27.0	07 57 02.65	+14 23 13.5	341	7.7	14.81	-14.75	7.61±0.06
33	UGC4117	07 57 25.98	+35 56 21.0	07 57 25.45	+35 56 32.3	773	14.1	15.36	-15.59	7.73±0.03
34	NGC2537	08 13 14.73	+45 59 26.3	08 13 12.66	+45 59 24.9	445	9.9	12.49	-17.71	7.61±0.07
35	IC2233	08 13 58.93	+45 44 34.3	08 13 59.14	+45 44 09.9	553	10.7	13.34	-17.03	7.94±0.03
36	NGC2541	08 14 40.18	+49 03 42.1	08 14 39.73	+49 02 57.7	548	12.5	12.34	-18.36	7.91±0.11
37	NGC2552	08 19 20.14	+50 00 25.2	08 19 22.10	+50 00 05.8	524	11.1	13.0	-17.42	7.95±0.06
38	UGC4704	08 59 00.28	+39 12 35.7	08 59 02.29	+39 12 21.7	596	11.7	14.82	-15.66	8.01±0.04
39	UGC5288	09 51 17.20	+07 49 38.0	09 51 17.04	+07 49 37.5	556	9.5	14.42	-15.61	7.66±0.05
40	UGC5354	09 58 53.40	+47 44 13.0	09 58 49.80	+47 44 14.2	1168	19.7	14.15	-17.39	7.78±0.04

¹) Взвешенное среднее O/H по старому значению 7.45±0.15 и по новому 7.59±0.09.

²) Взвешенное среднее O/H по старому значению 7.24±0.20 и по новому 7.38±0.11.

³) Подробности по системе UGC4722/4722C в главе 4.1.

⁴) Получены две, схожие в пределах ошибок, оценки по спектрам БТА и SDSS. В качестве окончательной, принимаем оценку БТА с лучшей точностью.

2.2.1 Комментарии для некоторых галактик

ККН 38 (J0647+4730). Для этой галактики в щель попали сразу 4 отдельные HII области. Однако, даже для ярчайшей из них отношение сигнал/шум основных линий получилось весьма скромным. Для увеличения отношения сигнал/шум, значение O/H оценено по интегральному спектру всех HII областей, как если бы объект был в 10 раз более далеким. Обычно вариации металличности газа по телу карликовой галактики малы или необнаружимы. Следовательно, допускаем, что значение O/H, полученное по такому суммарному спектру всех 4-х областей, должно быть представительным для галактики ККН 38 в целом. Аналогичный подход был применен, чтобы улучшить отношения сигнал/шум для измерений O/H в самой низкометаллической галактике войда LSBD J0926+3343 [65].

J0706+3020 = UGC 6372A. Эта слабая dIrr галактика была отождествлена, как галактика войда Lynx-Cancer, по результатам целенаправленной спектроскопии на БТА в январе 2015, для проверки ее возможного статуса спутника известной галактики войда UGC 3672. В работе Ченгалура и др. (2016) [115] обнаружено, что данный объект чрезвычайно богат газом ($M(\text{HI})/L_B \sim 17$) и очень голубой, что указывает на его принадлежность к группе “эволюционно-молодых” галактик. Полученная по нашим новым наблюдениям рекордно низкая металличность O/H (на фактор 3-4 ниже, чем ожидаемая для реперной зависимости 2.3) хорошо соответствует предыдущим двум свойствам. Оценка, полученная в данной работе имеет недостаточно хорошую точность (± 0.13 dex). Наши новые неопубликованные наблюдения на БТА позволили улучшить сигнал/шум спектров и подтвердить действительно рекордно низкую металличность для этой галактики, но тем не менее еще не имеют достаточной точности. Однако, для более уверенной оценки O/H этой необычной галактики необходимо получить спектр с соотношением сигнал/шум по меньшей мере в 4 раза выше.

SDSS J0723+3621. Для этой галактики имеем 2 отдельные HII области на щели, но для них отношение сигнал/шум снова достаточно скромное. Для улучшения точности и надежности оценки O/H галактики, спектры этих HII областей были сложены, предполагая, что это даст репрезентативную оценку O/H для галактики в целом.

Две галактики, принадлежащие к группе из дюжины наиболее ярких объектов войда, проявляют спектры, нетипичные для HII областей. Первая из них – это **J0917+2525 (IC 2450=MRK 1230)** с абсолютной величиной $M_B = -18.1$. Ее морфологический тип – S0:. По диагностическим диаграммам $\log(I(\text{OIII}\lambda 5007)/I(\text{H}\beta))$ от $\log(I(\text{NII}\lambda 6584)/I(\text{H}\alpha))$ [116] SDSS спектр её центральной части (показан на рис. А.3 в приложении А) классифицируется,

как спектр SBN (Starburst Nuclei, с активным ядром) типа.

Другая галактика **J0956+2713 (IC 2520)**, $M_B = -17.2$, – это диск с сильно искаженной морфологией, возможно, в результате недавнего взаимодействия или слияния. На диагностических диаграммах SDSS спектр ее центральной части также классифицируется, как спектр SBN типа. Спектры на БТА для трех компактных узлов на периферии IC 2520, ожидаемые как более или менее типичные HII области, также показывают отношения линий SBN типа (см. рис. A.4 в приложении A). Из-за того, что спектры внешних областей имеют такие необычные свойства, более детальное изучение этой галактики представляет большой интерес.

Для галактики **IC 559 = J0944+0936** был получен спектр SDSS для слабой HII области на краю диска. Берг с соавторами (2012) [45] получили, с помощью прямого T_e метода, металличность для яркой HII области на краю, которая на 0.36 ± 0.10 dex больше нашей (смотрите подраздел 2.2.2 для обсуждения этого редкого случая).

Для галактики **UGC4115** мы получили оценки содержания кислорода O/H как из спектров SDSS, так и по нашим новым спектрам БТА. В таблице 2.2 мы приводим оба значения. Однако, они схожи в пределах их неопределенностей, поэтому в качестве окончательной мы принимаем оценку, полученную по БТА, как более надежную.

Значительное число галактик в войде Lync-Cancer имеет доступные спектры в базе данных SDSS DR7, но их качество не позволяет получить приемлемые оценки O/H. Дополнительная спектроскопия с высоким отношением сигнал/шум из различных альтернативных источников может помочь в оценке O/H для объектов, приведенных ниже (в скобках указаны эмиссионные линии, видимые в спектрах SDSS): J0831+4104 (только $H\alpha$ и дублет [SII]), J0845+1519 (только $H\alpha$, дублет [SII] и зашумленная [OIII]5007), J0929+1155 (слишком низкое отношение сигнал/шум для важных эмиссионных линий), J0943+4134 и J0944+1000 (только слабая $H\alpha$), UGC 5209 (J0945+3214) (только Бальмеровские абсорбции), J0954+3620 (только $H\alpha$).

Несколько галактик войда, представленных в данной работе, имеют спектры с довольно слабыми эмиссионными линиями и/или низкими отношениями сигнал/шум. Однако, использование полуэмпирического метода из [37] в большинстве случаев достаточно для получения первого приближения параметра $12+\log(O/H)$ в шкале прямого T_e метода, с точностью $\sim 0.10-0.15$ dex.

2.2.2 Оценки O/H из литературы

Для увеличения статистической значимости выводов из предыдущего исследования эволюционного статуса галактик в войде, естественно объединить все новые данные O/H с оценками из предыдущих работ, включая работы Пустильника и др. (2011) [34, 35]. Для этого оценки из литературы были пересмотрены и обновлены с использованием собственных калибровок методов (подробнее в разделе 1.4). С учетом новых оценок O/H для галактик, у которых ранее данные о металличности отсутствовали, общее число галактик войда с известными O/H составило 81, то есть 75 % от текущей выборки галактик войда.

В таблице 2.3 представлены обновленные основные параметры для 50 галактик войда, взятые из литературы. Из них ~ 80 % основаны на данных из упомянутых работ [34, 35], в которых все наблюдения и анализ выполнены аналогично нашим. Данные из работ [37, 94, 45, 95] получены с помощью длиннощелевой спектроскопии на больших телескопах и обработаны стандартным образом. Поэтому их можно непосредственно сравнивать с тем, что получено из наших наблюдений. Около 20% галактик имеют оценки O/H как у нас, так и в других работах. Эти значения согласуются в пределах приведенных ошибок. В таких случаях, чтобы получить более надежные значения O/H, мы используем взвешенные средние значения.

В таблице 2.3 приведены следующие данные: колонка **1** – имя или префикс SDSS; **2** и **3** – координаты галактики (J2000); **4** – гелиоцентрическая скорость; **5** – принятое расстояние в Мпк относительно центра Местной Группы, которое определено аналогично табл. 2.2 с учетом для большой пекулярной скорости, как в [60] (смотрите подробное описание в [33]); **6** и **7** – принятая интегральная B величина и соответствующая абсолютная величина; **8** – металличности $12+\log(\text{O}/\text{H})$, полученные с помощью прямого метода с ошибкой 1σ (если имеется, со ссылкой на источник в колонке 10); **9** – металличность $12+\log(\text{O}/\text{H})$, принятая для дальнейшего анализа. Последняя величина берется из различных источников, указанных в колонке **10** следующим образом: (1) – индивидуальное или средневзвешенное O/H для двух или более HII областей в одной галактике по данным ВТА, оцененное классическим(прямым) T_e методом; (2) – наиболее надежная оценка O/H из спектров ВТА, как средневзвешенное прямого, полуэмпирического [37] и эмпирического методов из [117, 40], когда их ошибка составляла $\log(\text{O}/\text{H}) \lesssim 0.20$ dex (и [39], если $12+\log(\text{O}/\text{H}) < 7.90$). В тех случаях, когда ошибка средневзвешенного была меньше, чем 0.03 dex, мы приняли минимальное значение 0.03 dex; (3) – то же, что и в (2), но с включением в средневзвешенное также значений O/H, полу-

ченных эмпирическими методами из [40, 41, 99], которые включают в себя, в дополнение к сильным линиям кислорода, интенсивности [NII] λ 6584 и [SII] λ 6716,6730. Однако, использовать методы с включением интенсивности линии азота нужно с осторожностью. Это связано с тем, что в работе Санчес Альмейда и др. (2015) [118] по массовому исследованию O/H для галактик SDSS обнаружено, что порядка 10% малометаллических галактик показывают повышенное содержание азота и усиленные линии [NII] λ 6584. Поэтому такие оценки были использованы только в тех случаях, когда они не показывали систематическое смещение относительно значений O/H, полученных только по сильным линиям кислорода. Кроме того, в связи с низким отношением сигнал/шум в линии [NII] λ 6584 для многих наших спектров, последние оценки имеют ошибки $\gtrsim 0.20$ dex и в таких случаях не учитываются; (4) – то же, что и в (2), но на основании спектров SDSS; (5) – то же, что и в (3), но на основании спектров SDSS; (6) – O/H, принятое из литературы и пересчитанное (при необходимости) с учетом уточненных атомных констант [89]. Метки после (6) – ссылки на источник в примечании к данной таблице. В случае, когда это значение является взвешенным средним из нескольких источников, все они могут быть найдены в колонке 10.

Для DDO 68 недавний анализ данных с космического телескопа Хаббла, проведенный Тихоновым и др. (2014) [121], выявил два явных компонента малого мерджинга с сильно отличающимися металличностями. Для яркого компонента DDO 68A, который включает основную долю интегрального света от DDO 68, они определили металличность звезд на уровне $Z = 0.2 Z_{\odot}$, что соответствует $12+\log(\text{O}/\text{H}) \sim 8.0$. Так как до сих пор нет прямых данных по металличности газа в DDO 68A, мы принимаем последнее значение в качестве представительного для этого компонента. Для слабого, очень низкометаллического компонента DDO 68B ($12+\log(\text{O}/\text{H}) = 7.14-7.20$ [64, 37, 45]) значение параметра M_B не очень определено и принято нами условно слабее на 2^m по отношению к главному компоненту.

Несколько новых оценок O/H для галактик войда Lync-Cancer были добавлены из статьи Изотова и др. (2012) [94], посвященной поиску очень низкометаллических галактик среди эмиссионных объектов SDSS. Это в основном слабые галактики J0810+1837, J0843+4025, KKH 46, J0931+2717, UGC 5272B со значениями O/H менее, чем 1/10 от солнечной величины. Совсем недавно обнаруженная, самая низкометаллическая галактика AGC 198691, с металличностью $12+\log(\text{O}/\text{H}) = 7.02 \pm 0.03$ [95] (по прямому T_e методу), также находится в войде Lync-Cancer и, вероятно, является спутником галактики UGC 5186, которая на $\sim 4^m$ ярче. Поэтому она добавлена к обновленной выборке галактик войда в таблице 2.3 в последний момент.

Таблица 2.3: Основные параметры галактик войда Lунх-Сансер с известными значениями O/H

№	Имя или префикс (1)	Координаты J2000		V_{hel} , km/s (4)	D, Mpc (5)	B_{tot} , mag (6)	M_B^\dagger , mag (7)	12+log(O/H)	12+log(O/H)	Источ. O/H (10)
		(2)	(3)					Direct (8)	Принято (9)	
1	UGC3475	06 30 28.86	+39 30 13.6	487	10.30	14.97	-15.88	...	8.00±0.03	2
2	UGC3476	06 30 29.22	+33 18 07.2	469	9.84	14.96	-16.02	7.71±0.07	7.71±0.03	3
3	UGC3501	06 38 38.40	+49 15 30.0	449	10.07	17.20	-13.31	7.56±0.07	7.55±0.03	3
4	UGC3600	06 55 40.00	+39 05 42.8	412	9.30	15.92	-14.22	7.69±0.16	7.60±0.03	2
5	UGC3672	07 06 27.56	+30 19 19.4	994	16.93	16.04	-15.43	7.90±0.13	7.94±0.03	3
6	UGC3698	07 09 16.80	+44 22 48.0	422	9.60	15.41	-14.92	7.74±0.08	7.72±0.03	2
7	NGC2337	07 10 13.60	+44 27 25.0	436	9.79	13.48	-16.85	8.38±0.06	8.38±0.06	1
8	UGC3817	07 22 44.48	+45 06 30.7	437	9.82	15.96	-14.44	7.96±0.13	7.98±0.03	3
9	UGC3860	07 28 17.20	+40 46 13.0	354	7.81	15.21	-14.50	7.79±0.08	7.83±0.03	2
10	UGC3876	07 29 17.49	+27 54 01.9	854	15.01	13.77	-17.31	7.95±0.16	7.78±0.07	2
11	SDSS	07 30 58.90	+41 09 59.8	874	15.70	16.67	-14.58	8.04±0.05	7.99±0.04	5
12	DDO 47	07 41 55.00	+16 48 03.0	272	8.04	14.89	-14.78	...	7.76±0.03	3
13	SDSS	07 44 43.72	+25 08 26.6	749	12.95	18.11	-12.63	...	7.23±0.03	5
14	MCG9-13-56	07 47 32.10	+51 11 29.0	439	10.00	15.12	-15.18	7.70±0.03	7.62±0.03	6b
15	UGC4117	07 57 25.98	+35 56 21.0	773	14.12	14.81	-15.59	...	7.73±0.03	3
16	UGC4148	08 00 23.68	+42 11 37.0	716	13.55	15.66	-15.18	...	7.82±0.05	5
17	MCG7-17-19	08 09 36.10	+41 35 40.0	704	13.37	15.46	-15.39	7.85±0.12	7.88±0.04	2,5
18	SDSS	08 10 30.65	+18 37 04.1	1483	23.05	18.39	-13.59	7.83±0.20	7.85±0.05	5,6i
19	SDSS	08 12 39.53	+48 36 45.4	521	11.05	17.36	-13.08	7.27±0.06	7.27±0.06	6b
20	NGC2537	08 13 14.73	+45 59 26.3	445	9.86	12.49	-17.71	...	8.22±0.10	4,6j
21	IC2233	08 13 58.93	+45 44 34.3	553	10.70	13.34	-17.03	8.08±0.19	8.08±0.19	5,6a
22	NGC2541	08 14 40.18	+49 03 42.1	548	12.00	12.34	-18.28	8.23±0.03	8.02±0.10	5,6a
23	NGC2552	08 19 20.14	+50 00 25.2	524	11.11	13.01	-17.42	8.16±0.04	8.16±0.04	5,6a,j
24	KUG 0821+321	08 25 04.90	+32 01 05.1	648	12.25	16.91	-13.73	...	7.55±0.04	2
25	HS 0822+3542	08 25 55.43	+35 32 31.9	720	13.49	17.88	-12.97	7.44±0.02	7.44±0.02	6e
26	SDSS	08 43 37.98	+40 25 47.2	614	12.05	17.90	-12.65	...	7.49±0.03	3,5,6b
27	SDSS	08 52 33.75	+13 50 28.3	1511	23.08	17.40	-14.58	7.28±0.10	7.28±0.10	6d
28	UGC4704	08 59 00.28	+39 12 35.7	596	11.74	14.82	-15.66	7.97±0.19	7.94±0.05	2
29	SDSS	08 59 46.93	+39 23 05.6	588	11.63	17.25	-13.19	...	7.57±0.06	6b
30	KKH46	09 08 36.54	+05 17 26.8	598	10.00	17.21	-12.99	7.68±0.03	7.61±0.05	6i
31	SDSS	09 11 59.43	+31 35 35.9	750	13.52	18.05	-12.68	7.50±0.05	7.56±0.03	5,6b
32	SDSS	09 26 09.45	+33 43 04.1	536	10.63	17.30	-12.91	7.12±0.02	7.12±0.02	6f
33	SDSS	09 28 59.06	+28 45 28.5	1229	19.90	16.76	-14.82	...	7.68±0.15	4
34	SDSS	09 31 36.15	+27 17 46.6	1505	23.60	18.00	-13.94	...	7.48±0.06	5,6i
35	SDSS	09 40 03.27	+44 59 31.7	1246	20.71	18.01	-13.63	...	7.39±0.03	4
36	KISSB23	09 40 12.67	+29 35 29.3	505	10.21	16.07	-14.08	7.60±0.05	7.52±0.03	5,6b
37	AGC198691	09 43 32.35	+33 26 57.6	514	10.80	19.82	-10.40	7.02±0.03	7.02±0.03	6n
38	IC 559	09 44 43.82	+09 36 57.5	541	9.40	14.98	-14.89	8.07±0.10	7.89±0.10	5,6j
39	SDSS	09 47 18.35	+41 38 16.4	1389	22.56	17.92	-13.92	7.77±0.03	7.77±0.03	5
40	UGC5272B	09 50 19.49	+31 27 22.3	539	10.27	17.56	-12.60	7.67±0.13	7.57±0.04	2,4,6i
41	UGC5272	09 50 22.40	+31 29 16.0	520	10.30	14.45	-15.71	7.87±0.05	7.84±0.03	3,5,6j
42	SDSS	09 51 41.67	+38 42 07.3	1435	23.07	17.46	-14.44	...	7.91±0.11	5
43	DDO68A	09 56 45.70	+28 49 35.0	502	12.75	14.60	-16.01	...	8.00±0.10	6h
44	DDO68B	09 56 47.70	+28 49 23.0	502	12.75	16.6:	-14.01	7.14±0.04	7.14±0.03	6b
45	SDSS	10 00 36.50	+30 32 09.8	501	9.90	18.14	-11.92	...	7.42±0.03	2,5
46	UGC5427	10 04 41.05	+29 21 55.2	498	9.79	14.91	-15.15	7.99±0.09	7.85±0.05	3
47	UGC5464	10 08 07.70	+29 32 34.4	1003	16.90	15.77	-15.47	7.92±0.26	7.61±0.06	2
48	SDSS	10 10 14.96	+46 17 44.1	1092	18.58	18.23	-13.15	...	7.79±0.03	5
49	UGC5540	10 16 21.70	+37 46 48.7	1162	19.16	14.63	-16.85	...	7.95±0.07	5
50	HS 1013+3809	10 16 24.50	+37 54 46.0	1173	19.30	16.02	-15.48	7.59±0.04	7.59±0.04	6g

(7) † – M_B из [34, 119] и NED

(10) Ссылки на O/H: 1-6 – смотрите описание таблицы в тексте

Ссылки из литературы: a–[101]; b–[37]; d–[35]; e–[57]; f–[65]; g–[120]; h–[121]; i–[94]; j–[45]; n –[95]

Берг с соавторами (2012) [45] изучали металличности для подвыборки карликовых галактик в Местном Объеме. Их “комбинированная” выборка включает в себя 28 галактик с расстояниями, не зависящими от скоростей, то есть полученными по светимости верхушки ветви красных гигантов (TRGB, Tip of the Red Giant Branch) или цефеидам. Для них значения металличности O/H оценены прямым T_e методом. Они получили также хорошие спектры для оценок O/H прямым методом для галактик войда Lynx-Cancer: NGC 2537, NGC 2552, IC 2233, UGC 5272, DDO 68B (для самой яркой HII области в Северном кольце), IC 559 и CGCG 035-007. Эти объекты не вошли в их “комбинированную” выборку, так как для них нет оценок (за исключением DDO 68) расстояний по методу TRGB. Более подробное обсуждение этой подвыборки приводится в разделе 2.3.1.

Для первых пяти объектов в таблице 2.3 наши оценки O/H и оценки из работы [45] согласуются в пределах ошибок. Для дальнейшего анализа, мы объединяем их самые надежные оценки O/H по каждому объекту. В частности, первые три – это спирали с промежуточными светимостями, в которых найдены относительно небольшие вариации O/H вдоль тела, ~ -0.3 dex между центром и оптическим радиусом R_{25} [122]. В работе [123] металличность газа в таких системах принимается равной значению, полученному на радиусе $R \sim R_{25}/2$. Мы объединяем все имеющиеся данные по измеренной O/H, чтобы получить наилучшую оценку последнего значения.

Для UGC 5272 и DDO 68B оценки по результатам спектроскопии на БТА, и из работы [45], полученные с помощью прямого метода, согласуются, поэтому объединяем их с весами, определенными из соответствующих ошибок. Для IC 559 (таблица 2.2) в SDSS и [45] получены спектры двух разных HII областей, на юго-восточном и западном краю основного тела галактики, с расстоянием ~ 0.6 кпк ($25''$) между ними. Полученные для них $12+\log(\text{O}/\text{H})$ существенно различаются: 7.71 ± 0.05 и 8.07 ± 0.10 соответственно. Это может указывать на реальные вариации O/H вдоль тела галактики, например, из-за притока низкометаллического межгалактического газа [118]. Эта галактика, безусловно, заслуживает более глубокого изучения. Для дальнейшего анализа IC 559 условно принимаем в таблице 2.3 среднее значение в логарифмической шкале, а именно 7.89 ± 0.10 dex.

Для типичной иррегулярной галактики CGCG 035-007 мы получили оценку O/H по спектру SDSS DR7 для слабой HII области, расположенной на $\sim 7''$ западнее центра галактики. Берг с соавторами (2012) [45] получили спектр HII области “A”, расположенной западнее на $\sim 5''$. В этом спектре они измеряют поток линии [OIII]4363 на уровне 3σ , но они не приво-

дят значения O/H для этой области. Поэтому для соответствующих потоков линий из их таблицы 3 получаем оценку $12+\log(O/H)=7.71\pm 0.13$, которая хорошо согласуется с нашей средневзвешенной оценкой 7.70 ± 0.12 в таблице 2.2. Таким образом, мы принимаем первое значение O/H в качестве представительного, полученного прямым методом.

2.3 Обсуждение результатов

Одной из основных целей данного исследования была проверка вывода о значимом различии в металличностях популяции галактик войда и аналогичных галактик в плотном окружении из Местного Объема, полученного в исследовании 48 галактик войда Lух-Cancer из работы Пустильника и др. (2011) [34].

2.3.1 Контрольная выборка и ее соотношение “ $O/H - M_B$ ”

Наиболее подходящая контрольная выборка для сравнения — 38 галактик Местного Объема из работы Берг и др. (2012) [45], для которых есть оценки расстояний по TRGB или цефеидам, а также величины O/H на основе прямого метода (их так называемая “комбинированная” выборка).

Для данной выборки авторы получают линейную регрессию между $12+\log(O/H)$ и M_B : $12+\log(O/H) = (6.272\pm 0.21) + (-0.107\pm 0.01)M_B$, с дисперсией в $\log(O/H) - 0.15$ dex. Однако, в иллюстрации этой регрессии, показанной на их рис. 3 (нижняя панель), есть ошибка, вероятно, связанная со смещением расстояния по оси Y (частное сообщение от Даниелы Берг). Чтобы исправить эту ошибку, на рис. 2.1 наносим положения их 38 галактик “комбинированной” выборки и получаем линейную регрессию, которая идет выше, чем сплошная красная линия из их статьи. Также на этом рисунке показаны две параллельные штрих-пунктирные синие линии, ограничивающие диапазон ± 0.15 dex, которые соответствуют среднеквадратичному разбросу их выборки относительно линейной регрессии. Отметим, что только $\sim 20\%$ их галактик, в пределах ошибок O/H , выпадают из интервала ± 0.15 dex, и лишь несколько объектов (5–8 %) находятся ниже линии -0.15 dex.

Выборка галактик из работы Берг и др. (2012) [45] ограничена по $M_B \sim -11$. Для того, чтобы показать, как продолжается их линейная регрессия в область $M_B \sim -9$, добавляем к их первоначальной выборке из 38 галактик недавно обнаруженную чрезвычайно низкометаллическую карликовую галактику Leo P (AGC208583, [126]), которая удовлетворяет критериям отбора “комбинированной” выборки. Ее металличность $12+\log(O/H)=7.17\pm 0.04$ [124] полу-

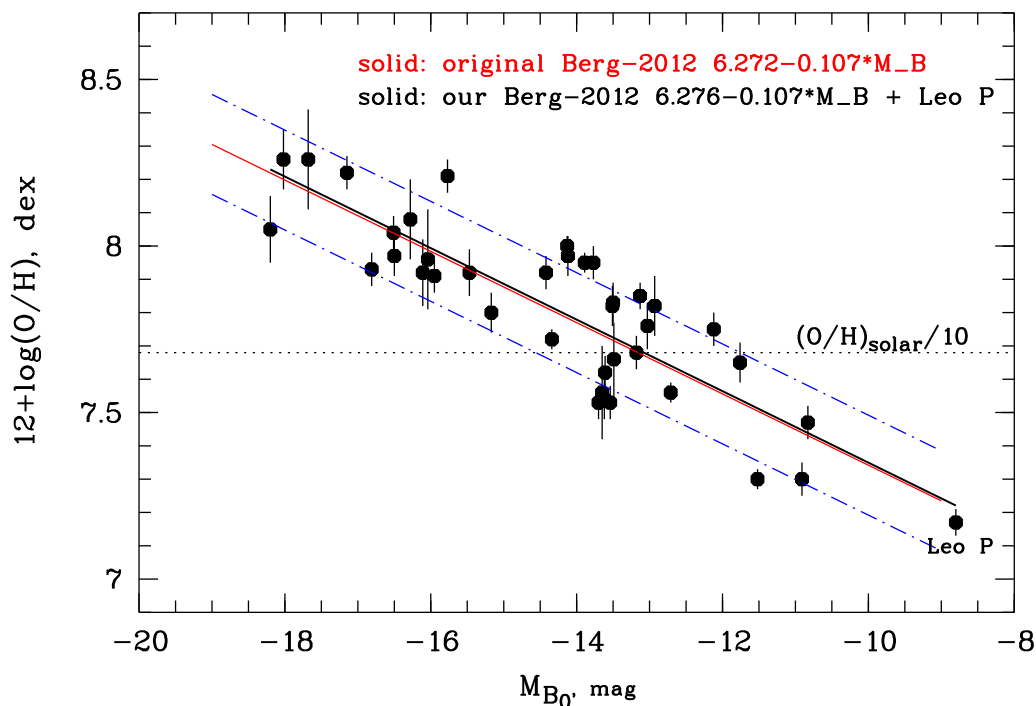


Рис. 2.1: Соотношение между $\log(\text{O}/\text{H})$ и M_B для 38 галактик Местного Объема “комбинированной” выборки (O/H получены с помощью прямого метода, и расстояния – по TRGB или цефеидам, из [45], см. текст). Сплошная красная линия – оригинальная линейная регрессия по их данным. Две штрих-пунктирные линии показывают ее разброс $\pm\sigma(\text{O}/\text{H})=0.15$ dex. Обратите внимание, что только небольшая часть “комбинированной” выборки галактик выпадает из этого интервала. Черная сплошная линия – линейная регрессия (39 точек) с включением галактики Leo P из [124, 125].

чена прямым методом, а ее TRGB расстояние – 1.62 ± 0.15 Мпк [125]. На рис. 2.1 черной сплошной линией показана линейная регрессия по 39 объектам (оригинальная “комбинированная” выборка галактик, а также Leo P). Она проходит очень близко к оригинальной линии регрессии из [45], отличаясь лишь на 0.004 dex в $\log(\text{O}/\text{H})$.

2.3.2 Соотношение “ $\text{O}/\text{H} - M_B$ ” для галактик войда Lync-Cancer

В качестве предварительного шага на рис. 2.2 для всех 40 галактик войда Lync-Cancer (из таблиц 2.2 и 2.3) нанесены значения $\log(\text{O}/\text{H})$ (с соответствующими барами ошибок), полученные с помощью прямого метода по спектрам БТА, SDSS или в литературе. Этот график иллюстрирует общую тенденцию пониженной металличности для галактик войда с оценками O/H на основе прямого T_e метода. Позиции трех галактик из VGS (Void Galaxy Survey, Обзор Галактик Войдов) [127] со значениями O/H , полученными с помощью прямого метода, показаны звездочками с барами ошибок. Они рассмотрены в разделе 2.3.3. Красная сплош-

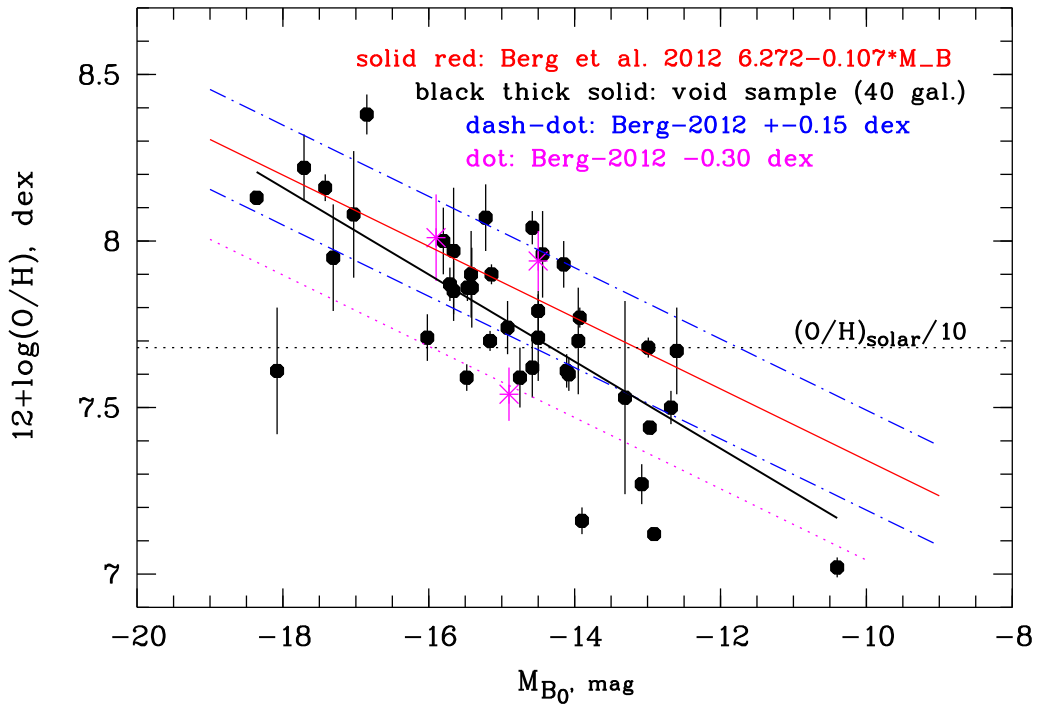


Рис. 2.2: Соотношение между $\log(O/H)$ и M_B для всех 40 галактик войда Lynx-Cancer со значениями O/H , полученными с помощью прямого метода. Сплошная “диагональная” красная линия – линейная регрессия для “комбинированной” выборки из 38 галактик Местного Объема [45] (смотрите текст). Две штрих-пунктирные линии аналогичны тем, что нанесены на рис. 2.1. Пунктирная линия проходит на 0.30 dex ниже и отделяет область очень низких металличностей O/H (с фактором 2-4) для галактик войда. Звездочками показаны три галактики из Обзора Галактик Войдов (Void Galaxy Survey) с оценками O/H по прямым методам из работы Крекел и др. (2012)[110] (см. текст).

ная линия и две пунктирные линии, на ± 0.15 dex от нее, идентичны тем, что показаны на рис. 2.1. Также нанесена пунктирная линия, проходящая на $2 \sigma_{\log(O/H)}$ ниже линии регрессии из работы Берг и др. (2012) [45] (то есть на 0.30 dex, или на фактор 2 в O/H), отделяющая галактики с самыми низкими значениями O/H .

Жирная сплошная (черная) линия – линейная регрессия по 40 галактикам войда. Она отражает значимое отклонение вниз для выборки галактик войда относительно соотношения для объектов контрольной выборки. Действительно, 11 галактик войда, или 27.5% подвыборки с оценками O/H по прямому методу, располагаются ниже линии регрессии на 0.15 dex по сравнению с (5-8)% контрольной выборки. Кроме того, 5 галактик войда (12.5%) находятся ниже линии регрессии для контрольной выборки на 0.30 dex. Это является ясным свидетельством пониженной металличности для выборки галактик войда.

На следующем шаге, для сравнения выборки галактик войда Lynx-Cancer с “комбиниро-

ванной” выборкой галактик Местного Объема, мы используем все доступные значения O/H для 81 галактик войда из таблиц 2.2 и 2.3. Для половины из них оценки O/H по прямому методу недоступны из-за отсутствия в их спектрах слабой линии $[OIII]\lambda 4363$. Кроме того, для части галактик войда, со значениями O/H по прямому методу, ошибки составляют ~ 0.10 dex или более. Поэтому для них используем оценки полуэмпирического метода [37] и эмпирических методов из работ [38] и [39] с учетом калибровок, описанных в разделе 1.4. Эти оценки дают разумное соответствие с оценками O/H , полученными с помощью прямого метода, с разбросом в $\lesssim 0.1$ dex.

На рисунке 2.3 нанесены значения для 81 галактики в войде Lync-Cancer с известным параметром O/H и соответствующими барами ошибок. Эти данные включают в себя все принятые значения O/H из таблиц 2.2 и 2.3. Как сказано в описании этих таблиц, для получения наиболее надежных оценок O/H , в большинстве случаев бралось средневзвешенное значение по прямому методу (если имелись) и по полуэмпирическим и эмпирическим оценкам O/H , точность которых описывается в разделе 1.4. Эти значения O/H использованы для анализа соотношения “ O/H к M_B ” для галактик войда и сравнения с аналогичным соотношением для подобных галактик позднего типа из более плотного окружения [45]. Линейная регрессия для всех галактик войда показана сплошной черной линией. Среднеквадратичный разброс в $\log(O/H)$ относительно линейной регрессии – 0.20 dex.

Анализ соотношения для существенно расширенной выборки галактик войда Lync-Cancer и её сравнение с контрольной выборкой из [45], подтверждает ранние выводы [34] о том, что галактики войда имеют систематически пониженные металличности. Поскольку линия регрессии идет не параллельно линии регрессии реперной выборки, для оценки сдвига мы используем именно середину диапазона M_B ($M_B = -14.5$), где для галактик войда Lync-Cancer наблюдается сдвиг вниз на 0.2 dex по отношению к контрольной выборке. Это означает, что в среднем галактики войда имеют значение O/H для данного M_B ниже на $\sim 37\%$ или в 1.58 раз меньше, чем для объектов реперной выборки. Из них около четверти имеют более чем в два раза пониженные металличности. Большой разброс для галактик войда, относительно их линии линейной регрессии, по сравнению с контрольной выборкой (0.202 dex в отличие от 0.15 dex) может указывать на большие ошибки расстояний и параметров O/H , а также на большее разнообразие эволюционных сценариев для галактик войда. Действительно, около 40% выборки галактик войда попадает в полосу $\pm 15\%$ для реперной выборки. Поэтому при небольшой статистике галактик войда разница соотношения “ O/H от M_B ” с контрольной

выборкой может оказаться незначительной, как, вероятно, для галактик VGS [127] (обсуждается ниже).

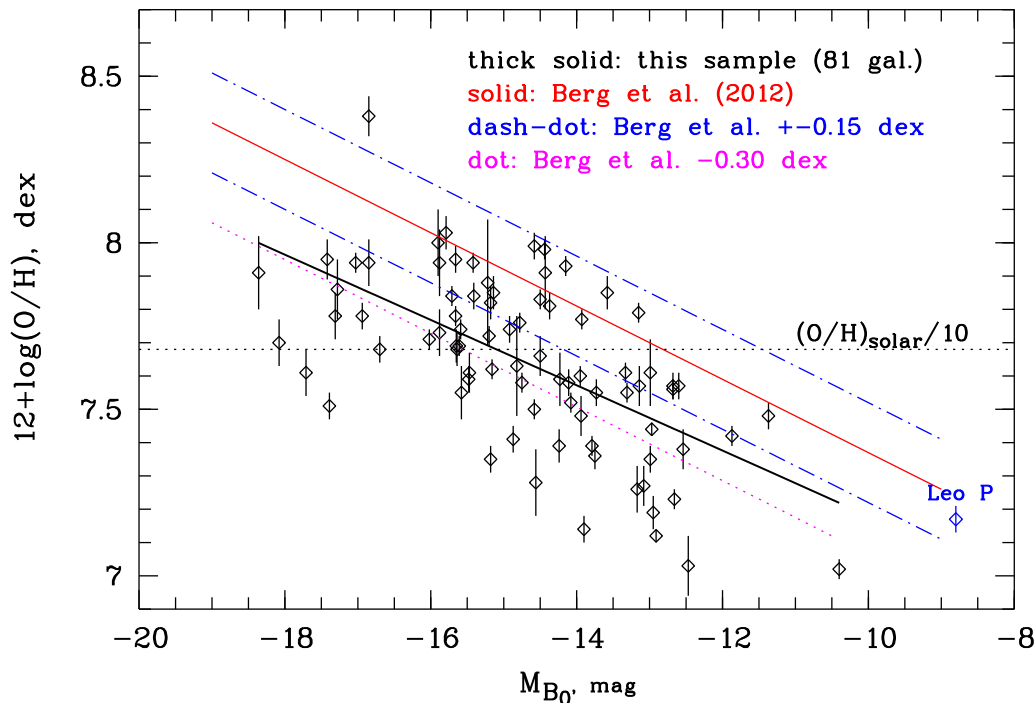


Рис. 2.3: Зависимость между $\log(\text{O}/\text{H})$ и абсолютной звездной величиной в В фильтре для 81 галактики войда Lynx-Cancer с известными O/H (пустые ромбы с барами ошибок). Жирной черной линией показана линейная регрессия для всех галактик войда со среднеквадратичным разбросом $\sigma(\text{O}/\text{H})=0.20$ dex. Сплошная диагональная красная линия показывает линейную регрессию аналогичных данных по галактикам Местного Обьема из работы Берг и др. (2012) [45]. Две штрих-пунктирных линии показывают их разброс, равный $\pm\sigma(\text{O}/\text{H})=0.15$ dex. Пунктирная линия соответствует значениям на 0.30 dex ниже и отделяет область с низкими металличностями O/H (ниже на фактор 2-4) для объектов войда.

2.3.3 Сравнение с другими результатами

Кроме результатов данной работы на сегодняшний день опубликовано всего 2 работы, которые пытались проверить отличия металличности галактик в войдах и в более плотном окружении, используя статистический подход. В статье нашей группы [34] проводилось аналогичное данной работе исследование галактик войда Lynx-Cancer, но на меньшей статистике (48 галактик). Полученные ими результаты полностью согласуются с новыми данными настоящей диссертации. Работа Крекел и др. (2015) [127] была фактически первой в этом направлении после [34]. Они получили O/H для 8 карликов в 7 пустотах с M_r в диапазоне $[-14.0, -16.2]$. Только для трех из восьми галактик была обнаружена слабая линия

[ОIII] λ 4363, и получены оценки O/H с помощью прямого метода. А для остальных использовались методы с плохой привязкой к шкале прямого метода.

В отличие от результатов данной работы, Крекел и др. (2015) [127] не находят свидетельств пониженной металличности газа для галактик войдов. Однако, следует отметить, что их результаты из-за очень небольшой статистики не выглядят убедительными. Для того чтобы продемонстрировать, что они не противоречат нашим выводам, на рис. 2.2 нанесены упомянутые три галактики из VGS (звездочками) со значениями O/H, полученными по прямому методу, и галактики из нашей выборки, для которых оценки O/H получены также прямым методом. На соотношении “O/H от M_B ” нанесена линия регрессии для реперной выборки [45]. Три галактики из VLG попадают в ту же область, что и галактики войда Lync-Cancer с оценками O/H по прямому методу. А именно, две из них располагаются в пределах ± 0.15 dex относительно основной линии регрессии из [45], и еще одна, VGS39a, находится ниже линии регрессии для реперной выборки на ~ 0.30 dex. Поэтому, когда для сравнения берутся только самые надежные данные VGS, они согласуются с нашими результатами.

2.3.4 Влияние точности расстояний на полученные выводы

Как уже упоминалось в описании столбцов таблиц 2.2 и 2.3, расстояния для галактик войда взяты из работы [33]. Для большинства галактик выборки, которые не имеют расстояний, не зависящих от скорости, авторы используют модель из Талли и др. (2008) [60]. Эта модель учитывает движение Местного Листа, включая Местную Группу, в направлении от Местного Войда, что приводит к большой пекулярной скорости с максимальными значениями ~ 330 км с $^{-1}$.

Поскольку точность оценок расстояний для изученных галактик войда переходит в соответствующие ошибки светимостей, это могло бы сказаться на результатах и выводах данной работы. Кратко обсудим проблему определения расстояний и их неопределенности, и как это в итоге может повлиять на оценки светимости. Сдвиг 0.20 dex в $\log(O/H)$ между галактиками войда и контрольной выборки в середине диапазона M_B (смотрите рис. 2.3) соответствует разнице в $\sim 2.2^m$ в M_B с тем же значением $\log(O/H)$. Если бы указанная разница была результатом систематического сдвига из-за использования данной модели расстояний, то это приводило бы к их увеличению на фактор ~ 2.7 . Среднее расстояние для выборки галактик в пустоте составляет ~ 12 Мпк, с полным диапазоном от 7 до 27 Мпк. Семь галактик войда Lync-Cancer имеют расстояния, определенные с помощью метода TRGB. Соответствующее

медианное значение скорости Хаббловского потока $V_{LG} \sim 870 \text{ км с}^{-1}$.

Если упомянутый выше сдвиг в M_B был связан с систематическим сдвигом расстояний для галактик войда, это привело бы к среднему сдвигу для соответствующих радиальных скоростей $\sim 550 \text{ км с}^{-1}$ (или на фактор 2.7, от 320 до 870 км с^{-1}). Как найдено из сравнения модельно скорректированных расстояний с расстояниями, не зависящими от скоростей, для 21 объекта в этой области неба, среднее отклонение составляет всего $9 \pm 32 \text{ км с}^{-1}$. Если принимать случайную погрешность оценок расстояний, полученных с помощью модели, в два раза большей (64 км с^{-1}), то получаем медианные ошибки для расстояний $\sim 7.5 \%$ и соответствующую добавку для ошибки абсолютной величины $\sim 0.15^m$. Это сравнимо или несколько больше типичных ошибок интегральных величин для галактик, о которых идет речь. И это намного меньше наблюдаемого сдвига M_B на уровне -2.2^m от линии регрессии контрольной выборки для того же значения $\log(O/H)$. Таким образом, неопределенность расстояний для галактик войда не может вызвать наблюдаемый эффект (или даже дать заметный вклад) пониженной металличности O/H относительно реперной выборки.

2.4 Выводы

1. Приведены результаты спектральных наблюдений на БТА и анализ спектров SDSS, на основе которых удалось определить содержание кислорода для 39 карликовых и маломассивных галактик позднего типа, принадлежащих войду Lynx-Cancer.
2. Более половины галактик войда имеют низкие металличности, с $(O/H)_{\odot}/10$ или $12 + \log(O/H) < 7.68$. Для семи самых низкометаллических галактик, найденных (или подтвержденных) в этом исследовании, $12 + \log(O/H)$ оценены в диапазоне [7.03–7.38].
3. В центральной части войда найдена карликовая иррегулярная галактика J0706+3020 ($M_B \sim -12.5$, слабый спутник UGC 3672), чрезвычайно богатая газом и очень голубая, согласно Ченгалур и др. (2016) [115]. По результатам нашей спектроскопии на БТА получена оценка O/H на уровне $\sim 1/50$ солнечного значения. Таким образом, наряду с другой недавно найденной в этом войде галактикой AGC198691 это самый низкометаллический карлик в ближней Вселенной. С учетом этих недавних находок, список самых необычных (“эволюционно молодых”) галактик существенно расширен.
4. По результатам этой работы полное число галактик текущей выборки войда Lynx-Cancer, с известными оценками O/H , увеличено до 81. Проведено сравнение зависи-

мости “ $\log(\text{O}/\text{H})$ от M_B ” с аналогичной зависимостью для контрольной выборки подобных галактик в Местном Объемe, находящихся в более плотном окружении. Получен уверенный результат о пониженной металличности (в среднем на 37% или в ~ 1.6 раза) для галактик войда Lutz-Saenger. Это подтверждает вывод, сделанный в работе нашей группы [34] по меньшему числу галактик.

Глава 3

Фотометрия выборки карликовых галактик войда Lynx-Cancer

3.1 Введение и цели

Сравнение предсказываемого числа гравитационно-связанных гало DM и числа наблюдаемых галактик в войдах обнаруживает недостаток последних в несколько раз. Причина этого феномена, сформулированного в разной форме в работах де Лаппаран (1995) [128], Пиблса [12], Тихонова и Клыпина (2009) [112], не ясна. Можно надеяться, что по мере усовершенствования моделей формирования и эволюции галактик, разрыв между числом гало DM и реальными галактик уменьшится. Одной из причин упомянутого феномена может быть повышенная доля в войдах карликовых галактик низкой поверхностной яркости (LSBD), поскольку их труднее обнаруживать и отождествлять.

Чтобы понять ситуацию с подобными объектами, необходимы детальные и массовые исследования свойств галактик в войдах. Авторы большинства работ в этом направлении (например, [24, 25, 23]) имели дело с далекими большими войдами и вследствие естественной наблюдательной селекции – только с более яркой частью галактик войдов ($M_r \lesssim -16.5$). Больших отличий от аналогичных галактик в более плотных структурах, кроме несколько более голубых цветов, для них не выявлено. Аналогично, в недавней работе Хойл и др. (2012) [129] по галактикам из SDSS, проанализированы фотометрические свойства почти 90000 галактик, принадлежащих примерно 1000 войдам. Обнаружено, что карлики всех типов в войдах являются систематически более голубыми, по сравнению с их аналогами в более плотном окружении.

Следует упомянуть так называемый Void Galaxy Survey (VGS, [110]), в котором исследовалась HI-структура и оптические свойства около 60-ти SDSS-галактик, расположенных вблизи центров больших, но относительно далеких (~ 80 Мпк) войдов. Лишь для несколь-

ких ближайших войдов из их выборки, светимости изучаемых галактик приближаются к медианной для выборки в войде Lynx-Cancer. Именно среди таких галактик авторы работы Крекел и др. (2012) [110] нашли три очень богатых газом объекта.

В данной главе представлены результаты фотометрического исследования для 85-ти галактик войда Lynx-Cancer по их изображениям в фильтрах u, g, r, i из базы данных SDSS DR7 (Data Release 7) [62]. Основная цель фотометрического анализа – получить основные параметры галактик выборки для изучения статистических свойств галактик войдов и для сравнения с другими выборками похожих галактик в более плотном окружении или отобранными по другим критериям. Полные величины и цветовые индексы галактик использованы для оценки массы их звезд. Кроме того, цвета внешних областей галактик, в которых обычно отсутствуют следы текущего или недавнего звездообразования, при сопоставлении с модельными эволюционными треками, использованы как индикаторы возрастов наиболее старого (видимого) звездного населения. Одной из задач в данной главе является оценка этих возрастов.

3.2 Результаты и их анализ

Для изучения фотометрических свойств галактик войда с максимально возможной полнотой, за основу была взята дополненная выборка галактик в войде Lynx-Cancer (смотрите описание в разделе 1.1). Основные параметры нашей подвыборки 85-ти галактик войда Lynx-Cancer, с доступными данными SDSS для фотометрии, представлены в таблице A16 (в приложении A). В ее колонках приведены: **1** – имя галактики; **2** – имя объекта в коротком формате IAU; **3** – тип галактики, принятый либо как в [33] – для объектов из оригинальной выборки, либо по NED¹, либо наша оценка, если отсутствует в NED; **4** – лучевая гелиоцентрическая скорость V_{hel} в км с⁻¹; **5** – расстояние до объекта в Мпк (оцененное, как в [33], т.е. с учетом поправки за большую пекулярную отрицательную скорость в этой области); **6** – экстинкция A_B в B -полосе в Галактике, взятая из [81]; **7, 8** – полные видимые и абсолютные величины B_{tot} (не исправленные за поглощение в Галактике) и $M_{B,0}$ (исправленные за поглощение), пересчитанные из нашей независимой фотометрии по формуле из [78] и использованные далее в статистическом анализе; **9** – полные видимые величины B_{tot} , взятые из NED (для сравнения с полученными нами); **10** – масса водорода $\mathcal{M}(\text{H I})$ в единицах $10^7 \mathcal{M}_{\odot}$ (по данным из литературы и наблюдениям на NRT [106]); **11** – отношение массы водорода к светимости

¹NASA/IPAC EXTRAGALACTIC DATABASE, <http://ned.ipac.caltech.edu/>.

в фильтре $\mathfrak{M}(\text{H}\alpha)/L_B$ в солнечных единицах; **12** – масса звезд \mathfrak{M}_* в единицах $10^7 M_\odot$; **13** – массовая доля газа f_{gas} ; **14** – наблюдаемое отношение полуосей b/a .

Модельно-независимые параметры, полученные по фотометрии и анализу изображений SDSS, приведены в таблицах A17 и A18 (в приложении A). В колонках таблицы A17 представлены: 2, 3 – радиусы галактики, внутри которых содержится 50% и 90% ее потока в фильтре g ; 4 – эффективная поверхностная яркость в фильтре g , определенная как средняя поверхностная яркость внутри радиуса $R_{50}(g)$; 5, 6 – "оптический" радиус (на изофоте $25.0^m/\square''$) в фильтре g , в секундах дуги $R^{25}(g)$ и в кпк a_{25} ; 7 – звездная величина в фильтре g внутри "оптического" радиуса; 8, 9 – радиус на изофоте $26.5^m/\square''$ (радиус Холмберга) [79] и звездная величина в фильтре g внутри данного радиуса; 10, 11 – оптические размеры, пересчитанные, как $b = R^{25}(g) * (\sqrt{b/a})$ и $a = R^{25}(g) * (\sqrt{a/b})$, в секундах дуги и кпк соответственно.

В колонках таблицы A18 представлены следующие параметры: 2 – интегральные звездные величины в фильтре g ; 3, 4, 5 – интегральные цвета $(u-g)$, $(g-r)$, $(r-i)$; 6, 7, 8 – $(u-g)$, $(g-r)$, $(r-i)$ цвета периферии с учетом экстинкции в Галактике.

Приближение фотометрических профилей экспоненциальным диском, или, в более общем случае, законом Серсика [80], дает модельные параметры, представленные в таблице A19 (в приложении A). Она включает следующие колонки: 2, 3 – центральные поверхностные яркости в фильтрах g и r ; 4, 5 – центральные поверхностные яркости в B -полосе (подсчитанные с помощью соотношения из [78]), без учета и с учетом экстинкции в Галактике и наклона к лучу зрения соответственно; 6 – масштабная длина в секундах; 7 – индекс Серсика.

3.2.1 Распределения параметров

Для понимания полного диапазона изменения, типа распределения и характерных величин наиболее важных параметров изучаемой выборки, были построены их наблюдаемые распределения. Распределение абсолютной величины $M_{B,0}$ для объектов войда, рассчитанной по данным нашей фотометрии и исправленной за экстинкцию в Галактике, показано на рис. 3.1 (редкая штриховка). Для сравнения, показано распределение $M_{B,0}$ для подвыборки так называемых "рудиментарных" (inchoate) галактик из обзора ES [46] (нанесены обратной штриховкой на том же рисунке). Эти 14 галактик выделены авторами из полного числа 195 объектов экваториального обзора (отобранных по слепому H α обзору HIPASS), так как обладают необычными свойствами – голубыми цветами и высоким отношением $\mathfrak{M}(\text{H}\alpha)/L_g$. Для части

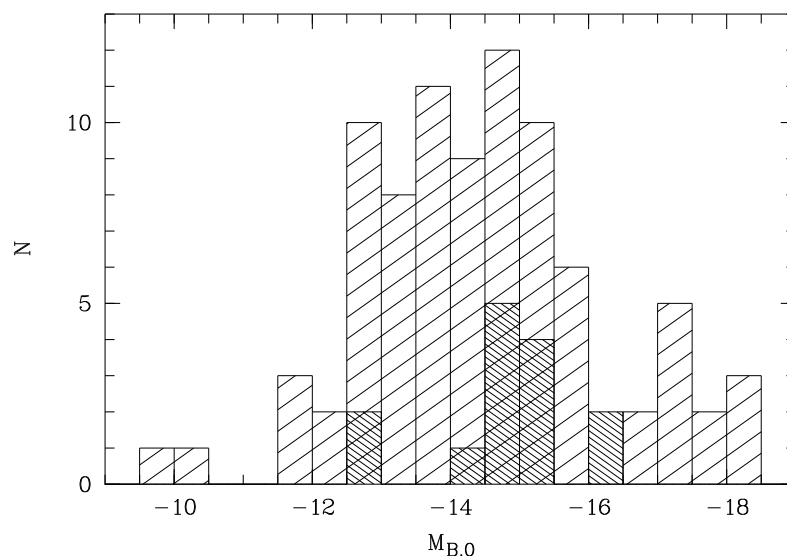


Рис. 3.1: Распределение абсолютной величины в фильтре B для 85-ти галактик войда Lync-Cancer. Частой штриховкой показано распределение подвыборки 14-ти так называемых “рудиментарных” галактик из работы Гарсия-Аппадоо и др. (2009) [46].

этих объектов в [46] потоки в линии 21 см переоценены, что приводит к слишком высокому отношению $\mathfrak{M}(\text{HI})/L_g$. Эти значения были исправлены, учитывая новые данные из литературы, так что они стали не такими выдающимися. В частности, для NE-компонента пары HI 1225+01 (HIPeQ1227+01) параметр $\mathfrak{M}(\text{HI})/L_B$ равен 10.1, а не 22. Кроме того, для лучшего понимания природы галактик этой подвыборки, проверено их окружение на наличие массивных галактик. Из 14-ти “рудиментарных” галактик 9 находятся не ближе 1 Мпк от массивной галактики, из них для 6-ти, наиболее богатых газом, расстояния до массивной галактики составляют 2-5 Мпк. Таким образом, галактики этой подвыборки, также как наши галактики войда, показывают явные признаки изолированности.

На рис. 3.2 показано распределение центральной поверхностной яркости $\mu_{0,c,i}(B)$ в фильтре B (с учетом экстинкции в Галактике и коррекции за наклон к лучу зрения) для галактик исследуемой подвыборки в войде Lync-Cancer. Доля галактик с $\mu_{0,c,i}(B) > 23.0^m/\square''$ (LSB) в этой подвыборке составляет $\sim 50\%$. На рис. 3.3 представлено распределение по индексу Серсика n_g , определенному моделированием радиального профиля яркости для изображения в фильтре g . Для почти 2/3 объектов индекс n_g достаточно близок к 1, то есть профили яркости близки к экспоненциальным. Для остальных галактик с n_g в диапазоне от 1.2 до 2.1 профиль яркости заметно уплощается к центру.

Распределение наблюдаемого отношения полуосей b/a на рис. 3.4 показывает, что $\sim 50\%$

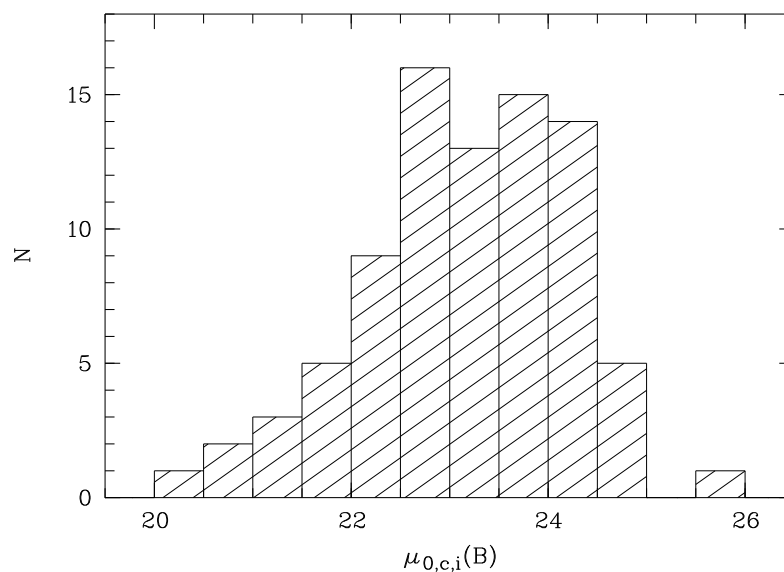


Рис. 3.2: Распределение центральной поверхностной яркости в фильтре B , исправленной за экстинкцию в Галактике и наклон к лучу зрения, для 85-ти галактик войда.

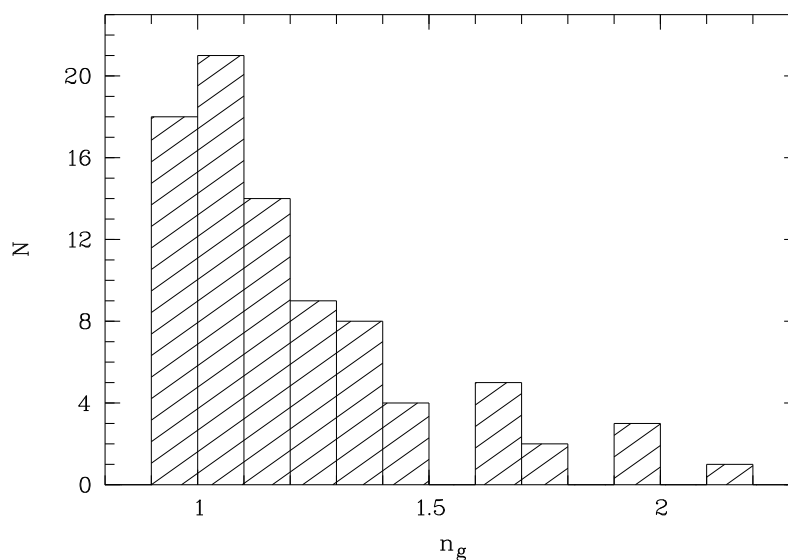


Рис. 3.3: Распределение индекса Серсика [80] радиального профиля поверхностной яркости в фильтре g для 85-ти галактик войда.

объектов выборки значительно наклонены к лучу зрения ($b/a < 0.65$ и, соответственно, угол $i > 50^\circ$). Как показано в [33], из-за избирательности спектрального обзора SDSS по поверхностной яркости, многие LSB-галактики войда, имея полную величину ярче формального порога SDSS $r_{\text{petro}} [130] < 17.77$, могли остаться без определения скорости. Благодаря наклону к лучу зрения, их видимая яркость увеличена, что повысило вероятность их включения в спектральную часть SDSS.

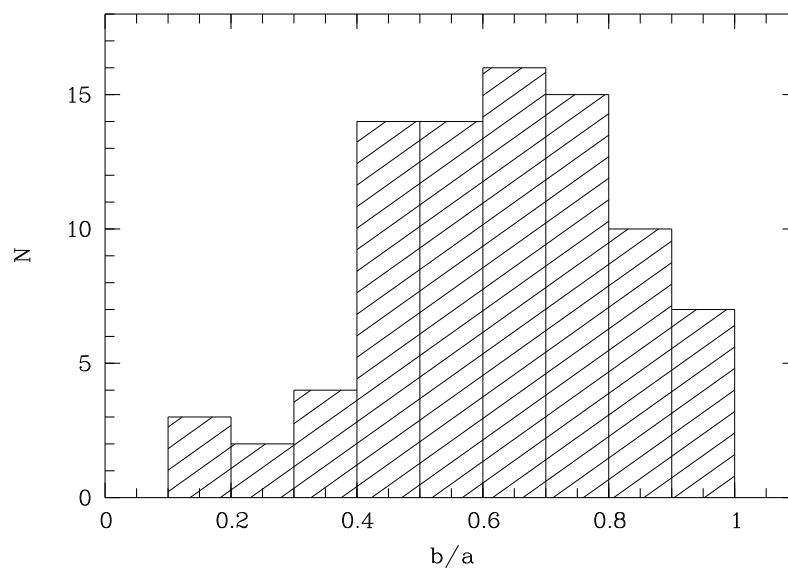


Рис. 3.4: Распределение отношения полуосей b/a для 85-ти галактик войда.

Распределение отношения массы водорода к светимости ($\mathfrak{M}(\text{HI})/L_B$) представлено на рис. 3.5 (редкая штриховка). Для 57 галактик нашей выборки медианное значение $\mathfrak{M}(\text{HI})/L_B \sim 1.0$. Здесь же, как и на рис. 3.1, приведено для сравнения распределение подвыборки “рудиментарных” галактик из работы Гарсия-Аппадоо и др. (2009) [46] (обратная штриховка). Медианное значение $\mathfrak{M}(\text{HI})/L_B$ для нее ~ 3.4 . Само название “рудиментарные” авторы [46] связывают с их неправильной формой, предполагая, что они находятся в процессе формирования или в начале эволюции. Как показано ниже, часть галактик нашей выборки также обладает необычными свойствами, напоминая “рудиментарные” объекты из ES выборки (смотри таб. 3.1). Они также являются необычно голубыми ($(B - V) < 0.3$), а медианное значение их параметра $\mathfrak{M}(\text{HI})/L_B \sim 2.7$ сравнимо с таковым для подвыборки из [46].

Распределение массовой доли газа f_{gas} показано на рис. 3.6. Для 59% галактик войда с известными HI данными массовая доля газа попадает в диапазон (80-99)%. Такая высокая концентрация богатых газом объектов в нашей выборке указывает на то, что для населения войдов свойственна более медленная эволюция, как уже указывалось в [34].

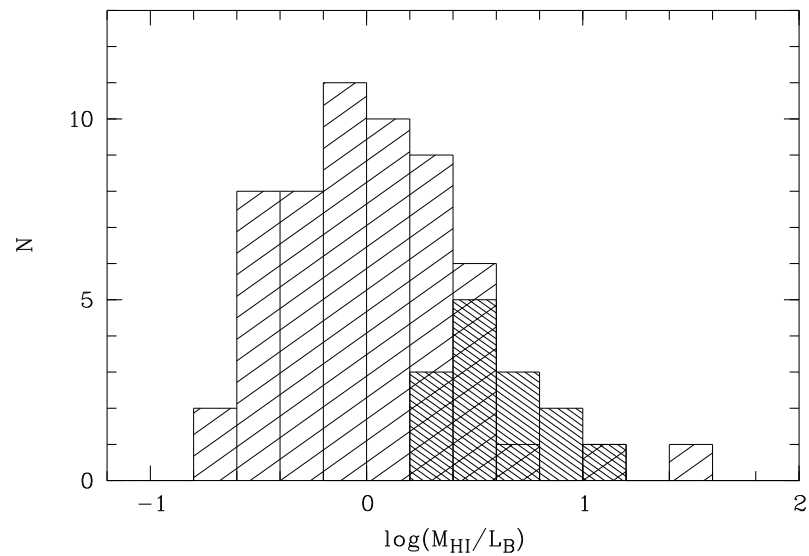


Рис. 3.5: Распределение галактик войда по отношению массы водорода к светимости в фильтре $\mathfrak{M}(\text{HI})/L_B$ (в солнечных единицах). Обратной штриховкой показано распределение подвыборки 14 “рудиментарных” галактик из общей выборки слепого HI обзора (ES) из работе Гарсия-Аппадоо и др (2009) [46].

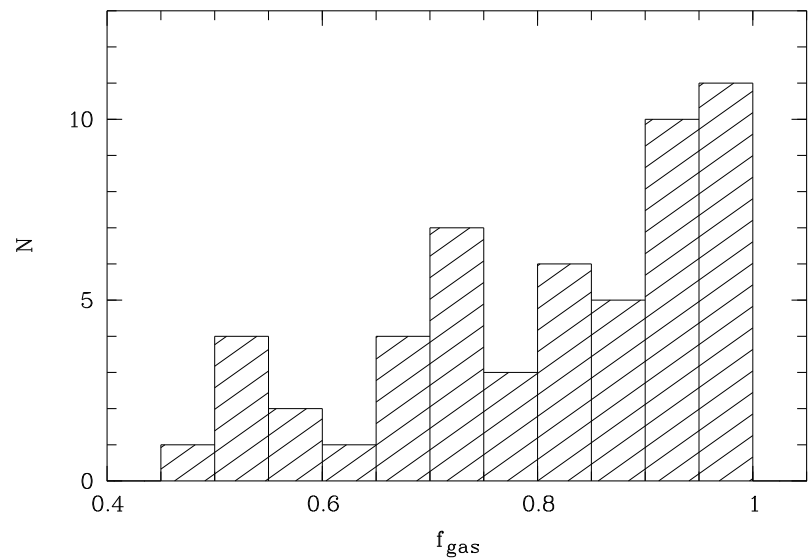


Рис. 3.6: Предварительное (примерно по половине выборки) распределение массовой доли газа для 54 галактик войда по HI данным из литературы и по наблюдениям на радиотелескопе NRT [106].

3.2.2 Соотношения между параметрами галактик войда

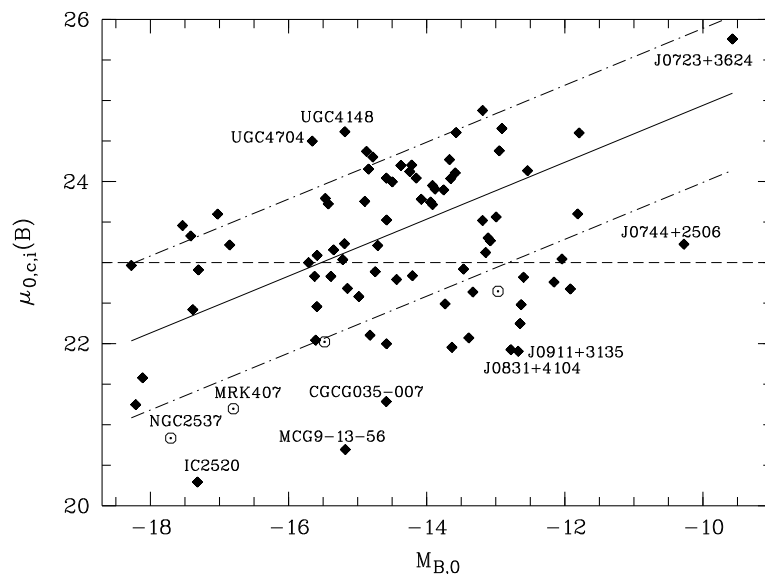


Рис. 3.7: Соотношение между абсолютной величиной $M_{B,0}$ и центральной поверхностной яркостью $\mu_{0,c,i}(B)$ для 85-ти галактик войда Lynx-Cancer. Штриховая горизонтальная линия соответствует значению $23^m/\square''$, выше которой область LSB-галактик. Линейная регрессия (сплошная прямая) проведена по точкам для 81 галактики исследуемой подвыборки. Штрихпунктирные прямые – разброс точек подвыборки. 4 BCG (светлые кружки) исключены.

На рис. 3.7 сопоставлены абсолютная величина $M_{B,0}$ и центральная поверхностная яркость $\mu_{0,c,i}(B)$ для подвыборки из 85-ти галактик войда Lynx-Cancer. Оба параметра исправлены за экстинкцию в Галактике. Центральные поверхностные яркости исправлены за наклон галактик к лучу зрения. Для галактик с существенным вкладом центральной области звездообразования или с “балджем”, центральная SB была оценена по экстраполяции в центр профиля внешнего подстилающего диска. Около половины галактик классифицируется как LSB, т.е. их скорректированная центральная поверхностная яркость $\mu_{0,c,i}(B) > 23^m/\square''$ (выше штриховой линии). Линейная регрессия (сплошная прямая) проведена по всем галактикам подвыборки за исключением 4-х BCG – голубых компактных галактик с активным звездообразованием. Среднеквадратичное отклонение индивидуальных галактик относительно общего тренда достаточно велико: $\sigma_{\mu_0} = 0.97^m/\square''$ (штрихпунктирные прямые). Светлыми кружками показаны положения четырех BCG. Эти редкие маломассивные галактики имеют повышенную центральную яркость, заметно отличаясь от более типичных карликов поздних типов.

На рис. 3.8 показано соотношение между абсолютной величиной $M_{B,0}$ и эффективной поверхностной яркостью $\mu_{\text{eff}}(B)$. Оба параметра исправлены за экстинкцию в Галактике.

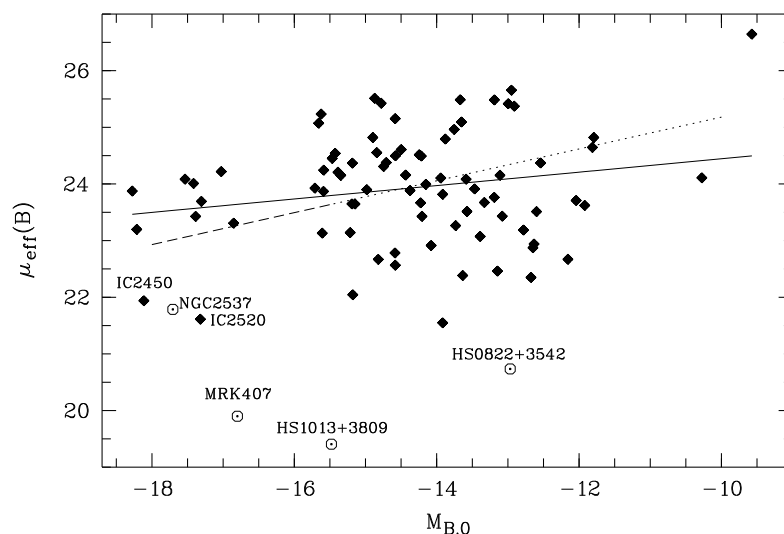


Рис. 3.8: Соотношение между абсолютной величиной $M_{B,0}$ и эффективной поверхностной яркостью $\mu_{\text{eff}}(B)$ для 85-ти галактик войда Lунх-Сансер. Линейная регрессия (сплошная прямая) проведена по всем галактикам, за исключением 4-х VCG (светлые кружки). Аналогичная прямая из работы Кросса и Драйвера (2002) [30] (штриховая линия, по выборке ~ 45000 галактик, и пунктирная прямая – ее продолжение в область до $M_{B,0} < 10$) в общем диапазоне $M_{B,0} < -15.5$ проходит близко к нашей.

Линейная регрессия, проведенная по 81 галактике войда, с исключением 4 VCG, показана сплошной прямой (коэффициент наклона $k=0.12\pm 0.06$). Из-за большого разброса точек в середине диапазона, наличие тренда определяется не очень надежно. Аналогичная прямая (показана штрихами), полученная для большой выборки галактик (~ 45000) из работы Кросс и Драйвер [30] (и ее экстраполяция в область низких светимостей, пунктирная прямая), хотя и проходит близко к центру распределения галактик войда, но имеет наклон значительно больше ($k=0.28$). Вероятно, это различие связано с существенно более высокой долей карликов в выборке галактик войда и большим разнообразием их свойств. Кроме того, разброс около линии регрессии для выборки из работы [30] ниже, чем для выборки войда: $\sigma_\mu \sim 0.5$ и $\sim 1.0^m/\square''$ соответственно.

На рис. 3.9 показано соотношение между эффективной поверхностной яркостью $\mu_{\text{eff}}(g)$ и светимостью $\log(L_g)$ – аналог предыдущего рисунка. Как и ранее, линейная регрессия (сплошная прямая) проведена по всем галактикам за исключением четырех VCG. Для того, чтобы сравнить наши соотношения с аналогичными по выборке 195 галактик из экваториального обзора (ES) [46], отобранных по эмиссии в линии 21 см слепого HI обзора HIPASS, их линейная регрессия нанесена на рис. 3.9 штриховой прямой, которая для наглядности

продлена в область низких светимостей пунктирной прямой. Светлыми треугольниками отмечены 14 объектов из их подвыборки так называемых “рудиментарных” галактик, имеющих голубые цвета и повышенное отношение массы водорода к светимости ($(B - V) \leq 0.3$ и $\mathcal{M}(\text{HI})/L_B > 1.8$). Наклон нашей регрессии для галактик войда ($k = -0.35 \pm 0.16$) примерно в 2.5 раза меньше, чем для ES выборки ($k = -0.83$). При этом, в их выборке нет объектов с $\log(L_g) < 7.5$. Наклон регрессии для выборки ES при этом довольно близок к наклону для выборки из [30], при корреляции со светимостью вместо абсолютной величины ($k = -0.70$). Разброс параметра $\mu_{\text{eff}}(g)$ для галактик войда, также как и для выборки обзора ES, весьма значителен, достигая 3-х и более величин для данной светимости.

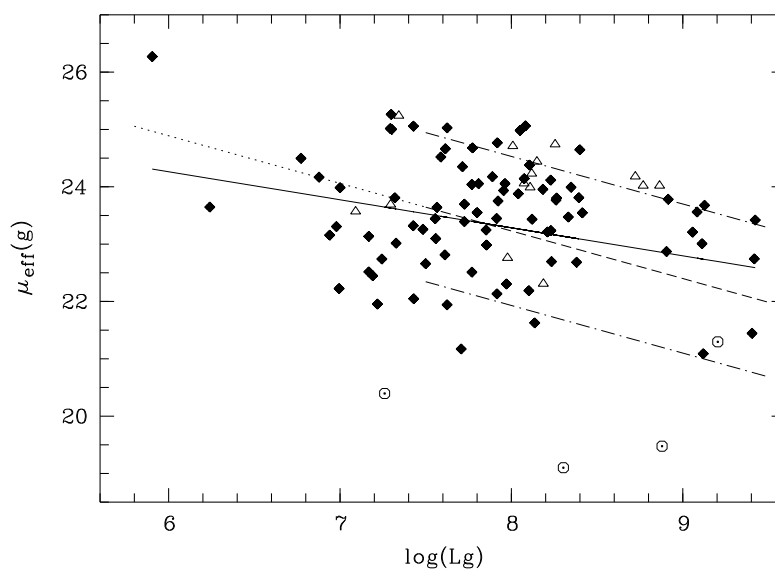


Рис. 3.9: Соотношение между эффективной поверхностной яркостью $\mu_{\text{eff}}(g)$ и светимостью $\log(L_g)$. Сплошная прямая – линейная регрессия по галактикам нашей выборки (заполненные ромбики), исключая VCG (светлые кружки). Штриховая прямая – линейная регрессия из работы [46], пунктирная прямая – ее продолжение в область низких светимостей, штрих-пунктирные линии – разброс точек их выборки, светлые треугольники – группа 14-ти так называемых “рудиментарных” галактик, отмеченная в этой работе.

За счет галактик на краях диапазона светимостей, для соотношений, показанных на рис. 3.8 и 3.9, уменьшение поверхностной яркости с уменьшением светимости более отчетливо просматривается. Но достаточно большой разброс $\mu_{\text{eff}}(g)$ галактик войда в центре диапазона светимостей, по-видимому, означает, что кроме общей тенденции увеличения доли LSB галактик, в войдах появляются и галактики с достаточно высокой поверхностной яркостью, что вероятно связано с их повышенным звездообразованием в последние несколько млрд. лет. Возможной причиной отмеченного выше большого различия наклонов регрессии галак-

тик войда Lync-Cancer и выборки Экваториального обзора является наличие в последней значимой доли массивных галактик с повышенной концентрацией света в центре – балджем или следами вспышки звездообразования. Это приводит к смещению среднего для эффективной поверхностной яркости при больших светимостях в их выборке и большему наклону регрессии.

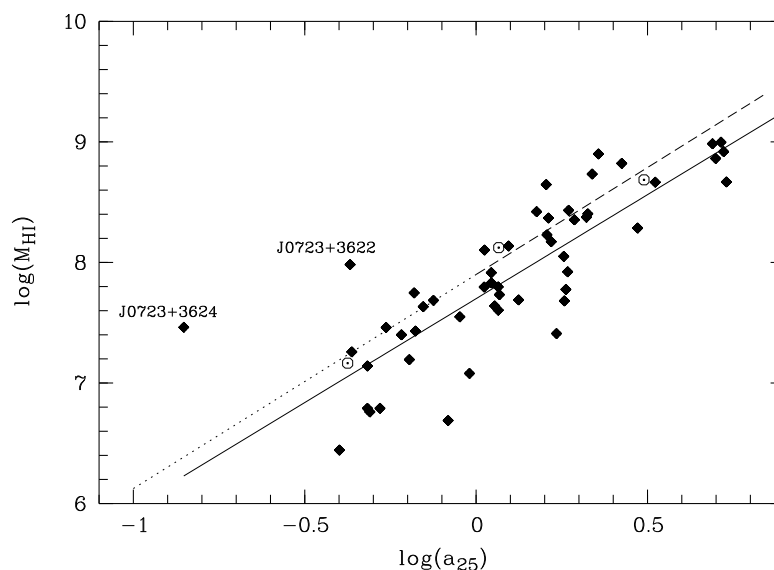


Рис. 3.10: Соотношение между оптическим радиусом $\log a_{25}(g)$ (кпк) и массой водорода в галактике $\log(\mathcal{M}(\text{HI}))$ (в солнечных единицах). Сплошная линия – линейная регрессия между данными величинами (наклон 1.96), из которой исключены BCG галактики, обозначенные светлыми кружками. Для сравнения приведена зависимость из работы [46] (штриховая линия, и пунктирная прямая – ее продолжение в область $a_{25}(g) < 1$ кпк).

Соотношение между оптическими радиусами $a_{25}(g)$ (кпк) и массой водорода в галактике $\mathcal{M}(\text{HI})$ (в солнечных единицах) показано на рис. 3.10. Кроме линейной регрессии по 85-ти галактикам нашей выборки (сплошная прямая, $k=1.96 \pm 0.16$), показана аналогичная зависимость из работы [46] (штриховая прямая). Видно их очень хорошее согласие в общем диапазоне. Наши данные позволяют продлить эту зависимость в область объектов с $a_{25}(g) < 1$ кпк. Наклон регрессии, близкий к 2, отражает простой физический факт того, что водород распределен в исследуемых галактиках в достаточно плоском диске, и что в большом диапазоне эффективных размеров характерный радиус диска HI тесно коррелирует с оптическим. При этом имеется два объекта (J0723+3624, J0723+3622) с наибольшим отношением $\mathcal{M}(\text{HI})/L_B > 10$, которые сильно отскакивают от основной зависимости.

На рис. 3.11 представлено соотношение между массой водорода $\mathcal{M}(\text{HI})$ и светимостью L_B (в солнечных единицах) для 54 галактик войда с известными массами HI. Штриховой пря-

мой показана линейная регрессия по галактикам нашей выборки (ромбики, $k1 = 0.84 \pm 0.08$). Светлыми треугольниками для сравнения показаны “рудиментарные” галактики из работы [46]. Пунктирная прямая, на которой $\mathfrak{M}(\text{HI})/L_B = 1$, отделяет галактики с высоким содержанием газа от более типичных галактик с нормальным содержанием газа. По этим же данным определяются зависимость параметра $\mathfrak{M}(\text{HI})/L_B$ от L_B , для которой наклон регрессии будет соответственно равен -0.16 ± 0.08 . Этот наклон в пределах довольно больших ошибок близок к наклону подобной зависимости, найденной для BCG в Местном Сверхскоплении и в войдах в работе [109].

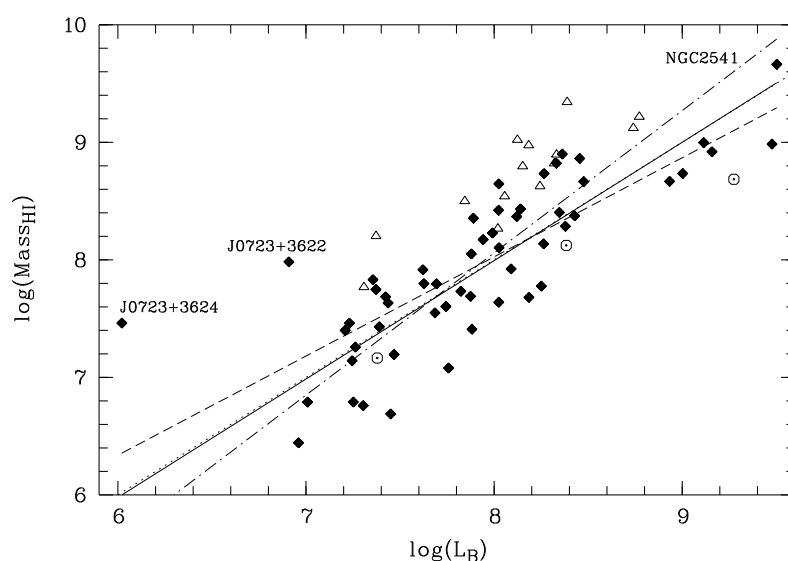


Рис. 3.11: Соотношение между массой водорода $\log(\mathfrak{M}(\text{HI}))$ и светимостью $\log(L_B)$ в солнечных единицах. Штриховая линия – линейная регрессия по всему интервалу светимостей для галактик нашей выборки (заполненные ромбики), сплошная прямая – линейная регрессия без учета J0723+3622 и J0723+3624, штрих-пунктирная прямая – линейная регрессия по интервалу $\log(L_B) = 7.0-8.6$. В каждом из вариантов были исключены BCG-галактики, обозначенные светлыми кружками. Светлые треугольники – группа так называемых ‘рудиментарных’ галактик из работы [46], выделяющихся повышенным содержанием газа. Пунктирная линия соответствует $\mathfrak{M}(\text{HI})/L_B = 1$.

Более внимательный взгляд на обсуждаемый график наводит на мысль о том, что увеличение $\mathfrak{M}(\text{HI})/L_B$ при уменьшении L_B в основном обеспечено галактиками на краях диапазона, включая и две самые богатые газом галактики триплета J0723+36. Мы приводим на графике другие варианты регрессии. Второй – без учета упомянутых членов триплета – сплошная прямая, с наклоном $k2 = 1.01 \pm 0.08$ (52 объекта). И третий – только по “узкому” интервалу светимостей – $\log(L_B) = 7.0-8.6$ – штрих-пунктирная прямая, с наклоном $k3 = 1.21 \pm 0.12$ (45 объектов). Сопоставление разности наклонов и ее “комбинированной ошибки” указывает на

отличия на уровне 2.5-3 сигма: $k1 - k2 = -0.17 \pm 0.056$, $k1 - k3 = -0.35 \pm 0.144$. Таким образом, можно отметить, что характер связи двух глобальных параметров маломассивных галактик войдов для большого диапазона светимостей остается пока не совсем ясным. Необходима большая статистика, особенно для диапазона $\log(L_B) < 7.5$. Включение в анализ остальных галактик этого войда, а также маломассивных галактик из других близких войдов позволит увеличить их общее число в $\sim 2-3$ раза, и даст лучшее понимание обсуждаемой связи.

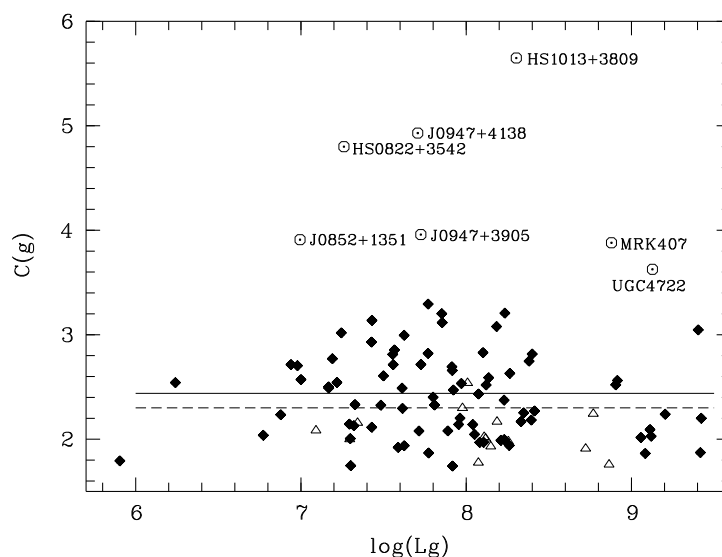


Рис. 3.12: Соотношение между светимостью $\log(L_g)$ и индексом концентрации $C(g)$ в фильтре g . Сплошная линия – среднее значение ($R = 2.44$) по объектам нашей выборки (заполненные ромбики). Штриховая линия – среднее значение из работы [46] для их выборки из 195 объектов ($R=2.3$). Светлые треугольники – так называемая группа “рудиментарных” галактик, отмеченная в их работе.

На рис. 3.12 видно, что индекс концентрации в фильтре g , $C(g) = R_{90g}/R_{50g}$ (где $R_{90}(g)$ – радиус галактики, в котором заключено 90% ее потока в фильтре g , $R_{50}(g)$ – половина потока) не зависит от светимости (L_g). Среднее значение по галактикам нашей выборки $C(g) = 2.44$ (сплошная линия), что близко к значению 2.32 для чисто экспоненциальных дисков. При расчете среднего исключены, как и выше, BCG, а также очень компактные объекты (J0947+4138, J0947+3905, J0852+1351) и возмущенная дисковая галактика с приливным хвостом и яркой вспышкой звездообразования – UGC 4722 (все обозначены светлыми кружками). Показано также среднее значение $C(g) = 2.3$ для галактик из работы Гарсия-Аппадоо и др. (2009) [46] (штриховая прямая) и положения их “рудиментарных” галактик (светлые треугольники).

Соотношение между логарифмом светимости $\log(L_g)$ в фильтре g и интегральным цветом

$(g-r)_{\text{tot}}$ галактик войда показано на рис. 3.13. Сплошная прямая представляет линейную регрессию для этой выборки ($k = 0.05 \pm 0.02$). Для сравнения показана штриховая прямая - линейная регрессия по галактикам ES обзора ($k = 0.25$), а также положения “рудиментарных” галактик из работы [46] (светлые треугольники). В то время, как для ES выборки имеется сильный тренд, для галактик войда цвет $(g-r)_{\text{tot}}$ (так же как и параметр $\mu_{\text{eff}}(g)$ на рис. 3.9), в среднем меняется мало с уменьшением светимости, от 0.35 до ~ 0.15 , хотя при этом имеется большой разброс показателя цвета. Чтобы лучше понять природу такого разброса, галактики с крайними значениями параметра $(g-r)_{\text{tot}}$ надо изучить более детально.

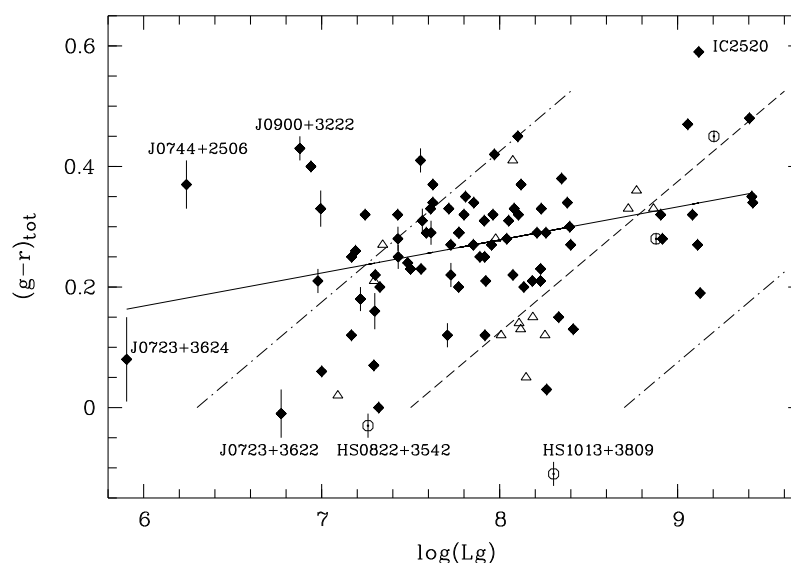


Рис. 3.13: Соотношение между светимостью $\log(L_g)$ в фильтре g и интегральным цветом $(g-r)_{\text{tot}}$. Сплошная прямая – линейная регрессия по объектам нашей выборки (заполненные ромбики), за исключением BCG (светлые кружки). Штриховая прямая – линейная регрессия из работы [46], Штрих-пунктирные линии – разброс точек их выборки, светлые треугольники – группа “рудиментарных” галактик, отмеченная в [46].

На рис. 3.14 показано соотношение между массовой долей звезд ($\log(1 - f_{\text{gas}})$) и интегральным цветом $(g-r)_{\text{tot}}$. Сплошной прямой показана линейная регрессия между этими параметрами ($k = 0.215 \pm 0.024$). Как и следовало ожидать, здесь связь прослеживается лучше, чем на предыдущем рисунке, так как цвет $(g-i)$ (который коррелирует с $g-r$) входит в коэффициент Υ для оценки массы звезд по светимости (подробнее в разделе 1.6). Чем он голубее, тем меньше масса звезд, и при данной массе газа меньше их массовая доля.

На рис. 3.15 показано соотношение между массовой долей звезд ($\log(1 - f_{\text{gas}})$) и содержанием кислорода в межзвездной среде (аналог металличности) $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ для галактик войда, у которых этот параметр на сегодня измерен. Как и выше, сплошная прямая показы-

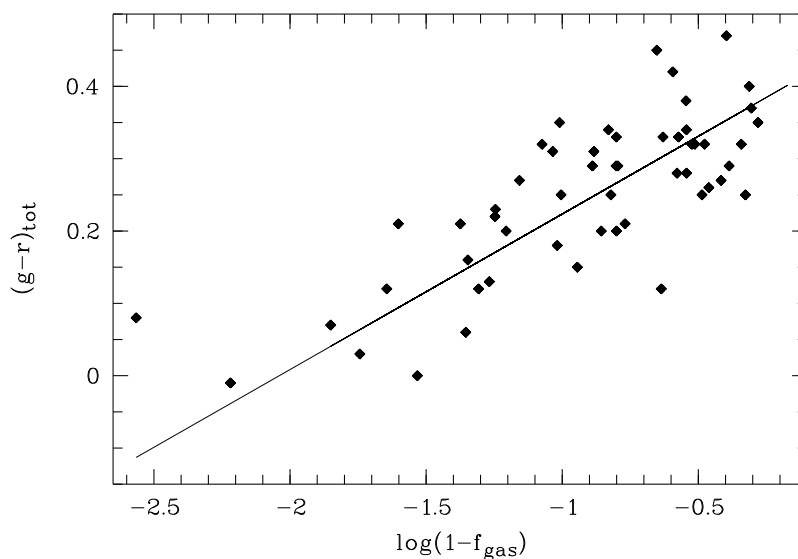


Рис. 3.14: Соотношение между массовой долей звезд ($\log(1 - f_{\text{gas}})$) и интегральным цветом $(g - r)_{\text{tot}}$. Сплошная прямая – линейная регрессия по объектам нашей выборки.

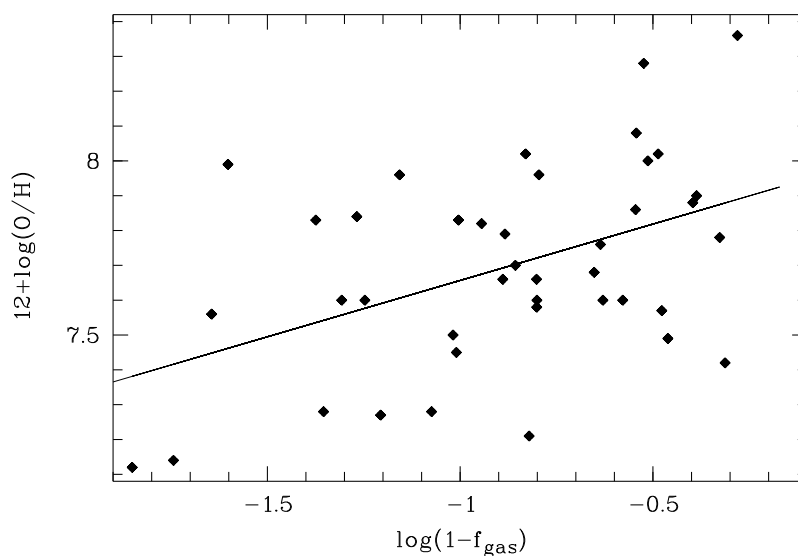


Рис. 3.15: Соотношение между массовой долей звезд ($\log(1 - f_{\text{gas}})$) и металличностью $12 + \log(O/H)$. Сплошная прямая – линейная регрессия по объектам нашей выборки.

дает линейную регрессию ($k = 0.32 \pm 0.10$). Видимый тренд падения металличности с уменьшением массовой доли звезд согласуется с ожидаемым в так называемой модели эволюции галактик “закрытого ящика” (т.е. без обмена с внешней средой). Однако разброс параметра O/H настолько велик, что в галактиках войда, включая и LSB-галактики, приближение “закрытого ящика”, видимо, часто не выполняется.

3.2.3 Двухцветные диаграммы, эволюционные треки и оценки возрастов

На рисунках 3.16, 3.17 цвета внешних частей 81 галактики войда сопоставлены с моделями PEGASE2 для двух крайних случаев закона звездообразования (ЗО): мгновенного (*inst*) ЗО и непрерывного (*cont*) ЗО с постоянным темпом. Приняты две начальные функции масс звезд (IMF): стандартная Солпитер и Кроупа. Для иллюстрации показаны треки с металличностью $z=0.002$, которая представляет примерно середину диапазона известных металличностей галактик в войде. Для 4-х VCG в нашей выборке вклад небулярной эмиссии во внешних частях может быть значителен. Эти объекты исключены из анализа, так как для них оценки цветов звездного населения ненадежны.

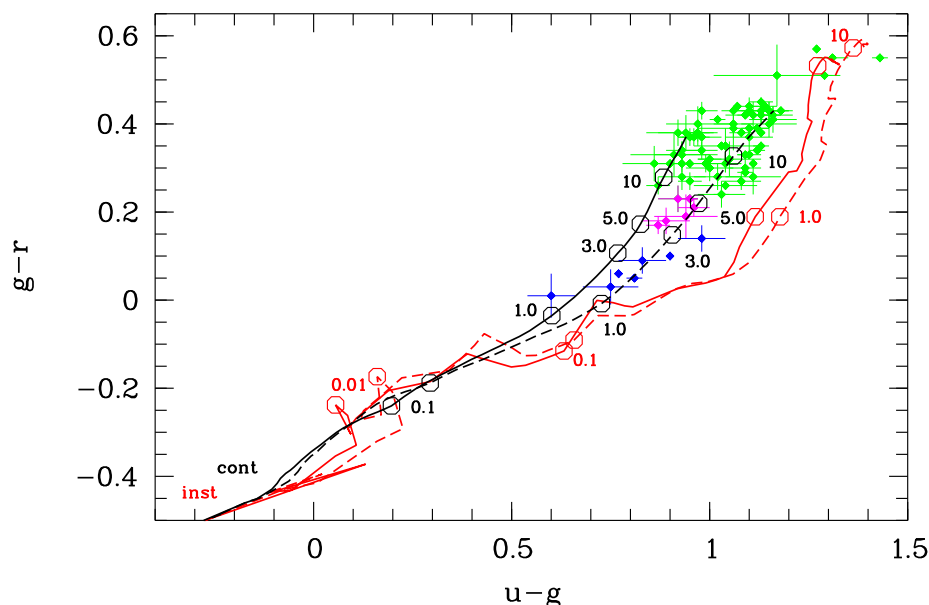


Рис. 3.16: Диаграмма $(u-g)$ и $(g-r)$ цветов внешних частей 85-ти галактик выборки в войде Lupx-Cancer в сравнении с эволюционными треками пакета PEGASE2 для двух крайних случаев закона звездообразования. Мгновенное (*inst*) ЗО для двух начальных функций масс (IMF): Солпитер (сплошной красный трек) и Кроупа (штрих-пунктирный красный трек). Непрерывное (*cont*) звездообразование для таких же IMF: Солпитер (сплошной черный трек) и Кроупа (штриховой черный трек). Зеленые ромбы с барями ошибок - цвета внешних частей галактик, соответствующие возрастам - $T_{30} \sim 10-13$ млрд. лет, розовые ромбы - $T_{30} \sim 4-6.5$ млрд. лет, синие ромбы - $T_{30} \sim 1-3.5$ млрд. лет. Цифры на треках - времена от начала звездообразования в млрд. лет.

Для 77 из 81 изученных здесь галактик войда цвета их внешних частей достаточно хорошо соответствуют эволюционным трекам PEGASE2 с непрерывным звездообразованием. Диапазон времен от начала эпохи звездообразования T_{30} (или в других терминах, возрастов

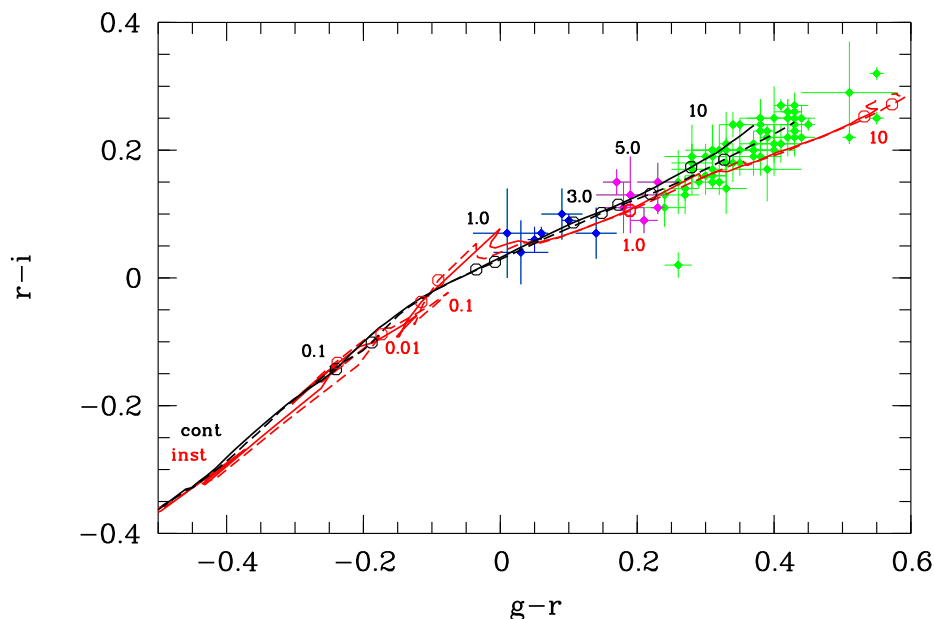


Рис. 3.17: Тоже, что на рисунке 3.16, только для $(g - r)$ и $(r - i)$ цветов.

галактик) очень широк – от ~ 1 до ~ 14 млрд. лет. Значительное большинство этих галактик лучше соответствует трекам с IMF Кроупа. У подавляющего большинства объектов цвета внешних частей соответствуют типичным для галактик возрастам – $T_{30} \sim 10\text{--}13$ млрд. лет. Однако, для 7-ми объектов цвета их внешних областей соответствуют временам T_{30} только $\sim 1\text{--}3.5$ млрд. лет. Еще для 6-ти галактик цвета соответствуют промежуточным временам $T_{30} \sim 4\text{--}6.5$ млрд. лет. Эти галактики и их особенности более подробно описаны следующем разделе.

Лишь для 4-х галактик: J0744+2506, IC 2450, J0928+2845, CGCG 035-007, в отличие от остальных 77-ти, их довольно красные цвета ($g-r \sim 0.5\text{--}0.6$) можно интерпретировать как результат достаточно короткого (“одномоментного”) и очень старого эпизода (~ 10 млрд. лет) звездообразования, характерного для эллиптических галактик. Однако их морфология не согласуется с таким предположением. Наличие эмиссионных областей либо вблизи центра, как для J0744+2506 и IC 2450, либо смещенных к краю, как у J0928+284 и CGCG 035-007, указывает на относительно недавнее звездообразование, связанное либо с внешним возмущением, либо с втеканием свежего газа. Как объекты с нетипичными для исследуемой выборки цветами внешних частей, эти галактики заслуживают более детального исследования. В частности, важно было бы понять, какая доля более слабых таких объектов может оставаться необнаруженной из-за наблюдательной селекции, если их звездообразование не было активировано внешними причинами в последние десятки млн. лет.

Таблица 3.1: Параметры необычных галактик войда

Параметр	J0723 +3622	J0723 +3624	J0737 +4724	J0812 +4836	J0926 +3343	J0929 +2503	S0822 +3545	U3966
T_{30} млрд. лет	1–2	2–2.5	2–3	4–6	3–3.5	3–5	1–3	2.5–3
f_{gas}	0.997	0.997	0.96	0.94	0.99	0.95	0.97	0.98
$12+\log(\text{O}/\text{H})$	–	–	7.38	7.27	7.12	7.19	–	7.62
M_{B}	–11.79	–9.57	–12.54	–13.08	–12.91	–12.95	–13.11	–14.58

3.3 Необычные галактики войда

Для части галактик с некосмологическими временами от начала основной эпохи звездообразования (SAO 0822+3542, UGC 5340=DDO 68, J0926+3343, J0723+3622, J0723+3624, J0737+4724), их необычные свойства уже были отмечены в статьях, посвященных отдельным галактикам этого войда [57, 64, 131, 65, 35, 36].

Для этих галактик получено независимое подтверждение голубых цветов периферии, что соответствует небольшим временам от начала непрерывного звездообразования – $T_{30} \lesssim 3.5$ млрд. лет. Еще для 2-х галактик – UGC 3966, UGC 4117 такие данные получены впервые. Для галактик UGC 3672, UGC 3860, J0812+4836, J0929+2502, UGC 5272 и ее спутника UGC 5272b, цвета внешних частей также соответствуют некосмологическим временам, в диапазоне $T_{30} \sim 3\text{--}6.5$ млрд. лет.

В таблице 3.1 дается сводка эволюционных параметров для 8-ми галактик, которые по сумме свойств можно отнести к эволюционно-молодым. В них массовая доля газа f_{gas} – (94–99.7)%, металличность $12+\log(\text{O}/\text{H})$ в 2–5 раз ниже, чем у типичных иррегулярных карликовых галактик такой же светимости, но населяющих области со средней или повышенной плотностью галактик (смотри [57, 132, 64, 131, 65]), и вместе с тем цвета видимого старого звездного населения соответствуют эпохе начала звездообразования $T_{30} \lesssim 1\text{--}5$ млрд. лет. К этой же группе галактик относим упомянутую выше J0723+3624 с $M_{\text{B}} = -9.57$. Галактика UGC 4117, хотя и показывает голубые цвета периферии, соответствующие $T_{30} \sim 2$ млрд. лет, выпадает из списка необычных галактик войда, так как ее металличность $12+\log(\text{O}/\text{H})$, равная 7.82), не слишком сильно отличается от ожидаемой для ее светимости ($M_{\text{B}}=-15.6$). То же самое относится к галактикам UGC 3672, UGC 3860, UGC 5272 и UGC 5272b, с возрастными периферии 5–6 млрд. лет. Для UGC 5340 (DDO 68) новые данные с космического телескопа HST [121] подтверждают предположения Пустильника и др. [64], Экты и др. (2008) [133] о

том, что эта галактика состоит из двух сливающихся компонент, с очень отличающимися свойствами, что необходимо учитывать при включении этого объекта в группу необычных галактик. Более массивная, центральная компонента с $M_B \sim -16$ имеет металличность звезд в пять раз меньше солнечной и старое звездное население, т.е. является достаточно типичной галактикой позднего типа. Значительно менее массивная компонента (UGC 5340b), вытянутая вдоль восточного края более массивной компоненты, имеет металличность звезд не более чем $Z_{\odot}/20$, что согласуется с оценкой металличности газа $12+\log(O/H)=7.14$ по ее HII областям. Подавляющая часть звезд имеют возраста не более 2 млрд. лет. Однако оценить массу или светимость менее массивной компоненты пока не представляется возможным.

Более внимательный анализ свойств упомянутых выше самых необычных галактик войда позволяет предположить, что их доля значимо выше среди галактик с более низкой светимостью. Однако, это может быть и случайным результатом, связанным с малой статистикой более ярких галактик войда. Проверить правдоподобие гипотезы о связи между светимостью и долей эволюционно-молодых галактик в войде можно с помощью хорошо известного в биологии и прикладных исследованиях статистического критерия “таблица сопряженности признаков 2x2” из книги Большева и Смирнова (1983) [134]. Для астрономического приложения этот критерий использовался также в работе Пустильника и др. (1995) [135].

Суть метода заключается в изучении чисел заполнения в таблице 2x2, которые соответствуют различным комбинациям двух признаков для элементов выборки. Для нашего случая принимаем признак Y - принадлежность к группе низкой светимости $M_B > M_{\text{faint}}$, где M_{faint} – выбранное из определенных соображений граничное значение. Таким образом, по признаку Y исследуемая выборка делится на Y и не- Y . Аналогично, второй признак Z состоит в принадлежности к группе эволюционно-молодых галактик, согласно критериям, описанным выше. Соответственно, не- Z означает принадлежность к группе галактик с более стандартным видимым звездным населением. Для проверки нулевой гипотезы H_0 о том, что оба признака в исследуемой выборке независимы друг от друга, нужно составить таблицу 2x2, которая выглядит следующим образом:

Пример таблицы 2x2 для проверки независимости признаков

Признак	Y	не- Y	Всего
Z	m	$n - m$	n
не- Z	$M - m$	$N - n - (M - m)$	$N - n$
Всего	M	$N - M$	N

Здесь m , $n - m$, $M - m$, $N - n - (M - m)$, дают числа галактик в выборке, соответственно с признаками (Y, Z) , $(\text{не-}Y, Z)$, $(Y, \text{не-}Z)$, $(\text{не-}Y, \text{не-}Z)$. Как показано в книге [134](стр.77-78), при независимости признаков Y и Z , вероятность реализации таблицы с такими числами заполнения описывается гипергеометрическим распределением, которое при $N > 25$ хорошо приближается так называемой неполной бета-функцией $I_x(a, b)$, где параметры x , a , и b выражаются через числа заполнения таблицы 2×2 по формулам (27)–(30) на стр.74 из книги ([134], также приложение в работе [135]).

Если реальной корреляции признаков низкой светимости и “малого” возраста в выборке галактик войда нет, то при наблюдаемом распределении галактик по абсолютным величинам, какое бы значение пороговой величины M_{faint} мы не приняли, числа заполнения должны соответствовать относительно невысокой вероятности отклонения нулевой гипотезы.

Для более полного учета всей известной информации об эволюционно-молодых галактиках выборки войда Lунх-Сансер, при работе с таблицей независимости признаков 2×2 , использовано два свежих факта. Во-первых, в число эволюционно-молодых объектов добавили галактику J0723+3624 с величиной $M_B = -9.57$. Несмотря на то, что у этой очень маленькой галактики, члена необычного триплета в центральной части войда, не удается померить цвета периферии, ее рекордно высокая массовая доля газа (0.997) и голубой интегральный цвет, при любых разумных сценариях эволюции приводят к возрастам менее 2–3 млрд. лет (рис. 7 в работе [36]). С учетом сказанного, для $M_{\text{faint}} = -13.15$, таблица 2×2 выглядит так:

Таблица 2×2 для галактик войда

Признак	Y	не- Y	Всего
Z	6	12	18
не- Z	2	65	67
Всего	8	77	85

Расчет вероятности таблицы с этими числами заполнения по соответствующим формулам для неполной бета-функции дает значимый результат: $P(\text{отклонения } h_0) = 0.9993$. Интерпретация этого результата подразумевает, что имеется значимая статистическая связь между двумя признаками в том смысле, что доля эволюционно-молодых галактик значимо выше в группе с абсолютными величинами слабее $M_{\text{faint}} = -13.15$ (простое сравнение долей $6/18$ и $2/67$ указывает на видимое различие более чем на порядок величины). Для данного расчета эволюционно-молодая компонента UGC 5340b включена в выборку и ее M_B принята ярче, чем -13.15 . В противоположном случае уровень значимости будет еще выше.

Также, в подтверждении к полученному результату, стоит упомянуть две слабые ($M_B > -12.5$) галактики, принадлежащие войду Lynx-Cancer, для которых недавно были найдены свойства, позволяющие их отнести к “эволюционно-молодым” объектам. К ним относятся: галактика J0706+3020 с оценкой $12+\log(\text{O}/\text{H}) = 7.03 \pm 0.09$ (глава 2), очень голубым цветом и высокой массовой долей газа [115]; а также чрезвычайно богатая газом и очень голубая галактика AGC 198691 с металличностью $12+\log(\text{O}/\text{H}) = 7.02 \pm 0.03$ [95]. Если включить эти галактики в вышеупомянутую таблицу, то уровень значимости возрастет.

Обнаружение такой связи имеет два важных приложения. Первое связано с пониманием физики процессов, приводящих к преимущественному появлению эволюционно-молодых галактик только среди достаточно маломассивных объектов. Второе – методическое. Обнаруженная корреляция указывает на то, что для эффективного поиска подобных объектов в войдах необходимо исследовать галактики с абсолютными величинами слабее или около “порога”.

Вернемся к ситуации с голубыми цветами периферии нескольких галактик, для которых параметр O/H оказывается лишь немного ниже ожидаемого для их светимости (UGC 3672, 3860, 4117, 5272 и 5272b). Эти объекты не похожи на эволюционно-молодые, но их необычные цвета требуют дополнительного обсуждения. Одной из возможностей является относительно недавнее (на шкале 2–6 млрд. лет) внешнее возмущение, приведшее к повышенному темпу звездообразования, следы которого видны сейчас и во внешних областях. Действительно, для галактик UGC 3672, UGC 3860, UGC 4117 и пары UGC5272/5272b их оптическая морфология указывает на значительное возмущение и/или текущее взаимодействие. Дополнительное картографирование этих объектов в линии H α должно дать более веские свидетельства их возмущенного состояния.

3.4 Выводы

Суммируя проведенные исследования галактик войда, включая их статистический анализ и сравнение с другими данными и выборками, сформулированы следующие результаты и выводы:

1. Для 85-ти галактик войда Lynx-Cancer по изображениям из базы данных SDSS получены фотометрические параметры в фильтрах u, g, r, i , (полные величины и цвета, эффективные радиусы и соответствующие поверхностные яркости, оптические радиусы и радиусы Холмберга). По результатам анализа радиальных профилей поверхностной

яркости получены центральные поверхностные яркости и масштабные длины модельных дисков.

2. Цветовые индексы $(u-g)$, $(g-r)$, $(r-i)$ внешних частей галактик вне областей недавнего звездообразования сопоставлены с эволюционными треками пакета PEGASE2 и получены оценки времени, прошедшего с начала эпохи звездообразования T_{30} . Для $\sim 85\%$ всех галактик эти времена находятся в диапазоне $T_{30} \sim 10-13$ млрд.лет, типичном для галактик в более плотном окружении. Для 13-ти галактик их цвета приводят к существенно меньшим T_{30} . Для 7-ми они находятся в диапазоне $\sim 1-3.5$, а для 6-ти остальных – $\sim 4-6.5$ млрд. лет.
3. Среди галактик с необычными цветами внешних областей большинство имеет очень низкие значения металличности газа ($12 + \log(O/H) \lesssim 7.4$), что в 2-5 раз ниже ожидаемой для их светимости, и наибольшие значения эмпирического параметра содержания газа $\mathfrak{M}(HI)/L_B \gtrsim 2.5$. Оценив массы звезд для этой группы галактик, находим их массовую долю газа в диапазоне 94–99%, что является максимальным из всех известных. По своим свойствам эти галактики являются эволюционно-молодыми.
4. Сравнение статистических связей между наблюдаемыми параметрами галактик войда Lutz-Cancer и галактик из выборки Экваториального обзора (ES), отобранных исходно по их излучению в линии HI, показывает схожесть выборок в общем диапазоне светимостей. Однако, среди галактик войда имеется значимая часть, которая выпадает из общих закономерностей. Небольшая группа так называемых “рудиментарных” галактик обзора ES также имеет необычные свойства. Более детальные исследования, вероятно, покажут, какая их часть является аналогами необычных галактик войдов.
5. Группа эволюционно-молодых галактик составляет около 15% всех карликовых галактик низкой поверхностной яркости войда и представлена значимо чаще среди галактик низкой светимости ($M_B > -13.2$), где их доля достигает $\sim 30\%$. Это является свидетельством в пользу предсказываемого более сильного влияния окружения на менее массивные галактики и указанием к эффективному поиску таких необычных галактик.

Глава 4

Комплексное исследование нескольких необычных галактик войдов

4.1 Изолированная галактика UGC 4722 войда Lynx-Cancer

4.1.1 Введение

Галактика UGC 4722 входит в выборку галактик войда Lynx-Cancer. Это одна из 520 галактик, которые были определены как наиболее изолированные (“сиротские”) галактики Местного Сверхскопления [136]. UGC 4722 также является членом Каталога изолированных галактик (CIG), составленным в работе [137], и выборки AMIGA¹ [138]. У галактики UGC 4722 своеобразная структура с наличием длинного хвоста, простирающегося из северного конца диска галактики (см. рис. 4.1). Галактика отождествлена в работе [136], как одна из порядка 20 галактик “сирот” с пекулярной морфологией. Этот объект также рассматривался, как галактика, находящаяся под влиянием приливного взаимодействия с темной галактикой [139, 140]. Авторы работ [141] и [142] предположили, что Местная Вселенная может содержать компактные объекты, состоящие полностью из темной материи. В качестве проверки этой возможности, [139] искали особо изолированные галактики с морфологическими искажениями, которые предположительно могли быть результатом взаимодействия с невидимым спутником. Были найдены только 8 таких изолированных систем, с явными признаками морфологического искажения, из которых UGC 4722, с её протяженностью и необычным шлейфом, является одним из лучших кандидатов для исследования данной проблемы.

В настоящем разделе мы показываем, что эта система состоит из двух взаимодействующих компонент, обозначенных как UGC 4722 и UGC 4722C. Рассматриваются возможные

¹AMIGA — Analysis of the interstellar Medium of Isolated GALaxies

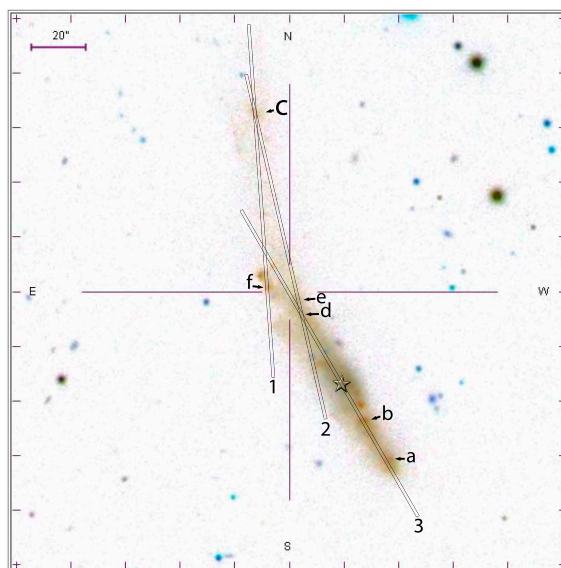


Рис. 4.1: Изображение из обзора SDSS в фильтрах *gri* (инвертированные цвета, размер $\sim 200''$) системы UGC 4722/UGC 4722C с наложенными позициями щели из наблюдений на БТА 17.11.2012 и 15.01.2013 (**№ 1** с позиционным углом $PA = 4^\circ$) и 18.11.2006 (**№ 2** с $PA = 13^\circ$ и **№ 3** с $PA = 30^\circ$). Стрелки с буквами указывают наиболее яркие области звездообразования, обнаруженные по P-V диаграммам (рис. 4.2 и 4.3). Звездочка показывает приблизительное положение центра галактики, соответствующее положению крутого градиента скорости на P-V диаграмме (рис. 4.3, нижняя панель).

сценарии, приведшие к такой необычной морфологии. Для анализа мы использовали новые данные БТА и фотометрию SDSS.

4.1.2 Спектроскопия на БТА

На телескопе БТА с помощью универсального редуктора светосилы SCORPIO, в комбинации с гризмами VPHG1200R и VPHG550G, были получены два длиннощелевых спектра UGC 4722. Основные наблюдательные параметры даны в таблице 4.1. Наблюдения, проведенные с гризмой VPHG1200R, использовались для исследования кинематики. Оценки содержания кислорода были получены по спектрам с гризмой VPHG550G. Позиции щели, которые были использованы для наблюдений с обеими гризмами, показаны на рис. 4.1, наложенные на поисковые карты SDSS в области UGC 4722 (размер поля $\sim 200''$). Как можно видеть на рис. 4.1, щель (обозначенная "1") проходила через диффузный шлейф, компактную эмиссионную туманность "C" на северном краю шлейфа и через яркую HII-область "f" на северном конце диска галактики.

Также для этой галактики были доступны архивные длиннощелевые спектры, снятые на БТА в ночь 18 ноября 2006, соответствующие позициям щели **№ 2** и **3** (рис. 4.1). Как видно из этого рисунка, положение щели **№ 3**, с позиционным углом 30° , ставилось вдоль большой

Таблица 4.1: Журнал наблюдений на 6-метровом телескопе системы UGC 4722

Дата	Время экс. (сек)	Кач-во изобр. (")	Возд. масса	Гризма VRHG	№ щели	Позиц. угол (°)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
2006.11.18	2×600	1.5	1.11	1200R	2	13
2006.11.18	2×600	1.5	1.08	1200R	3	30
2012.11.17	1×1200	1.7	1.06	1200R	1	4
2013.01.15	3×900	2.0	1.06	550G	1	4

оси диска и пересекала яркие HII-области **a** и **b**. Положение щели № 2, с позиционным углом 13°, было установлено вдоль края шлейфа так, чтобы захватить туманность “C” на границе шлейфа, а также северный край диска между двумя яркими HII-областями **d** и **e**.

Спектры обрабатывались с использованием стандартных процедур, как описано в разделе 1.3.1. Диаграммы “положение-скорость” (P-V) для самой сильной линии H α получены с помощью программ на языке MIDAS, написанных Д. Макаровым и А. Князевым, с деталями можно ознакомиться в работе [143].

4.1.3 Содержание кислорода

После обработки длиннощелевых спектров (положение щели № 2, гризма VRHG550G) получены двумерные, из которых для оценок металличности вырезаны два одномерных спектра с высоким отношением сигнал/шум для сильных эмиссионных линий. На рисунке А.2 приложения А показан одномерный спектр для ярчайшей центральной HII-области (область “f”, протяженность $\sim 1.8''$) в UGC 4722. Там же показан одномерный спектр (UGC 4722C) для самой яркой части слабой туманности “C” (протяженностью $\sim 3.2''$). Измеренные интенсивности линий, используемые для определения содержания кислорода O/H, приводятся в таблицах А6-А7 приложения А. В средней части этих таблиц даны расчетные параметры: коэффициент экстинкции $S(H\beta)$, эквивалентная ширина Бальмеровских абсорбций ($EW(abs)$), полный поток в линии H β , эквивалентная ширина эмиссии H β ($EW(H\beta)$) и взвешенное значение лучевой скорости, полученное по красным смещениям сильных эмиссионных линий.

В частности, учитывая скромные отношения сигнал/шум и эквивалентные ширины (EW) линии [OIII] $\lambda 4959$, очевидно, что не обнаружима чувствительная к температуре линия [OIII] $\lambda 4363$, которая, как правило, от 12 до 30 раз слабее в диапазоне температур T_e от 20000 К до 13000 К. Следовательно, мы не можем использовать классический T_e метод для

оценки O/H по этим спектрам. Поэтому мы применили методы, использующие только интенсивности сильных линий: полуэмпирический [37], эмпирические методы [38, 39, 40, 144, 99].

Соответствующие результирующие физические параметры и производные величины O/H , вместе с их погрешностями, приведены в конце таблиц А6-А7 в приложении А. Они включают в себя электронную температуру в основной эмиссионной зоне O^{++} , $T_e(OIII)$ (полученные с помощью полуэмпирического метода), температуру в зоне O^+ , $T_e(OII)$, и принятое значение электронной плотности N_e . Относительные содержания O^+ , O^{++} и O , а также их ошибки, показаны в следующих трех строках этих таблиц. В последних строчках таблиц приведены оценки $12+\log(O/H)$, полученные различными методами.

4.1.4 Кинематика ионизованного газа в линии $H\alpha$ по результатам длиннощелевых спектров

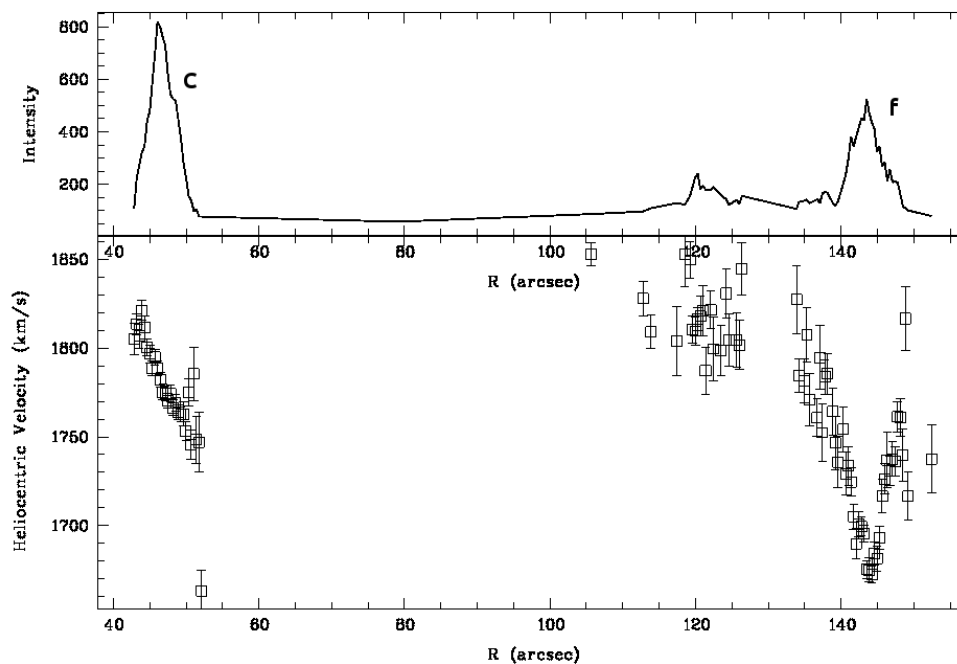


Рис. 4.2: Положение щели №1 (см. рис. 4.1). **Верхняя панель:** распределение интенсивности линии $H\alpha$ вдоль щели (север слева) в относительных единицах для галактики UGC 4722. **Нижняя панель:** диаграмма “Положение–Скорость” (P–V) для щели № 1 вдоль шлейфа UGC 4722. Ось X показывает позицию вдоль щели в угл. секундах, Y – относительные интенсивности и лучевые скорости в km s^{-1} . Буквы “C” и “F” на пиках интенсивности $H\alpha$ совпадают с соответствующими объектами на рис. 4.1.

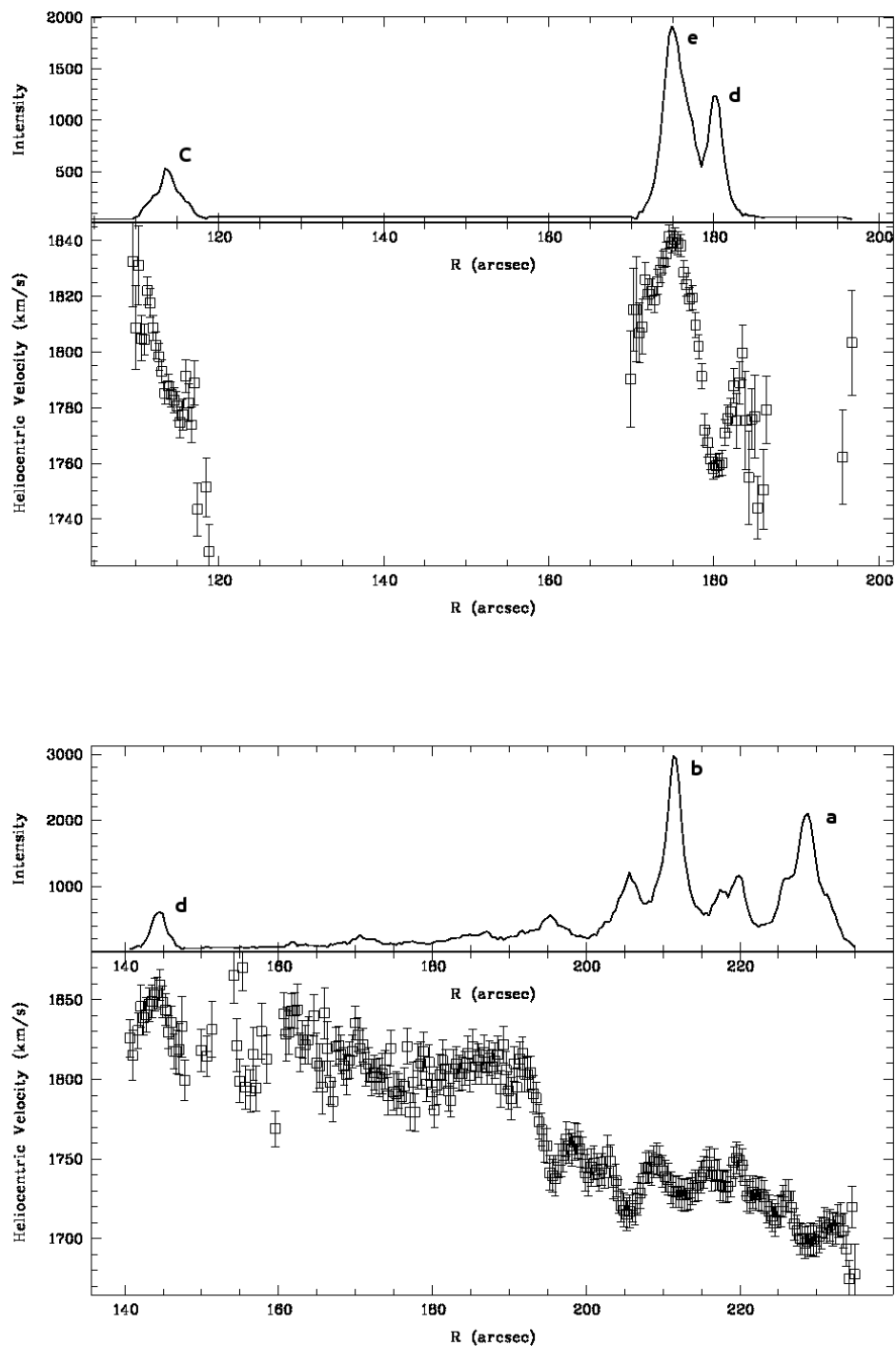


Рис. 4.3: То же, что и на рис. 4.2, но для наблюдений 18.11.2006. **Верхняя панель:** позиция щели № 2. Распределение интенсивности $H\alpha$ (произвольные единицы) и P-V диаграмма для щели, расположенной вдоль шлейфа и через компактную туманность на её северном краю (центрировано на $X \sim 114''$). **Нижняя панель:** позиция щели № 3. То же самое, что выше, но для диска вдоль ребра основной галактики UGC 4722. Ось X – позиция вдоль щели в угловых секундах. Ось Y – относительная интенсивность $H\alpha$ и лучевая скорость (в km s^{-1}) для этого положения, измеренная по линии $H\alpha$. Буквы “C”, “a” - “e” над пиками интенсивности $H\alpha$ совпадают с соответствующими объектами на рис. 4.1. Положения максимумов на P-V диаграмме хорошо согласуются с соответствующими пиками интенсивности $H\alpha$.

На рис. 4.2 (верхняя панель) показано распределение интенсивности линии $H\alpha$ (в относительных единицах) вдоль положения щели № 1 и соответствующие лучевые скорости в км с^{-1} (нижняя панель) для областей, где отношение сигнал/шум выше трех и ошибки скорости σ_V менее 20 км с^{-1} . Сплошная линия на рис. 4.2 показывает интенсивность внутри узкого диапазона длин волн (шириной $\delta\lambda = 10 \text{ \AA}$), центрированную к $H\alpha$, без коррекции за красное смещение. Буквы “С” и “Г” около пиков интенсивности $H\alpha$ соответствуют объектам на рис. 4.1. Полное расстояние вдоль щели составляет около $110''$. Левый край графика соответствует северному краю щели, который показывает движения ионизованного газа в туманности “С” на краю шлейфа. Размер этой туманности составляет $\sim 8''$, а направление щели наклонено под углом $PA_1 \sim 30^\circ$ к большой оси туманности. Правый край графика соответствует северо-западной части диска основной галактики с положением щели под углом $PA_2 \sim 25^\circ$ к большой оси галактики.

Как видно на нижней панели рисунка 4.2, скорость ионизованного газа в компоненте “С” центрирована на $V_{\text{hel}}(\text{C}) \sim 1780 \text{ км с}^{-1}$ и имеет разброс $\sim 75 \text{ км с}^{-1}$. Вариации скорости вдоль щели типичны для кривой вращения твердого тела. Для основной галактики скорость вдоль щели возмущена, с явным колебанием вблизи позиции самой яркой HII области (обозначена здесь как область “Г”). Форма и знак этого колебания указывают на расширяющуюся ионизованную оболочку вокруг HII области, с максимальными скоростями $\sim 60\text{-}80 \text{ км с}^{-1}$. Похожие случаи расширяющихся оболочек $H\alpha$ представлены, например, в [145]. Физические модели для этих оболочек обсуждаются в работе [146]. Ионизованный газ вне оболочки имеет скорость $\sim 1810 \text{ км с}^{-1}$ с разбросом $\pm 20\text{-}30 \text{ км с}^{-1}$.

На рис. 4.3 показаны аналогичные рисунку 4.2 данные наблюдений на БТА 18 ноября 2006. На верхней панели – распределение интенсивности $H\alpha$ и лучевых скоростей для позиции щели № 2 (вдоль северной части диска основной галактики, шлейфа и компонента “С”). Позиции HII-областей “С”, “е” и “d” также обозначены. Вблизи двух последних областей видны колебания скорости с амплитудами $30\text{-}40 \text{ км с}^{-1}$. Для компоненты “С” заметно твердотельное вращение с амплитудой $\sim 80\text{-}100 \text{ км с}^{-1}$. На нижней панели представлены такие же графики для позиции щели № 3 (вдоль большой оси галактики). Видно несколько HII областей в южной части диска (включая “а” и “b”), а также заметна область, обозначенная как “d”, на краю. Кривая вращения показывает крутой градиент вблизи центра галактики (т.е. абсцисса между 190 и 195), который выравнивается по мере приближения к краю видимой протяженности $H\alpha$ ($\sim 95''$). На предыдущих графиках, вблизи позиций ярких HII областей,

видны несколько колебаний скорости, указывающие на расширяющиеся оболочки. Полная амплитуда скорости вращения по этим колебаниям составляет ~ 130 км с $^{-1}$.

4.1.5 Фотометрические свойства

Проведена поверхностная фотометрия в круговых апертурах по изображениям базы данных SDSS. Полученные параметры даны в таблице 4.2. В ней содержатся измеренные полные звездные величины g_{tot} , цвета $(u - g)$, $(g - r)$ и $(r - i)$, звездные величины B_{tot} , не исправленные за поглощение в Млечном Пути, а также отношение осей b/a для обеих галактик. Во второй части таблицы приводятся: полные звездные величины эмиссии шлейфа, центральные поверхностные яркости в фильтрах g , r и B для галактики UGC4722, и этот же параметр, скорректированный за поглощение в Млечном Пути [81] и наклон. Величины в B полосе были получены с помощью формул из [78]. Кроме того, туда входят такие модельные параметры для галактики UGC4722, как индекс профиля Серсика и характеристический радиус. Для компоненты “С” и полной эмиссии “шлейф+С” поверхностная яркость соответствует модельно-независимым параметрам, поскольку довольно трудно применять модели к таким распределениям поверхностной яркости.

Таблица 4.2: Фотометрические параметры UGC 4722, UGC 4722C и “шлейфа”

Parameter	UGC 4722	UGC 4722C	“Шлейф”
g_{tot}	14.70 ± 0.01	19.26 ± 0.02	16.94 ± 0.01
$(u - g)_{\text{tot}}$	0.96 ± 0.01	0.56 ± 0.05	1.08 ± 0.03
$(g - r)_{\text{tot}}$	0.25 ± 0.01	0.11 ± 0.03	0.13 ± 0.01
$(r - i)_{\text{tot}}$	0.10 ± 0.01	-0.15 ± 0.04	0.09 ± 0.02
$(u - g)_{\text{tot},0}$	0.91 ± 0.01	0.51 ± 0.05	1.03 ± 0.03
$(g - r)_{\text{tot},0}$	0.20 ± 0.01	0.06 ± 0.03	0.08 ± 0.01
$(r - i)_{\text{tot},0}$	0.08 ± 0.01	-0.17 ± 0.04	0.07 ± 0.02
B_{tot}	15.01 ± 0.02	19.53 ± 0.03	17.21 ± 0.02
$(b/a)_{25}$	0.22	0.50	—
$\mu_g (m/\square'')$	24.04 ± 0.28	25.20 ± 0.02	24.80
$\mu_r (m/\square'')$	24.40 ± 0.15	24.99 ± 0.02	24.60
$\mu_B (m/\square'')$	24.15 ± 0.32	25.50 ± 0.02	25.10
$\mu_{B,c,i} (m/\square'')$	24.47 ± 0.32	—	—
$n_g(\text{Sersic})$	1.23 ± 0.24	—	—
$\alpha_g (")$	7.3 ± 1.8	—	—

4.1.6 Особенности шлейфа

Чтобы лучше понять свойства шлейфа, мы проанализировали полученные для него поверхностные яркости, звездные величины и цвета вдоль его длины. Мы не обнаружили вариаций цветов $ugri$ вдоль шлейфа, поэтому целесообразнее использовать интегральные параметры шлейфа. Мы оценили интегральные $ugri$ -цвета (после учета поглощения в Галактике [81]), как $(u - g)_0 = 1.03 \pm 0.03$, $(g - r)_0 = 0.08 \pm 0.01$ и $(r - i)_0 = 0.07 \pm 0.02$.

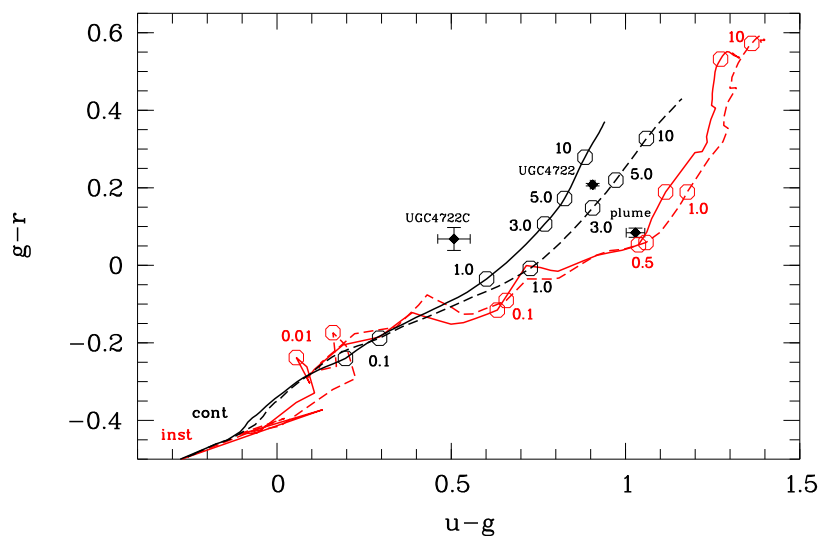


Рис. 4.4: Эволюционные треки PEGASE2 для постоянного (черным) и мгновенного звездообразования (красным) и металличности $z=0.002$. Сплошные линии соответствуют Солпитеровской [102] начальной функции масс, а штриховые линии — начальной функции масс Кроупа [103]. Кружки вдоль треков (с соответствующими числами) — времена, прошедшие с начала звездообразования (в млрд. лет). Интегральные цвета, скорректированные за поглощение в Галактике, показаны ромбами с барами ошибок, и обозначены именами объектов (“UGC4722” — основная Sdm галактика, “UGC4722C” — компактная эмиссионная туманность на краю шлейфа, “plume” — полная эмиссия от шлейфа и туманности “C”). Отметим, что цвета туманности “C” подвержены влиянию небулярной эмиссии, вследствие её недавней активности звездообразования. Однако для интегральных цветов “шлейфа” это дает незначительный вклад.

Как видно из рис. 4.4, полученные цвета хорошо согласуются с треками эволюционных моделей PEGASE2 [42], с металличностью $z=0.002$ ($\sim Z = Z_{\odot}/10$), для мгновенного звездообразования, как для Солпитеровской [102], так и для Кроуповской [103] начальной функции масс (НФМ). Металличность, взятая для треков, близка к найденной в центральной НII области туманности “C”. Данные треки, для двух НФМ, проходят очень близко друг к другу в этом временном диапазоне (вблизи 0.5 млрд. лет). Лучшее приближение цветов соответствует вспышке звездообразования с возрастом ~ 0.45 -0.5 млрд. лет для НФМ Солпитера.

Наблюдательные статистические данные указывают, что пик активности звездообразования во взаимодействующих галактиках происходит вблизи перицентра пролета (например, [147]). Численные модели (к примеру, [148]) также дают подобные прогнозы, хотя и для специфических начальных условий. Таким образом, полученное время от начала основного эпизода звездообразования примерно соответствует времени с момента последнего близкого столкновения между двумя галактиками. Это, в свою очередь, позволяет оценить относительную скорость в проекции на небо. Разделив проекционное расстояние между центрами UGC 4722 и туманности “С” (т.е. ~ 13.8 кпс) на время с начала перигалактического пролета (т.е. ~ 500 млн. лет), получаем $V_{\text{trans}} \sim 28 \text{ км с}^{-1}$.

Из моделей PEGASE2 можно определить множество параметров, зависящих от звездного населения, включая зависимость удельной светимости (из расчета на солнечную массу) во многих полосах от времени. Принимая эти параметры для эпохи $T=500$ млн. лет, из $M_V=3.78$ и цветового индекса $g-V=-0.11$ мы получаем $M_g=3.67$. Тогда для рассчитанной абсолютной звездной величины $M_{g,\text{plume}}=-15.38$ мы оцениваем полную звездную массу $4.6 \times 10^7 \mathcal{M}_\odot$. Эту оценку можно сравнить с полной массой HI ($\mathcal{M}(\text{HI})=78 \times 10^7 \mathcal{M}_\odot$) или полной массой газа ($\mathcal{M}(\text{HI}+\text{He})=1.33 \times \mathcal{M}(\text{HI})$), $\mathcal{M}_{\text{gas}}=104 \times 10^7 \mathcal{M}_\odot$. То есть, видимая звездная масса шлейфа включает в себя лишь $\sim 4\%$ от барионной массы.

В работе [149] было показано, что шлейфы могут образовываться из вещества, вытянутого из меньшего компаньона при столкновении “в лоб”. Для галактик с массивным диском лобовые столкновения должны приводить к образованию кольца (в экваториальной плоскости). Здесь могло быть проникающее столкновение меньшей галактики по краю диска основной галактики. Еще одна, более вероятная возможность заключается в том, что меньшая галактика подвергается в настоящее время столкновению – в этом случае из нее может быть вытянуто значительное количество вещества.

4.1.7 Обсуждение результатов

В таблице 4.3 приводятся основные параметры системы UGC 4722. Используя полные звездные величины в фильтрах g и r (таблица 4.2) и уравнения перехода, данные в работе [78], определены полные звездные величины в B полосе, $B_{\text{tot}}=15.01 \pm 0.02$ и 19.53 ± 0.03 для основной галактики и туманности “С” соответственно. Как упоминалось выше, предполагается, что шлейф состоит из вещества, вытянутого из более слабой галактики. Тогда, добавив интегральный свет от шлейфа к туманности “С”, получаем оценку полной светимости компа-

ньона. Эти полные звездные величины, обозначенные как “С” + шлейф, также приведены в таблице.

Согласно статье Пустильника и др. (2011) [33] и предположению из работы [60], что эта система имеет большую пекулярную скорость, взят модуль расстояния $\mu=32.22$ ($D=27.8$ Мпк). Отметим, что расстояние, принятое здесь, близко к среднему значению 26.2 Мпк из NED (которое определялось из зависимости Талли-Фишера). Соответствующие абсолютные величины отсюда равны $M_B^0 = -17.38$ (основная галактика), -12.86 (туманность “С”) и -15.18 (“С” + шлейф). Отношение $\mathfrak{M}(\text{HI})/L_B$ (в солнечных единицах) для галактик составляет: ~ 1.0 — для основной галактики и ~ 4.3 — для системы “С” + шлейф.

Таблица 4.3: Основные параметры UGC 4722 и UGC 4722C

Параметр	UGC 4722	UGC 4722C
R.A.(J2000.0)	09 00 23.54	09 00 26.11
DEC.(J2000.0)	+25 36 40.6	+25 38 21.4
A_B (из NED)	0.17	0.17
B_{tot}	15.01 ⁽¹⁾	19.53 ⁽¹⁾
B_{tot}		17.21 (“С” + шлейф)
$V_{\text{hel}}(\text{HI})(\text{км с}^{-1})$	1795±1 ⁽²⁾	1837±4 ⁽²⁾
$V_{\text{hel}}(\text{опт})(\text{км с}^{-1})$	1780±5 ⁽¹⁾	1795±5 ⁽¹⁾
$V_{\text{LG}}(\text{опт})(\text{км с}^{-1})$	1714	1729
Расстояние (Мпк)	27.8 ⁽¹⁾	27.8 ⁽¹⁾
M_B^0	-17.38 ⁽¹⁾	-12.86 ⁽¹⁾
M_B^0		-15.18 (“С” + шлейф)
Опт. размер (″) ⁽⁴⁾	90×20 ⁽¹⁾	10×5 ⁽¹⁾
Опт. размер (кпк)	12.1×2.7	1.35×0.67
$\mu_{B,c,i}^0(m/\square'')$	23.35 ⁽¹⁾	—
12+log(O/H)	7.51±0.04 ⁽¹⁾	7.35±0.04 ⁽¹⁾
V_{rot} (км с ⁻¹)	80 ⁽²⁾	43 ⁽³⁾
$\mathfrak{M}(\text{HI})/L_B^{(5)}$	1.0 ⁽¹⁾	4.3 ⁽¹⁾
T (осн. зв. население)	3–6 млрд. лет ⁽¹⁾	0.9–2.5 млрд. лет ⁽¹⁾

(1) – средневзвешенное значение по нескольким методам (подробнее в главе 2; (2) – получено из GMRT HI-профилей [150], (3) – Из $\text{H}\alpha$ P-V диаграмм; (4) – $a \times b$ at $\mu_B = 250 \text{ arcsec}^{-2}$; из $\text{H}\alpha$ P-V диаграмм (UGC 4722C); (5) – в солнечных единицах.

Мы получили две оценки O/H для этой системы: для центральной HI области туманности “С” и для яркой HI области на краю диска UGC 4722 (область “f”). Измеренные оценки металличностей нанесены на соотношение “O/H – M_B ” (раздел 2.3.1). Проведено сравнение с зависимостью, полученной для карликов Местного Объема с известными расстояниями.

Разброс в этой зависимости весьма мал, $\sigma_{(O/H)}=0.15$ dex. Сравнение показывает, что оценки O/H для наших двух карликов ниже на фактор ~ 3 для основной галактики UGC 4722 и на фактор ~ 2 для маломассивного компаньона UGC 4722C. Отклонение значимо больше, чем ошибки измерений. Этот разброс может быть связан с падением газа из “непроеволюционировавших” внешних частей галактик из-за сильного приливного возмущения [151, 152]. Надо отметить, что галактики в войде Lync-Cancer имеют систематически более низкие значения O/H (на ~ 30 -50%) (об этом подробнее в главе 2) для данной светимости, чем таковые оценки для галактик в более плотных областях.

4.1.8 Сравнение с подобными системами

Оптические данные, полученные в данной работе, с включением данных HI [150], позволяют предположить, что это система на самом деле состоит из пары взаимодействующих карликовых галактик. Это означает, что критерии отбора для выборок изолированных галактик позволяют иногда находить некоторое количество систем малого мержинга, которые изначально были классифицированы как изолированные галактики. Обнаружение того, что UGC 4722 состоит из пары галактик, а также открытия других пар и малых групп карликовых галактик в ближайших войдах [36, 153], согласуются с предположением [110], что сгущивание на малых масштабах в войдах аналогично тому, что наблюдается в областях повышенной плотности.

Единственная галактика с аналогичной морфологией, из найденных нами в литературе, – это DDO 169 (UGC 8331), близкая карликовая иррегулярная галактика ($M_B \sim -13.8$, $D_{\text{TRGB}}=4.4$ Мпк), которая использовалась во многих статистических исследованиях. Статья [154], посвященная этой галактике, основана на довольно неглубоком HI картировании на телескопе VLA (Very Large Array) и прямых снимках в линии H α . Более ранние карты HI, полученные с WSRT (Westerbork Synthesis Radio Telescope)², также предоставляют лишь ограниченную чувствительность. Авторы [154] не измеряли цвета шлейфа или самых ярких узлов на его краю. Однако, они обнаружили H α эмиссию лишь вблизи яркого центрального тела галактики. На картах VLA можно увидеть, что есть HI пик, который совпадает с оптическим узлом на краю шлейфа. Следовательно, UGC 8331 и UGC 4772 являются довольно схожими системами, но для выяснения деталей необходимо более детальное изучение UGC 8331.

²<http://www.nrao.edu/astrores/HIrogues/>

Хотя число найденных подобных систем ограничено, отметим, что система UGC 4722 имеет много общего с другими небольшими группами карликовых галактик, найденными в войдах. Аналогично UGC 4722, многие члены пар и триплетов в войде показывают повышенные значения $\mathfrak{M}(\text{HI})/L_B$ (~ 2 to 25), голубые цвета их внешних областей и низкие оценки O/H . Таковыми примерами являются: слияние в DDO 68 [121, 155, 133], триплет J0723+36 [36], пара HS 0822+3542/SAO 0822+3545 [153], пара J0852+13 и триплет MRK 407 (Ченгалур и др., в подготовке).

В настоящее время существует очень мало численных моделей, нацеленных на слияния чрезвычайно богатых газом малых систем. Такие исследования станут важным теоретическим дополнением к наблюдениям UGC 4722 и других систем, рассмотренных выше. Изучение процессов слияния малых богатых газом объектов также важно для более детального понимания моделей иерархического формирования галактик.

4.2 Самая богатая газом галактика войда J0723+3624: подтверждение природы оптического компонента

Ченгалур и Пустильник (2013) [36] провели HI-картирование на GMRT для очень богатой газом пары карликовых LSB галактик J0723+3621 и J0723+3622. Они открыли еще одно дополнительное HI облако на проекционном расстоянии 25 кпк от этой пары и оценили его массу в HI ($\sim 3 \times 10^7 \mathfrak{M}_\odot$). Авторы предположили, что это HI облако соответствует слабой голубой туманности SDSS J0723+3624, для которой в SDSS DR7 звездные величины равны $g=21.42$ и $r=21.33$. Оцененные нами полные звездные величины, измеренные по фотометрии в круговых апертурах, оказываются схожими в пределах их ошибок: $g_{\text{tot}}=21.41$ и $r_{\text{tot}}=21.33$ (подробнее в главе 3). После преобразования с помощью формул Лаптона (2005) [78], авторы получили звездную величину $B_{\text{tot}}=21.68$ ($M_B=-9.57$). Они обнаружили для данного объекта рекордно высокое отношение массы газа к светимости, $\mathfrak{M}(\text{HI})/L_B = 25.4$. Однако, для уверенности результата было необходимо исключить случайное совпадение HI облака с голубым диффузным объектом. В ходе данной работы, для этого оптического объекта оценено красное смещение.

На БТА с прибором SCORPIO и решеткой VPHG1200R, в ночь с 2012.11.17, был получен 20-минутный спектр для SDSS J0723+3624, с качеством изображения $2''$. На рисунке 4.5 представлен довольно зашумленный одномерный спектр (в пределах $4.5''$ вдоль щели, где видна $\text{H}\alpha$) этого самого слабого известного объекта войда Лунх-Сансер. Единствен-

ная заметная эмиссия – это $H\alpha$ с эквивалентной шириной $EW=17 \text{ \AA}$ и потоком в линии $0.035 \pm 0.006 \times 10^{-16} \text{ эрг сек}^{-1} \text{ см}^{-2}$. Последняя величина близка к нижнему пределу, поскольку область, суммированная вдоль щели $\sim 4.5 \text{ \AA}$, на порядок величины меньше, чем область, заключенная внутри эффективного радиуса (см. фотометрические параметры этой карликовой галактики в главе 3). Мы предположили, что $H\alpha$ простирается до эффективного радиуса области с похожей яркостью, и приняли, что полный поток в $H\alpha$ в 5-10 раз больше измеренного на щели: $F(H\alpha) = (0.17-0.35) \times 10^{-16} \text{ эрг сек}^{-1} \text{ см}^{-2}$.

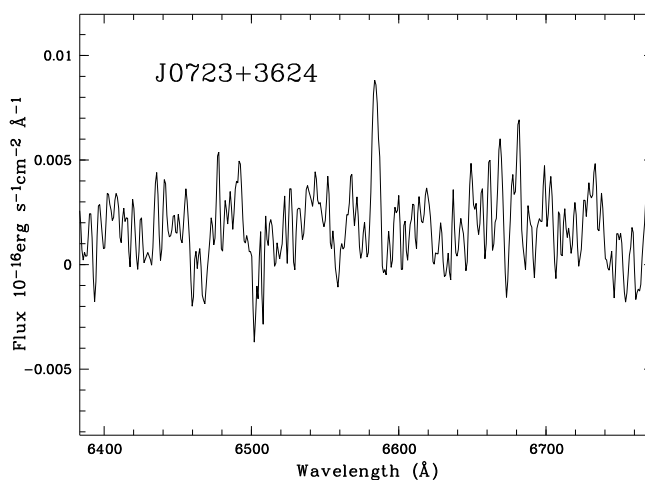


Рис. 4.5: Одномерный спектр самой слабой известной галактики в войде Lynx-Cancer, SDSS J0723+3624 ($M_B = -9.7$). Эта галактика является членом богатого газом триплета карликовых галактик, расположенного вблизи центра войда [36]. Измеренное красное смещение по $H\alpha$ подтверждает правильное отождествление $H\alpha$ со слабой ($g \sim 21.6$) оптической голубой туманностью.

Оцененная по $H\alpha$ лучевая скорость $V_{\text{hel}} = 943 \pm 23 \text{ км с}^{-1}$, очень близка к скорости $V(H\alpha) = 938 \pm 1 \text{ км с}^{-1}$, оцененной по $H\alpha$, из работы [36]. Результирующая светимость $L(H\alpha) = (0.5-1) \times 10^{36} \text{ эрг сек}^{-1}$ соответствует, согласно известному соотношению из работы [156], темпу звездообразования (SFR), равному $(3-6) \times 10^{-6} M_{\odot}$ в год. Низкое значение $EW(H\alpha)$ указывает (согласно диаграммам из Starburst99³) либо на мгновенную вспышку звездообразования с возрастом ~ 16 млн. лет, либо на непрерывное звездообразование в течение ~ 600 млн. лет для более крутой начальной функции масс (НФМ), чем у Солпитера ($\alpha = 3.30$). Для стандартного наклона НФМ $\alpha = 2.35$, непрерывное звездообразование должно длиться несколько млрд. лет и давать в итоге массу звезд $\sim 60000 M_{\odot}$. Такая масса включала бы в себя меньше, чем 0.002 от полной массы газа для этой карликовой галактики ($4 \times 10^7 M_{\odot}$). Последняя

³Starburst99 - веб пакет и программное обеспечение, предназначенное для моделирования спектрофотометрических и связанных с ними свойств звездообразования галактик. <http://www.stsci.edu/science/starburst99/docs/parameters.html>

величина согласуется с очень высокой массовой долей газа (0.997), полученной в работе [36]. Совпадение оптической и HI скорости для этой необычной карликовой галактики позволяет отбросить версию случайной проекции. Следовательно, подтверждается вывод, предложенный в статье [36], о замедленной эволюции в этой галактике, расположенной вблизи центра войда.

4.3 Свойства двух очень низкометаллических LSB карликов войда Eridanus

4.3.1 Введение

В работе Гусевой и др. (2009) [157] среди других низкометаллических галактик была представлена экстремально низкометаллическая галактика SDSS J0015+0104. Обилие кислорода в ее HI области на краю галактики составляет $12+\log(\text{O}/\text{H})=7.17$ [158]. Это типичная LSB (карликовая галактика низкой поверхностной яркости) с одной HI областью на краю оптического тела. Для сравнения, у экстремально низкометаллической dIrr галактики SBS 0335-052W содержание кислорода (~ 7.00 [91]) мало изменяется вдоль тела галактики. В данном разделе представлены HI данные и фотометрический анализ SDSS изображений в фильтрах u, g, r, i для галактики SDSS J0015+0104 и для другого очень низкометаллического карлика SDSS J2354-0005 ($12+\log(\text{O}/\text{H})=7.36$). Эти LSB карликовые галактики находятся в большой области, лишенной ярких галактик, известной как Eridanus войд. Поэтому разумно сопоставить свойства данных объектов со свойствами нескольких наиболее бедных металлами LSB карликовых галактик в Lync-Sagae войде.

4.3.2 HI наблюдения и результаты

HI наблюдения проведены на радиотелескопе Нансе (NRT), с площадью зеркала $200 \times 34.5 \text{ m}^2$ и шириной диаграммы направленности (HPBW) $3.7'$ (восток-запад) $\times 22'$ (север-юг). Данные были получены в период с 2011 по 2012 годы с общим накоплением на объект ~ 140 мин для J0015+0104 и ~ 110 мин для J2354-0005. Использовалась новая система антенна+приемник F.O.R.T. [159]. Был использован 8192-канальный коррелятор с полной полосой 12.5 МГц. Перекрываемый диапазон скоростей – около 2700 km s^{-1} , с расстоянием между каналами 1.3 km s^{-1} до сглаживания. Более подробная информация о наблюдениях на NRT есть в статье Пустильника и Мартина (2007) [160].

Левая и правая поляризации спектров калибровались и обрабатывались независимо, а за-

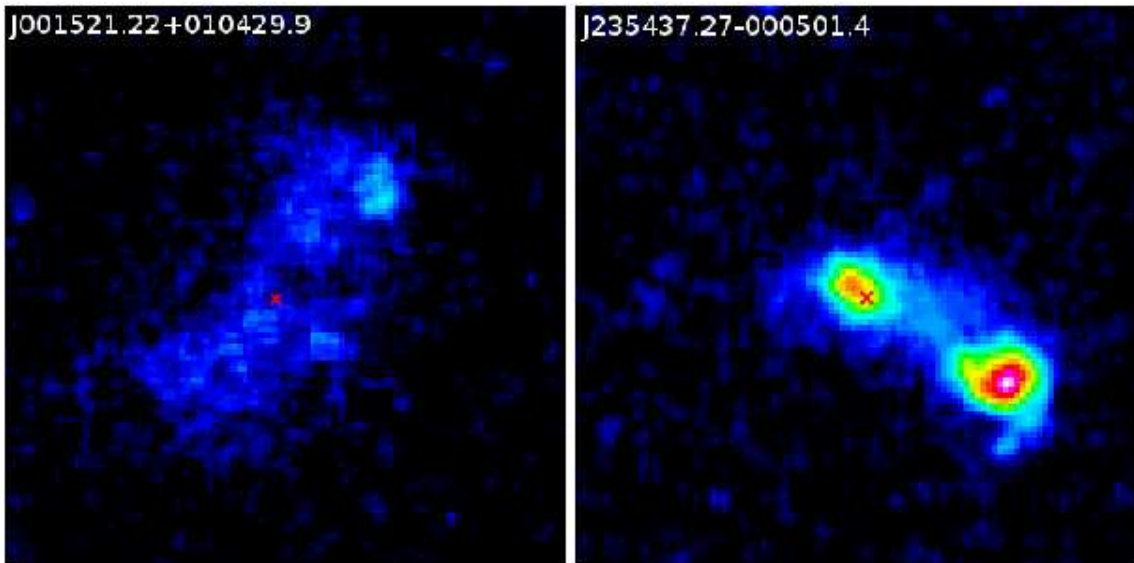


Рис. 4.6: **Левая панель:** изображение SDSS J0015+0104 в g -фильтре в условных цветах, с принятым геометрическим центром, отмеченным красным крестиком. Общий размер поля составляет $\sim 40'' \times 40''$. Север сверху, восток справа. **Правая панель:** аналогичное изображение для SDSS J2354-0005. Соседний объект на $\sim 10''$ является фоновой галактикой с красным смещением ~ 0.165 [157]. Он был замаскирован при проведении поверхностной фотометрии основной галактики.

тем усреднялись. Оценки погрешности рассчитаны из работы Шнайдер и др. (1986) [161]. На NRT полуширина диаграммы в вертикальном направлении $22'$ соответствует угловым расстояниям $\pm 11'$ в направлении север-юг от направления на исходный объект. На расстоянии исследуемых галактик ~ 30 Мпк это соответствует линейным масштабам порядка ~ 100 кпк. Внутри этой области на небе не найдено потенциальных галактик, которые могли бы давать дополнительное излучение во время наблюдений.

На рис. 4.7 показаны полученные профили линии H I 21 см для SDSS J0015+0104 и J2354-0005. Узкий профиль H I для галактики J0015+0104 имеет высокое сигнал/шум и выглядит как стандартная гауссиана, и поэтому его параметры определяются непосредственно. Ее полный поток в линии H I равен $F(\text{H I}) = 0.81 \pm 0.04$ Дж км с^{-1} . Центральная скорость H I профиля - 2035 ± 3 км с^{-1} . Для сравнения, оптическая скорость по эмиссионным линиям SDSS хорошо соответствует: $V_{\text{opt}} = 2066 \pm 64$ км с^{-1} . Ширины профиля $W_{50} = 21.2 \pm 2$ км с^{-1} и $W_{20} = 29.4 \pm 3$ км с^{-1} .

Для SDSS J2354-0005 профиль более широкий и его отношение сигнал/шум хуже. Интегральный поток данной галактики в линии H I равен $F(\text{H I}) = 0.50 \pm 0.04$ Дж км с^{-1} . Параметр $W_{50} = 38.5 \pm 7.3$ км с^{-1} . Центральная скорость пика в H I (2310 ± 4 км с^{-1}) очень близка к оптической скорости $V_{\text{opt}} = 2311$ км с^{-1} , полученной из SDSS в работе [157].

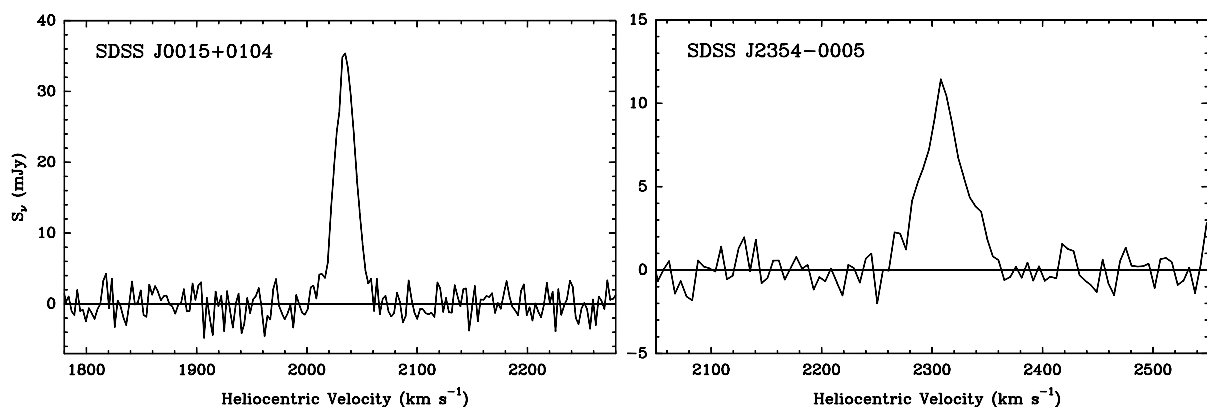


Рис. 4.7: NRT профили в линии H I для галактик SDSS J0015+0104 и SDSS J2354-0005. X-ось показывает гелиоцентрическую радиальную скорость в км с⁻¹. Y-ось показывает плотность потока в мДж.

Для оценок глобальных параметров галактики J0015+0104 мы приняли расстояние $D=28.4$ Мпк. Это значение взято из NED с постоянной Хаббла $73 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$, для модели “Virgo-infall” [162], и с коррекцией на 0.4 Мпк, что составляет разницу между скоростью $V_{\text{hel}}=2066 \pm 64 \text{ км с}^{-1}$, взятой из NED, и новым значением с лучшей точностью, полученным из нашего H I профиля. Аналогично, для J2354-0005 мы принимаем расстояние $D=32.1$ Мпк. Линейный масштаб соответствует 138 и 156 пк на $1''$. Масса атомарного водорода H I для галактик определяется из известного соотношения для эмиссии H I в оптически тонком слое (согласно, [105]). С учетом вышесказанного, мы получаем оценки массы атомарного водорода, $\mathcal{M}(\text{H I})=(1.82 \pm 0.15) \times 10^8 \mathcal{M}_{\odot}$ для J0015+0104 и $(1.22 \pm 0.11) \times 10^8 \mathcal{M}_{\odot}$ для J2354-0005.

4.3.3 Фотометрические свойства и оценки возрастов

Для фотометрии взяты изображения в фильтрах u, g, r, i из базы данных SDSS DR7. Для построения профилей поверхностной яркости (SB) геометрический центр для каждой галактики был принят нами визуально (отмечен красным крестиком на рис. 4.6). Центр SDSS J0015+0105 находится на расстоянии $\sim 10''$ от положения края H II области, отождествленной в SDSS как эмиссионная галактика, спектр которой был измерен в [158]. Для SDSS J2354-0005 центр был принят на расстоянии $\sim 1''$ от эмиссионной области, отождествленной в SDSS для оценки соответствующего красного смещения.

Из радиальных профилей поверхностной яркости в g -фильтре и $g-r$ цвете, представленных на рисунке 4.8, можно получить “усредненную” оценку цвета для основного “диска” (за исключением внешних частей с большими ошибками из-за шума). В галактике J0015+0104 область в пределах $R=15''$ соответствует цветам $g-r \sim 0.15$. С помо-

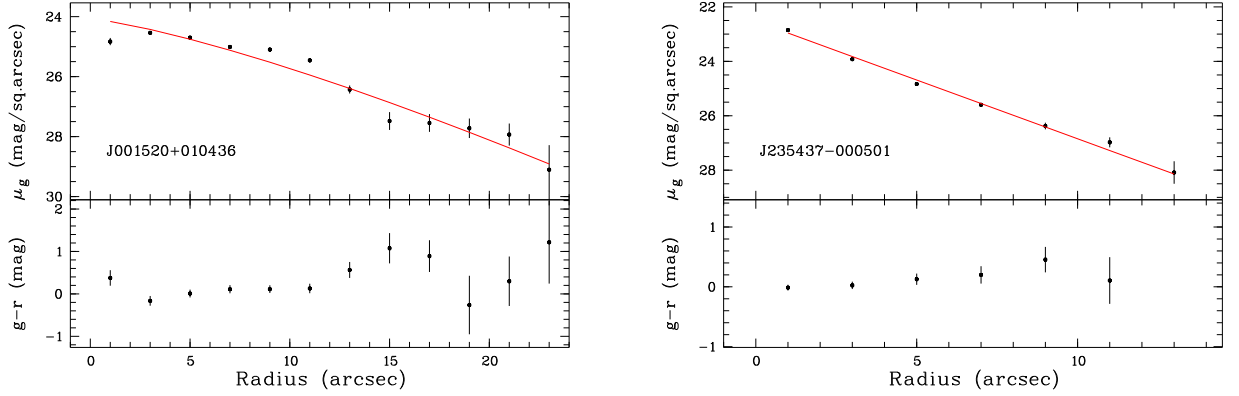


Рис. 4.8: **Левая панель:** поверхностная яркость в g -фильтре и цвета $g-r$, в зависимости от эффективного радиуса для SDSS J0015+0104. Сплошные красные линии показывают профиль Серсика, проведенный по точкам $<23''$, исключая самую центральную область и две точки на радиусе $9''$ и $11''$, как явно связанные с наложением света от III области. **Правая панель:** то же самое для галактики SDSS J2354-0005. Профиль Серсика проведен по всем точкам кроме центральной области.

щью формул преобразования из [78] получаем соотношение $\mu_B = \mu_g + 0.27^m / \square''$. Затем из SB профиля галактики в g -фильтре находим “оптический” радиус R_{opt} и радиус Холмберга R_{Hol} : $R_{\text{opt,eff}} = 6.4''$ и $R_{\text{Hol,eff}} = 12.4''$. Применяя для эффективных радиусов поправочный коэффициент $(b/a)^{-1/2} = 1.17$, где соотношение осей для галактики $b/a = 0.73$ получено из нашей фотометрии, получаем “оптический” радиус $R_{\text{opt}} = 7.5''$ (~ 1.03 кпк) и радиус “Холмберга” $R_{\text{Hol}} = 14.5''$ (~ 2.0 кпк). Аналогичные оценки для J2354-0005 с “усредненным” цветом $(g-r) = \sim 0.10$: $R_{\text{opt,eff}} = 5.0''$ и $R_{\text{Hol,eff}} = 8.7''$ и с учетом поправки $R_{\text{opt}} = 6.7''$ (~ 1.04 кпк) и $R_{\text{Hol}} = 11.6''$ (~ 1.8 кпк).

Измеренные величины g_{tot} , интегральные цвета $(u-g)$, $(g-r)$, $(r-i)$ и полученные B_{tot} , а также соотношение осей b/a , приведены в верхней части таблицы 4.4. В средней части даны центральные SB в фильтрах g , r и B , а также последний параметр с поправкой на экстинкцию в нашей Галактике [163] и наклон. В таблицу также включены модельно-зависимые параметры для g -фильтра: индекс Серсика (n_g) и его характерный радиус (α_g). В трех нижних строках представлены $(u-g)$, $(g-r)$ и $(r-i)$ цвета внешних областей обеих галактик, исправленные за экстинкцию. В последней строчке показаны оценки возрастов самого старого видимого звездного населения, из сравнения цветов соответствующего звездного населения с модельными эволюционными треками пакета PEGASE2 (подробнее о методе в разделе 1.5). Как видно из радиального профиля цвета $(g-r)$ для J0015+0104, на рис. 4.8 (слева), в связи с упомянутыми выше III областями во внешних частях галактики, трудно оценить вклад

Таблица 4.4: Фотометрические параметры J0015+0104 и J2354-0005

Parameter	J0015+0105	J2354-0005
$g_{\text{tot}}^{(1)}$	18.02 ± 0.01	18.52 ± 0.02
$(u - g)_{\text{tot}}^{(1)}$	0.91 ± 0.03	0.58 ± 0.04
$(g - r)_{\text{tot}}^{(1)}$	0.19 ± 0.01	0.10 ± 0.03
$(r - i)_{\text{tot}}^{(1)}$	-0.08 ± 0.01	0.13 ± 0.04
$B_{\text{tot}}^{(1)}$	18.31 ± 0.02	18.79 ± 0.03
$(b/a)_{25}$	0.734	0.563
$\mu_{0,g} (m/\square'')$	24.04 ± 0.28	22.75 ± 0.08
$\mu_{0,r} (m/\square'')$	24.40 ± 0.15	22.85 ± 0.10
$\mu_{0,B} (m/\square'')$	24.15 ± 0.32	23.01 ± 0.12
$\mu_{0,B,c,i} (m/\square'')$	24.47 ± 0.32	23.55 ± 0.12
$n_g(\text{Sérsic})$	1.23 ± 0.24	1.00 ± 0.01
$\alpha_g(\text{arcsec})$	7.3 ± 1.8	2.7 ± 0.1
$(u - g)_{\text{outer,c}}^{(2)}$	0.93 ± 0.08	0.79 ± 0.05
$(g - r)_{\text{outer,c}}^{(2)}$	0.19 ± 0.05	0.09 ± 0.03
$(r - i)_{\text{outer,c}}^{(2)}$	0.15 ± 0.07	0.03 ± 0.04
$T^{(3)}$ (млрд. лет)	4.5 ± 1.5	2.7 ± 0.8

- (1) – не исправлены за экстинкцию в нашей Галактике;
(2) – скорректированы за экстинкцию в нашей Галактике;
(3) – возраста самого старого видимого звездного населения

основного звездного населения в цвет ее периферии.

На рис. 4.9 показано сопоставление цветов внешних частей (таблица 4.4) для J0015+0104 и J2354-0005 (ромбы с барами ошибок) с модельными треками из пакета PEGASE2. Интегральные цвета для J0015+0104 попадают между треками с НФМ Солпитера и Кроупа для непрерывных треков звездообразования. Достаточно голубые $(u - g)$ и $(g - r)$ цвета этой галактики соответствуют возрастам ~ 3 млрд. лет. Ромбы с ошибками, соответствующие цветам внешних частей (получаемые интегрированием потока в 14 маленьких круглых апертурах, со средним расстоянием $11''$ или ~ 1.5 кпк от принятого центра), попадают между треками Солпитера и Кроупа для непрерывного закона звездообразования, что соответствует возрастам $\sim 4.5 \pm 1.5$ млрд. лет. Это намного меньше возрастов, соответствующих большинству карликовых галактик позднего типа ($\sim 10-13$ млрд. лет), для которых были получены подобные данные (например, [164, 165, 166]). Для J2354-0005 интегральный цвет немного голубее, что может быть связано со значительным вкладом цвета от центральной области звездообразования. Цвета внешних частей получены интегрированием потока в пяти маленьких круглых

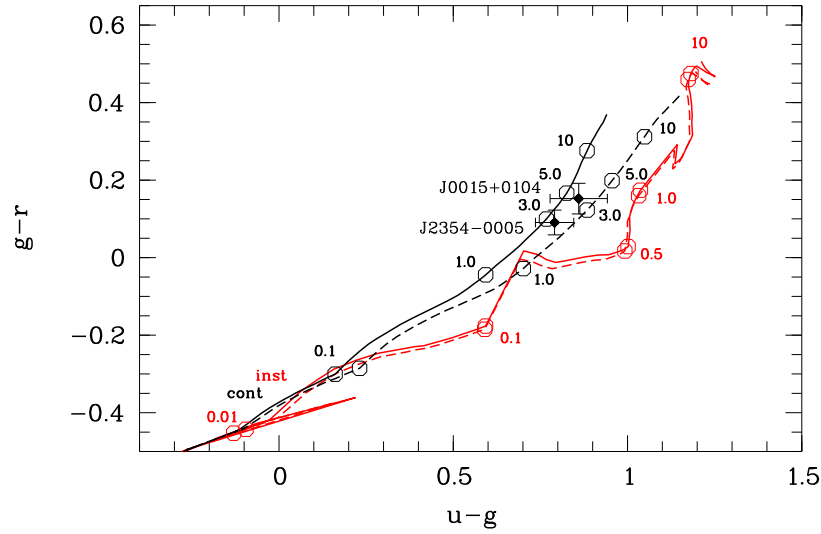


Рис. 4.9: Два ромба с барами ошибок – показатели ugr цветов внешних частей (см. описание в тексте) для SDSS J0015+0104 и J2354-0005, в сравнении с эволюционными треками PEGASE2 (с учетом небольшого сдвига из-за красного смещения галактик) для мгновенного (красные треки) и непрерывного (черные треки) законов ЗО. Отметки вдоль треков показывают время (в млрд. лет) от начального эпизода ЗО. Для треков принята металличность $z=0.0004$, как лучшее приближение к оцененной металличности газа в этих галактиках. Сплошные линии соответствуют НФМ Солпитера, а штриховые – НФМ Кроупа.

апертурах, со средним лучевым расстоянием $4.4''$ (~ 0.7 кпк) от центра. На двухцветной диаграмме данный цвет ложится на трек с НФМ Солпитера с непрерывным ЗО и соответствует возрастам $\sim 2.7 \pm 0.8$ млрд. лет. На двухцветных диаграммах gri (не показано) оба трека проходят слишком близко друг к другу, поэтому диаграммы gri цветов для галактик были бы непредставительны. Тем не менее, измеренные $(r-i)$ цвета соответствуют вышеприведенным выводам, полученным из ugr цветов.

4.3.4 Сравнение с типичными LSB карликами

В таблице 4.5 приведены основные параметры изучаемых галактик. Поскольку координаты LSB карликовой галактики J0015+0104 определены в SDSS некорректно, принимаем координаты ее геометрического центра, а не НII области, расположенной на краю галактики. Для J2354-0005 сохраняем SDSS координаты эмиссионной области, которая расположена на расстоянии $\sim 1''$ от основного центрального тела. Из интегральной величины в фильтре g (Табл. 4.4), с использованием формул [78], получены интегральные B -величины для галактик $B_{\text{tot}}=18.31 \pm 0.03$ и 18.79 ± 0.033 соответственно. Для принятых модулей расстояния $(m-M)=32.27$ ($D=28.4$ Мпк) и $(m-M)=32.53$ ($D=32.1$ Мпк), их абсолютные величины равны

Таблица 4.5: Основные параметры SDSS J0015+0104, J2354–0005, J0926+3343 и среднее для выборки из 9 типичных LSB карликов

Параметр	J0015+0104	J2354–0005	J0926+3343	“типичные” LSBD ⁽⁹⁾
R.A.(J2000.0)	00 15 21.22	23 54 37.30	09 26 09.45	–
DEC.(J2000.0)	+01 04 29.9	–00 05 06.1	+33 43 04.1	–
A_B (из NED)	0.11	0.14	0.08	–
B_{tot}	18.31 ⁽¹⁾	18.79 ⁽¹⁾	17.34 ⁽⁶⁾	–
$V_{\text{hel}}(\text{HI})(\text{км с}^{-1})$	2035±1 ⁽¹⁾	2310±4 ⁽¹⁾	536 ⁽⁶⁾	–
Расстояние (Мпк)	28.4 ⁽¹⁾	32.1 ⁽¹⁾	10.7 ⁽⁶⁾	16.0
M_B^0	–14.07 ⁽¹⁾	–13.88 ⁽¹⁾	–12.90 ⁽⁶⁾	–15.53
Опт. разм. (″) ⁽³⁾	7.5×5.5 ⁽¹⁾	6.5×3.6 ⁽¹⁾	35.8×9.9 ⁽⁶⁾	–
Опт. разм. (кпк)	1.03×0.75	1.01×0.56	0.93×0.26 ⁽⁶⁾	–
$\mu_{B,c,i}^0 (m/\square'')$	24.47 ⁽¹⁾	23.55 ⁽¹⁾	25.4 ⁽⁶⁾	23.70
12+log(O/H)	7.17±0.07 ⁽⁸⁾	7.36±0.13 ⁽⁷⁾	7.12 ⁽⁶⁾	8.0
HI int.flux ⁽⁴⁾	0.81±0.04 ⁽²⁾	0.50±0.04 ⁽²⁾	2.54 ⁽⁶⁾	–
$W_{50} (\text{км с}^{-1})$	22±2 ⁽²⁾	38±7 ⁽²⁾	47.4 ⁽⁶⁾	–
$W_{20} (\text{км с}^{-1})$	32±3 ⁽²⁾	70±12 ⁽²⁾	80.5 ⁽⁶⁾	–
$\mathfrak{M}(\text{HI})/L_B^{(5)}$	2.35 ⁽¹⁾	2.2 ⁽¹⁾	3.0 ⁽⁶⁾	2.2
f_{gas}	0.98 ⁽¹⁾	0.97 ⁽¹⁾	0.98 ⁽¹⁾	0.89
$T(\text{млрд. лет})^{(10)}$	3–6 ⁽¹⁾	0.9–2.5 ⁽¹⁾	1–3 ⁽⁶⁾	~10

(1) – получено в настоящей работе; (2) – взято из NRT профилей HI; (3) – $a \times b$, соответствующие $\mu_B = 25.0^m/\square''$; (4) – в единицах $\text{Jy} \cdot \text{км с}^{-1}$; (5) – в солнечных единицах; (6) – из работы [65]; (7) – из работы [157]; (8) – согласно [158]; (9) – среднее значения для выборки LSB галактик из работы [167]; (10) – возраст основного звездного населения.

$M_B^0 = -14.07$ и -13.88 . Последние соответствуют $L_B = 6.55$ и $5.47 \times 10^7 L_{B\odot}$. Затем из $\mathfrak{M}(\text{HI})$ можно получить соотношение $\mathfrak{M}(\text{HI})/L_B \sim 2.35$ и ~ 2.2 (в солнечных единицах), а также массовые доли газа (подробнее в разделе 1.6).

В таблице 4.5, наряду с основными параметрами для SDSS J0015+0104 и J2354–0005, для сравнения приведены свойства галактики SDSS J0926+3343 войда Lynx-Cancer, металличность которой оценена на уровне $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 7.12$ [65]. Как видно, отличие их основных параметров (масса газа, центральные SB, светимости в фильтре B) не больше, чем в 2-3 раза. Их металличности O/H и высокие массовые доли газа очень близки. Возрасты их самого старого видимого звездного населения не являются космологическими. В пределах ошибок они могут отличаться в несколько раз или могут быть примерно аналогичными, если принимать $T \sim 3$ млрд. лет.

Кроме того, в таблице 4.5 мы даем аналогичные параметры типичных LSB карликов. Одна из лучших выборок LSB карликовых галактик позднего типа в Местном Объеме изучена в работе Ван Зее и Хэйнес (2006) [167]. Мы провели простой статистический анализ свойств этой подвыборки (в нее входят галактики UGC2684, UGCA20, UGC3174, UGCA357, UGC891, UGC5716, UGC300, UGC11820 и UGC634) и обобщили их в последнем столбце таблицы 4.5. Данная подвыборка очень похожа по светимостям, центральной SB (как и ожидалось из их определения) и отношению $\mathcal{M}(\text{HI})/L_B$ с двумя исследуемыми галактиками войда Eridanus и уникальной галактикой SDSS J0926+3343 войда Lynx-Cancer. Однако, для галактик из работы [167] оценки O/H обычно в четыре-восемь раз выше при данной светимости, и их массовая доля газа соответствует значительно большей доле звездной массы. Последнее связано с тем, что их интегральные цвета – преимущественно красные. Таким образом, можно сделать вывод, что рассматриваемые в настоящей работе LSB карлики отличаются от более типичных тем, что имеют экстремально низкие металличности (по сравнению с ожидаемым для их светимости, см. [34, 35]), а также очень голубые интегральные и периферийные цвета.

Такие необычные карликовые LSB галактики, которые сочетают в себе очень низкую металличность и очень высокую массовую долю газа и достаточно голубые цвета звездного населения во внешних частях галактики, встречаются крайне редко. До сих пор их находят преимущественно в войдах (и иногда на периферии групп галактик [35]). Несколько галактик с $f_{\text{gas}} \sim 0.9$, найденных в работах [168, 169], можно было бы отнести к подобным объектам, но необходимо более подробное изучение. К примеру, сравнительно недавно в Обзоре Галактик Войдов (Void Galaxy Survey) рядом с центром войда были найдены три очень богатых газом карликовых галактики [110]. Для лучшего понимания их природы необходимо исследовать окружение этих галактик. Исследование непосредственного окружения в NED для объекта SDSS J0015+0104 не выявило галактик с известными радиальными скоростями в пределах расстояний ~ 2 Мпк и $\Delta V \sim 500$ км с⁻¹. Более тщательный анализ соседнего региона неба показывает, что на проекционном расстоянии ближе, чем 7 Мпк с $\Delta V \sim 500$ км с⁻¹, нет ярких галактик с $M_B < -19$. Это согласуется с отождествлением данной ячейки местной Вселенной, как части войда Eridanus, в соответствии с описанием из работы Фэйрэла (1998) [58]. В таблице 4.1 в их работе войд Eridanus расположен на небе с R.A. ~ 1.0 h, Dec. $\sim 0^\circ$ и на расстоянии, соответствующем $V_{LG} \sim 2500$ км с⁻¹. Подобная проверка окружения в NED для объекта J2354-0005 показывает, что она также находится внутри войда, но ближе к его границе. Ближайшая яркая галактика UGC 12857 расположена на расстоянии 0.86 Мпк и $\Delta V = 166$ км с⁻¹,

или на физическом расстоянии 2.4 Мпк. Еще одна яркая галактика NGC 7716 находится на проекционном расстоянии ~ 2.5 Мпк, с $\Delta V = 260$ км с⁻¹, то есть на физическом расстоянии 4.3 Мпк.

Как говорилось выше, две очень низкометаллических LSB карликовых галактики похожи на несколько самых низкометаллических LSB карликов в войде Lynx-Cancer, описанных в статье [35]. Очень высокая концентрация таких “эволюционно молодых” галактик в этой пустоте указывает на то, что окружение с очень низкой плотностью может обеспечивать специальные условия для формирования и эволюции маломассивных галактик. Существование в войде Eridanus этих двух необычных LSB карликов с экстремально низким содержанием металлов согласуется с более общим заявлением об эффекте окружения в войдах, проявляющегося в замедленной эволюции галактик.

4.4 Выводы

В этой главе представлены результаты детального исследования необычных карликовых галактик в близких войдах. Из выборки в войде Lynx-Cancer исследована система галактик UGC 4722/UGC 4722C со своеобразной морфологией, а также слабая галактика в очень богатом газом триплете J0723+36. В войде Eridanus комплексно изучены две низкометаллических LSB. Подводя итоги обсуждения, можно сделать следующие выводы:

1. По данным фотометрии, полученной по изображениям SDSS, с включением данных в линии H α на основе H α -карт, полученных на GMRT, мы обнаружили, что оба компонента системы UGC 4722/UGC 4722C богаты газом. Для UGC 4722 и UGC 4722C+шлейф мы оцениваем значения $\mathfrak{M}(H\alpha)/L_B$, равные 1.0 и 4.3 соответственно.
2. Сравнение цветов шлейфа в галактике UGC 4722 с треками эволюционных моделей PEGASE2 для одномоментного эпизода звездообразования показывает, что цвета хорошо согласуются со звездным населением, вызванным одиночной вспышкой около ~ 0.5 млрд. лет назад. С учетом статистических и численных исследований вспышек во взаимодействующих галактиках, мы предполагаем, что время вспышки привязано к перигалактическому прохождению компаньона.
3. По H α эмиссии мы оценили гелиоцентрическую скорость 943 ± 23 км с⁻¹ для очень слабого голубого оптического спутника H α компонента J0723+3624 в экстремально богатом

газом триplete J0723+36. Эта оценка в пределах нескольких км с^{-1} совпадает с лучевой скоростью соответствующего HI облака. Данный результат подтверждает вывод из [36] об “эволюционно-молодом” характере этого самого маломассивного из известных объектов войда.

4. Две необычные карликовые LSB галактики SDSS J0015+0104 и J2354-0005, с крайне низкой металличностью, расположены в войде Eridanus. Они находятся на расстоянии до ближайших ярких галактик $D_{NN} > 7$ и 4.3 Мпк соответственно. На основе данных собственной фотометрии по изображениям SDSS для этих галактик, включая данные интегрального потока в HI, мы обнаруживаем, что это очень богатые газом объекты ($\mathfrak{M}(\text{HI})/L_B \sim 2.35$ и ~ 2.3), с массовой долей газа $f_{\text{gas}} \sim 0.98$ и 0.97 соответственно.
5. Измеренные голубые цвета $(u - g)$, $(g - r)$ и $(r - i)$ для двух галактик, в войде Eridanus, при сопоставлении с эволюционными треками пакета PEGASE2 для непрерывного ЗО, указывают на время от начала основного эпизода звездообразования $T \sim 4.5$ млрд. лет и $T \sim 2.7$ млрд. лет. Таким образом, все три наблюдательных параметра – металличность O/H, массовая доля газа f_g и голубые цвета периферии – доказывают “эволюционно-молодой” статус этих карликов.
6. По результатам исследования двух необычных галактик в войде Eridanus и аналогичных галактик в войде Lync-Cancer, можно предполагать, что области пониженной плотности благоприятствуют формированию галактик с необычными эволюционными свойствами (очень низкая металличность газа, очень высокая массовая доля газа, голубые цвета внешних областей). Таким образом, целенаправленный поиск таких объектов, среди выборок галактик войдов, может быть одним из наиболее эффективных способов их обнаружения.

Глава 5

Исследование переменности LBV в DDO 68, галактике войда с экстремально низкой металличностью

5.1 Введение

Карликовая иррегулярная галактика DDO 68 (UGC 5340, VV 542) принадлежит выборке войда Lync-Cancer. Она обладает необычной морфологией с несколькими известными молодыми областями звездообразования (ЗО). Для нее получены оценки рекордно низкой металличности ($12+\log(\text{O}/\text{H})=7.14$, подробнее в главе 2). Большинство областей ЗО находятся на периферии преимущественно в “Северном кольце” и “Южном хвосте” [64, 37]. При последующих наблюдениях в DDO 68 была обнаружена уникальная массивная голубая переменная звезда (LBV, Luminous Blue Variable), в одной из самых бедных металлами III областей локальной Вселенной [48, 49].

Картографирование DDO 68 в линии HI на GMRT (Giant Meterwave Radio Telescope) показало наличие сложной структуры и поля скоростей, состоящего из двух рукавов, закрученных асимметрично вокруг самой яркой части оптического тела галактики. Эта картина не противоречит тому, что эти рукава имеют приливное происхождение и образовались в результате недавнего слияния (мерджинга) [133]. Последние глубокие HI карты с VLA (Very Large Array) иGBT (Green Bank Telescope) позволили выявить слабый спутник (DDO 68C) на проекционном расстоянии ~ 42 кпк от DDO 68. Его барионная масса в ~ 35 раз меньше, чем у основной галактики [155]. Наблюдается слабая перемычка из газа, приливно вытянутого из DDO 68C. Однако, обратное влияние DDO 68C на основную галактику DDO 68 должно быть мало из-за большого расстояния и очень большой разницы масс.

В соответствии с ранее полученными результатами, авторы работы [121], на основе глу-

боких изображений HST в широких фильтрах F606W и F814W, выделили в разрешенном звездном населении две совершенно разные пространственные компоненты со “средней” ($Z \sim Z_{\odot}/5$) и очень низкой ($Z \lesssim Z_{\odot}/20$) звездной металличностью. Первый относится к “основному, центральному” компоненту, а второй – к “вторичному, периферийному” компоненту. Они также считают, что считают, что ‘вторичный’ компонент, огибающий “основной” компонент с севера по восточному краю к “Южному хвосту”, имеет лишь небольшую часть старых звезд, которая не относится к “основному” компоненту. В дополнение к этому, на очень глубоких изображениях в работе [170] видны дуги более низкой поверхностной яркости и тонкий удлиненный фрагмент, прилегающий к основному телу, который авторы определили, как мини-спутник, аккрецируемый к “основному” компоненту.

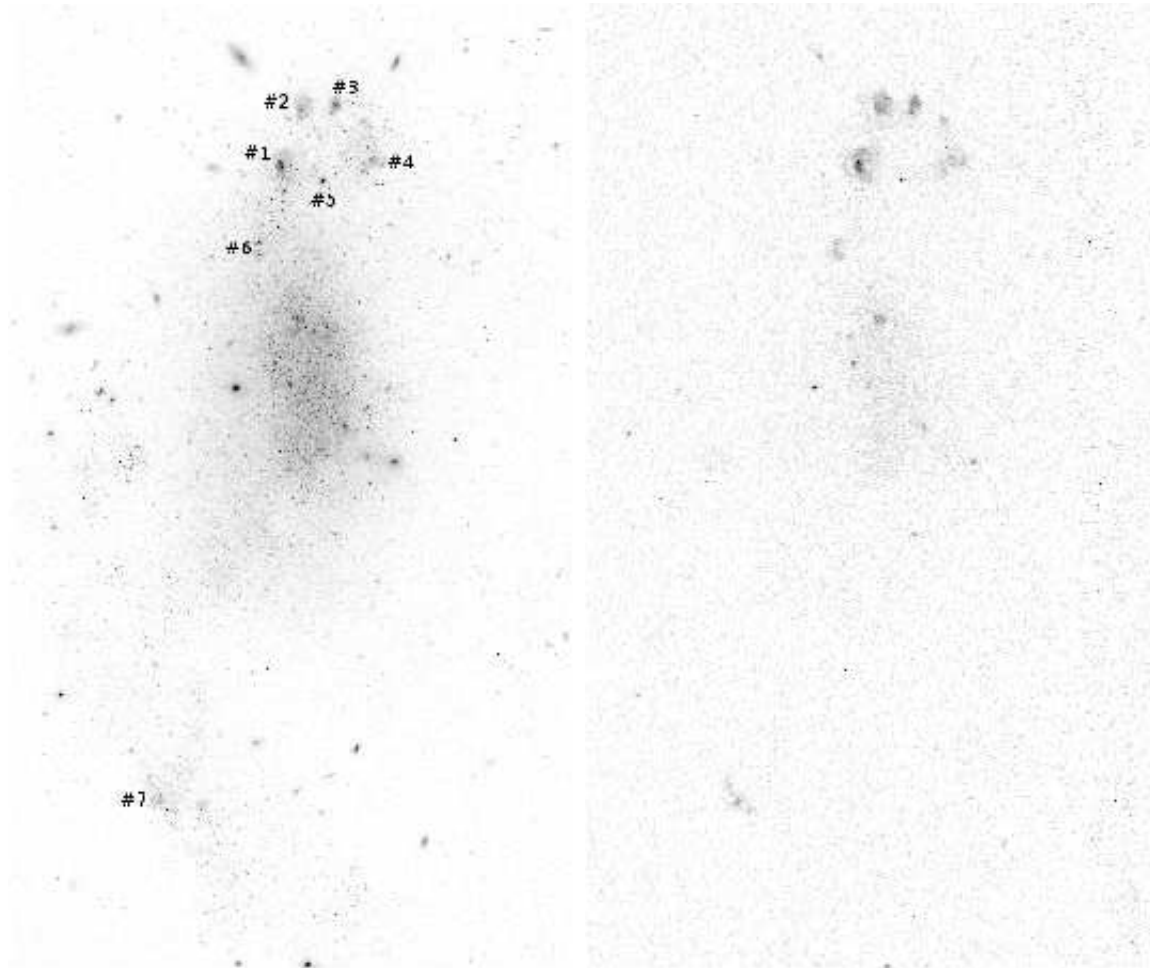


Рис. 5.1: **Левая панель:** *HST* изображение для всей галактики DDO 68 в фильтре V (F606W). Несколько областей текущего/недавнего звездообразования присутствуют в “Северном кольце” и один в “Южном хвосте” (в этом и последующих изображениях север примерно вверху ($PA = -14^\circ$), восток слева. Смотрите также стрелки на других рисунках). **Правая панель:** *HST* изображение DDO 68 в узкополосном фильтре F658N ($H\alpha$). Видно несколько областей текущего(недавнего) ЗО, преимущественно расположенных в “Северном кольце” и “Южном хвосте”, с несколькими узлами звездообразования в основном теле.

Вопрос о природе “вторичного” компонента остается нерешенным. В недавней работе Макарова и др. (2016) [171] показано, что упомянутая выше небольшая доля старых звезд в “Северном кольце” может быть естественно объяснена перекрытием этой области с внешними частями основного центрального компонента. Поэтому в маломассивном компоненте малого мержинга, с измеренной металличностью газа $\sim Z_{\odot}/35$, старого населения, по-видимому, нет. Следовательно, это может быть действительно очень молодой объект с основным звездным населением, сформировавшимся не ранее чем $\sim 1-2$ млрд. лет назад. Несколько богатых газом “эволюционно-молодых” карликов подобного типа уже были найдены среди галактик войда Lynx-Cancer [65, 35, 36].

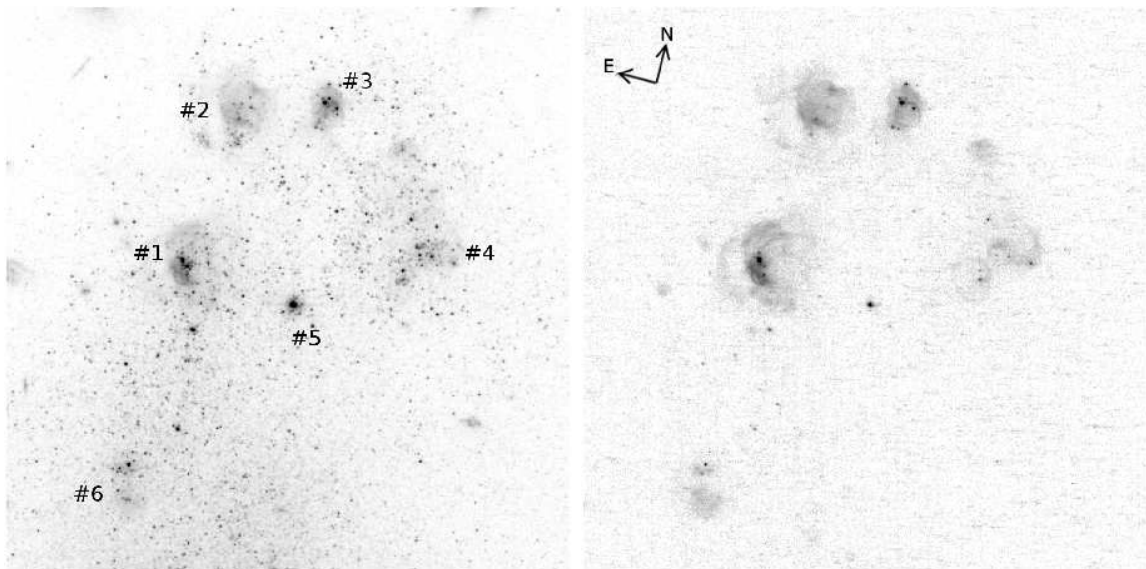


Рис. 5.2: **Левая панель:** Увеличенная часть *HST* изображения для DDO 68 в фильтре *V* (F606W), центрированная на “Северном кольце” (совокупность областей активного ЗО, также хорошо видимых на аналогичном изображении $H\alpha$). Области расположены по периметру сверхгигантской оболочки (SGS) в виде “эллипсоида”. **Правая панель:** Аналогичное изображение *HST* для DDO 68, полученное в узкополосном фильтре F658N, включающем линии $H\alpha$.

Вопрос о эволюции экстремально бедных металлами массивных звезд и их конечных стадий является одним из ключевых для понимания формирования и эволюции галактик в ранней Вселенной на шкале $\lesssim 1$ млрд. лет (например, [172]). В то время, как современные модели звездной эволюции, в том числе с быстрым вращением, имеют существенные продвижения в течение последнего десятилетия (к примеру, [173, 174] и ссылки в них), прямое сопоставление предсказаний моделей со свойствами реальных экстремально бедных металлами массивных звезд по-прежнему отсутствует. Основной причиной этого является отсутствие в локальной Вселенной таких звезд, доступных для достаточно детальных исследований. Нужно ждать

качественного прогресса приборов на очень больших оптических телескопах нового поколения. Одной из наиболее интересных фаз для эволюции массивных звезд является достаточно короткая фаза после завершения горения водородного ядра, которая называется массивной голубой переменной (LBV) звездой.

Типичная переменность LBV включает в себя вариации 0.1^m - 0.2^m на коротких (дни - недели) временных масштабах и нерегулярные вариации амплитуды до $\sim 2^m$ на шкале времени в несколько лет (так называемые “нормальные выбросы”). В ходе этих изменений, при “постоянной” болометрической светимости, спектральный тип LBV, как правило, варьируется от раннего В сверхгиганта в минимуме до поздних В типов или более ранних А типов вблизи максимумов (например, [175, 176, 177, 178, 179, 180]). Наибольшие изменения блеска, более чем на 3^m , связаны с “гигантскими выбросами”, в которых скорости потери массы возрастают на несколько порядков, а также увеличиваются болометрические светимости (например, [181]). Такие события чрезвычайно редки среди известных LBV. В нашей Галактике они зарегистрированы только для двух классических LBV: η Car и P Cyg. Среди LBV в близких галактиках было обнаружено лишь несколько “гигантских выбросов”. Интерпретация феномена LBV еще весьма далека до удовлетворительной. Обсуждаются варианты сверхэддингтоновского ветра, обусловленного давлением излучения в континууме, взрывов из-за неустойчивости под фотосферой, необычных пульсаций и другие (к примеру, [182]). Поэтому любые новые наблюдательные данные могут помочь в понимании возможных действующих механизмов.

Одна из самых необычных LBV была открыта в 2008 году Пустильником и др. [48], по наблюдениям на БТА галактики DDO 68. Ее уникальность состоит в том, что она происходит из звезды ГП (главной последовательности) с рекордно низкой металличностью $Z_{\odot}/35$, которая соответствует содержанию кислорода в HII области – $12+\log(O/H)\sim 7.14$. Для того, чтобы исследовать переменность данной LBV, мы объединили и проанализировали несколько новых наблюдений области No.3 (в которой находится LBV) в DDO 68. Они включают в себя длиннощелевую спектроскопию на БТА и фотометрию для области звездообразования No.3 (отмечена на левой панели рисунков 5.1 и 5.2), содержащей LBV. Чтобы проследить переменность LBV, мы также проводим фотометрию области No.3 по изображениям HST и SDSS, взятым из архивов.

5.2 Наблюдения и данные из архивов

5.2.1 БТА данные

Спектральные и фотометрические данные на БТА (6-м телескоп САО РАН) были получены в первичном фокусе с помощью многомодового инструмента SCORPIO [85]. Журнал наблюдений представлен в таблице 5.1, туда же включены данные о наблюдениях до января 2009 года (более подробно в работе [48]). При получении спектра в январе 2009 года ширина щели составляла $1''$. В течение ночи наблюдался спектрофотометрический стандарт Feige 34. Фотометрия НИ области No.3 в DDO 68 в 2009, 2015 и 2016 годах, а также в январе 2005 года, проведена с использованием локальных стандартов. В качестве последних было выбрано шесть достаточно ярких (от 17.5^m до 18.8^m в V фильтре) звезд в окрестности DDO 68, с измеренными в SDSS величинами с хорошей точностью ($\sim 0.02^m$). Для того, чтобы использовать эти локальные стандарты для фильтров B, V, R системы Джонсона-Казинса их величины g, r, i были преобразованы, согласно формулам из работы [78].

Таблица 5.1: Журнал наблюдений на БТА для области No.3 в галактике DDO 68

Дата (1)	Гризма или фильтр (2)	Время экспоз., с (3)	РА (4)	Кач-во изобр.,'' (5)	Возд. масса (6)
2004.11.09	VPHG550G	1×900	-57	0.8	1.08
2005.01.12	V	3×600		1.7	1.07
2005.01.12	R	3×600		1.9	1.20
2005.01.13	VPHG550G	3×900	-57	1.2	1.09
2006.12.30	FPI $H\alpha$	36×120		1.8	1.04
2008.01.11	VPHG550G	5×900	-26	1.2	1.20
2008.02.04	VPHG1200G	5×900	-26	1.3	1.13
2009.01.21	V	1×300		1.3	1.19
2009.01.21	VPHG1200G	6×1200	-26	1.3	1.12
2015.01.14	B	2×150		2.1	1.05
2015.01.14	V	2×180		2.1	1.05
2015.01.14	R	2×180		2.1	1.05
2016.01.15	B	5×180		2.2	1.10
2016.01.15	V	5×180		2.2	1.14
2016.01.15	R	5×180		2.2	1.07

Спектральные и фотометрические наблюдения области No.3 в DDO 68 в ноябре 2004 года и январе 2005 года, когда в спектрах этой области не было видно следов LBV, позволили определить уровень потока подстилающей НИ области. Эта величина является основным

параметром для получения доли света, приходящейся непосредственно на LBV, поскольку при регистрации наземными телескопами удается измерять только суммарный поток НП области и LBV.

Проведена стандартная обработка двумерных спектров, более подробно описанная в разделе 1.3.1. Из подготовленных двумерных спектров были вырезаны соответствующие одномерные спектры, протяженностью вдоль щели $\sim 5''$, которые включали весь видимый свет от НП области No.3 в пределах щели. Для полученных одномерных спектров была проведена свертка с кривыми пропускания в B и/или V полосе. Полученные величины затем использовались при анализе переменности области No.3. К ним применялись соответствующие поправки, связанные с потерей света на щели, выполненные согласно процедурам, описанным в разделе 5.3.2.

5.2.2 HST данные

DDO 68 наблюдалась на *HST* с помощью усовершенствованной камеры для обзоров ACS (Advanced Camera for Surveys). Глубокие экспозиции были сделаны в фильтрах $F606W$ (7644 сек., 02.05.2010 г.) и $F814W$ (7644 сек., 27.04.2010 г.). Кроме того, было получено глубокое изображение галактики в узкополосном фильтре $F658N$ с центром в $H\alpha$ (2388 сек., 02.05.2010 г.). Для краткости будем в дальнейшем называть их, как V , I и $H\alpha$ соответственно. Поскольку первичная обработка изображений *HST* выполняется в рамках пакета автоматической первичной редукции, то пользователю предоставляются уже откалиброванные изображения. Поэтому нам перед фотометрией в круговых апертурах, в качестве дополнительного шага, требовалось лишь аккуратно вычистить фон неба, аналогично тому, что делалось для изображений SDSS (подробное описание в разделе 1.2.2).

5.2.3 SDSS данные

Наблюдения области, включающей DDO 68, в SDSS были проведены 16 апреля 2004 года. Так как изображения в фильтрах u, g, r, i, z , представленные в базе данных SDSS, полностью обработаны, для выполнения фотометрии в круглых апертурах нам нужно только вычитание основного фона. Это потребовало особого подхода, так как интересующий нас объект (область No.3 с LBV) находится вблизи других областей недавнего и текущего звездообразования. Поэтому, фон измеряли в небольших апертурах в нескольких соседних областях, избегая какого-либо вклада от соседних диффузных или звездных объектов.

5.3 Кривая блеска LBV

5.3.1 Оценки вклада от подстилающей НII области по данным *HST* и БТА

Высокое угловое разрешение *HST* изображений для этой галактики дает нам возможность отделить поток подстилающей НII области No.3 от LBV, которая выглядит на этих снимках, как звездообразный объект. Это позволяет получить как прямую оценку светимости LBV в эти даты, так и интегральные V и I величины для области No.3 без вклада LBV. По определению, они должны соответствовать минимумам кривой блеска для области No.3 в V и I фильтрах.

Исследуемая LBV, вместе с предположительно молодым компактным звездным скоплением, к которому она принадлежит, выглядит на изображениях *HST* как звездообразный объект (см. 5.3). Нами были измерены ее полные величины и преобразованы в V и I величины системы Джонсона-Казинса с помощью соотношений из [183]. Для того, чтобы напрямую сопоставить данные *HST* с наземной фотометрией, была проведена интегральная апертурная фотометрия по изображениям *HST*. В результате мы получаем интегральный поток от LBV и подстилающей области No.3. Для получения этой оценки радиус круговой апертуры, с центром на LBV, был принят равным $2.5''$, что соответствует нашей фотометрии области No.3 по изображениям БТА и SDSS. Оценка фона была получена усреднением во многих маленьких апертурах вокруг измеряемой области.

В стандартной $BVRI$ системе получаем для LBV следующие значения: $V_{LBV}=20.05\pm 0.08$, $I_{LBV}=19.93\pm 0.03$. Для интегральных величин в этой области мы получаем: $V_{No.3+LBV}=19.26\pm 0.08$ и $I_{No.3+LBV}=19.16\pm 0.03$. Среднеквадратичные ошибки 0.08^m и 0.03^m определяются точностью перехода между системами *HST* и Джонсона-Казинса, по формулам из работы [183]. Соответствующая абсолютная величина LBV в эту эпоху была $M_{V,LBV} = -10.53$.

5.3.2 БТА фотометрия и метод восстановления блеска LBV

Проведена фотометрия для области No.3, содержащей LBV, по изображениям DDO 68, полученным из наших наблюдений на БТА в 2015.01.14 и 2016.01.15 (B , V , R), а также использованы данные более ранних наблюдений на БТА в 2005.01.12 (V , R) и 2009.01.21 (V). Первичная обработка изображений, для которой использованы пакеты IRAF и MIDAS, проведена стандартным методом. Она включает в себя удаление космических частиц, коррекцию

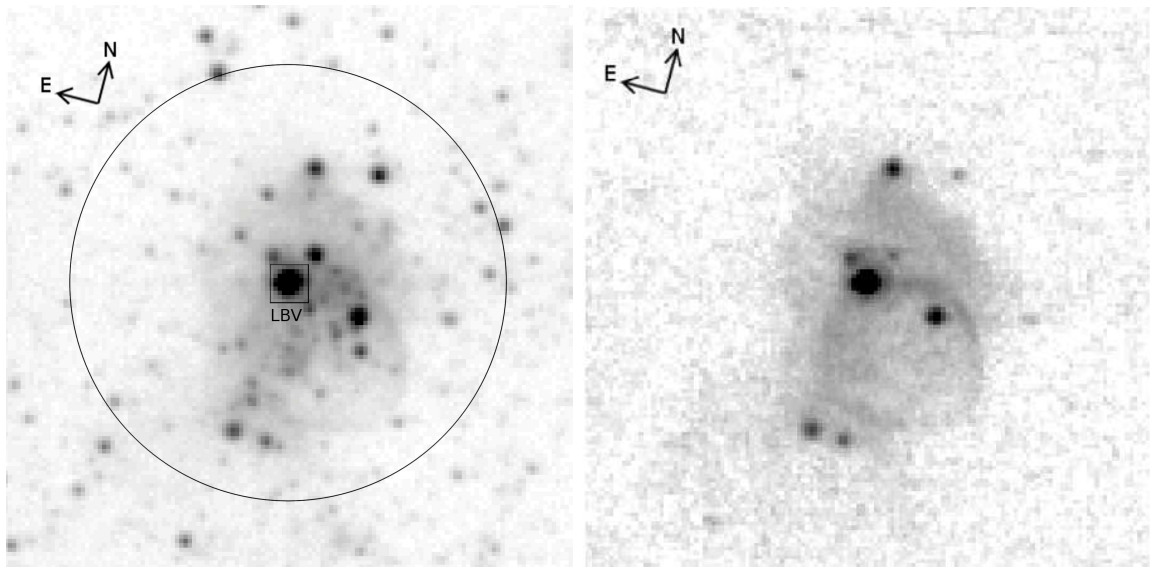


Рис. 5.3: **Левая панель:** Изображение *HST* для DDO 68 в V полосе, с центром на III области No.3 в “Северном кольце”, содержащей LBV звезду. LBV – самый яркий звездоподобный объект на изображении, находящийся на краю оболочки (структура с диаметром около $1.9''$, что соответствует ~ 115 пк). Общая протяженность основной туманности составляет $\sim 3''$. Окружность показывает размер апертуры с $R=2.5''$. Такая апертура была использована для измерения полного света области No.3 на этом изображении и во всех других изображениях (SDSS и БТА), включенных для построения кривой блеска области No.3 и LBV. **Правая панель:** Изображение той же области в узкополосном фильтре F658N с центром $H\alpha$.

за смещение нулевого уровня и плоское поле. Фон определяется как среднее значение для нескольких небольших областей вокруг области No.3 в окрестности $5''$. После вычитания фона неба делается апертурная фотометрия с радиусом $r=2.5''$, и определяются инструментальные величины для области No.3. Переход от инструментальных к B, V, R величинам проводится с помощью средневзвешенных нуль-пунктов, полученных с помощью локальных стандартов. Типичная среднеквадратичная ошибка нуль-пунктов в фильтрах B, V, R составляет 0.014^m , 0.020^m и 0.024^m соответственно.

Для увеличения количества данных для построения кривой блеска LBV мы также использовали свертку полученных на БТА одномерных спектров области No.3, с соответствующими полосами пропускания: B и V фильтры для спектров с гризмой VPHG550G (диапазон $3600\text{--}7000 \text{ \AA}$); B фильтр, когда использовали гризму VPHG1200G (диапазон $3600\text{--}5700 \text{ \AA}$). Из-за сравнительно небольшой ширины длинной щели ($1''$) значительная часть области No.3 теряется. Поэтому, чтобы из полученных с помощью свертки звездных величин оценить полные величины, необходимо сделать поправку за потери света на щели. Это требует адекватной модели распределения яркости в этой области и дополнительных расчетов.

Для каждого из используемых спектров нами рассчитаны соответствующие поправки. В

качестве входного параметра принималось качество изображения (β) для соответствующего наблюдения и использовалась соответствующая процедура. Для этого использовалось оригинальное HST изображение области No.3 с FWHM $\sim 0.1''$. По нему производилось сглаживание (FILTER/GAUSS в пакете MIDAS) с переменной шириной окна, которое позволило воспроизвести изображение этой области с кружком рассеяния $\beta=(0.8-1.8)''$. На каждое из таких сглаженных изображений накладывался прямоугольник щели $1''\times 5''$. Аналогичная процедура делалась для звездообразного объекта, соответствующего LBV. Затем, мы оценивали поток внутри “щели” отдельно для подстилающей HII области и для LBV и вычисляли долю потерь относительно общего света. При β между $0.8''$ и $1.8''$, полученные коэффициенты коррекции (то есть множители для оценки полного потока исходя из потока, измеренного внутри щели) колеблются от 1.36 до 2.07 для звездного объекта и, соответственно, от 2.33 до 2.85 для подстилающей HII области. Аналогичные оценки были сделаны для спектров из работы Изотова и Туана (2009) [49]. Для них использовался размер щели $1.5''\times 3.5''$ для $\beta=0.8''\pm 0.2''$.

Для дальнейших вычислений используется полученная по изображениям HST (раздел 5.3.1) интегральная V величина подстилающей HII области ($V(\text{HII})=20.12^m$). Эта оценка близка к полученной по независимой фотометрии на БТА для области No.3, в период наблюдений 2005.01.12, когда LBV не была видна в спектре. Интегральный поток области No.3 и отдельно для LBV получен из исходных оценок по сверткам спектров в соответствующих полосах пропускания фильтров (V, B) с помощью алгоритма, который иллюстрируется на следующем примере. Будем исходить из V величины свертки спектра ($V(\text{conv})=20.83\pm 0.02$), полученного 2008.01.11 с $\beta=1.2''$. Соответствующие коэффициенты потерь света на щели равны 1.53 для звездообразного объекта и 2.5 для HII области No.3. Из известной величины $V(\text{HII})=20.12^m$, применяя соответствующую коррекцию, оцениваем ее вклад в $V(\text{conv})$ на уровне $V(\text{HII})(\text{conv})=21.12^m$. Разница между $V(\text{conv})=20.83^m$ и $V(\text{HII})(\text{conv})=21.12^m$ относится к потоку LBV, попадающему внутрь щели. Из простых вычислений, она соответствует $V(\text{LBV})(\text{conv})=22.40^m$. Затем, после соответствующей коррекции для потери света на щели, мы получаем истинное $V(\text{LBV})=21.94^m$. И, наконец, суммируя потоки для $V(\text{HII})=20.12$ и для LBV, мы оцениваем интегральный свет для области No.3, равный $V(\text{No.3})=19.93^m$.

Подобные расчеты применяются, когда мы непосредственно измеряем общий свет в области No.3 по фотометрии в круговых апертурах и оцениваем свет LBV. Мы снова используем величину $V(\text{HII})=20.12^m$, соответствующую потоку от подстилающей HII области, и весь до-

полнительный поток относим к LBV.

5.3.3 Оценки, полученные по SDSS

По результатам фотометрии по изображениям SDSS (2004.04.16) получаем полные величины области No.3 в круговых апертурах с радиусом $2.5''$: $g=19.85\pm 0.02$, $r=19.83\pm 0.02$. Согласно формулам преобразования из работы [78], получаем соответствующие величины $B=20.08\pm 0.03$, $V=19.84\pm 0.03$ и $R=19.73\pm 0.03$.

5.3.4 Переменность LBV в DDO 68

Весь набор данных переменности LBV в DDO 68 весьма ограничен. За единственным исключением данных по изображениям *HST*, все другие измерения, полученные при качествах изображений на уровне $1''$ - $2''$, – это интегральный свет от LBV и подстилающей области звездообразования No.3. Однако, как показано в разделе 5.3.2, имея возможность с помощью *HST* изображений оценить отдельно вклад от подстилающей HII области (см. подраздел 5.3.1), можно разделить с приемлемой точностью интегральный поток на две части, получив при этом вклад от LBV.

В течение последних ~ 60 лет было известно очень небольшое количество оценок звездных величин области No.3 в DDO 68. Большинство из них, в B и R фильтрах (Джонсона-Казинса), представлены в работах Боманс и Вайс (2011) [184, 185]. Они охватывают период с 1955 года (два измерения по изображениям DSS¹) до 2007 года. С 1988 по 2007 г. данные получены по наблюдениям с ПЗС матрицей. В этих работах также приводятся оценки потока, полученные из сверток спектров за февраль и март 2008 года, взятых из [49]. Анализ кривой блеска в работе [185] показал, что, согласно их данным, максимальный свет ($B \sim 18.9$) этой области зарегистрирован в феврале 1999 года. Однако, ошибка этой точки на их рисунке 2 очень большая и, таким образом, объект может быть значительно слабее, до $B \sim 19.5$. Из-за отсутствия какой-либо информации о качестве изображений, используемых апертурах и вычитании фона, их набор данных трудно использовать для изучения диапазона оптической переменности самой LBV. Общий диапазон наблюдаемой переменности области No.3, согласно [185], составляет $\Delta B(\text{No.3}) \sim 2^m$, если принимать самую яркую фазу с величиной $B \sim 19.1$ (POSS1 фотопластинки от 1955 г.), а самое слабое состояние соответствует $B \sim 21.1$ в 1988 г. Эти две крайние точки очень важны для дальнейшего анализа. Тем не менее, их

¹Digitized Sky Survey – оцифровка “Palomar Observatory Sky Survey One”, POSS1 фотопластинки.

надежность, особенно для минимума, может быть поставлена под сомнение, ввиду нашей оценки от подстилающей области No.3, равной $V=20.12^m$.

Нами проведен более детальный анализ имеющихся фотометрических оценок области No.3 с использованием собственной фотометрии на БТА, а также SDSS данных и *HST*/ACS изображений в фильтрах F606W и F814W. Для последующего анализа кривой блеска необходимо, чтобы имеющиеся измерения *HST* согласовались, в пределах принятых неопределенностей, с оценкой $V_{\text{No.3+LBV}}=20.12\pm 0.02$, полученной из фотометрии на БТА в 2005.01.12. В эту эпоху LBV была слишком слабой и не проявлялась в спектре области No.3. Следовательно, полученные V и R величины следует рассматривать, как хорошее приближение для подстилающей III области. Согласно значения *HST* и БТА, принимаем интегральную *HST* величину $V_{\text{No.3+LBV}}=19.33$. Последняя величина находится в пределах неопределенности 1σ от номинального значения 19.26 ± 0.08 .

Чтобы оценить поток от LBV в ночь 12-13 января 2005 года, использован следующий подход. Учитывая упомянутую выше ошибку апертурной фотометрии $\sigma_V=0.02^m$, мы предполагаем, что вклад в ту эпоху от LBV не превышает 3σ , что составляет $\sim 6\%$ от величины подстилающей III области No.3, равной $V=20.12$. Следовательно, верхний предел соответствует $V_{\text{LBV}}\geq 23.17^m$. Поток LBV в наиболее ярком непосредственно наблюдаемом состоянии, полученный из фотометрии *HST* изображения, соответствует $V_{\text{LBV}}=20.05^m$. Таким образом, за период около 5 лет (2005-2010, см. табл. 5.2) LBV стала ярче, более чем на 3.1^m .

Измерения интегрального света области No.3 и LBV на БТА в 2015.01.14 ($V_{\text{total}}=20.11$) дают видимую величину, очень близкую к оценкам, полученным по изображениям БТА (12.01.2005 г.) и *HST* для подстилающей III области No.3. Учитывая лучшую точность недавней оценки 3σ , верхний предел вклада LBV оказывается менее 4% от светимости области No.3, или $V_{\text{LBV}} > 23.62^m$. Это указывает на то, что в какой-то момент, в период с мая 2010 года по январь 2015 года, LBV снова стала тусклее на $\sim 3.6^m$ или больше.

Для того, чтобы лучше понять характер кривой блеска области No.3 и LBV в течение последнего десятилетия, мы проанализировали все имеющиеся данные, а именно, собственные изображения с БТА, из архивов SDSS и *HST*, а также свертки спектров БТА. Кроме того, была проведена свертка спектров из работы [49], полученных 2 февраля и 28 марта 2008 года, когда LBV была в яркой фазе. Мы использовали подход, описанный выше и продемонстрированный в конце раздела 5.3.2. Поскольку не была доступна информация о качестве изображений (β) спектра области No.3 из [49], мы приняли медианное значение $\beta = 0.8''$,

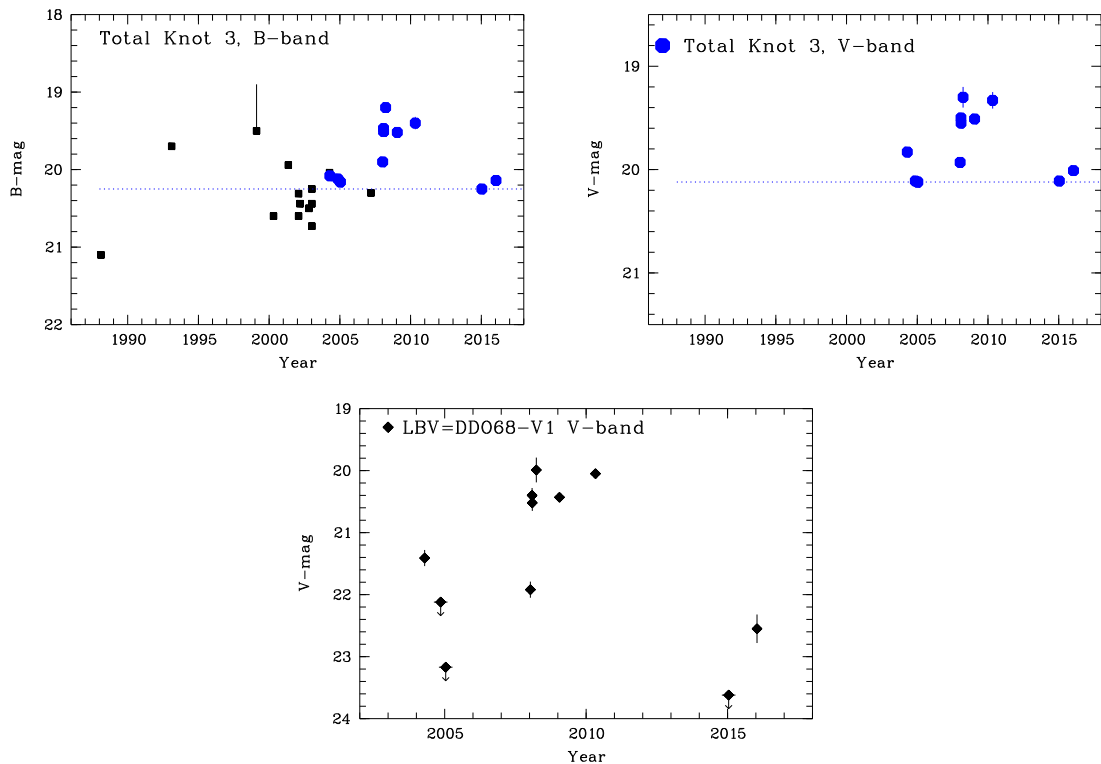


Рис. 5.4: **Верхняя панель слева:** Кривая блеска области No.3 в DDO 68 в B фильтре с 1988 года. Заполненные (черные) квадраты – значения из работы [184, 185]. Заполненные (синие) кружки – новые оценки в апертуре радиусом $r=2.5''$ (см. таблицу 5.2 и ее описание). Часть B величин получена из цвета $B-V$ и величин в V фильтре, полученных с помощью свертки спектров для объекта. Пунктирная линия на $B=20.25$ соответствует свету области No.3, когда LBV не была видна в спектре. **Верхняя панель справа:** То же, но для V фильтра. Кривую блеска в V фильтре для данной LBV ранее никто не получал. Величины, оцененные по изображениям из HST и SDSS, преобразованы в V . Остальные данные из фотометрии прямых снимков с БТА или из сверток спектров с БТА, а также ММТ и АРО [49], с поправками за потери света на щели. Пунктирная линия на $V=20.12$ соответствует свету всей области No.3, когда вклад LBV не был виден в спектре. **Нижняя панель:** Кривая блеска LBV в V фильтре (заполненные ромбики). За исключением одной прямой фотометрии (HST изображения), все остальные величины получены как “остаточный свет”, после вычитания постоянной светимости подстилающей НII области ($V=20.12$) из предыдущей кривой блеска. Ромбы со стрелками показывают верхние пределы на уровне 3σ .

типичное для телескопов АРО (3.5 метра) и ММТ. Неопределенность в пределах $0.2''$ создает относительно небольшие дополнительные погрешности для полученных величин, которые включены в наши финальные ошибки. Все полученные оценки представлены в таблице 5.2 и показаны на кривой блеска, наряду с другими данными (рис. 5.4).

Как показано на рисунке 5.4, LBV находилась в фазе ее максимальной яркости уже в начале 2008 года. В течение следующих двух лет есть только две дополнительные точки, в январе 2009 года (БТА) и в мае 2010 года (HST), которые свидетельствуют о том, что

Таблица 5.2: Оценки полных величин B, V, g для области 3 и LBV в DDO 68

Дата	B	σ_B	g	σ_g	V	σ_V	$V(\text{LBV})$	$\sigma_V(\text{LBV})$	Примечания
040416	20.00	0.05	19.85	0.02	19.83	0.03	21.41	0.13	SDSS phot
041109	20.12	0.06	20.08	0.04	20.11	0.05	≥ 22.12	3σ up.lim.	BTA cv
050113	(20.16)	0.05	20.11	0.05	20.12	0.02	≥ 23.23	3σ up.lim.	BTA phot+cv
080111	19.90	0.03	19.91	0.03	19.93	0.02	21.92	0.13	BTA cv
080202	(19.47)				19.50	0.05	20.40	0.12	APO IT09 cv
080204	19.51	0.07	19.55	0.05	19.55	0.05	20.52	0.13	BTA cv
080328	(19.20)	0.10			19.30	0.10	19.99	0.20	MMT IT09 cv
090121	19.52	0.02	(19.53)		19.51	0.01	20.43	0.03	BTA phot+cv
100502	(19.40)	0.08			19.33	0.08	20.05	0.08	HST phot
150114	20.25	0.01	(20.09)		20.09	0.01	24.00	0.32	BTA phot
160115	20.14	0.02			20.01	0.03	22.55	0.32	BTA phot

cv – оценки из сверток спектров с соответствующим фильтром и коррекцией за потери света на щели.

() – ожидаемые значения, пересчитанные из величин в других фильтрах и измеряемых цветов; IT09 – Изотов и Туан (2009) [49].

ее блеск был близок к “максимуму”, соответствующему $M_V(\text{LBV}) \sim -10.5$. Нам не удалось обнаружить опубликованных изображений области No.3 и/или ее измерений светимости в период с мая 2010 года по январь 2015 года.

В таблице 5.2 мы суммируем все фотометрические данные области No.3 и LBV. В колонке 1 приводится дата наблюдений. В колонках 2 и 3 – полные B величины и их ошибки σ_B . Часть данных в скобках – это пересчитанные оценки V величин в ту же ночь, либо непосредственно из цвета $B-V$, либо косвенно через типичные цвета объекта при одинаковой яркости. В колонках 4 и 5 аналогичные значения представлены для g фильтра. В колонках 6 и 7 мы даем принятые интегральные V величины и ошибки σ_V . В колонках 8 и 9 приведены V величины и их ошибки для LBV. В колонке 10 – информация о телескопе и источнике для параметров из предыдущих колонок.

Стоит отметить, что некоторые данные из работы [184], противоречат нашему диапазону кривой блеска в V фильтре. Действительно, самое минимальное значение интегральной величины III области No.3 ($V_{\text{tot}}=20.12$) соответствует наименьшей светимости LBV, когда она была ниже уровня обнаружения. Наши оценки цвета этой области вблизи “минимумов” приводят к B величине в наиболее слабой фазе на уровне ~ 20.25 . Но в работе [184] на их кривой блеска в B фильтре отмечено несколько таких точек, в том числе одна за 1988 год с $B \sim 21.1^m$. Поскольку авторы не приводят детали их фотометрии, можно предположить, что

минимумы их кривой блеска связаны либо с систематической разницей из-за фотометрии в меньших апертурах, либо с некоторыми другими неизвестными причинами, которые могут помочь определить только авторы.

Найденная в ходе этого исследования амплитуда переменности LBV в DDO 68 (которая получила название DDO68-V1, в соответствии с практикой наименований переменных звезд в других галактиках) очень велика. В период примерно от двух до семи лет (в течение 2008-2010 годов, и, вероятно, дольше, до конца 2014 года) ее абсолютная величина M_V увеличилась от $\gtrsim -6.95$ до -10.58 . Такие мощные вспышки в LBV называют “гигантскими выбросами”. Если максимумы кривой блеска области No.3 в B фильтре из работы [184] в 1955 г. ($B \sim 19.1$) и 1999 г. ($B \sim 18.9$, см. рис. 5.4) реальны, то DDO68-V1 прошла эту фазу два или три раза в течение последних 60 лет.

5.4 Спектры LBV

Спектры области No.3, полученные в 2005 и 2008 годах на БТА, можно найти в статье Пустильника и др. (2008) [48]. На рисунке 5.5 (левая панель) показан спектр области No.3, полученный нами с гризмой VPHG1200G в 2009.01.15. Как и в спектрах 2008 года, для данной LBV видны широкие компоненты только у водорода и гелия (~ 1000 км с $^{-1}$), в отличие от других известных LBV. Единственным исключением, похожим в этом отношении на LBV в DDO 68, является LBV в PHL 293B с металличностью $12 + \log(O/H) = 7.72$ [49, 186]. Кроме того, в синей части присутствуют P Cug поглощения бальмеровских линий. Мы видим их также и в спектре DDO68-V1, и приводим на рис. 5.5 (правая панель) увеличенный спектр с центром в точке H γ . Здесь вычтена узкая эмиссионная компонента с инструментальной шириной, связанной с излучением основной HII области. Это выполнено с помощью стандартной процедуры “blendfit” в MIDAS, которая позволяет вписывать в профиль необходимое число линий. Инструментальная ширина (FWHM) узкой компоненты (~ 5.5 Å или ~ 370 км с $^{-1}$ в H γ) была принята на основании измеренных ширин сильных симметричных эмиссионных линий [OIII] $\lambda\lambda 4959, 5007$, относящихся к подстилающей HII области. Эта инструментальная ширина примерно в три раза меньше ширины линий, связанных с LBV.

В период наблюдений 15.01.2009 года LBV была в яркой фазе, примерно на 0.5^m слабее надежно зарегистрированного максимума для всей амплитуды блеска – более 3.6^m (см. раздел 5.3.4). Поэтому измеренные потоки этих линий можно использовать для того, чтобы проверить их изменение с фазой блеска LBV. Ниже проводим их анализ, объединяя со

спектральными данными из работы [49].

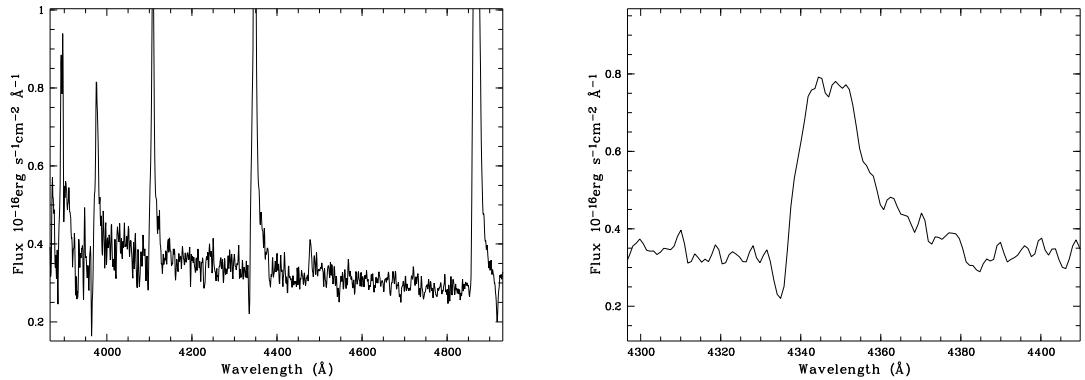


Рис. 5.5: **Левая панель:** Увеличенный спектр HII области No.3 в DDO 68 (включая излучение от LBV), полученный на БТА 15 января 2009 года. Хорошо видны особенности LBV, связанные с ветром и оболочкой: широкие ($\sim 1000 \text{ км с}^{-1}$) низкоконтрастные компоненты в трех бальмеровских линиях и абсорбционные компоненты P-Cyг при отрицательных скоростях ($\delta V \sim 700\text{-}800 \text{ км с}^{-1}$). **Правая панель:** Профиль линии H γ для LBV, после вычитания “инструментального” профиля узкой компоненты от подстилающей HII области.

На сегодняшний день существует четыре опубликованных спектра HII области No.3 (за исключением данной работы) в фазе, когда LBV давала существенный вклад в интегральный спектр. Все они получены в период с 11 января до 28 марта 2008 года (таблица 5.4). Единственный спектр 2008.01.11, когда была открыта LBV, соответствует промежуточной фазе, с $M_{V,LBV} = -8.6$. В этот период LBV была почти на две величины слабее, чем в максимуме (смотрите таблицу 5.2). Три другие спектра получены в “максимуме” света от LBV, или когда она была на $0.4^m\text{-}0.5^m$ тусклее, за ~ 50 дней до максимума. Новый спектр 2009.01.21, добавленный в данной работе (хотя и полученный в период ~ 300 дней после “максимума”), соответствует яркости LBV лишь на 0.44^m слабее “максимума”. Поэтому, кроме того, что для данной LBV имеется весьма скромное количество спектральных данных, они также смещены к верхней квантили диапазона переменности в V фильтре.

Таблица 5.3: Параметры широких бальмеровских линий в спектре 2009.01.21

Линия	λ_{em} Å	λ_{abs} Å	FWHM км с $^{-1}$	$V - V_{abs}$ км с $^{-1}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
H β	4869.36	4856.31	1079	806
H γ	4347.48	4336.53	1160	757
H δ	4108.20	4098.65	1123	699

Таблица 5.4: Переменность линий в спектрах LBV (DDO68-V1) с телескопов БТА, АРО и ММТ

Дата	V_{LBV}	$I(\text{HeI})_{4471}$	σ_{4471}	$I(\text{HeI})_{5876}$	σ_{5876}	$I(\text{H}\alpha)$	$\sigma_{\text{H}\alpha}$	$I(\text{H}\beta)$	$\sigma_{\text{H}\beta}$	$I(\text{H}\gamma)$	$\sigma_{\text{H}\gamma}$
041109	>22.12	<1.4		<1.2	0.5	<1.0	0.5	<0.5	0.27	<0.5	0.25
050113	>23.17	<0.5		<0.6	0.3	<6.0	1.8	<2.3	0.7	<1.3	0.45
080111	21.92	5.3	0.4	10.2	0.6	48.7	9.0	22.2	4.6	19.2	4.6
080202*	20.40					21.6	0.5	10.9	0.6		
080204	20.52	0.7	0.2	–				12.1	1.0	6.0	0.8
080328**	19.99	0.4	0.2					21.0	0.3	11.7	0.5
090121	20.43	0.6	0.3	1.3	0.2			32.9	1.6	12.7	1.8

Потоки линий в 10^{-16} эрг сек $^{-1}$ см $^{-2}$. Верхний предел на уровне 2σ . Потоки балмеровских эмиссионных линий относятся к широким компонентам с $\text{FWHM} \sim 1000$ км с $^{-1}$.

* – АРО данные [49]; ** – ММТ данные [49].

Единственные видимые широкие ($\text{FWHM} \sim 1000$ км с $^{-1}$) линии в этих спектрах – эмиссии водорода и гелия (таблица 5.3). Для тяжелых элементов, без их видимых линий излучения, широкие компоненты не могут быть обнаружены. Так как мы не знаем других LBV, в спектрах которых отсутствуют тяжелые элементы, предполагаем, что это связано с очень низкой металличностью прародителя на главной последовательности. Профили P-Cygn хорошо видны для сильных эмиссионных линий, что указывает на расширение оболочки с терминальной скоростью ~ 800 км с $^{-1}$, обнаруженной ранее в работе [49].

Из-за очень ограниченного интервала и малого временного охвата изменений светимости LBV для дат, когда были получены спектральные данные, трудно проследить за более или менее постепенными изменениями потоков в линиях. В такой ситуации можно лишь попытаться уловить некоторые тенденции и сравнить их с известными подобными объектами. В таблице 5.4 представлены потоки линий в LBV вместе с принятыми V величинами.

Потоки эмиссионных линий HeI λ 4471 и λ 5876 (только те, у которых достаточно хорошее отношение сигнал/шум) оказываются самыми сильными в фазе, когда LBV была открыта (2008.01.11). В этот момент она была слабее на ~ 2 величины по отношению к блеску в “максимуме” (2008.03.28). В пределы диапазона спектра, снятого в максимальной фазе, попадала только линия HeI λ 4471 (см. [49]). Ее поток был на порядок ниже, чем в спектре при первом обнаружении LBV. Для двух других дат, когда LBV была слабее, поток HeI λ 4471 также был мал, но, вероятно, на фактор ~ 1.5 выше, чем в “максимуме”. Для линии HeI λ 5876 есть только два спектра с очевидным вкладом LBV. Из их анализа можно утверждать, что поток в

линии HeI λ 5876 стал меньше в $\sim 8 \pm 2$ раз, между датами 2008.01.11 и 2009.01.21, в то время как светимость LBV в фильтре V стала выше в четыре раза. Это, в первом приближении, соответствует изменениям потока в линии HeI λ 4471.

Наличие эмиссионной линии HeII λ 4686 является индикатором горячего состояния при изменениях блеска LBV, характерного для минимумов ее кривой блеска, когда звезда по параметрам приближается к типу Вольфара-Райе (например, [187]). В этом состоянии EW(HeII λ 4686) может достигать $\sim 10 \text{ \AA}$. По нашим данным, ни в одном из имеющихся спектров изучаемой LBV линии HeII λ 4686 не обнаружено. Для спектров БТА общий верхний предел (2σ) на поток линии, с поправкой за потери на щели, составляет $\sim 0.2 \times 10^{-16} \text{ эрг сек}^{-1} \text{ см}^{-2}$. Что касается возможного уровня линии HeII λ 4686 вблизи минимальной фазы LBV, то поскольку вклад континуума LBV в спектрах 2004-2005 годов, с учетом подстилающей HII области, меньше чем несколько процентов, то эта линия должна быть ниже уровня обнаружения.

Вариации интенсивности бальмеровских линий в LBV не легко проследить, так как они требуют разделения композитных профилей линий (HII области и LBV) и извлечения из них широких компонентов. Для них также необходима коррекция за потери света от LBV на щели. Их ширины и предельная скорость ветра, измеренная по P-Cyг профилю, остаются одинаковыми в пределах ошибок для разных эпох измерений.

5.5 Обсуждение результатов

Несмотря на то, что количество фотометрических и спектроскопических данных для DDO68-V1 является очень скромным, полезно сделать предварительное сравнение с другими хорошо изученными LBV, прошедшими фазу “гигантского выброса”. Одной из них является NGC 2363-V1 на расстоянии $D \sim 3.4 \text{ Мпк}$ и с металличностью HII области, в которой она находится, равной $12 + \log(O/H) = 7.9$. Для NGC2363-V1 эта фаза началась с конца 1993 года с $M_V \sim -6.5$. В конце 1997 года она достигла “максимума” кривой блеска на уровне $M_V \sim -10.5$, а затем LBV постепенно понизила блеск на $\Delta V \sim 0.3^m$ в течение следующих 7 лет [176, 177, 188]. За этот же период ее поток в УФ вырос примерно на 0.6^m . Таким образом, ее болометрическая светимость за последний период увеличилась.

Поведение DDO68-V1 (рис. 5.4, снизу) показывает существенные различия в того, что мы видим для NGC2363-V1. Хотя амплитуда переменности $\Delta V \sim 3.6^m$ (от $\gtrsim -6.95$ до -10.58) очень близка к тому, что наблюдалось для NGC 2363-V1, но временные масштабы значимо

отличаются. В то время как для NGC2363-V1 мы видим более или менее монотонное возрастание светимости на протяжении порядка ~ 5 лет, для DDO68-V1 наблюдалась сильная активность и до “гигантского выброса”. В частности, в апреле 2004 года (SDSS изображение) LBV была в промежуточной фазе, на $\sim 1.5^m$ слабее V величины в “максимуме”, и достигла “минимума” в конце 2004 и начале 2005 года. В соответствии с фотометрией авторов работы [185], LBV была в промежуточной фазе и вблизи “максимума” в период между 1993 и 2001 годами. Вполне вероятно, что DDO68-V1 была близка к максимальной оптической светимости в 1955 году (на POSS фотопластинках).

DDO68-V1, с ее хаотичным характером переменности, может быть более слабым аналогом необычной (“непрерывно возобновляющейся”) внегалактической LBV, известной как UGC 2773-OT [189]. Совершенно очевидно, что для более точного определения классификации DDO68-V1 необходимы регулярные данные многополосного мониторинга.

Как обсуждалось в работе Смита и Овоцки (2006) [190], серия таких “гигантских выбросов” в LBV, которые образуют несколько расширяющихся оболочек, может предшествовать их взрывам, как сверхновых, на довольно короткой временной шкале (месяцы–годы). Последний пример такого события представлен в работах [191, 192], где ложная LBV/SN (“SN impostor” – объект, который имитирует вспышку сверхновой) в галактике NGC 2770 взорвалась как SNII (сверхновая второго типа) через три месяца после “гигантского выброса” в ней. Таким образом, DDO68-V1 может быть хорошим кандидатом для изучения прародителей SN в самых низкометаллических средах в ближней Вселенной.

Единственный вопрос, который остается открытым в плане классификации большой амплитуды переменности DDO68-V1 как “гигантского выброса”, – это ее происхождение из очень низкометаллической звезды. Для LBV в областях с намного большей металличностью постоянная болометрическая светимость с амплитудами $\Delta V \lesssim 2^m$ (“нормальные” выбросы) является эмпирическим фактом. Так как этот факт не объяснен теоретически и не обоснован на модельных расчетах, можно предположить, что для самых низкометаллических представителей LBV, как для DDO68-V1, диапазон переменности в V полосе может быть шире при постоянной болометрической светимости. Поэтому, чтобы надежно подтвердить гигантский(ие) выброс(ы) в DDO68-V1, важно расширить мониторинг этой LBV в широком диапазоне длин волн, чтобы увидеть, как ее спектральное распределение энергии и болометрическая светимость изменяются во время сильного увеличения блеска в оптическом диапазоне.

5.5.1 Сравнение спектральной переменности LBV в DDO 68 с другими LBV

Для DDO68-V1 связь потока HeI(4471) и светимости в V полосе отличается от найденного для LBV V532 в галактике Местной Группы M33, согласно работам Шолуховой и др. (2011) [187], Фабрики и др. (2005) [193]. Авторы этих работ обнаружили, что на протяжении одиннадцати лет переменности потоки $F(\text{HeI } 4471)$ и $F(\text{HeI } 5876)$ коррелируют с оптической переменностью V532 для полной амплитуды $\Delta B = 1.6^m$. Общий диапазон переменности в этой LBV $\sim 2.5^m$, с минимальным уровнем $M_V \sim -6.1$.

С другой стороны, переменность потоков линий HeI в DDO68-V1 напоминает то, что наблюдали для хорошо изученной LBV NGC 2363-V1, из работы [188]. Авторам удалось получить спектры NGC 2363-V1 на *HST*. За семь лет был накоплен набор ее УФ и оптических спектров, начиная с максимума “гигантского выброса” в 1997 году. Спустя ~ 1 год, поток в фильтре V постепенно снизился на $\sim 0.3^m$, в то время как континуум в УФ вырос на 0.6^m . Потоки HeI линий (в частности, HeI 4471 и HeI 5876) менялись в противоположную сторону относительно изменений в полосе V . Они были слабее (HeI 5876) или в поглощении (HeI 4471) вблизи максимума V кривой блеска. Затем сильно возросли в эпоху условного (локального) “минимума”: HeI 5876 поток увеличился в 5-6 раз, при этом HeI 4471 и другие слабые линии HeI стали хорошо обнаружимы в эмиссии. Без более подробной информации можно предположить, что, когда LBV становилась слабее в V полосе после “гигантского извержения”, ее потоки HeI линий возросли в несколько раз.

Мы провели сравнение переменности линий HeI в DDO 68-V1 с аналогичными переменностями в хорошо изученной LBV, описанной выше. Для наших сравнительно небольших статистических данных, потоки линий HeI в DDO 68-V1 изменялись похожим образом, как у NGC 2363-V1, вблизи фазы ее максимальной светимости.

5.6 Выводы

Суммируя представленные в данной главе результаты, можно сформулировать следующие выводы:

1. Для DDO68-V1, ярчайшей звезды галактики DDO 68, массивной голубой переменной (LBV), открытой в январе 2008 года, с помощью БТА получены новые данные фотометрии для III области No.3 (содержащей LBV), которые дополненные фотометрией

изображений из архивов *HST* и SDSS. Наряду с анализом новых и старых спектров для этой области в разные эпохи, эти данные позволили впервые построить кривую блеска LBV и оценить амплитуду вариаций блеска. Все имеющиеся оценки свидетельствуют о том, что величина в *V* полосе для данной LBV менялась в течение последнего десятилетия в диапазоне от 23.6^m до $\sim 20.0^m$ (M_V от -6.95 до -10.58). Если фотометрическое поведение данной LBV, возникшей из самой низкометаллической звезды ГП, похоже на то, что наблюдается для более типичных LBV, то переменность блеска в DDO68-V1 в течение последних 20 лет свидетельствует о том, что в ней произошел “гигантский выброс”. Если объединить наши данные, начинающиеся с эпохи 2004 года, с более ранними оценками для области No.3 из работы [185], то максимальная яркость LBV возможно достигалась в 1955 и 1999 годах. Для того чтобы доказать существенное увеличение ее болометрической светимости, необходим многоволновой мониторинг этого объекта.

2. К спектрам LBV, полученным в январе, феврале и марте 2008 года был добавлен еще один, полученный на БТА в январе 2009 года. Несмотря на очень небольшое количество спектральных данных, сделана попытка сравнения их со спектрами известных LBV в фазе “гигантского выброса”. Все спектры DDO68-V1 проанализированы в совокупности, для того, чтобы найти какие-то общие признаки, а также признаки, которые могут иметь важное значение в контексте вероятной очень низкой металличности прародителя LBV. Обнаружены P-Cygn профили Бальмеровских линий водорода и терминальные скорости ветра ~ 800 км с $^{-1}$. Найдено значительное понижение потоков линий HeI $\lambda 4471$ и $\lambda 5876$, при повышении светимости LBV в *V* фильтре на 1.5^m - 2^m , что согласуется с изменением потока линии HeI в фазе “гигантского выброса” для других LBV.

Заклучение

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

1. Результаты спектральных наблюдений на БТА и анализ спектров SDSS, на основе которых удалось определить содержание кислорода для 39 карликовых и маломассивных галактик позднего типа, принадлежащих войду Lynx-Cancer. Более половины галактик войда имеют низкие металличности, с $(O/H)_{\odot}/10$ или $12+\log(O/H)<7.68$. Для семи самых низкометаллических галактик, найденных (или подтвержденных) в этом исследовании, $12+\log(O/H)$ оценены в диапазоне [7.03-7.38].
2. По результатам этой работы полное число галактик текущей выборки войда Lynx-Cancer, с известными оценками O/H , увеличено до 81. Проведено сравнение зависимости “ $\log(O/H)$ от M_B ” с аналогичной зависимостью для контрольной выборки подобных галактик в Местном Объеме, находящихся в более плотном окружении. Получен уверенный результат о пониженной металличности (в среднем на 37% или в ~ 1.6 раза) для галактик войда Lynx-Cancer. Это подтверждает вывод, сделанный в работе нашей группы [34] по меньшему числу галактик.
3. В центральной части войда найдена карликовая иррегулярная галактика J0706+3020 ($M_B \sim -12.5$, слабый спутник UGC 3672), чрезвычайно богатая газом и очень голубая, согласно Ченгалур и др. (2016) [115]. По результатам нашей спектроскопии на БТА для нее получена оценка O/H на уровне $\sim 1/50$ солнечного значения. Таким образом, наряду с другой, недавно найденной в этом войде, галактикой AGC198691, это самый низкометаллический карлик в ближней Вселенной. С учетом этих недавних находок, список самых необычных (“эволюционно-молодых”) галактик существенно расширен.
4. Для 85-ти галактик войда Lynx-Cancer по изображениям из базы данных SDSS получены фотометрические параметры в фильтрах u, g, r, i , (полные величины и цвета,

эффективные радиусы и соответствующие поверхностные яркости, оптические радиусы и радиусы Холмберга). По результатам анализа радиальных профилей поверхностной яркости получены центральные поверхностные яркости и масштабные длины модельных дисков. Цветовые индексы $(u - g)$, $(g - r)$, $(r - i)$ внешних частей галактик, вне областей недавнего звездообразования, сопоставлены с эволюционными треками пакета PEGASE2, и получены оценки времени, прошедшего с начала эпохи звездообразования T_{30} . Для $\sim 85\%$ всех галактик эти времена находятся в диапазоне $T_{30} \sim 10$ -13 млрд.лет, типичном для галактик в более плотном окружении. Для 13-ти галактик их цвета приводят к существенно меньшим T_{30} . Для 7-ми они находятся в диапазоне ~ 1 -3.5, а для 6-ти остальных – ~ 4 -6.5 млрд.лет. Среди галактик, с необычными цветами внешних областей, большинство имеет очень низкие значения металличности газа ($12 + \log(\text{O}/\text{H}) \lesssim 7.4$), что в 2-5 раз ниже ожидаемых для их светимости, и наибольшие значения эмпирического параметра содержания газа $\mathfrak{M}(\text{H I})/L_B \gtrsim 2.5$. Оценив массы звезд для этой группы галактик, находим их массовую долю газа в диапазоне 94-99%, что является максимальным из всех известных. По своим свойствам эти галактики являются “эволюционно-молодыми”.

5. Группа “эволюционно-молодых” галактик составляет около 15% всех карликовых галактик низкой поверхностной яркости в войде и представлена значимо чаще среди галактик низкой светимости ($M_B > -13.2$), где их доля достигает $\sim 30\%$. Это является свидетельством в пользу предсказываемого более сильного влияния окружения на менее массивные галактики и указанием к эффективному поиску таких необычных галактик.
6. Сравнение статистических связей между наблюдаемыми параметрами галактик войда Лунх-Сапсег и галактик из выборки Экваториального обзора (ES), отобранных исходно по их излучению в линии H I, показывает схожесть выборок в общем диапазоне светимостей. Однако, среди галактик войда имеется значимая часть, которая выпадает из общих закономерностей. Небольшая группа так называемых “рудиментарных” галактик обзора ES также имеет необычные свойства. Более детальные исследования, вероятно, покажут, какая их часть является аналогами необычных галактик войдов.
7. Комплексно изучена система взаимодействующих галактик UGC 4722/UGC 4722C. По данным фотометрии, полученной по изображениям SDSS, с включением данных в ли-

нии HI на основе HI-карт, полученных на GMRT, мы обнаружили, что оба компонента системы UGC 4722/UGC 4722C богаты газом. Для UGC 4722 и UGC 4722C+шлейф мы оцениваем значения $\mathfrak{M}(\text{HI})/L_B$, равные 1.0 и 4.3 соответственно. Сравнение цветов шлейфа в галактике UGC 4722 с треками эволюционных моделей PEGASE2 для одномоментного эпизода звездообразования показывает, что цвета хорошо согласуются со звездным населением, вызванным одиночной вспышкой около ~ 0.5 млрд. лет назад. С учетом статистических и численных исследований вспышек во взаимодействующих галактиках, мы предполагаем, что время вспышки привязано к перигалактическому прохождению компаньона.

8. При изучении очень богатой газом системы J0723+36 вблизи центра войда Lynx-Cancer была обнаружена экстремально богатая газом, очень слабая галактика J0723+3624 ($B_{\text{tot}}=21.68$). Красное смещение оптического компонента оставалось неизвестным. По спектру БТА и обнаруженной в нем эмиссии $\text{H}\alpha$ мы оценили гелиоцентрическую скорость 943 ± 23 км s^{-1} для этого слабого оптического объекта. Она в пределах нескольких км s^{-1} совпадает с лучевой скоростью соответствующего HI облака. Данный результат подтверждает вывод из [36] о “эволюционно-молодом” характере этого самого маломассивного из известных объектов войда.
9. Изучены две необычные LSB карликовые галактики SDSS J0015+0104 и J2354-0005, с крайне низкой металличностью, расположенные в войде Eridanus. Они находятся на расстоянии до ближайших ярких галактик $D_{NN} > 7$ и 4.3 Мпк соответственно. На основе данных собственной фотометрии по изображениям SDSS для этих галактик, включая данные интегрального потока в HI, мы обнаруживаем, что это очень богатые газом объекты ($\mathfrak{M}(\text{HI})/L_B \sim 2.35$ и ~ 2.3), с массовой долей газа $f_{\text{gas}} \sim 0.98$ и 0.97 соответственно. Их измеренные голубые цвета ($u - g$), ($g - r$) и ($r - i$), при сопоставлении с эволюционными треками пакета PEGASE2 для непрерывного ЗО, указывают на время от начала основного эпизода звездообразования $T \sim 4.5$ млрд. лет и $T \sim 2.7$ млрд. лет. Таким образом, все три наблюдательных параметра – металличность O/H, массовая доля газа f_g и голубые цвета периферии – доказывают “эволюционно-молодой” статус этих карликов.
10. По результатам исследования двух необычных галактик в войде Eridanus и аналогичных галактик в войде Lynx-Cancer, можно предполагать, что области пониженной плот-

ности благоприятствуют формированию галактик с необычными эволюционными свойствами (очень низкая металличность газа, очень высокая массовая доля газа, голубые цвета внешних областей). Таким образом, целенаправленный поиск таких объектов, среди выборок галактик войдов, может быть одним из наиболее эффективных способов их обнаружения.

11. Для DDO68-V1, ярчайшей звезды галактики DDO 68, массивной голубой переменной (LBV), открытой в январе 2008 года, с помощью БТА получены новые данные фотометрии для III области No.3 (содержащей LBV), которые дополнены фотометрией изображений из архивов *HST* и SDSS. Наряду с анализом новых и старых спектров для этой области в разные эпохи, с использованием оценки светимости подстилающей III области (как по данным БТА, так и HST), эти данные позволили впервые построить кривую блеска LBV и оценить амплитуду вариаций блеска. Все полученные оценки свидетельствуют о том, что величина в фильтре V для данной LBV менялась в течение последнего десятилетия в диапазоне от 23.6^m до $\sim 20.0^m$. Это соответствует увеличению светимости M_V от -6.95 до -10.58 . Если фотометрическое поведение данной LBV, возникшей из самой низкометалличной звезды ГП, похоже на то, что наблюдается для более типичных LBV, то переменность блеска в DDO68-V1 в течение последних 20 лет свидетельствует о том, что в ней произошел “гигантский выброс”. Для того чтобы доказать существенное увеличение ее болометрической светимости, необходим многоволновой мониторинг этого объекта.
12. К спектрам LBV, полученным в январе, феврале и марте 2008 года был добавлен еще один, полученный на БТА в январе 2009 года. Несмотря на очень небольшое количество спектральных данных, сделана попытка сравнения их со спектрами известных LBV в фазе “гигантского выброса”. Все спектры DDO68-V1 проанализированы в совокупности, для того, чтобы найти какие-то общие признаки, а также признаки, которые могут иметь важное значение в контексте вероятной очень низкой металличности прародителя LBV. Обнаружены P-Cyг профили Бальмеровских линий водорода и терминальные скорости ветра ~ 800 км с $^{-1}$. Найдено значительное снижение потоков линий HeI $\lambda 4471$ и $\lambda 5876$, в то время как светимость LBV в V фильтре увеличилась на 1.5^m - 2^m , что согласуется с изменением потока линии HeI в фазе “гигантского выброса” для других LBV.

Автор выражает искреннюю благодарность всем, кто способствовал выполнению этой работы:

- своему научному руководителю, Пустильнику Семену Ароновичу, за постановку задач, постоянное внимание к работе и ценный опыт;
- Щекинову Юрию Андреевичу за мотивацию и содействие на начальных этапах работы в САО РАН;
- всем сотрудникам лаборатории Внегалактической Астрофизики и Космологии за благоприятную, дружескую обстановку, способствовавшую эффективному выполнению поставленных задач;
- разработчикам SCORPIO и ответственным наблюдателям, благодаря которым удалось получить ценный материал, использованный в данной диссертации;
- соавторам своих статей за плодотворное сотрудничество;
- друзьям за отзывчивость и позитив. В частности, Уклеину Роману Ивановичу за помощь с переводами и внимательное прочтение диссертации;
- и, конечно же, САО РАН и его коллективу за возможность заниматься интересной работой. Отдельное спасибо супругу Перепелицыну Александру Евгеньевичу и нашим замечательным родителям за неизменное одобрение и поддержку, которая придавала сил и уверенности в себе на протяжении всей работы над диссертацией.

Литература

- [1] M. Jõeveer, 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 (R. van de Weygaert, S. Shandarin, E. Saar, and J. Einasto, eds.), 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 of Bulletin of the American Astronomical Society, 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. Vogele, 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. Vogele, 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 (L. Verdes-Montenegro, A. Del Olmo, and J. Sulentic, eds.), 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 H II 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.
- [50] A. V. Ugryumov, D. Engels, V. A. Lipovetsky, H.-J. Hagen, and et al., “VizieR Online Data Catalog: The Hamburg/SAO Survey for ELGs (Ugryumov+ 1999),” VizieR Online Data Catalog, vol. 413, Nov. 1998.
- [51] S. A. Pustilnik, D. Engels, A. V. Ugryumov, V. A. Lipovetsky, and et al., “The Hamburg/SAO survey for emission-line galaxies . II. The second list of 128 galaxies,” A&AS, vol. 137, pp. 299–304, June 1999.
- [52] U. Hopp, D. Engels, R. F. Green, A. V. Ugryumov, and et al., “VizieR Online Data Catalog: Hamburg/SAO Survey for ELGs. III. (Hopp+, 2000),” VizieR Online Data Catalog, vol. 414, Mar. 2000.
- [53] A. Y. Kniazev, D. Engels, S. A. Pustilnik, A. V. Ugryumov, and et al., “The Hamburg/SAO survey for emission-line galaxies. IV. The fourth list of 119 galaxies,” A&A, vol. 366, pp. 771–787, Feb. 2001.
- [54] A. V. Ugryumov, D. Engels, A. Y. Kniazev, R. F. Green, and et al., “The Hamburg/SAO survey for emission-line galaxies . V. The fifth list of 161 galaxies,” A&A, vol. 374, pp. 907–913, Aug. 2001.

- [55] S. A. Pustilnik, D. Engels, V. A. Lipovetsky, A. Y. Kniazev, and et al., “VizieR Online Data Catalog: Hamburg/SAO Survey for ELGs. VI. (Pustilnik+, 2005),” VizieR Online Data Catalog, vol. 344, Oct. 2005.
- [56] A. Y. Kniazev, S. A. Pustilnik, J. Masegosa, I. Márquez, and et al., “HS 0822+3542 - a new nearby extremely metal-poor galaxy,” A&A, vol. 357, pp. 101–110, May 2000.
- [57] S. A. Pustilnik, A. Y. Kniazev, A. G. Pramskij, A. V. Ugryumov, and J. Masegosa, “Starburst in HS 0822+3542 induced by the very blue LSB dwarf SAO 0822+3545,” A&A, vol. 409, pp. 917–932, Oct. 2003.
- [58] A. P. Fairall, Large-scale structures in the universe. 1998.
- [59] H. M. Courtois, D. Pomarède, R. B. Tully, Y. Hoffman, and D. Courtois, “Cosmography of the Local Universe,” AJ, vol. 146, p. 69, Sept. 2013.
- [60] R. B. Tully, E. J. Shaya, I. D. Karachentsev, H. M. Courtois, and et al., “Our Peculiar Motion Away from the Local Void,” ApJ, vol. 676, pp. 184–205, Mar. 2008.
- [61] D. G. York, J. Adelman, J. E. Anderson, Jr., S. F. Anderson, and et al., “The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary,” AJ, vol. 120, pp. 1579–1587, Sept. 2000.
- [62] K. N. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agüeros, S. S. Allam, and et al., “The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey,” ApJS, vol. 182, pp. 543–558, June 2009.
- [63] M. P. Haynes, R. Giovanelli, A. M. Martin, K. M. Hess, and et al., “The Arecibo Legacy Fast ALFA Survey: The $\alpha.40$ H I Source Catalog, Its Characteristics and Their Impact on the Derivation of the H I Mass Function,” AJ, vol. 142, p. 170, Nov. 2011.
- [64] S. A. Pustilnik, A. Y. Kniazev, and A. G. Pramskij, “Study of DDO 68: nearest candidate for a young galaxy?,” A&A, vol. 443, pp. 91–102, Nov. 2005.
- [65] S. A. Pustilnik, A. L. Tepliakova, A. Y. Kniazev, J.-M. Martin, and A. N. Burenkov, “SDSS J092609.45+334304.1: a nearby unevolved galaxy,” MNRAS, vol. 401, pp. 333–341, Jan. 2010.
- [66] F. Prada, M. Vitvitska, A. Klypin, J. A. Holtzman, and et al., “Observing the Dark Matter Density Profile of Isolated Galaxies,” ApJ, vol. 598, pp. 260–271, Nov. 2003.

- [67] J. E. Gunn, M. Carr, C. Rockosi, M. Sekiguchi, and et al., “The Sloan Digital Sky Survey Photometric Camera,” AJ, vol. 116, pp. 3040–3081, Dec. 1998.
- [68] M. Fukugita, T. Ichikawa, J. E. Gunn, M. Doi, and et al., “The Sloan Digital Sky Survey Photometric System,” AJ, vol. 111, p. 1748, Apr. 1996.
- [69] R. Lupton, J. E. Gunn, Z. Ivezić, G. R. Knapp, and S. Kent, “The SDSS Imaging Pipelines,” in Astronomical Data Analysis Software and Systems X (F. R. Harnden, Jr., F. A. Primini, and H. E. Payne, eds.), vol. 238 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series, p. 269, 2001.
- [70] J. A. Smith, D. L. Tucker, S. Kent, M. W. Richmond, and et al., “The u’g’r’i’z’ Standard-Star System,” AJ, vol. 123, pp. 2121–2144, Apr. 2002.
- [71] J. R. Pier, J. A. Munn, R. B. Hindsley, G. S. Hennessy, and et al., “Astrometric Calibration of the Sloan Digital Sky Survey,” AJ, vol. 125, pp. 1559–1579, Mar. 2003.
- [72] M. R. Blanton, J. Dalcanton, D. Eisenstein, J. Loveday, and et al., “The Luminosity Function of Galaxies in SDSS Commissioning Data,” AJ, vol. 121, pp. 2358–2380, May 2001.
- [73] P. Fischer, T. A. McKay, E. Sheldon, A. Connolly, and et al., “Weak Lensing with Sloan Digital Sky Survey Commissioning Data: The Galaxy-Mass Correlation Function to $1\text{ H}^{-1}\text{ Mpc}$,” AJ, vol. 120, pp. 1198–1208, Sept. 2000.
- [74] T. A. McKay, E. S. Sheldon, D. Johnston, E. K. Grebel, and et al., “Dynamical Confirmation of Sloan Digital Sky Survey Weak-lensing Scaling Laws,” ApJ, vol. 571, pp. L85–L88, June 2002.
- [75] K. Shimasaku, M. Fukugita, M. Doi, M. Hamabe, and et al., “Statistical Properties of Bright Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey Photometric System,” AJ, vol. 122, pp. 1238–1250, Sept. 2001.
- [76] I. Strateva, Ž. Ivezić, G. R. Knapp, V. K. Narayanan, and et al., “Color Separation of Galaxy Types in the Sloan Digital Sky Survey Imaging Data,” AJ, vol. 122, pp. 1861–1874, Oct. 2001.
- [77] A. Y. Kniazev, E. K. Grebel, S. A. Pustilnik, A. G. Pramskij, and et al., “Low Surface Brightness Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. I. Search Method and Test Sample,” AJ, vol. 127, pp. 704–727, Feb. 2004.

- [78] R. Lupton R, “Transform sdss to uvri,”
- [79] E. Holmberg, “A photographic photometry of extragalactic nebulae.,” Meddelanden fran Lunds Astronomiska Observatorium Serie II, vol. 136, p. 1, 1958.
- [80] J. L. Sersic, Atlas de galaxias australes. 1968.
- [81] E. F. Schlafly and D. P. Finkbeiner, “Measuring Reddening with Sloan Digital Sky Survey Stellar Spectra and Recalibrating SFD,” ApJ, vol. 737, p. 103, Aug. 2011.
- [82] L. D. Matthews, J. S. Gallagher, III, and W. van Driel, “The Extraordinary “Superthin” Spiral Galaxy UGC 7321. I. Disk Color Gradients and Global Properties from Multiwavelength Observations,” AJ, vol. 118, pp. 2751–2766, Dec. 1999.
- [83] P. C. van der Kruit and L. Searle, “Surface photometry of edge-on spiral galaxies. I - A model for the three-dimensional distribution of light in galactic disks.,” A&A, vol. 95, pp. 105–115, Feb. 1981.
- [84] S. Roychowdhury, J. N. Chengalur, I. D. Karachentsev, and E. I. Kaisina, “The intrinsic shapes of dwarf irregular galaxies,” MNRAS, vol. 436, pp. L104–L108, Nov. 2013.
- [85] V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, “The SCORPIO Universal Focal Reducer of the 6-m Telescope,” Astronomy Letters, vol. 31, pp. 194–204, Mar. 2005.
- [86] A. E. Whitford, “The law of interstellar reddening.,” AJ, vol. 63, pp. 201–207, May 1958.
- [87] Y. I. Izotov, T. X. Thuan, and V. A. Lipovetsky, “The primordial helium abundance from a new sample of metal-deficient blue compact galaxies,” ApJ, vol. 435, pp. 647–667, Nov. 1994.
- [88] L. H. Aller, ed., Physics of thermal gaseous nebulae, vol. 112 of Astrophysics and Space Science Library, 1984.
- [89] Y. I. Izotov, G. Stasińska, G. Meynet, N. G. Guseva, and T. X. Thuan, “The chemical composition of metal-poor emission-line galaxies in the Data Release 3 of the Sloan Digital Sky Survey,” A&A, vol. 448, pp. 955–970, Mar. 2006.
- [90] G. Stasińska and Y. Izotov, “Modeling the emission line sequence of H II galaxies,” A&A, vol. 397, pp. 71–85, Jan. 2003.

- [91] Y. I. Izotov, N. G. Guseva, K. J. Fricke, and P. Papaderos, “SBS 0335-052E+W: deep VLT/FORS+UVES spectroscopy of the pair of the lowest-metallicity blue compact dwarf galaxies,” *A&A*, vol. 503, pp. 61–72, Aug. 2009.
- [92] N. G. Guseva, Y. I. Izotov, P. Papaderos, and K. J. Fricke, “Balmer jump temperature determination in a large sample of low-metallicity HII regions,” *A&A*, vol. 464, pp. 885–893, Mar. 2007.
- [93] T. X. Thuan and Y. I. Izotov, “High-Ionization Emission in Metal-deficient Blue Compact Dwarf Galaxies,” *ApJS*, vol. 161, pp. 240–270, Dec. 2005.
- [94] Y. I. Izotov, T. X. Thuan, and N. G. Guseva, “VizieR Online Data Catalog: SDSS extremely metal-poor emission-line galaxies (Izotov+, 2012),” *VizieR Online Data Catalog*, vol. 354, Nov. 2012.
- [95] A. S. Hirschauer, J. J. Salzer, E. D. Skillman, D. Berg, and et al., “ALFALFA Discovery of the Most Metal-poor Gas-rich Galaxy Known: AGC 198691,” *ApJ*, vol. 822, p. 108, May 2016.
- [96] S. A. Pustilnik, D. Engels, A. Y. Kniazev, A. G. Pramskij, and et al., “HS 2134+0400 a new very metal-poor galaxy, a representative of the void population?,” *Astronomy Letters*, vol. 32, pp. 228–235, Apr. 2006.
- [97] Y. I. Izotov, T. X. Thuan, and N. G. Guseva, “Broad-Line Emission in Low-Metallicity Blue Compact Dwarf Galaxies: Evidence for Stellar Wind, Supernova, and Possible AGN Activity,” *ApJ*, vol. 671, pp. 1297–1320, Dec. 2007.
- [98] J. Sánchez Almeida, E. Pérez-Montero, A. B. Morales-Luis, C. Muñoz-Tuñón, and et al., “Search for Extremely Metal-poor Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. (II). High Electron Temperature Objects,” *ApJ*, vol. 819, p. 110, Mar. 2016.
- [99] L. S. Pilyugin, E. K. Grebel, and L. Mattsson, “‘Counterpart’ method for abundance determinations in H II regions,” *MNRAS*, vol. 424, pp. 2316–2329, Aug. 2012.
- [100] A. Y. Kniazev, E. K. Grebel, L. Hao, M. A. Strauss, and et al., “Discovery of Eight New Extremely Metal Poor Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey,” *ApJ*, vol. 593, pp. L73–L76, Aug. 2003.

- [101] A. Y. Kniazev, S. A. Pustilnik, E. K. Grebel, H. Lee, and A. G. Pramskij, “Strong Emission Line H II Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. I. Catalog of DR1 Objects with Oxygen Abundances from T_e Measurements,” ApJS, vol. 153, pp. 429–445, Aug. 2004.
- [102] E. E. Salpeter, “The Luminosity Function and Stellar Evolution.,” ApJ, vol. 121, p. 161, Jan. 1955.
- [103] P. Kroupa, C. A. Tout, and G. Gilmore, “The distribution of low-mass stars in the Galactic disc,” MNRAS, vol. 262, pp. 545–587, June 1993.
- [104] D. L. Tucker, S. Kent, M. W. Richmond, J. Annis, and et al., “The Sloan Digital Sky Survey monitor telescope pipeline,” Astronomische Nachrichten, vol. 327, p. 821, Nov. 2006.
- [105] M. S. Roberts, “Integral Properties of Spiral and Irregular Galaxies,” AJ, vol. 74, pp. 859–876, Sept. 1969.
- [106] S. A. Pustilnik and J.-M. Martin, “Study of galaxies in the Lynx-Cancer void. VI. H I observations with Nançay Radio Telescope,” A&A, vol. 596, p. A86, Dec. 2016.
- [107] S. Zibetti, S. Charlot, and H.-W. Rix, “Resolved stellar mass maps of galaxies - I. Method and implications for global mass estimates,” MNRAS, vol. 400, pp. 1181–1198, Dec. 2009.
- [108] W. K. Huchtmeier, U. Hopp, and B. Kuhn, “HI observations of dwarf galaxies in voids.,” A&A, vol. 319, pp. 67–73, Mar. 1997.
- [109] S. A. Pustilnik, J.-M. Martin, W. K. Huchtmeier, N. Brosch, and et al., “Studies of galaxies in voids. I. H I observations of Blue Compact Galaxies,” A&A, vol. 389, pp. 405–418, July 2002.
- [110] K. Kreckel, E. Platen, M. A. Aragón-Calvo, J. H. van Gorkom, and et al., “The Void Galaxy Survey: Optical Properties and H I Morphology and Kinematics,” AJ, vol. 144, p. 16, July 2012.
- [111] C. M. Moorman, M. S. Vogele, F. Hoyle, D. C. Pan, and et al., “The Optical Luminosity Function of Void Galaxies in the SDSS and ALFALFA Surveys,” ApJ, vol. 810, p. 108, Sept. 2015.
- [112] A. V. Tikhonov and A. Klypin, “The emptiness of voids: yet another overabundance problem for the Λ cold dark matter model,” MNRAS, vol. 395, pp. 1915–1924, June 2009.

- [113] I. D. Karachentsev, D. I. Makarov, and E. I. Kaisina, “Updated Nearby Galaxy Catalog,” AJ, vol. 145, p. 101, Apr. 2013.
- [114] A. Y. Kniazev, A. A. Zijlstra, E. K. Grebel, L. S. Pilyugin, and et al., “The metallicity extremes of the Sagittarius dSph: SALT spectroscopy of PNe,” MNRAS, vol. 388, pp. 1667–1678, Aug. 2008.
- [115] J. N. Chengalur, S. A. Pustilnik, and E. S. Egorova, “UGC 3672: An unusual merging triplet of gas-rich galaxies in the Lynx-Cancer void,” ArXiv e-prints, Nov. 2016.
- [116] J. A. Baldwin, M. M. Phillips, and R. Terlevich, “Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects,” PASP, vol. 93, pp. 5–19, Feb. 1981.
- [117] 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.
- [118] J. Sánchez Almeida, B. G. Elmegreen, C. Muñoz-Tuñón, D. M. Elmegreen, and et al., “Localized Starbursts in Dwarf Galaxies Produced by the Impact of Low-metallicity Cosmic Gas Clouds,” ApJ, vol. 810, p. L15, Sept. 2015.
- [119] Y. A. Perepelitsyna, S. A. Pustilnik, and A. Y. Kniazev, “Study of galaxies in the Lynx-Cancer void. IV. Photometrical properties,” Astrophysical Bulletin, vol. 69, p. 247, 2014.
- [120] A. Y. Kniazev, S. A. Pustil’nik, and A. V. Ugryumov, “New nearby very metal-deficient blue compact galaxies,” Bulletin of the Special Astrophysics Observatory, vol. 46, pp. 23–27, 1998.
- [121] N. A. Tikhonov, O. A. Galazutdinova, and V. S. Lebedev, “Stellar content of the metal-poor galaxy DDO 68,” Astronomy Letters, vol. 40, pp. 1–10, Jan. 2014.
- [122] L. van Zee, J. J. Salzer, M. P. Haynes, A. A. O’Donoghue, and T. J. Balonek, “Spectroscopy of Outlying H II Regions in Spiral Galaxies: Abundances and Radial Gradients,” AJ, vol. 116, pp. 2805–2833, Dec. 1998.
- [123] J. Moustakas and R. C. Kennicutt, Jr., “Integrated Nebular Abundances of Disk Galaxies,” ApJ, vol. 651, pp. 155–166, Nov. 2006.

- [124] E. D. Skillman, J. J. Salzer, D. A. Berg, R. W. Pogge, and et al., “ALFALFA Discovery of the nearby Gas-rich Dwarf Galaxy Leo P. III. An Extremely Metal Deficient Galaxy,” AJ, vol. 146, p. 3, July 2013.
- [125] K. B. W. McQuinn, E. D. Skillman, A. Dolphin, J. M. Cannon, and et al., “Leo P: An Unquenched Very Low-mass Galaxy,” ApJ, vol. 812, p. 158, Oct. 2015.
- [126] R. Giovanelli, M. P. Haynes, E. A. K. Adams, J. M. Cannon, and et al., “ALFALFA Discovery of the Nearby Gas-rich Dwarf Galaxy Leo P. I. H I Observations,” AJ, vol. 146, p. 15, July 2013.
- [127] K. Kreckel, K. Croxall, B. Groves, R. van de Weygaert, and R. W. Pogge, “The Metallicity of Void Dwarf Galaxies,” ApJ, vol. 798, p. L15, Jan. 2015.
- [128] V. de Lapparent, “in Cosmology and large scale structure in Proceedings of Les Houches Summer School, Session LX, France, 1993, Ed. by R. Schaeffer, J. Silk, M. Spiro, and J. Zinn-Justin (Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1996), p.107,” 1995.
- [129] F. Hoyle, M. S. Vogeley, and D. Pan, “Photometric properties of void galaxies in the Sloan Digital Sky Survey Data Release 7,” MNRAS, vol. 426, pp. 3041–3050, Nov. 2012.
- [130] V. Petrosian, “Surface brightness and evolution of galaxies,” ApJ, vol. 209, pp. L1–L5, Oct. 1976.
- [131] S. A. Pustilnik, A. L. Tepliakova, and A. Y. Kniazev, “Study of the galaxy DDO 68: New evidence for its youth,” Astronomy Letters, vol. 34, pp. 457–467, July 2008.
- [132] S. A. Pustilnik, A. G. Pramskij, and A. Y. Kniazev, “SBS 0335-052 E and W: Implications of new broad-band and H α photometry,” A&A, vol. 425, pp. 51–65, Oct. 2004.
- [133] Ekta, J. N. Chengalur, and S. A. Pustilnik, “HI and star formation in the most metal-deficient galaxies,” MNRAS, vol. 391, pp. 881–890, Dec. 2008.
- [134] L. Bolshev and N. Smirnov
- [135] S. Pustil’nik, A. V. Ugryumov, V. A. Lipovetsky, T. X. Thuan, and N. Guseva, “The spatial distribution of blue compact galaxies in the second Byurakan survey,” ApJ, vol. 443, pp. 499–513, Apr. 1995.

- [136] I. D. Karachentsev, D. I. Makarov, V. E. Karachentseva, and O. V. Melnyk, “Catalog of nearby isolated galaxies in the volume $z < 0.01$,” Astrophysical Bulletin, vol. 66, pp. 1–27, Jan. 2011.
- [137] V. E. Karachentseva, “Catalogue of isolated galaxies.,” Soobshcheniya Spetsial’noj Astrofizicheskoy Observatorii, vol. 8, 1973.
- [138] L. Verdes-Montenegro, J. Sulentic, U. Lisenfeld, S. Leon, and et al., “The AMIGA project. I. Optical characterization of the CIG catalog,” A&A, vol. 436, pp. 443–455, June 2005.
- [139] 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.
- [140] I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, W. K. Huchtmeier, D. I. Makarov, and S. S. Kaisin, “Probe of Dark Galaxies via Disturbed/Lopsided Isolated Galaxies,” in Dark Galaxies and Lost Baryons (J. I. Davies and M. J. Disney, eds.), vol. 244 of IAU Symposium, pp. 235–246, May 2008.
- [141] S. van den Bergh, “Collapsed Objects in Clusters of Galaxies,” Nature, vol. 224, p. 891, Nov. 1969.
- [142] N. Trentham, O. Möller, and E. Ramirez-Ruiz, “Completely dark galaxies: their existence, properties and strategies for finding them,” MNRAS, vol. 322, pp. 658–668, Apr. 2001.
- [143] A. V. Zasov, A. Y. Kniazev, S. A. Pustilnik, A. G. Pramsky, and et al., “Possibly interacting Vorontsov-Vel’yaminov galaxies . I. Observations of VV 432, VV 543 and VV 747,” A&AS, vol. 144, pp. 429–439, June 2000.
- [144] L. S. Pilyugin and L. Mattsson, “Abundance determination in H II regions from spectra without the $[\text{O II}]\lambda 3727 + \lambda 3729$ line,” MNRAS, vol. 412, pp. 1145–1150, Apr. 2011.
- [145] S. Pustilnik, A. Zasov, A. Kniazev, A. Pramskij, and et al., “Possibly interacting Vorontsov-Velyaminov galaxies. II. The 6-m telescope spectroscopy of VV 080, 131, 499, 523 and 531,” A&A, vol. 400, pp. 841–857, Mar. 2003.
- [146] F. Walter and E. Brinks, “Holes and Shells in the Interstellar Medium of the Nearby Dwarf Galaxy IC 2574,” AJ, vol. 118, pp. 273–301, July 1999.

- [147] D. R. Patton, P. Torrey, S. L. Ellison, J. T. Mendel, and J. M. Scudder, “Galaxy pairs in the Sloan Digital Sky Survey - VI. The orbital extent of enhanced star formation in interacting galaxies,” *MNRAS*, vol. 433, pp. L59–L63, June 2013.
- [148] P. Di Matteo, F. Bournaud, M. Martig, F. Combes, and et al., “On the frequency, intensity, and duration of starburst episodes triggered by galaxy interactions and mergers,” *A&A*, vol. 492, pp. 31–49, Dec. 2008.
- [149] T. Tsuchiya, V. Korchagin, and K. Wada, “Formation of Plumes in Head-on Collisions of Galaxies,” *ApJ*, vol. 505, pp. 607–620, Oct. 1998.
- [150] J. N. Chengalur, S. A. Pustilnik, D. I. Makarov, Y. A. Perepelitsyna, and et al., “Study of the Lynx-Cancer void galaxies. - V. The extremely isolated galaxy UGC 4722,” *MNRAS*, vol. 448, pp. 1634–1643, Apr. 2015.
- [151] B. Ekta and J. N. Chengalur, “When are extremely metal-deficient galaxies extremely metal deficient?,” *MNRAS*, vol. 406, pp. 1238–1247, Aug. 2010.
- [152] M. Montuori, P. Di Matteo, M. D. Lehnert, F. Combes, and B. Semelin, “The dilution peak, metallicity evolution, and dating of galaxy interactions and mergers,” *A&A*, vol. 518, p. A56, July 2010.
- [153] J. N. Chengalur, S. A. Pustilnik, J.-M. Martin, and A. Y. Kniazev, “HI in extremely metal deficient galaxies - III. Giant Metrewave Radio Telescope observations of blue compact galaxy HS 0822+3542,” *MNRAS*, vol. 371, pp. 1849–1854, Oct. 2006.
- [154] M. G. Iyer and C. E. Simpson, “Properties of the Dwarf Irregular Galaxy DDO 169,” *AJ*, vol. 132, pp. 1035–1045, Sept. 2006.
- [155] J. M. Cannon, M. Johnson, K. B. W. McQuinn, E. D. Alfvén, and et al., “Discovery of a Gas-rich Companion to the Extremely Metal-poor Galaxy DDO 68,” *ApJ*, vol. 787, p. L1, May 2014.
- [156] D. A. Hunter and B. G. Elmegreen, “Star Formation Properties of a Large Sample of Irregular Galaxies,” *AJ*, vol. 128, pp. 2170–2205, Nov. 2004.
- [157] N. G. Guseva, P. Papaderos, H. T. Meyer, Y. I. Izotov, and K. J. Fricke, “An investigation of the luminosity-metallicity relation for a large sample of low-metallicity emission-line galaxies,” *A&A*, vol. 505, pp. 63–72, Oct. 2009.

- [158] N. G. Guseva, Y. I. Izotov, K. J. Fricke, and C. Henkel, “Searching for metal-deficient emission-line galaxy candidates: the final sample of the SDSS DR12 galaxies,” ArXiv e-prints, Nov. 2016.
- [159] J.-M. Martin, E. Gerard, P. Colom, G. Theureau, and I. Cognard, “First Results of the upgraded Nancay Radio Telescope and status of on-going projects,” in SF2A-2002: Semaine de l’Astrophysique Francaise (F. Combes and D. Barret, eds.), p. 33, June 2002.
- [160] S. A. Pustilnik and J.-M. Martin, “H I study of extremely metal-deficient dwarf galaxies. I. The Nançay radio telescope observations of twenty-two objects,” A&A, vol. 464, pp. 859–869, Mar. 2007.
- [161] S. E. Schneider, G. Helou, E. E. Salpeter, and Y. Terzian, “Neutral hydrogen in small groups of galaxies,” AJ, vol. 92, pp. 742–765, Oct. 1986.
- [162] N. Y. Lu, E. E. Salpeter, and G. L. Hoffman, “Measuring the Hubble constant and our Virgo-infall velocity independently,” ApJ, vol. 426, pp. 473–485, May 1994.
- [163] D. J. Schlegel, D. P. Finkbeiner, and M. Davis, “Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds,” ApJ, vol. 500, pp. 525–553, June 1998.
- [164] B. R. Parodi, F. D. Barazza, and B. Binggeli, “Structure and stellar content of dwarf galaxies. VII. B and R photometry of 25 southern field dwarfs and a disk parameter analysis of the complete sample of nearby irregulars,” A&A, vol. 388, pp. 29–49, June 2002.
- [165] N. Bergvall, E. Zackrisson, and B. Caldwell, “The red haloes of SDSS low surface brightness disc galaxies,” MNRAS, vol. 405, pp. 2697–2716, July 2010.
- [166] A. Y. Kniazev, N. Brosch, G. L. Hoffman, E. K. Grebel, and et al., “The faint outer regions of the Pegasus dwarf irregular galaxy: a much larger and undisturbed galaxy,” MNRAS, vol. 400, pp. 2054–2069, Dec. 2009.
- [167] L. van Zee and M. P. Haynes, “Oxygen and Nitrogen in Isolated Dwarf Irregular Galaxies,” ApJ, vol. 636, pp. 214–239, Jan. 2006.
- [168] M. Geha, M. R. Blanton, M. Masjedi, and A. A. West, “The Baryon Content of Extremely Low Mass Dwarf Galaxies,” ApJ, vol. 653, pp. 240–254, Dec. 2006.

- [169] S. S. McGaugh, J. M. Schombert, W. J. G. de Blok, and M. J. Zagursky, “The Baryon Content of Cosmic Structures,” ApJ, vol. 708, pp. L14–L17, Jan. 2010.
- [170] F. Annibali, C. Nipoti, L. Ciotti, M. Tosi, and et al., “DDO 68: A Flea with Smaller Fleas that on Him Prey,” ApJ, vol. 826, p. L27, Aug. 2016.
- [171] D. I. Makarov, L. N. Makarova, S. A. Pustilnik, and S. B. Borisov, “Unusual void galaxy DDO68: implications of the HST resolved photometry,” ArXiv e-prints, Dec. 2016.
- [172] R. Barkana and A. Loeb, “In the beginning: the first sources of light and the reionization of the universe,” Phys. Rep., vol. 349, pp. 125–238, July 2001.
- [173] D. Szécsi, N. Langer, S.-C. Yoon, D. Sanyal, and et al., “Low-metallicity massive single stars with rotation. Evolutionary models applicable to I Zwicky 18,” A&A, vol. 581, p. A15, Sept. 2015.
- [174] Y. Chen, A. Bressan, L. Girardi, P. Marigo, and et al., “PARSEC evolutionary tracks of massive stars up to $350 M_{sun}$ at metallicities $0.0001 \leq Z \leq 0.04$,” MNRAS, vol. 452, pp. 1068–1080, Sept. 2015.
- [175] R. M. Humphreys and K. Davidson, “The luminous blue variables: Astrophysical geysers,” PASP, vol. 106, pp. 1025–1051, Oct. 1994.
- [176] L. Drissen, J.-R. Roy, and C. Robert, “A New Luminous Blue Variable in the Giant Extragalactic H II Region NGC 2363,” ApJ, vol. 474, pp. L35–L38, Jan. 1997.
- [177] L. Drissen, P. A. Crowther, L. J. Smith, C. Robert, and et al., “Physical Parameters of Erupting Luminous Blue Variables: NGC 2363-V1 Caught in the Act,” ApJ, vol. 546, pp. 484–495, Jan. 2001.
- [178] P. A. Crowther, “Massive stars in transition,” in EAS Publications Series (M. Heydari-Malayeri, P. Stee, and J.-P. Zahn, eds.), vol. 13 of EAS Publications Series, pp. 119–140, 2004.
- [179] P. Massey, R. T. McNeill, K. A. G. Olsen, P. W. Hodge, and et al., “A Survey of Local Group Galaxies Currently Forming Stars. III. A Search for Luminous Blue Variables and Other H α Emission-Line Stars,” AJ, vol. 134, pp. 2474–2503, Dec. 2007.

- [180] N. R. Walborn, O. Stahl, R. C. Gamen, T. Szeifert, and et al., “A Three-Decade Outburst of the LMC Luminous Blue Variable R127 Draws to a Close,” ApJ, vol. 683, p. L33, Aug. 2008.
- [181] N. Smith, W. Li, J. M. Silverman, M. Ganeshalingam, and A. V. Filippenko, “Luminous blue variable eruptions and related transients: diversity of progenitors and outburst properties,” MNRAS, vol. 415, pp. 773–810, July 2011.
- [182] N. Smith, “Mass Loss: Its Effect on the Evolution and Fate of High-Mass Stars,” ARA&A, vol. 52, pp. 487–528, Aug. 2014.
- [183] M. Sirianni, M. J. Jee, N. Benítez, J. P. Blakeslee, and et al., “The Photometric Performance and Calibration of the Hubble Space Telescope Advanced Camera for Surveys,” PASP, vol. 117, pp. 1049–1112, Oct. 2005.
- [184] D. J. Bomans and K. Weis, “The nature of the massive stellar transient in DDO 68,” Bulletin de la Societe Royale des Sciences de Liege, vol. 80, pp. 341–345, Jan. 2011.
- [185] D. J. Bomans and K. Weis, “Massive variable stars at very low metallicity?,” in Active OB Stars: Structure, Evolution, Mass Loss, and Critical Limits (C. Neiner, G. Wade, G. Meynet, and G. Peters, eds.), vol. 272 of IAU Symposium, pp. 265–270, July 2011.
- [186] Y. I. Izotov, N. G. Guseva, K. J. Fricke, and C. Henkel, “VLT/X-shooter observations of the low-metallicity blue compact dwarf galaxy PHL 293B including a luminous blue variable star,” A&A, vol. 533, p. A25, Sept. 2011.
- [187] O. N. Sholukhova, S. N. Fabrika, A. V. Zharova, A. F. Valeev, and V. P. Goranskij, “Spectral variability of LBV star V 532 (Romano’s star),” Astrophysical Bulletin, vol. 66, pp. 123–143, Apr. 2011.
- [188] V. Petit, L. Drissen, and P. A. Crowther, “Spectral Evolution of the Luminous Blue Variable NGC 2363-V1. I. Observations and Qualitative Analysis of the Ongoing Giant Eruption,” AJ, vol. 132, pp. 1756–1762, Nov. 2006.
- [189] N. Smith, J. E. Andrews, J. C. Mauerhan, W. Zheng, and et al., “The Persistent Eruption of UGC 2773-OT: finally, a decade-long extragalactic Eta Carinae analogue,” MNRAS, vol. 455, pp. 3546–3560, Feb. 2016.

- [190] N. Smith and S. P. Owocki, “On the Role of Continuum-driven Eruptions in the Evolution of Very Massive Stars and Population III Stars,” ApJ, vol. 645, pp. L45–L48, July 2006.
- [191] J. Vinko, K. Sarnecky, and K. Vida, “ATel 7541: SNHunt275 in NGC 2770 Is Brightening,” The Astronomer’s Telegram, vol. 7541, May 2015.
- [192] N. Richardson and E. Artigau, “ATel 7543: NIR photometry of SNhunt 275,” The Astronomer’s Telegram, vol. 7543, May 2015.
- [193] S. Fabrika, O. Sholukhova, T. Becker, V. Afanasiev, and et al., “Crowded field 3D spectroscopy of LBV candidates in M 33,” A&A, vol. 437, pp. 217–226, July 2005.
- [194] P. J. Storey and C. J. Zeippen, “Theoretical values for the [Oiii] 5007/4959 line-intensity ratio and homologous cases,” MNRAS, vol. 312, pp. 813–816, Mar. 2000.

Приложение А

В таблицах А1-А9 приведены измеренные и исправленные интенсивности линий для 25 галактик войда Lунх-Сансер, полученные по результатам новых наблюдений на БТА. Интенсивности эмиссионных линий выражены в единицах интенсивности линии $H\beta$. $F(\lambda)/F(H\beta)$ - наблюдаемые относительные потоки. $I(\lambda)/I(H\beta)$ - интенсивности линий, исправленные за экстинкцию в нашей Галактике ($C(H\beta)$). Учтен вклад звездных абсорбционных линий в излучение ионизированного газа для линий бальмеровской серии ($EW(abs)$). В нижних частях таблицы также даны рассчитанные физические параметры, значения электронной температуры и содержания кислорода. В таблицах А10-А12 представлены аналогичные данные измерений по спектрам SDSS DR7 для 7 галактик из обновленной выборки войда. В таблицах А13-А15 тоже самое по спектрам SDSS DR12 для 8 галактик.

В нижней части таблиц металличности O/H представлены для различных методов. Если измерена линия $[OIII]\lambda 4363 \text{ \AA}$, и использовался прямой T_e метод, то этот результат показан в первой строке как $12+\log(O/H)(Dir)$. Для полуэмпирического метода [37] результат показан с меткой (IT07). Аналогично метки (PT05) и (Y07) показывают оценки O/H , полученные эмпирическими методами из работ [38] и [39], соответственно. Для значений O/H , полученных с помощью эмпирических методов, использующих интенсивности линий $[NII]$ и $[SII]$, предложенных Пилюгиным и соавторами [40, 117, 99], соответствующие результаты обозначаются (PVT10), (PM10) и (PGM12). Отметим, что в этих таблицах, полученные с помощью методов IT07, PT05 и Yin07 значения O/H даны для оригинальных формул (без калибровок, описанных в разделе 1.3.1). Для их усреднения и получения конечной оценки в шкале прямого метода в таблице 2.2 применены соответствующие рабочие формулы, описанные в разделе 1.3.1. Они дают коррекции на уровне 0.01–0.07 dex для оценок O/H из Таблиц А1-А15.

Для шумных спектров, где $I([OIII]4959)$ была измерена с большой погрешностью, чтобы повысить точность результатов, мы использовали более высокое значение линии ($[OIII]5007$), и принимали $I([OIII]4959)$, как $I([OIII]5007)/2.98$, как измеряется в спектрах высокого каче-

ства и ожидается из соответствующих теоретических расчетов [194].

Одномерные спектры для всех объектов, согласно таблицам А1-А15, показаны в той же последовательности: ВТА (Рис. А.1-А.3), SDSS DR7 (Рис. А.4) и SDSS DR12 (Рис. А.5). Для спектров с хорошо регистрируемой линией $[\text{OIII}]\lambda 4363$ показаны соответствующие врезки. Две галактики со спектрами типа SBN (IC2520, IC2450) приведены на графиках только для иллюстрации.

В таблице А16 представлены основные параметры галактик в войде Lynx-Cancer. В таблицах А17 и А18 приведены модельно-независимые параметры, полученные по фотометрии и анализу изображений SDSS. В таблице А19 даны модельные параметры, полученные методом приближения фотометрических профилей экспоненциальным диском, или в более общем случае законом Серсика. Для этих таблиц подробное описание колонок приведено в соответствующем разделе 3.2.

Таблица А1. Измеренные и скорректированные интенсивности линий, и полученные обилия кислорода (по данным ВТА).

$\lambda_0(\text{Å})$ Ion	HIPASSJ0626+24		PGC1689759		UGC3503	
	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)
3727 [O II]	1.674±0.382	2.299±0.610	2.074±0.182	2.860±0.274	2.040±0.167	2.889±0.259
4101 H δ	...	...	0.176±0.022	0.293±0.048	0.191±0.037	0.300±0.077
4340 H γ	...	...	0.342±0.031	0.453±0.050	0.346±0.044	0.451±0.074
4861 H β	1.000±0.173	1.000±0.221	1.000±0.049	1.000±0.055	1.000±0.067	1.000±0.077
4959 [O III]	0.865±0.152	0.747±0.149	0.901±0.046	0.824±0.045	1.181±0.075	1.091±0.073
5007 [O III]	2.489±0.326	2.116±0.314	2.784±0.109	2.511±0.105	3.457±0.178	3.151±0.172
6300 [O I]	...	...	...	...	0.140±0.037	0.092±0.026
6548 [N II]	0.063±0.057	0.035±0.036	0.111±0.021	0.069±0.014	0.094±0.031	0.058±0.020
6563 H α	4.827±0.606	2.792±0.439	4.444±0.169	2.798±0.124	4.485±0.226	2.809±0.164
6584 [N II]	0.219±0.101	0.122±0.064	0.349±0.045	0.216±0.031	0.285±0.055	0.176±0.036
6717 [S II]	0.765±0.135	0.414±0.087	0.542±0.036	0.327±0.024	0.611±0.049	0.367±0.032
6731 [S II]	0.517±0.118	0.278±0.074	0.350±0.033	0.211±0.021	0.438±0.042	0.263±0.028
C(H β) dex	0.61±0.16		0.54±0.05		0.56±0.06	
EW(abs) Å	1.75±1.44		2.15±0.63		1.35±0.84	
F(H β)	3.18±0.39		12.9±0.9		13.1±0.6	
EW(H β) Å	14.4±1.7		34.1±1.1		26.8±1.2	
Rad. vel. км с ⁻¹	1388±27		1451±24		1323±30	
$T_e(\text{OIII})(\text{K})$	16502±1589		15417±1080		14581±1085	
$T_e(\text{OII})(\text{K})$	14579±396		14106±494		13681±607	
O ⁺ /H ⁺ (×10 ⁵)	2.303±0.663		3.151±0.468		3.519±0.609	
O ⁺⁺ /H ⁺ (×10 ⁵)	1.872±0.480		2.568±0.453		3.760±0.739	
O/H(×10 ⁵)	4.175±0.819		5.719±0.651		7.279±0.958	
12+log(O/H)(IT07)	7.62±0.10		7.76±0.08		7.86±0.07	
12+log(O/H)(PT05)	7.78±0.10		7.94±0.10		8.06±0.10	
12+log(O/H)(Y07)	7.48±0.13		7.60±0.10		7.68±0.10	
12+log(O/H)(PVT10)	...		...		8.07±0.15	
12+log(O/H)(PM10)	7.77±0.16		...		8.04±0.07	
12+log(O/H)(PGM12)	7.81±0.08		...		8.07±0.07	

Таблица А2. Измеренные и скорректированные интенсивности линий, и полученные обилия кислорода (по данным ВТА).

$\lambda_0(\text{\AA})$ Ion	UGC3516		ККН38		UGC3587	
	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)
3727 [O II]	2.099±0.198	3.351±0.323	2.333±0.203	2.251±0.210	2.857±0.132	2.818±0.138
4101 H δ	...	...	...	...	0.233±0.019	0.254±0.026
4340 H γ	0.461±0.025	0.563±0.039	0.307±0.043	0.341±0.074	0.470±0.040	0.483±0.043
4363 [O III]	...	...	...	...	0.035±0.028	0.034±0.027
4861 H β	1.000±0.033	1.000±0.038	1.000±0.075	1.000±0.089	1.000±0.043	1.000±0.044
4959 [O III]	1.111±0.036	1.074±0.035	0.267±0.043	0.257±0.043	0.479±0.030	0.472±0.029
5007 [O III]	3.373±0.096	3.204±0.092	0.773±0.057	0.746±0.058	1.472±0.060	1.452±0.060
5876 He I	0.215±0.014	0.156±0.011	...	...	...	...
6548 [N II]	0.083±0.023	0.050±0.014	0.000±0.013	0.000±0.013	0.105±0.017	0.103±0.017
6563 H α	4.668±0.135	2.818±0.090	2.813±0.164	2.738±0.182	2.811±0.096	2.774±0.103
6584 [N II]	0.266±0.052	0.160±0.032	0.040±0.027	0.038±0.027	0.325±0.030	0.321±0.030
6717 [S II]	0.498±0.034	0.290±0.020	0.347±0.056	0.334±0.057	0.433±0.026	0.427±0.026
6731 [S II]	0.406±0.033	0.236±0.020	0.133±0.053	0.129±0.054	0.328±0.024	0.323±0.024
C(H β) dex	0.66±0.04		0.00±0.08		0.00±0.04	
EW(abs) \AA	0.00±0.53		1.00±1.15		1.25±0.83	
F(H β)	8.17±0.17		0.75±0.04		11.3±0.32	
EW(H β) \AA	31±0.7		27.4±1.4		90.5±3	
Rad. vel. км с ⁻¹	1243±24		423±60		1396±21	
$T_e(\text{OIII})(\text{K})$	14181±1060		19244±1149		16511±6678	
$T_e(\text{OII})(\text{K})$	13448±644		14962±11		14533±2161	
O ⁺ /H ⁺ (×10 ⁵)	4.424±0.838		2.057±0.192		2.847±1.349	
O ⁺⁺ /H ⁺ (×10 ⁵)	4.074±0.805		0.466±0.067		1.256±1.193	
O/H(×10 ⁵)	8.498±1.162		2.523±0.204		4.102±1.801	
12+log(O/H)(Dir)	...		...		7.61±0.19	
12+log(O/H)(IT07)	7.93 ±0.09		7.40±0.08		7.59±0.09	
12+log(O/H)(PT05)	8.16 ±0.10		7.35±0.10		7.69±0.10	
12+log(O/H)(Y07)	...		7.20±0.10		7.44±0.09	
12+log(O/H)(PVT10)	8.06 ±0.13		7.48±0.25		...	
12+log(O/H)(PM10)	8.02 ±0.09		...		...
12+log(O/H)(PGM12)	8.16 ±0.07		7.44±0.07		...	

Таблица А3. Измеренные и скорректированные интенсивности линий, и полученные обилия кислорода (по данным ВТА).

$\lambda_0(\text{Å})$ Ion	J0706+3020		UGC3755		J0723+3621	
	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)
3727 [O II]	0.952±0.211	0.959±0.250	1.705±0.068	1.786±0.080	2.690±0.333	1.973±0.342
3868 [Ne III]	...	...	0.195±0.023	0.201±0.025	0.453±0.127	0.332±0.127
3889 He I + H8	...	...	0.099±0.018	0.220±0.051	...	...
3967 [Ne III] + H7	...	...	0.195±0.030	0.306±0.054	...	...
4101 H δ	...	...	0.150±0.007	0.260±0.017	...	...
4340 H γ	...	...	0.386±0.015	0.470±0.021	0.200±0.048	0.437±0.170
4363 [O III]	...	...	0.057±0.010	0.055±0.011	...	...
4861 H β	1.000±0.135	1.000±0.738	1.000±0.027	1.000±0.029	1.000±0.093	1.000±0.131
4959 [O III]	0.286±0.055	0.245±0.054	1.250±0.033	1.146±0.033	0.556±0.066	0.408±0.066
5007 [O III]	0.810±0.123	0.691±0.121	3.831±0.099	3.496±0.098	1.778±0.141	1.304±0.142
5876 He I	...	...	0.119±0.009	0.101±0.009	...	...
6548 [N II]	...	...	0.033±0.008	0.026±0.007	0.004±0.031	0.003±0.031
6563 H α	3.619±0.358	2.719±0.413	3.428±0.084	2.814±0.081	3.521±0.255	2.752±0.295
6584 [N II]	...	...	0.098±0.033	0.079±0.029	0.024±0.057	0.018±0.057
6678 He I	...	...	0.031±0.006	0.025±0.005	...	...
6717 [S II]	...	...	0.248±0.012	0.199±0.011	0.343±0.062	0.251±0.063
6731 [S II]	...	...	0.160±0.012	0.128±0.011	0.323±0.061	0.237±0.062
C(H β) dex	0.21±0.13		0.17±0.03		0.00±0.09	
EW(abs) Å	4.75±4.75		5.60±0.35		4.65±0.26	
F(H β)	0.21±0.02		57.9±0.9		4.6±0.3	
EW(H β) Å	31.2±2.7		69.2±1.3		12.8±1	
Rad. vel. км c ⁻¹	867±21		236±24		1062±51	
$T_e(\text{OIII})(\text{K})$	22456±1666		13811±1189		18505±1336	
$T_e(\text{OII})(\text{K})$	16299±340		13214±776		14936±107	
O ⁺ /H ⁺ (×10 ⁵)	0.678±0.181		2.446±0.504		1.918±0.445	
O ⁺⁺ /H ⁺ (×10 ⁵)	0.319±0.064		4.744±1.099		0.864±0.157	
O/H(×10 ⁵)	0.998±0.192		7.189±1.209		2.782±0.472	
12+log(O/H)(Dir)	...		7.86±0.07		...	
12+log(O/H)(IT07)	7.00±0.13		7.75±0.08		7.44±0.09	
12+log(O/H)(PT05)	7.29±0.10		7.84±0.10		7.55±0.10	
12+log(O/H)(Y07)	6.87±0.14		7.62±0.09		7.28±0.11	
12+log(O/H)(PVT10)	...		7.83±0.11		...	
12+log(O/H)(PM10)	...		7.86±0.11		...	
12+log(O/H)(PGM12)	...		7.88±0.11		...	

Таблица А4. Измеренные и скорректированные интенсивности линий, и полученные обилия кислорода (по данным ВТА).

$\lambda_0(\text{Å})$ Ion	UGC3853		J0736+0959		J0737+4724	
	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)
3727 [O II]	2.922±0.169	2.834±0.190	2.615±0.642	2.511±0.702	2.148±0.705	1.529±0.774
4340 H γ	0.369±0.059	0.473±0.098	...	...	...	...
4861 H β	1.000±0.043	1.000±0.058	1.000±0.119	1.000±0.198	1.000±0.314	1.000±1.416
4959 [O III]	0.859±0.042	0.766±0.042	0.313±0.055	0.278±0.055	0.691±0.214	0.464±0.213
5007 [O III]	2.548±0.100	2.266±0.099	1.169±0.130	1.033±0.129	2.074±0.512	1.392±0.509
6548 [N II]	0.015±0.018	0.013±0.016	0.000±0.036	0.000±0.036	0.037±0.111	0.024±0.105
6563 H α	2.732±0.104	2.329±0.110	3.277±0.324	2.760±0.343	4.000±0.926	2.747±1.306
6584 [N II]	0.058±0.040	0.047±0.037	0.048±0.084	0.040±0.078	0.222±0.156	0.142±0.149
6717 [S II]	0.351±0.035	0.288±0.032	0.422±0.114	0.345±0.106	0.704±0.303	0.447±0.293
6731 [S II]	0.189±0.033	0.155±0.031	0.108±0.085	0.089±0.078	0.259±0.194	0.165±0.184
C(H β) dex	0.11±0.05		0.11±0.13		0.08±0.30	
EW(abs) Å	1.20±0.35		1.30±1.55		2.6±3.3	
F(H β)	3.8±0.2		0.83±0.07		5.4±1	
EW(H β) Å	10.5±0.3		10.7±0.9		0.27±0.06	
Rad. vel. км с ⁻¹	922±18		453±24		530±90	
$T_e(\text{OIII})(\text{K})$	15742±1055		18289±1702		18913±2640	
$T_e(\text{OII})(\text{K})$	14249±440		14916±182		14960±90	
O ⁺ /H ⁺ (×10 ⁵)	3.021±0.362		2.316±0.653		1.400±0.714	
O ⁺⁺ /H ⁺ (×10 ⁵)	2.218±0.370		0.679±0.156		0.930±0.396	
O/H(×10 ⁵)	5.239±0.518		2.995±0.671		2.330±0.820	
12+log(O/H)(IT07)	7.72±0.08		7.48±0.11		7.37±0.15	
12+log(O/H)(PT05)	7.89±0.10		7.49±0.10		7.52±0.10	
12+log(O/H)(Y07)	7.56±0.09		7.31±0.15		7.27±0.21	
12+log(O/H)(PGM12)	7.70±0.15		7.55±0.07		...	

Таблица А5. Измеренные и скорректированные интенсивности линий, и полученные обилия кислорода (по данным ВТА).

$\lambda_0(\text{Å})$ Ion	UGC3966		KK65		MGC9-13-52	
	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)
3727 [O II]	0.701±0.042	0.763±0.049	1.800±0.084	1.731±0.086	2.192±0.395	2.104±0.404
3868 [Ne III]	0.168±0.017	0.180±0.019	0.425±0.030	0.409±0.030	...	...
3889 He I + H8	0.105±0.016	0.178±0.032	0.155±0.018	0.199±0.029	...	...
3967 [Ne III] + H7	0.159±0.011	0.228±0.019	...	...	...	...
4101 H δ	0.168±0.010	0.236±0.018	0.185±0.016	0.226±0.025	0.374±0.135	0.429±0.172
4340 H γ	0.417±0.016	0.474±0.021	0.413±0.015	0.441±0.021	0.293±0.075	0.349±0.107
4363 [O III]	0.058±0.010	0.059±0.011	0.086±0.009	0.083±0.009	...	...
4686 He II	...	...	0.108±0.007	0.104±0.007	...	...
4861 H β	1.000±0.028	1.000±0.030	1.000±0.032	1.000±0.035	1.000±0.114	1.000±0.123
4959 [O III]	1.049±0.029	0.988±0.029	1.618±0.049	1.556±0.049	0.293±0.094	0.281±0.094
5007 [O III]	3.221±0.090	3.020±0.089	4.856±0.135	4.670±0.135	1.051±0.117	1.008±0.117
5876 He I	0.113±0.007	0.098±0.007	0.114±0.007	0.109±0.006	...	...
6548 [N II]	0.015±0.005	0.013±0.005	0.026±0.005	0.025±0.005	0.010±0.040	0.010±0.040
6563 H α	3.370±0.099	2.797±0.095	2.889±0.075	2.802±0.082	2.838±0.255	2.743±0.279
6584 [N II]	0.050±0.050	0.041±0.043	0.080±0.019	0.077±0.018	0.081±0.071	0.078±0.071
6678 He I	0.035±0.009	0.028±0.007	0.032±0.005	0.031±0.005	...	...
6717 [S II]	0.105±0.011	0.086±0.009	0.234±0.009	0.225±0.009	0.404±0.097	0.388±0.098
6731 [S II]	0.075±0.011	0.061±0.009	0.154±0.008	0.148±0.008	0.192±0.082	0.184±0.083
C(H β) dex	0.19±0.04		0.00±0.03		0.00±0.12	
EW(abs) Å	7.10±1.06		2.65±0.80		2.7±1.9	
F(H β)	22.9±0.4		33.9±0.7		1.0±0.1	
EW(H β) Å	18.2±1.3		66.6±1.5		63±5	
Rad. vel. км с ⁻¹	357±39		219±15		435±84	
$T_e(\text{OIII})(\text{K})$	15046±1594		14454±730		18996±1469	
$T_e(\text{OII})(\text{K})$	13928±801		13609±419		14961±130	
O ⁺ /H ⁺ (×10 ⁵)	0.875±0.175		2.145±0.245		1.923±0.369	
O ⁺⁺ /H ⁺ (×10 ⁵)	3.279±0.876		5.642±0.749		0.615±0.124	
O ⁺⁺⁺ /H ⁺ (×10 ⁵)	...		0.811±0.166		...	
O/H(×10 ⁵)	4.155±0.894		8.598±0.805		2.538±0.389	
12+log(O/H)(Dir)	7.62±0.09		7.93±0.07		...	
12+log(O/H)(IT07)	7.50±0.07		7.97±0.07		7.40 ±0.10	
12+log(O/H)(PT05)	7.48±0.10		7.98±0.10		7.45 ±0.10	
12+log(O/H)(Y07)	7.44±0.09		...		7.24 ±0.12	
12+log(O/H)(PVT10)	...		7.93±0.10		...	
12+log(O/H)(PM10)	...		7.96±0.08		...	
12+log(O/H)(PGM12)	...		7.90±0.07		...	

Таблица А6. Измеренные и скорректированные интенсивности линий, и полученные обилия кислорода (по данным ВТА).

$\lambda_0(\text{\AA})$ Ion	UGC4115		UGC4426		UGC4722	
	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)
3727 [O II]	1.235±0.063	1.299±0.067	1.143±0.096	1.314±0.116	2.246±0.544	1.612±0.559
3868 [Ne III]	0.238±0.070	0.248±0.073	...	...	...	...
3889 He I + H8	0.220±0.070	0.233±0.080	...	...	...	...
4101 H δ	0.291±0.024	0.303±0.033	...	...	...	...
4340 H γ	0.474±0.019	0.486±0.028	0.424±0.050	0.476±0.066	0.139±0.065	0.430±0.460
4363 [O III]	0.061±0.013	0.062±0.013	...	...	...	...
4861 H β	1.000±0.029	1.000±0.033	1.000±0.050	1.000±0.057	1.000±0.196	1.000±0.370
4959 [O III]	0.887±0.024	0.881±0.024	0.671±0.043	0.647±0.043	1.185±0.225	0.849±0.225
5007 [O III]	2.807±0.073	2.784±0.073	2.040±0.089	1.957±0.088	2.692±0.403	1.930±0.404
5876 He I	0.115±0.012	0.110±0.012	0.071±0.016	0.062±0.014	...	...
6548 [N II]	0.018±0.005	0.017±0.005	0.071±0.016	0.059±0.014	0.015±0.031	0.011±0.031
6563 H α	2.951±0.071	2.781±0.073	3.353±0.130	2.758±0.120	3.615±0.509	2.764±0.608
6584 [N II]	0.057±0.018	0.054±0.016	0.246±0.033	0.201±0.028	0.092±0.048	0.066±0.048
6678 He I	0.028±0.009	0.027±0.008	0.024±0.008	0.019±0.006	...	...
6717 [S II]	0.215±0.009	0.201±0.010	0.250±0.025	0.203±0.022	0.462±0.089	0.331±0.094
6731 [S II]	0.134±0.008	0.126±0.008	0.214±0.025	0.173±0.021	0.323±0.076	0.232±0.079
C(H β) dex	0.08±0.03		0.23±0.05		0.00±0.18	
EW(abs) \AA	0.55±3.69		0.60±0.59		3.60±2.56	
F(H β)	11.31±0.20		2.52±0.09		0.65±0.09	
EW(H β) \AA	218±4		25.1±0.9		9.1±1.3	
Rad. vel. км с ⁻¹	436±30		473±45		1924±96	
$T_e(\text{OIII})(\text{K})$	16138±1740		18142±1068		17465±1893	
$T_e(\text{OII})(\text{K})$	14404±642		14899±133		14787±392	
O ⁺ /H ⁺ (×10 ⁵)	1.338±0.203		1.257±0.126		1.526±0.545	
O ⁺⁺ /H ⁺ (×10 ⁵)	2.526±0.652		1.372±0.185		1.595±0.471	
O/H(×10 ⁵)	3.863±0.683		2.630±0.223		3.121±0.720	
12+log(O/H)(Dir)	7.59±0.09		...		...
12+log(O/H)(IT07)	7.56±0.08		7.42±0.07		7.49±0.10	
12+log(O/H)(PT05)	7.63±0.10		7.54±0.10		7.63±0.10	
12+log(O/H)(Y07)	7.47±0.09		7.32±0.09		7.36±0.15	
12+log(O/H)(PVT10)	7.68±0.10		...		...
12+log(O/H)(PM10)	7.65±0.11		...		7.59±0.22	
12+log(O/H)(PGM12)	7.63±0.08		...		7.59±0.11	

Таблица А7. Измеренные и скорректированные интенсивности линий, и полученные обилия кислорода (по данным ВТА).

$\lambda_0(\text{Å})$ Ion	UGC4722C		J0929+2503		KUG0934+277	
	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)
3727 [O II]	2.456±0.221	2.500±0.257	1.418±0.586	1.322±0.601	8.333±1.331	2.983±1.456
3967 [Ne III] + H7	0.070±0.017	0.244±0.084	...	...	...	...
4340 H γ	0.342±0.030	0.477±0.050	0.134±0.067	0.244±0.313	...	...
4861 H β	1.000±0.062	1.000±0.070	1.000±0.317	1.000±0.375	1.000±0.188	1.000±1.169
4959 [O III]	0.254±0.045	0.227±0.045	0.239±0.201	0.223±0.201	0.866±0.176	0.299±0.176
5007 [O III]	0.824±0.071	0.731±0.071	0.716±0.240	0.668±0.240	4.333±0.611	1.497±0.610
6548 [N II]	0.052±0.026	0.041±0.023	0.015±0.075	0.014±0.074	0.006±0.066	0.007±0.066
6563 H α	3.447±0.163	2.750±0.158	2.866±0.680	2.714±0.755	7.267±0.989	2.799±1.459
6584 [N II]	0.201±0.036	0.159±0.032	0.075±0.106	0.070±0.106	0.067±0.133	0.022±0.129
6717 [S II]	0.508±0.049	0.396±0.044	0.522±0.190	0.487±0.197	1.200±0.256	0.401±0.257
6731 [S II]	0.359±0.046	0.280±0.041	0.164±0.125	0.153±0.126	0.667±0.219	0.223±0.215
C(H β) dex	0.17±0.06		0.00±0.31		0.05±0.18	
EW(abs) Å	3.80±0.31		2.90±6.32		4.05±3.22	
F(H β)	1.14±0.05		0.66±0.15		0.15±0.07	
EW(H β) Å	33.88±1.55		39.9±9		2.15±0.31	
Rad. vel. км с ⁻¹	1948±51		1733±81		1608±41	
$T_e(\text{OIII})(\text{K})$	18884±1187		21538±2977		16959±2962	
$T_e(\text{OII})(\text{K})$	14958± 41		16096±707		14666±797	
O ⁺ /H ⁺ (×10 ⁵)	2.286±0.235		0.969±0.458		2.901±1.501	
O ⁺⁺ /H ⁺ (×10 ⁵)	0.463±0.074		0.329±0.146		1.103±0.590	
O/H(×10 ⁵)	2.749±0.246		1.298±0.481		4.004±1.613	
12+log(O/H)(IT07)	7.44±0.08		7.11±0.16		7.60±0.17	
12+log(O/H)(PT05)	7.34±0.10		7.28±0.10		7.68±0.10	
12+log(O/H)(Y07)	7.24±0.10		...		...
12+log(O/H)(PM10)	7.41±0.09		...		...
12+log(O/H)(PGM12)	...		...		7.42±0.14	

Таблица А8. Измеренные и скорректированные интенсивности линий, и полученные обилия кислорода (по данным ВТА).

$\lambda_0(\text{Å})$ Ion	UGC5186		UZCJ0947+390		J0956+2716	
	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)
3727 [O II]	4.084±1.035	2.043±1.160	0.966±0.225	1.149±0.270	1.000±0.479	1.312±0.657
3868 [Ne III]	...	...	0.509±0.222	0.590±0.258	...	...
4340 H γ	...	...	0.458±0.072	0.493±0.108	...	...
4861 H β	1.000±0.155	1.000±0.404	1.000±0.072	1.000±0.095	1.000±0.303	1.000±0.480
4959 [O III]	1.830±0.234	0.612±0.189	1.203±0.080	1.188±0.079	0.297±0.087	0.286±0.086
5007 [O III]	5.491±0.626	2.470±0.621	4.356±0.244	4.273±0.240	0.905±0.272	0.860±0.265
6548 [N II]	0.016±0.017	0.007±0.015	0.017±0.017	0.014±0.014	0.000±0.036	0.000±0.036
6563 H α	6.118±0.699	2.786±0.765	3.373±0.184	2.797±0.168	3.798±0.845	2.733±0.700
6584 [N II]	0.050±0.017	0.020±0.016	0.119±0.034	0.098±0.029	0.036±0.107	0.026±0.079
6717 [S II]	0.550±0.097	0.224±0.091	0.271±0.053	0.223±0.044	...	...
6731 [S II]	0.228±0.072	0.093±0.065	0.085±0.034	0.069±0.028	...	...
C(H β) dex	0.14±0.15		0.25±0.07		0.41±0.29	
EW(abs) Å	2.40±0.27		0.05±1.08		0.25±4.74	
F(H β)	1.17±0.13		0.58±0.03		0.84±0.18	
EW(H β) Å	1.99±0.22		17.3±0.8		13.1±2.9	
Rad. vel. км с ⁻¹	613±39		1690±72		1026±87	
$T_e(\text{OIII})(\text{K})$	16567±2508		15032±1132		20913±2634	
$T_e(\text{OII})(\text{K})$	14551±795		13921±571		15635± 47	
O ⁺ /H ⁺ (×10 ⁵)	1.901±1.163		1.321±0.358		1.049±0.525	
O ⁺⁺ /H ⁺ (×10 ⁵)	2.072±0.851		4.478±0.873		0.448±0.157	
O/H(×10 ⁵)	3.973±1.442		5.800± 943		1.497±0.548	
12+log(O/H)(IT07)	7.61±0.16		7.76 ±0.10		7.17±0.16	
12+log(O/H)(PT05)	7.75±0.10		7.73 ±0.10		7.36±0.10	
12+log(O/H)(Y07)	...		7.66 ±0.10		...	
12+log(O/H)(PGM12)	7.48±0.13		...		...

Таблица А9. Измеренные и скорректированные интенсивности линий, и полученные обилия кислорода (по данным ВТА).

$\lambda_0(\text{\AA})$ Ion	J0957+2745	
	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)
3727 [O II]	1.500±0.120	1.185±0.125
4340 H γ	0.262±0.049	0.476±0.142
4861 H β	1.000±0.050	1.000±0.082
4959 [O III]	1.393±0.061	1.075±0.061
5007 [O III]	4.333±0.176	3.343±0.176
6548 [N II]	0.012±0.024	0.009±0.023
6563 H α	3.512±0.139	2.782±0.157
6584 [N II]	0.036±0.024	0.027±0.023
6717 [S II]	0.131±0.036	0.099±0.035
6731 [S II]	0.155±0.024	0.117±0.024
C(H β) dex	0.03±0.05	
EW(abs) \AA	5.80±0.96	
F(H β)	0.84±0.07	
EW(H β) \AA	19.77±0.66	
Rad. vel. км с ⁻¹	1119±43	
$T_e(\text{OIII})(\text{K})$	16016±1071	
$T_e(\text{OII})(\text{K})$	14358± 411	
O ⁺ /H ⁺ (×10 ⁵)	1.412±0.994	
O ⁺⁺ /H ⁺ (×10 ⁵)	3.100±0.514	
O/H(×10 ⁵)	4.512±1.119	
12+log(O/H)(IT07)	7.65±0.12	
12+log(O/H)(PT05)	7.65±0.10	
12+log(O/H)(Y07)	7.54±0.09	
12+log(O/H)(PGM12)	7.61±0.15	

Таблица А10. Измеренные и скорректированные интенсивности линий, и полученные обилия кислорода (по данным SDSS DR7).

$\lambda_0(\text{\AA})$ Ion	J0908+0657		CGCG035-007		IC559	
	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)
(3727 [O II])	2.679±1.795	2.095±1.968	2.946±1.631	2.613±1.786	2.820±1.390	3.357±1.689
4101 H δ	...	...	0.105±0.017	0.297±0.075	0.172±0.023	0.216±0.036
4340 H γ	...	...	0.308±0.023	0.464±0.048	0.453±0.088	0.502±0.101
4861 H β	1.000±0.076	1.000±0.097	1.000±0.038	1.000±0.050	1.000±0.116	1.000±0.118
4959 [O III]	0.971±0.071	0.691±0.071	0.558±0.029	0.450±0.029	0.433±0.041	0.421±0.041
5007 [O III]	2.859±0.164	2.027±0.163	1.720±0.057	1.383±0.056	1.385±0.117	1.338±0.115
6300 [O I]	...	...	...	...	0.107±0.031	0.088±0.026
6312 [S III]	...	...	...	...	0.031±0.034	0.026±0.029
6548 [N II]	0.034±0.270	0.022±0.246	0.098±0.121	0.073±0.111	0.070±0.012	0.057±0.010
6563 H α	3.995±0.277	2.778±0.295	3.562±0.127	2.767±0.133	3.436±0.384	2.778±0.254
6584 [N II]	0.306±0.156	0.199±0.142	0.373±0.061	0.275±0.056	0.214±0.023	0.172±0.020
6678 He I	...	...	...	...	0.056±0.014	0.044±0.011
6717 [S II]	0.312±0.029	0.202±0.027	0.669±0.024	0.490±0.024	0.471±0.041	0.374±0.036
6731 [S II]	0.314±0.032	0.202±0.030	0.507±0.021	0.371±0.020	0.346±0.032	0.275±0.028
7320 [O II]	0.142±0.016	0.089±0.015	0.071±0.046	0.051±0.040	0.072±0.038	0.055±0.029
7330 [O II]	0.044±0.006	0.028±0.005	0.046±0.046	0.033±0.040	0.032±0.035	0.024±0.027
C(H β) dex	0.13±0.09		0.13±0.05		0.27±0.10	
EW(abs) \AA	3.20±0.42		1.30±0.09		0.30±0.25	
F(H β)	5.62±0.3		10.02±0.25		10.67±0.26	
EW(H β) \AA	8.1±0.4		5.6±0.2		18.5±0.5	
Rad. vel. км с ⁻¹	1632±3		615±3		621±6	
T_e (OIII)(K)	16919±2897		17389±2683		16555±2365	
T_e (OII)(K)	14655±793		14771±583		14548±752	
O ⁺ /H ⁺ ($\times 10^5$)	2.797±0.968		2.492±1.234		2.850±1.103	
O ⁺⁺ /H ⁺ ($\times 10^5$)	1.676±0.671		1.062±0.374		1.141±0.390	
O/H($\times 10^5$)	4.473±1.178		3.554±1.290		3.992±1.170	
12+log(O/H)(IT07)	7.65±0.12		7.55±0.16		7.60±0.13	
12+log(O/H)(PT05)	7.72±0.10		7.65±0.10		7.71±0.10	
12+log(O/H)(PM10)	...		...		7.68±0.08	
12+log(O/H)(PGM12)	...		...		7.82±0.08	

Таблица А11. Измеренные и скорректированные интенсивности линий, и полученные обилия кислорода (по данным SDSS DR7).

$\lambda_0(\text{\AA})$ Ion	MRK407		UGC5288		PC0956+4751	
	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)
(3727 [O II])	1.991±0.298	1.928±0.333	1.596±0.511	1.584±0.526	1.291±1.165	1.724±1.681
3835 H9	...	...	0.057±0.006	0.113±0.015	...	...
3868 [Ne III]	0.305±0.013	0.291±0.014	0.306±0.009	0.304±0.010	...	...
3889 He I + H8	0.079±0.008	0.238±0.036	0.174±0.009	0.227±0.014	...	...
4101 H δ	0.142±0.009	0.294±0.026	0.248±0.009	0.293±0.012	...	...
4340 H γ	0.334±0.011	0.454±0.021	0.428±0.026	0.463±0.030	0.353±0.060	0.466±0.108
4471 He I	...	...	0.031±0.005	0.030±0.005	...	...
4861 H β	1.000±0.020	1.000±0.024	1.000±0.018	1.000±0.019	1.000±0.088	1.000±0.110
4959 [O III]	1.170±0.022	1.011±0.022	1.228±0.021	1.182±0.021	1.359±0.110	1.236±0.108
5007 [O III]	3.500±0.062	3.013±0.061	3.606±0.061	3.468±0.061	3.969±0.257	3.563±0.250
6300 [O I]	0.111±0.024	0.087±0.022	0.058±0.016	0.055±0.016	...	...
6312 [S III]	0.025±0.021	0.020±0.019	0.010±0.015	0.010±0.015	...	...
6364 [O I]	0.039±0.008	0.031±0.007	...	...	...	...
6548 [N II]	0.090±0.005	0.070±0.005	0.062±0.003	0.058±0.003	0.295±0.046	0.188±0.032
6563 H α	3.480±0.060	2.789±0.061	2.961±0.048	2.789±0.051	4.366±0.281	2.803±0.213
6584 [N II]	0.289±0.007	0.224±0.007	0.167±0.005	0.157±0.005	0.329±0.047	0.208±0.033
6678 He I	0.038±0.004	0.029±0.004	0.022±0.003	0.021±0.003	...	...
6717 [S II]	0.427±0.010	0.329±0.009	0.343±0.006	0.320±0.007	0.505±0.043	0.312±0.030
6731 [S II]	0.310±0.007	0.238±0.007	0.239±0.005	0.223±0.005	0.443±0.045	0.272±0.031
7136 [Ar III]	0.067±0.006	0.051±0.005	0.087±0.003	0.080±0.003	...	...
7320 [O II]	0.035±0.006	0.026±0.005	0.032±0.011	0.029±0.010	0.067±0.081	0.037±0.049
7330 [O II]	0.035±0.009	0.026±0.008	0.023±0.011	0.022±0.010	0.063±0.081	0.035±0.049
C(H β) dex	0.15±0.02		0.04±0.02		0.51±0.08	
EW(abs) \AA	1.40±0.07		0.95±0.10		0.50±0.36	
F(H β)	106.8±1.1		64.2 ±0.5		3.93±0.24	
EW(H β) \AA	9.5±0.1		26.0±0.3		7.1±0.4	
Rad. vel. км с ⁻¹	1653±3		642±3		1173±12	
$T_e(\text{OIII})(\text{K})$	15663±1084		15380±1156		15111±2109	
$T_e(\text{OII})(\text{K})$	14215±463		14089±534		13961±1043	
O ⁺ /H ⁺ (×10 ⁵)	1.976±0.302		1.825±0.447		2.242±1.613	
O ⁺⁺ /H ⁺ (×10 ⁵)	2.983±0.506		3.601±0.671		3.884±1.376	
O/H(×10 ⁵)	4.959±0.589		5.426±0.806		6.126±2.120	
12+log(O/H)(IT07)	7.70±0.08		7.73±0.08		7.79±0.15	
12+log(O/H)(PT05)	7.82±0.10		7.79±0.10		7.84±0.10	
12+log(O/H)(Y07)	7.57±0.10		7.60±0.11		...	

Таблица А12. Измеренные и скорректированные интенсивности линий, и полученные обилия кислорода (по данным SDSS DR7).

$\lambda_0(\text{\AA})$ Ion	J1015+3744	
	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)
(3727 [O II])	2.185±0.334	2.090±0.357
3868 [Ne III]	0.161±0.007	0.153±0.007
3889 He I + H8	0.116±0.006	0.244±0.018
3967 [Ne III] + H7	0.087±0.008	0.207±0.027
4101 H δ	0.191±0.009	0.300±0.020
4340 H γ	0.369±0.010	0.457±0.017
4363 [O III]	0.067±0.010	0.063±0.011
4861 H β	1.000±0.019	1.000±0.023
4959 [O III]	0.716±0.014	0.650±0.014
5007 [O III]	2.153±0.037	1.949±0.037
6300 [O I]	0.051±0.004	0.044±0.003
6312 [S III]	0.024±0.003	0.021±0.003
6364 [O I]	0.022±0.005	0.019±0.004
6548 [N II]	0.040±0.004	0.035±0.003
6563 H α	3.104±0.054	2.742±0.058
6584 [N II]	0.117±0.004	0.101±0.004
6678 He I	0.028±0.003	0.024±0.003
6717 [S II]	0.258±0.006	0.222±0.006
6731 [S II]	0.187±0.005	0.160±0.005
7065 He I	0.024±0.004	0.020±0.003
7136 [Ar III]	0.052±0.004	0.045±0.003
7320 [O II]	0.041±0.007	0.035±0.007
7330 [O II]	0.052±0.011	0.044±0.010
<hr/>		
C(H β) dex	0.07±0.02	
EW(abs) \AA	3.25±0.23	
F(H β)	29.2±1.0	
EW(H β) \AA	32.9±0.5	
Rad. vel. км с ⁻¹	1338±5	
<hr/>		
$T_e(\text{OIII})(\text{K})$	19431±1928	
$T_e(\text{OII})(\text{K})$	14958± 63	
O ⁺ /H ⁺ (×10 ⁵)	2.074±0.239	
O ⁺⁺ /H ⁺ (×10 ⁵)	1.182±0.246	
O/H(×10 ⁵)	3.257±0.343	
12+log(O/H)(Dir)	7.51±0.07	
12+log(O/H)(IT07)	7.57±0.08	
12+log(O/H)(PT05)	7.70±0.10	
12+log(O/H)(Y07)	7.43±0.11	
12+log(O/H)(PVT10)	7.77±0.15	
12+log(O/H)(PM10)	7.67±0.08	
12+log(O/H)(PGM12)	7.69±0.08	

Таблица А13. Измеренные и скорректированные интенсивности линий, и полученные обилия кислорода (по данным SDSS DR12).

$\lambda_0(\text{Å})$ Ion	UGC4115		NGC2537		IC2233	
	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)
3727 [O II]	6.364±1.349	4.731±1.474	4.903±0.421	3.568±0.460	2.128±0.048	2.379±0.058
3868 [Ne III]	...	...	...	...	0.387±0.029	0.424±0.033
3889 He I + H8	...	...	...	...	0.133±0.014	0.180±0.026
3967 [Ne III] + H7	...	...	...	...	0.190±0.024	0.237±0.035
4101 H δ	...	...	...	...	0.202±0.015	0.247±0.025
4340 H γ	...	...	0.133±0.049	0.471±0.319	0.437±0.017	0.479±0.023
4363 [O III]	...	...	...	...	0.055±0.008	0.057±0.008
4471 He I	...	...	...	...	0.044±0.008	0.045±0.008
4861 H β	1.000±0.076	1.000±0.097	1.000±0.098	1.000±0.147	1.000±0.021	1.000±0.025
4959 [O III]	0.519±0.218	0.372±0.217	0.578±0.077	0.406±0.077	1.551±0.029	1.500±0.029
5007 [O III]	1.099±0.230	0.786±0.230	1.750±0.146	1.229±0.145	4.774±0.088	4.596±0.087
6300 [O I]	...	...	...	...	0.031±0.007	0.027±0.006
6312 [S III]	...	...	...	...	0.016±0.004	0.013±0.004
6548 [N II]	0.152±0.095	0.105±0.092	0.169±0.034	0.115±0.033	0.038±0.007	0.032±0.006
6563 H α	3.776±0.654	2.801±0.742	3.773±0.274	2.777±0.312	3.338±0.061	2.834±0.059
6584 [N II]	0.265±0.126	0.183±0.123	0.214±0.023	0.172±0.020	0.120±0.007	0.101±0.006
6678 He I	...	...	0.646±0.069	0.440±0.070	0.033±0.007	0.028±0.006
6717 [S II]	0.664±0.161	0.458±0.163	0.727±0.070	0.494±0.071	0.216±0.009	0.181±0.008
6731 [S II]	0.296±0.124	0.204±0.121	0.520±0.059	0.353±0.059	0.155±0.007	0.129±0.006
C(H β) dex	0.05±0.23		0.05±0.09		0.19±0.02	
EW(abs) Å	2.55±0.99		1.50±0.13		1.05±0.53	
F(H β)	10.4±1.7		58.0±4.0		343.4±3.8	
EW(H β) Å	6.5±1.1		4.6±0.3		44.8±0.7	
Rad. vel. км с ⁻¹	408±3		567±3		600±3	
T_e (OIII)(K)	15720±2182		16456±1268		12532± 714	
T_e (OII)(K)	14239±917		14515±419		12280± 578	
O ⁺ /H ⁺ (×10 ⁵)	5.055±1.892		3.584±0.574		4.227±0.732	
O ⁺⁺ /H ⁺ (×10 ⁵)	0.849±0.369		1.076±0.223		8.165±1.350	
O/H(×10 ⁵)	5.904±1.928		4.660±0.616		12.390±1.535	
12+log(O/H)(Dir)	...		...		8.09±0.05	
12+log(O/H)(IT07)	7.77±0.15		7.67±0.09		7.99±0.08	
12+log(O/H)(PT05)	7.63±0.10		7.69±0.10		8.14±0.10	
12+log(O/H)(Y07)	...		7.49±0.11		...	
12+log(O/H)(PVT10)	...		...		7.96±0.08	
12+log(O/H)(PM10)	...		...		8.03±0.07	
12+log(O/H)(PGM12)	...		7.82±0.07		8.06±0.07	

Таблица А14. Измеренные и скорректированные интенсивности линий, и полученные обилия кислорода (по данным SDSS DR12).

$\lambda_0(\text{\AA})$ Ion	NGC2541		NGC2552		UGC4704	
	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)
3727 [O II]	4.601±0.387	5.453±0.501	4.701±0.292	5.990±0.397	1.255±0.040	1.640±0.055
3868 [Ne III]	...	...	...	...	0.213±0.025	0.267±0.033
3889 He I + H8	...	...	...	...	0.096±0.020	0.170±0.040
3967 [Ne III] + H7	...	...	...	...	0.148±0.009	0.228±0.020
4101 H δ	...	...	...	...	0.182±0.010	0.260±0.019
4340 H γ	0.416±0.053	0.466±0.078	0.466±0.050	0.519±0.075	0.390±0.011	0.468±0.017
4363 [O III]	...	...	...	...	0.051±0.006	0.056±0.006
4471 He I	...	...	...	...	0.022±0.006	0.024±0.006
4861 H β	1.000±0.101	1.000±0.112	1.000±0.071	1.000±0.081	1.000±0.019	1.000±0.021
4959 [O III]	0.367±0.069	0.354±0.068	0.641±0.059	0.628±0.058	1.478±0.027	1.402±0.026
5007 [O III]	1.247±0.109	1.195±0.108	1.895±0.111	1.841±0.108	4.680±0.082	4.393±0.080
6300 [O I]	...	...	...	...	0.025±0.003	0.018±0.002
6312 [S III]	...	...	...	...	0.034±0.006	0.025±0.005
6548 [N II]	0.164±0.044	0.131±0.036	...	...	0.038±0.005	0.026±0.003
6563 H α	3.502±0.261	2.803±0.234	3.679±0.192	2.821±0.162	4.011±0.069	2.836±0.055
6584 [N II]	0.577±0.068	0.458±0.057	0.327±0.037	0.250±0.029	0.106±0.005	0.074±0.003
6678 He I	...	...	...	...	0.038±0.004	0.026±0.002
6717 [S II]	0.974±0.088	0.764±0.076	0.625±0.049	0.470±0.039	0.188±0.005	0.129±0.003
6731 [S II]	0.739±0.073	0.579±0.062	0.430±0.045	0.322±0.035	0.148±0.005	0.101±0.003
C(H β) dex	0.27±0.10		0.34±0.07		0.42±0.02	
EW(abs) \AA	0.35±0.66		0.05±0.89		3.25±0.81	
F(H β)	29.5±2.1		36.0±1.8		427.6±4.1	
EW(H β) \AA	16.1±1.2		23.1±1.1		104.2±1.4	
Rad. vel. км с ⁻¹	687±4		600±5		693±3	
$T_e(\text{OIII})(\text{K})$	14689±1154		13566±1076		12719± 595	
$T_e(\text{OII})(\text{K})$	13741± 630		13051±735		12429± 467	
O ⁺ /H ⁺ (×10 ⁵)	6.611±1.183		8.561±1.761		2.832±0.396	
O ⁺⁺ /H ⁺ (×10 ⁵)	1.348±0.293		2.648±0.585		7.437±0.998	
O/H(×10 ⁵)	7.959±1.218		11.210±1.856		10.270±1.075	
12+log(O/H)(Dir)	...		...		8.01±0.04	
12+log(O/H)(IT07)	7.90±0.09		8.05±0.11		7.87±0.08	
12+log(O/H)(PT05)	7.89±0.10		8.27±0.10		7.91±0.10	
12+log(O/H)(PVT10)	8.16±0.16		8.16±0.12		7.84±0.08	
12+log(O/H)(PM10)	7.91±0.08		7.92±0.08		7.92±0.07	
12+log(O/H)(PGM12)	8.18±0.08		8.06±0.13		7.89±0.07	

Таблица А15. Измеренные и скорректированные интенсивности линий, и полученные обилия кислорода (по данным SDSS DR12).

$\lambda_0(\text{\AA})$ Ion	UGC5288		UGC5354	
	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)	F(λ)/F(H β)	I(λ)/I(H β)
3727 [O II]	3.208±0.191	3.356±0.270	4.747±0.217	4.997±0.254
3868 [Ne III]	0.262±0.100	0.263±0.130	0.224±0.132	0.233±0.144
3889 He I + H8	...	...	0.176±0.053	0.278±0.101
3967 [Ne III] + H7	...	...	0.105±0.060	0.197±0.133
4101 H δ	...	...	0.193±0.030	0.278±0.057
4340 H γ	0.243±0.035	0.472±0.108	0.402±0.032	0.468±0.047
4861 H β	1.000±0.061	1.000±0.087	1.000±0.051	1.000±0.057
4959 [O III]	0.785±0.056	0.596±0.055	0.296±0.033	0.280±0.033
5007 [O III]	2.247±0.112	1.691±0.110	0.976±0.048	0.920±0.048
6300 [O I]	...	...	0.122±0.017	0.105±0.015
6548 [N II]	0.186±0.050	0.110±0.038	0.077±0.012	0.066±0.011
6563 H α	4.416±0.202	2.785±0.181	3.229±0.122	2.792±0.121
6584 [N II]	0.548±0.050	0.324±0.039	0.271±0.018	0.232±0.017
6717 [S II]	0.927±0.060	0.540±0.048	0.543±0.025	0.462±0.024
6731 [S II]	0.646±0.055	0.376±0.043	0.364±0.020	0.309±0.019
C(H β) dex	0.35±0.06		0.14±0.05	
EW(abs) \AA	3.00±0.32		2.30±0.85	
F(H β)	79.0±3.3		82.1±2.8	
EW(H β) \AA	10.2±0.4		46.9±1.7	
Rad. vel. км с ⁻¹	639±4		1329±4	
$T_e(\text{OIII})(\text{K})$	16172±1101		15415±1051	
$T_e(\text{OII})(\text{K})$	14417± 402		14105±480	
O ⁺ /H ⁺ (×10 ⁵)	3.253±0.320		5.504±0.670	
O ⁺⁺ /H ⁺ (×10 ⁵)	1.569±0.268		0.925±0.162	
O/H(×10 ⁵)	4.822±0.475		6.429±0.689	
12+log(O/H)(IT07)	7.68±0.08		7.81±0.09	
12+log(O/H)(PT05)	7.82±0.10		7.68±0.10	
12+log(O/H)(Y07)	7.54±0.10		7.60±0.09	
12+log(O/H)(PVT10)	...		7.90±0.09	
12+log(O/H)(PM10)	...		7.61±0.08	
12+log(O/H)(PGM12)	...		7.79±0.07	

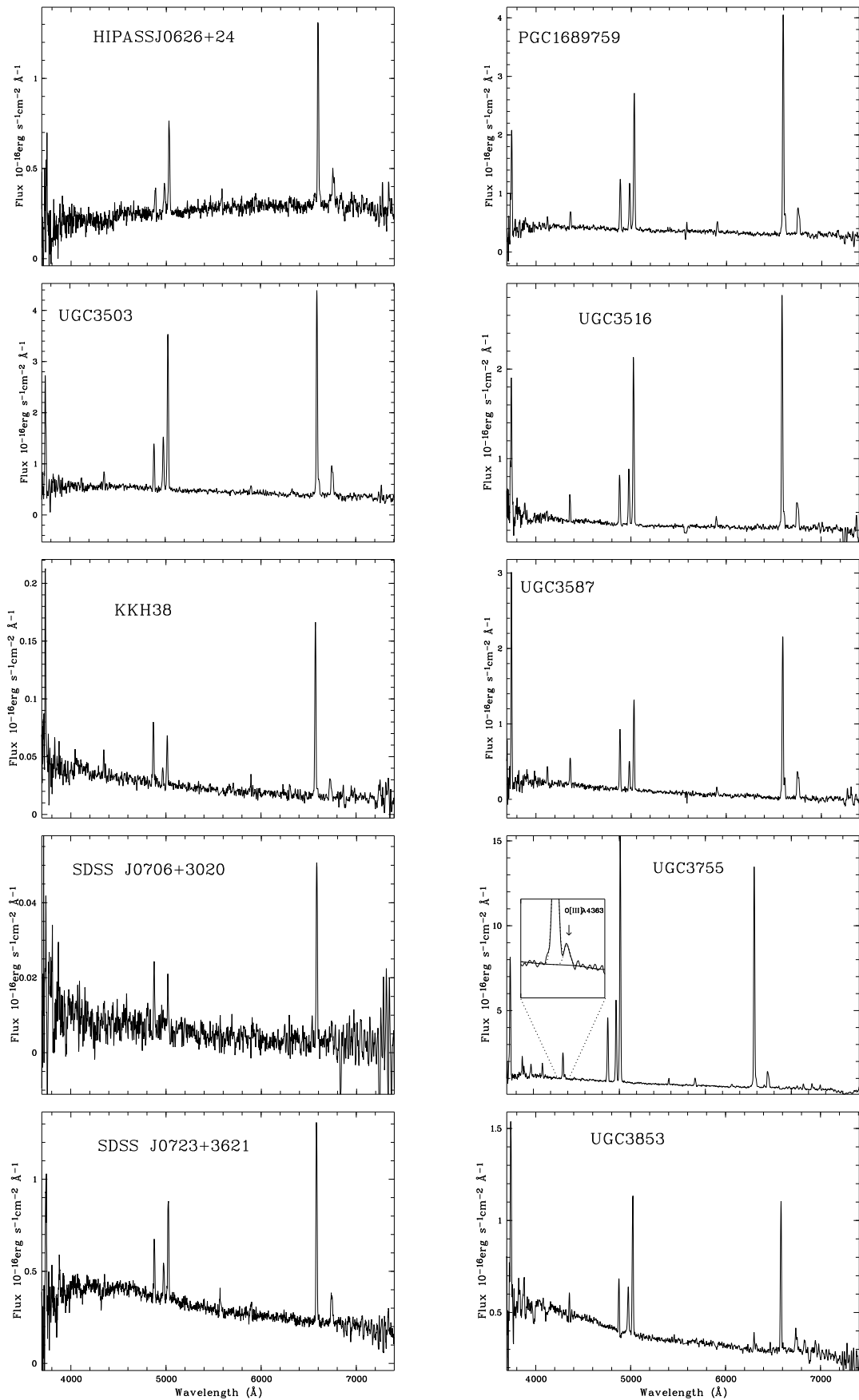


Рис. А.1: Мозаика из 10 спектров БТА из данной работы. По оси X: длина волны в \AA . По оси Y: поток на соответствующую длину волны в единицах $10^{-16} \text{erg cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$.

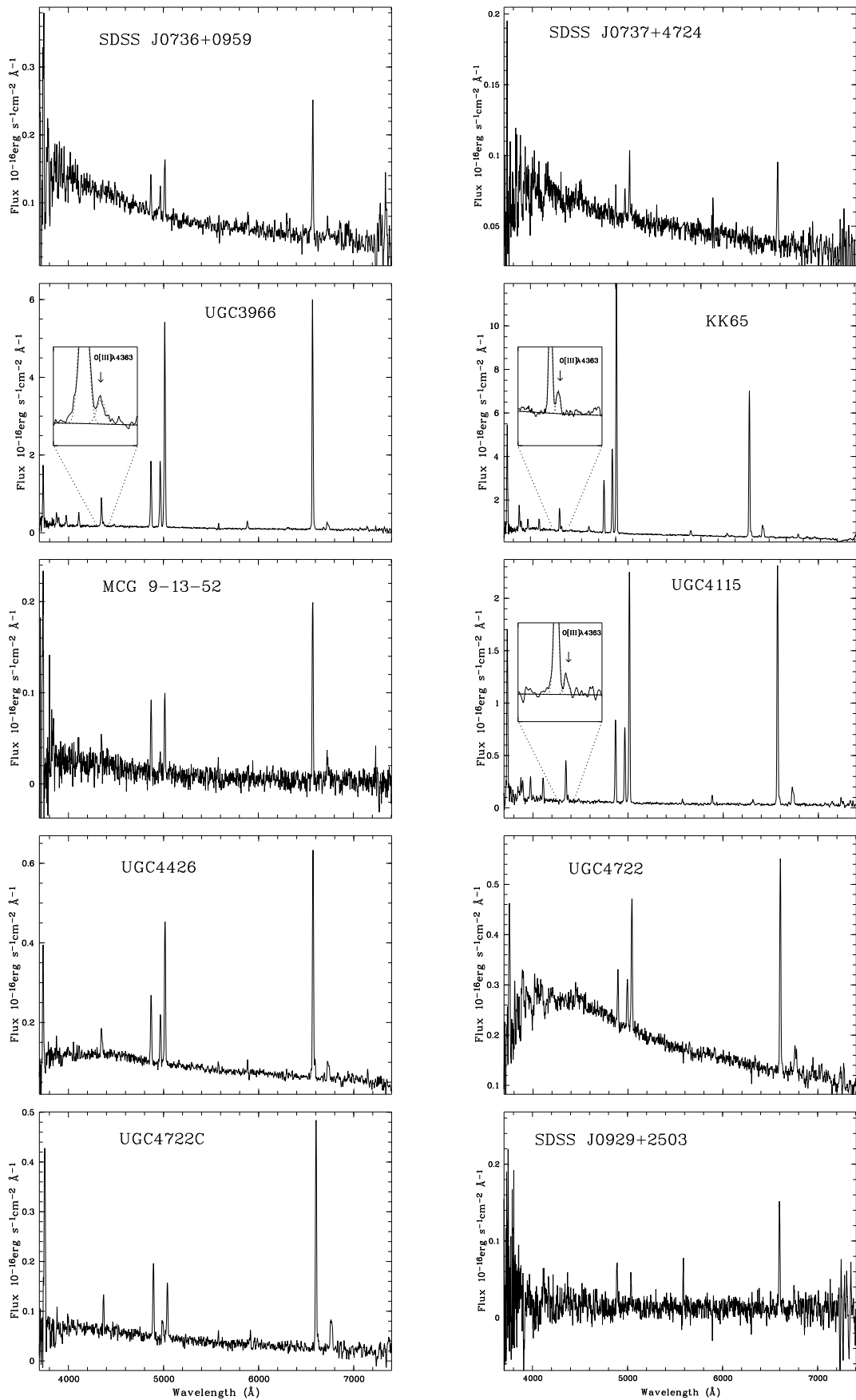


Рис. А.2: Мозаика следующих 10 спектров БТА из данной работы. Оси такие же, как и на Рис. А.1.

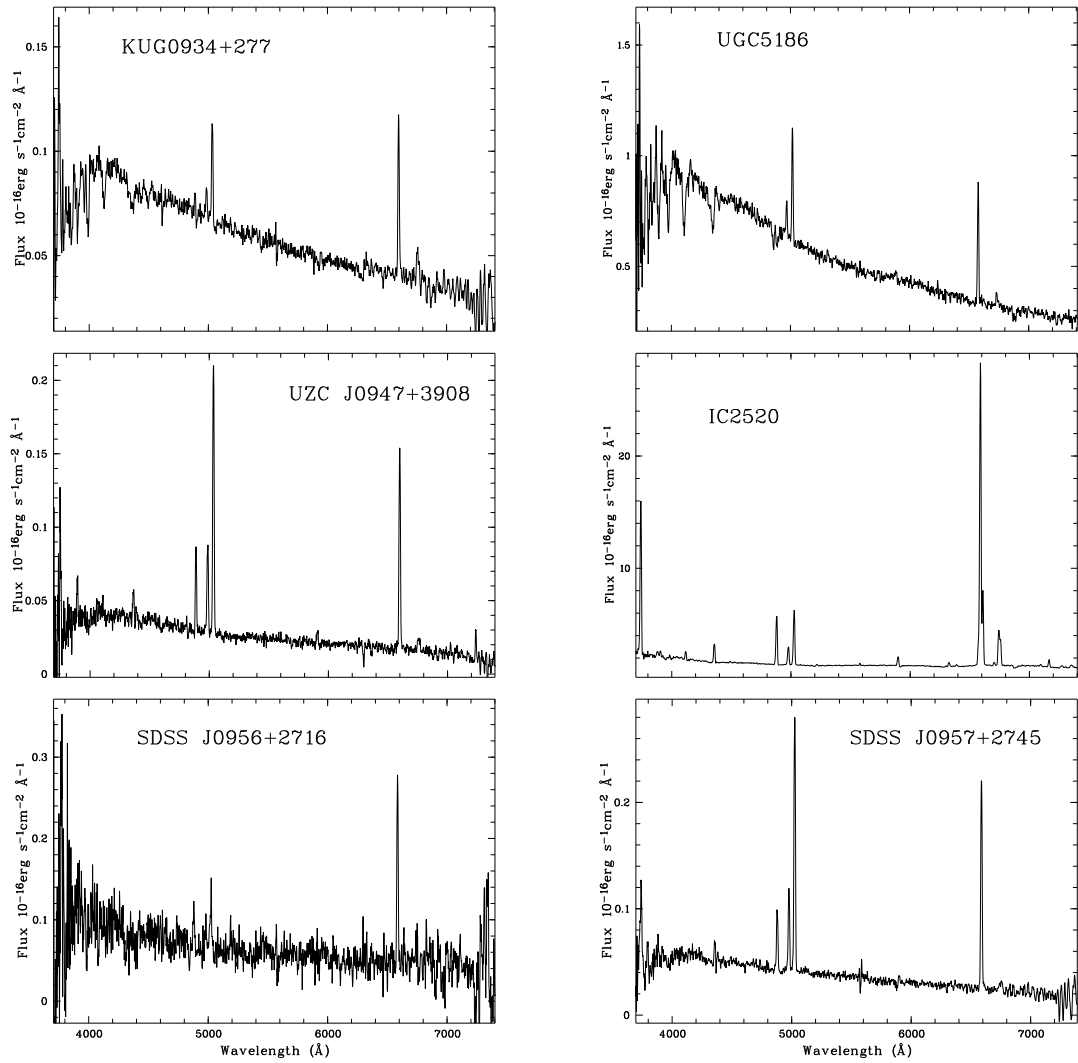


Рис. А.3: Шесть последних спектра БТА из данной работы. Оси такие же, как и на Рис. А.1. Спектр IC 2520 показан, чтобы проиллюстрировать природу его HII области.

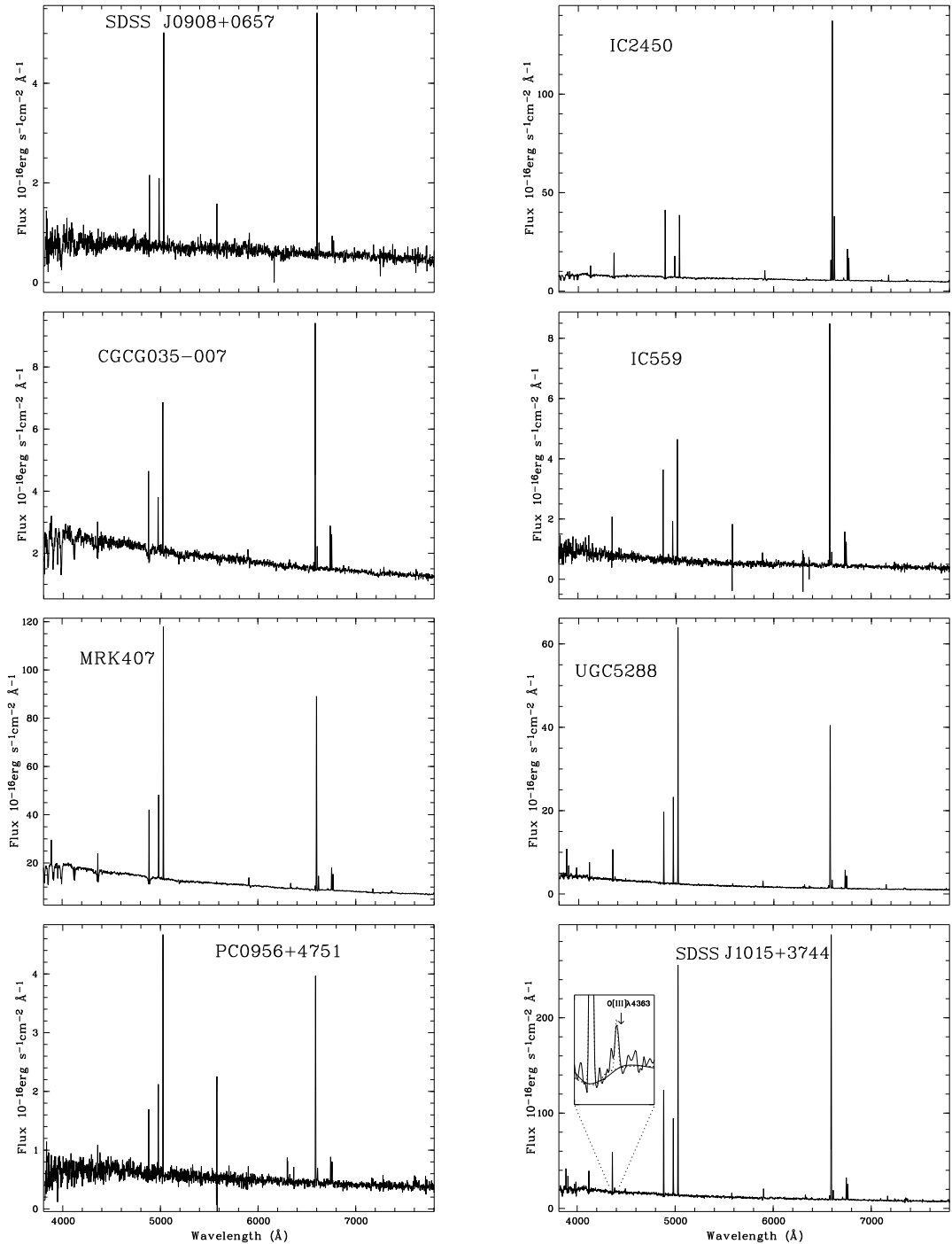


Рис. А.4: Мозаика из 8 спектров SDSS DR7 для галактик войда из данной работы. По оси X : длина волны в \AA . По оси Y : поток на соответствующую длину волны в единицах $10^{-17} \text{ erg cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$. Спектр IC 2450 показан, чтобы проиллюстрировать природу его HII области.

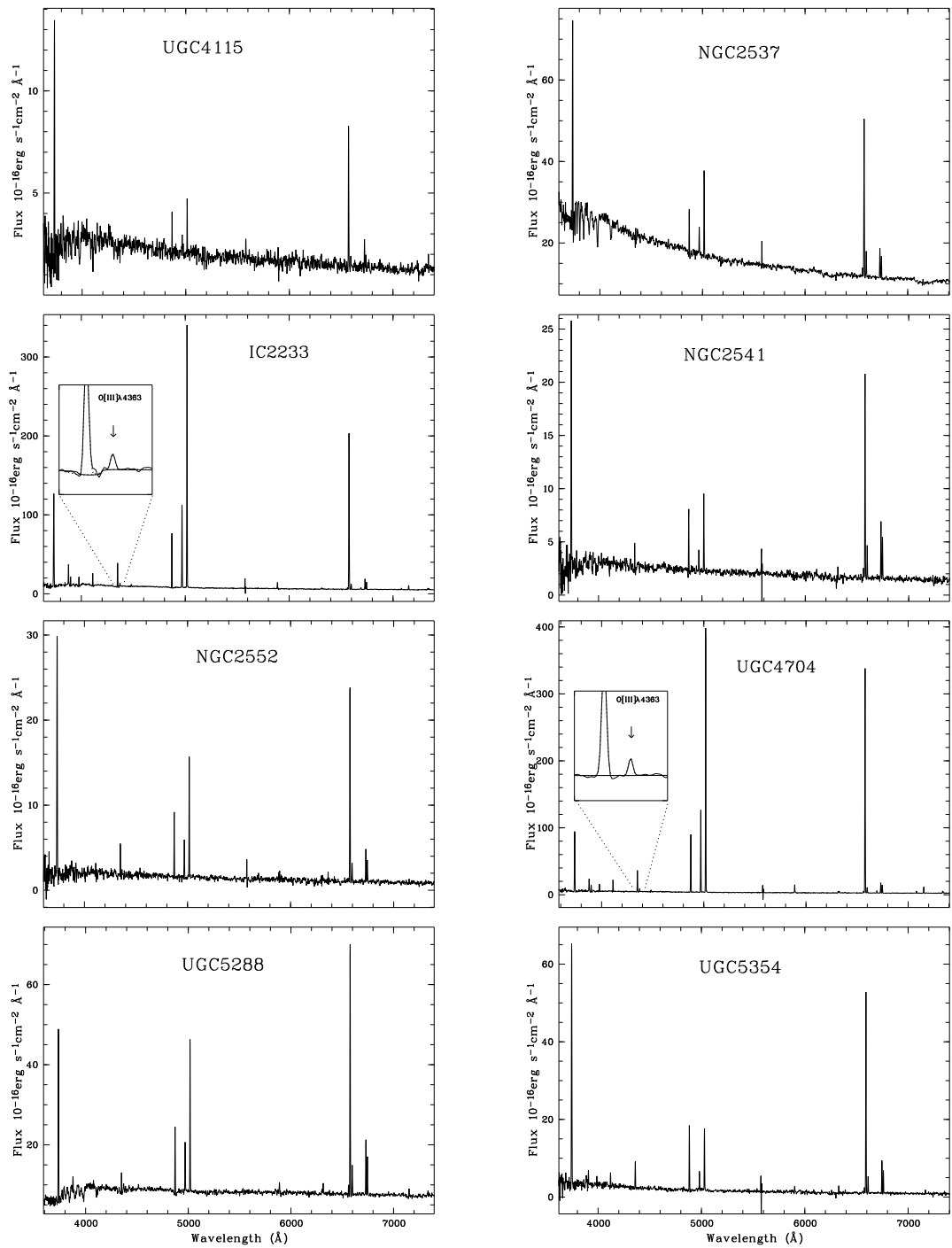


Рис. А.5: Мозаика из 8 спектров SDSS DR12 для галактик войда из данной работы. Оси такие же, как и на Рис. А.4.

Таблица А16. Основные параметры галактик в войде Лунх-Сансер.

№	Имя или префикс (1)	Имя в коротком IAU формате (2)	Тип (3)	V_{hel} км/с (4)	$Dist$ Мпк (5)	A_B^{NED} mag (6)	B_{tot} mag (7)	$M_{B,0}$ mag (8)	B_{tot}^{NED} mag (9)	$\mathfrak{M}(H\text{i})$ $10^7 M_\odot$ (10)	$\mathfrak{M}(H\text{i})/L_B$ (11)	\mathfrak{M}_{star} $10^7 M_\odot$ (12)	f_{gas} (13)	b/a (14)
1	HIPASSJ0626+24	J0626+2439	Scd	1473	23.04	1.79	17.98	-15.62	17.60	—	—	15.60	—	0.59
2	UGC3600	J0655+3905	Im	412	9.30	0.29	15.92	-14.22	16.18	11.23	1.48	2.21	0.87	0.27
3	UGC3672	J0706+3019	Im	994	16.93	0.32	16.04	-15.43	15.40	79.50	3.45	2.71	0.98	0.55
4	SDSS	J0713+2926	Im	950	16.26	0.31	16.66	-14.71	16.79	—	—	3.28	—	0.63
5	SDSS	J0723+3621	Sm	917	16.00	0.23	17.01	-14.25	17.01	22.60	2.91	3.26	0.90	0.31
6	SDSS	J0723+3622	dI	970	16.00	0.23	19.46	-11.79	19.31	9.61	11.84	0.08	0.99	0.71
7	SDSS	J0723+3624	dI	938	16.00	0.23	21.68	-9.57	21.56	2.90	27.62	0.01	0.99	0.47
8	UGC3860	J0728+4046	Im	354	7.81	0.25	15.21	-14.50	14.96	16.92	1.73	2.47	0.90	0.56
9	UGC3876	J0729+2754	SAd	854	15.01	0.19	13.77	-17.31	13.70	99.48	0.77	88.62	0.60	0.58
10	SDSS	J0730+4109	dI	874	15.70	0.27	16.67	-14.58	16.67	4.36	0.41	2.81	0.67	0.59
11	SDSS	J0737+4724	LSB	476	10.42	0.47	18.02	-12.54	18.06	2.51	1.56	0.15	0.96	0.47
12	UGC3966	J0741+4006	Im	361	8.64	0.22	15.32	-14.58	14.44	44.26	4.18	1.37	0.98	0.86
13	DDO47	J0741+1648	IBsm	272	8.04	0.14	14.89	-14.78	13.62	—	—	3.96	—	0.44
14	KK65	J0742+1633	dIrr	279	8.01	0.14	15.51	-14.15	15.34	—	—	2.62	—	0.37
15	SDSS	J0744+2508	Ir	749	12.95	0.18	18.11	-12.63	18.35	1.38	0.79	0.33	0.85	0.84
16	SDSS	J0744+2506	Ir	669	12.95	0.18	20.47	-10.28	20.30	—	—	0.08	—	0.83
17	MCG9-13-52	J0746+5117	Sm	445	10.10	0.27	16.54	-13.75	16.78	6.25	1.27	1.56	0.84	0.74
18	MCG9-13-56	J0747+5111	Sm	439	10.00	0.30	15.12	-15.18	15.48	13.69	0.75	2.94	0.86	0.68
19	UGC4115	J0757+1423	IAm	341	7.73	0.12	14.81	-14.75	15.23	8.37	0.68	3.99	0.74	0.60
20	UGC4117	J0757+3556	IBm	773	14.12	0.20	15.36	-15.59	15.34	23.73	0.89	4.05	0.89	0.75
21	UGC4148	J0800+4211	Scd	716	13.55	0.18	15.66	-15.18	15.63	54.15	2.94	3.18	0.96	0.42
22	NGC2500	J0801+5044	SBcd	504	10.88	0.17	12.14	-18.21	12.23	96.60	0.32	141.30	0.48	1.00
23	MCG7-17-19	J0809+4135	Sc	704	13.37	0.22	15.46	-15.39	16.65	25.31	1.14	6.42	0.84	0.60
24	SDSS	J0810+1837	Sm	1483	23.05	0.16	18.39	-13.59	18.29	6.27	1.48	1.25	0.87	0.46
25	SDSS	J0812+4836	dIr	521	11.05	0.22	17.36	-13.08	17.23	4.85	1.83	0.43	0.94	0.52
26	NGC2537	J0813+4559	BCG	445	9.86	0.23	12.49	-17.71	12.27	48.44	0.26	—	—	0.94
27	IC2233	J0813+4544	Sd	553	10.70	0.22	13.34	-17.03	13.05	54.30	0.54	28.96	0.71	0.11
28	NGC2541	J0814+4903	SABc	548	12.00	0.22	12.34	-18.28	12.25	460.82	1.45	106.35	0.85	0.60
29	NGC2552	J0819+5000	SAm	524	11.11	0.20	13.01	-17.42	12.92	83.01	0.58	47.15	0.70	0.68

Таблица А16. Основные параметры галактик в войде Лунх-Сансер. Продолжение.

№	Имя или префикс (1)	Имя в коротком IAU формате (2)	Тип (3)	V_{hel} км/с (4)	$Dist$ Мпк (5)	A_B^{NED} mag (6)	B_{tot} mag (7)	$M_{B,0}$ mag (8)	$B_{\text{tot}}^{\text{NED}}$ mag (9)	$\mathfrak{M}(\text{HI})$ $10^7 M_{\odot}$ (10)	$\mathfrak{M}(\text{HI})/L_B$ (11)	$\mathfrak{M}_{\text{star}}$ $10^7 M_{\odot}$ (12)	f_{gas} (13)	b/a (14)
30	KUG0821+321	J0825+3201	Ir	648	12.25	0.20	16.91	-13.73	16.10	3.54	0.73	1.44	0.77	0.67
31	HS0822+3542	J0825+3532	BCG	720	13.49	0.20	17.88	-12.97	17.92	1.46	0.61	–	–	0.78
32	SAO0822+3545	J0826+3535	Im	740	13.49	0.20	17.74	-13.11	17.56	4.30	1.57	0.17	0.97	0.80
33	UGC4426	J0828+4151	Im	397	10.30	0.16	15.35	-14.87	15.13	27.05	1.96	6.75	0.84	0.63
34	SDSS	J0831+4104	LSB	582	11.64	0.16	17.71	-12.78	17.71	0.58	0.29	0.64	0.55	0.90
35	SDSS	J0843+4025	Im	614	12.05	0.14	17.90	-12.65	17.83	0.62	0.35	0.43	0.65	0.70
36	SDSS	J0845+1519	dI	1642	24.99	0.09	18.61	-13.47	18.60	–	–	2.29	–	0.79
37	SDSS	J0852+1350	Im	1511	23.08	0.16	17.40	-14.58	17.43	26.40	2.50	3.23	0.92	0.76
38	SDSS	J0852+1351	dI	1541	23.08	0.16	19.82	-12.16	19.73	–	–	0.24	–	0.64
39	UGC4704	J0859+3912	Sdm	596	11.74	0.13	14.82	-15.66	15.51	72.86	2.56	7.25	0.93	0.13
40	SDSS	J0859+3923	dI	588	11.63	0.11	17.25	-13.19	16.98	1.56	0.53	1.04	0.67	0.93
41	SDSS	J0900+3222	dI	740	13.45	0.14	18.97	-11.81	18.86	–	–	0.45	–	0.64
42	UGC4722	J0900+2536	Sdm	1794	27.89	0.17	14.86	-17.54	15.16	–	–	26.09	–	0.18
43	SDSS	J0900+4908	Sdm	1600	25.78	0.09	18.49	-13.65	18.63	–	–	1.50	–	0.72
44	SDSS	J0908+0657	Sdm	1571	23.45	0.19	17.06	-14.98	17.00	4.80	0.31	6.26	0.51	0.57
45	SDSS	J0908+0517	dI	598	10.01	0.20	17.21	-12.99	16.96	2.70	1.10	0.22	0.94	0.99
46	SDSS	J0911+3135	dI	750	13.52	0.07	18.05	-12.68	17.97	1.81	0.99	0.26	0.90	0.87
47	IC2450	J0917+2525	S0	1644	25.47	0.14	14.06	-18.11	13.84	–	–	197.00	–	0.61
48	SDSS	J0926+3343	LSB	536	10.63	0.08	17.30	-12.91	17.34	6.77	2.98	0.13	0.99	0.25
49	SDSS	J0928+2845	dI	1229	19.90	0.09	16.76	-14.82	16.70	23.37	1.77	8.90	0.78	0.49
50	SDSS	J0929+2502	dI	1661	25.66	0.14	19.24	-12.95	19.03	5.59	2.38	0.35	0.95	0.89
51	SDSS	J0929+1155	dI	1614	24.29	0.11	17.20	-14.84	17.36	–	–	3.01	–	0.40
52	SDSS	J0931+2717	Sm	1505	23.60	0.08	18.00	-13.94	17.98	–	–	1.11	–	0.52
53	CGCG035-007	J0934+0625	Sc	574	9.23	0.18	15.42	-14.59	15.22	12.67	1.19	5.77	0.75	0.78
54	KUG0934+277	J0937+2733	Im	1594	25.16	0.08	16.50	-15.59	16.53	–	–	7.65	–	0.74
55	SDSS	J0940+4459	dI	1246	20.71	0.06	18.01	-13.63	17.96	–	–	1.64	–	0.72
56	KISSB23	J0940+2935	Sd	505	10.21	0.10	16.07	-14.08	16.32	5.41	0.81	1.35	0.84	0.49
57	SDSS	J0942+0937	dI	1461	22.00	0.11	18.15	-13.67	21.40	–	–	2.52	–	0.81
58	UGC5186	J0942+3315	Im	551	10.77	0.06	15.99	-14.23	16.27	2.57	0.34	2.13	0.62	0.40

Таблица А16. Основные параметры галактик в войде Лунх-Сансер. Продолжение.

№	Имя или префикс (1)	Имя в коротком IAU формате (2)	Тип (3)	V_{hel} км/с (4)	$Dist$ Мпк (5)	$A_{\text{B}}^{\text{NED}}$ mag (6)	B_{tot} mag (7)	$M_{\text{B},0}$ mag (8)	$B_{\text{tot}}^{\text{NED}}$ mag (9)	$\mathfrak{M}(\text{HI})$ $10^7 M_{\odot}$ (10)	$\mathfrak{M}(\text{HI})/L_{\text{B}}$ (11)	$\mathfrak{M}_{\text{star}}$ $10^7 M_{\odot}$ (12)	f_{gas} (13)	b/a (14)
59	SDSS	J0943+4134	dI	1403	22.77	0.06	17.64	-14.21	17.63	4.89	0.65	2.61	0.71	0.56
60	SDSS	J0944+1000	dI	1477	22.22	0.12	16.96	-14.90	16.95	–	–	4.21	–	0.90
61	IC559	J0944+0936	Sc	541	9.40	0.12	14.77	-15.22	14.98	–	–	6.89	–	0.87
62	UGC5209	J0945+3214	Im	538	10.55	0.08	16.32	-13.88	16.06	4.02	0.72	1.95	0.73	0.75
63	SDSS	J0947+4138	dI	1389	22.56	0.07	17.92	-13.92	17.61	1.20	0.21	0.48	0.77	0.54
64	MRK407	J0947+3905	comp	1589	25.21	0.07	15.28	-16.80	15.27	–	–	–	–	0.74
65	UZCJ09475+390	J0947+3908	dI	1553	24.73	0.07	16.85	-15.19	17.00	–	–	3.31	–	0.63
66	SDSS	J0947+3905	dI	1479	23.70	0.07	18.03	-13.92	18.12	–	–	1.49	–	0.63
67	UGC5272b	J0950+3127	Im	539	10.27	0.10	17.56	-12.60	17.68	2.89	1.70	0.20	0.95	0.67
68	UGC5272	J0950+3129	Im	520	10.30	0.10	14.45	-15.71	14.46	46.33	1.55	3.51	0.95	0.42
69	UGC5288	J0951+0749	Sdm	556	9.47	0.15	14.42	-15.61	14.62	–	–	10.31	–	0.92
70	SDSS	J0951+3842	dI	1435	23.07	0.08	17.46	-14.44	17.42	–	–	1.86	–	0.89
71	SDSS	J0954+3620	dI	503	10.22	0.04	18.05	-12.04	17.93	0.62	0.60	0.17	0.83	0.62
72	IC2520	J0956+2713	S	1243	19.93	0.09	14.27	-17.32	14.70	–	–	151.83	–	0.87
73	SDSS	J0956+2716	dI	1074	17.63	0.09	18.13	-13.19	18.39	–	–	0.80	–	0.54
74	UGC5340	J0956+2849	BC/Im	502	9.86	0.08	14.70	-15.35	14.60	66.35	3.10	1.62	0.98	0.44
75	SDSS	J0957+2745	dI	1184	19.14	0.08	18.16	-13.33	18.08	–	–	0.68	–	0.60
76	UGC5354	J0958+4744	Sm	1168	19.68	0.07	14.15	-17.39	14.60	–	–	33.93	–	0.56
77	PC0956+4751	J0959+4736	dI	1093	18.66	0.07	17.05	-14.37	17.14	14.87	1.70	2.01	0.91	0.45
78	SDSS	J1000+3032	dI	501	9.90	0.08	18.14	-11.92	18.06	0.28	0.30	0.35	0.51	0.79
79	KUG0959+299	J1002+2943	dI	766	13.48	0.10	17.36	-13.39	17.32	–	–	0.62	–	0.77
80	UGC5427	J1004+2921	SABd	498	9.79	0.10	14.91	-15.15	14.89	5.98	0.34	5.53	0.59	0.64
81	UGC5464	J1008+2932	Sm	1003	16.90	0.10	15.77	-15.47	15.62	19.29	0.81	10.22	0.72	0.46
82	SDSS	J1010+4617	dI	1092	18.58	0.03	18.23	-13.15	18.20	0.49	0.17	0.58	0.53	0.45
83	UGC5540	J1016+3746	Sc	1162	19.16	0.07	14.63	-16.85	14.60	46.55	0.54	27.40	0.69	0.36
84	HS1013+3809	J1016+3754	BCG	1173	19.30	0.07	16.02	-15.48	15.99	13.28	0.55	–	–	0.65
85	SDSS	J1019+2923	dI	874	15.25	0.14	17.48	-13.57	17.43	8.23	1.97	0.66	0.94	0.41

Таблица А17. Фотометрические параметры I.

№	Имя	R_{50}	R_{90}	$\mu_{\text{eff}}(g)$	R^{25}	a_{25}	g^{25}	$R^{26.5}$	$g^{26.5}$	Opt.size	Opt.size
		(g) "	(g) "	m/\square''	(g) "	кпк	mag	(g) "	mag	"	кпк
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
1	HIPASSJ0626	9.9	18.5	24.7	13.7	1.5	17.9	20.6	17.6	13.7 x 8.1	1.5 x 0.9
2	UGC3600	26.9	75.9	24.0	40.0	1.8	16.1	74.4	15.7	40.0 x 10.8	1.8 x 0.5
3	UGC3672	18.2	43.3	24.1	27.7	2.3	16.1	47.0	15.8	27.7 x 15.2	2.3 x 1.2
4	J0713+2926	11.8	25.4	23.9	20.7	1.6	16.6	27.0	16.4	20.7 x 13.1	1.6 x 1.0
5	J0723+3621	15.3	35.6	24.1	24.9	1.9	17.0	39.2	16.7	24.9 x 7.8	1.9 x 0.6
6	J0723+3622	3.8	7.7	24.5	5.5	0.4	19.7	9.1	19.3	5.5 x 3.9	0.4 x 0.3
7	J0723+3624	3.9	6.9	26.3	1.8	0.1	22.7	5.5	21.3	1.8 x 0.9	0.1 x 0.1
8	UGC3860	27.1	56.3	24.2	42.5	1.6	15.1	56.1	15.0	42.5 x 24.0	1.6 x 0.9
9	UGC3876	34.0	68.6	23.2	71.2	5.2	13.5	91.3	13.4	71.2 x 41.5	5.2 x 3.0
10	J0730+4109	5.3	14.1	22.1	14.9	1.1	16.4	21.3	16.4	14.9 x 8.8	1.1 x 0.7
11	J0737+4724	7.3	18.7	24.0	12.0	0.6	18.1	19.6	17.9	12.0 x 5.7	0.6 x 0.3
12	UGC3966	26.8	46.7	24.8	38.2	1.6	15.4	52.3	15.1	38.2 x 33.0	1.6 x 1.4
13	DDO47	52.0	106.4	25.0	60.2	2.3	15.1	103.5	14.7	60.2 x 26.5	2.4 x 1.0
14	KK65	22.1	53.1	23.6	41.5	1.6	15.4	63.9	15.2	41.5 x 15.2	1.6 x 0.6
15	J0744+2508	2.7	6.8	22.5	7.7	0.5	17.9	10.0	17.8	7.7 x 6.5	0.5 x 0.4
16	J0744+2506	1.6	4.0	23.6	3.2	0.2	20.4	4.7	20.2	3.2 x 2.6	0.2 x 0.2
17	MCG9-13-52	15.1	29.1	24.5	21.6	1.1	16.5	32.3	16.3	21.6 x 16.0	1.1 x 0.8
18	MCG9-13-56	7.9	20.5	21.6	25.6	1.2	14.9	32.8	14.8	25.6 x 17.4	1.2 x 0.8
19	UGC4115	27.6	59.0	23.9	49.4	1.8	14.6	72.1	14.4	49.4 x 29.5	1.9 x 1.1
20	UGC4117	15.7	34.0	23.5	30.6	2.1	15.2	41.6	15.1	30.6 x 22.9	2.1 x 1.6
21	UGC4148	22.9	70.6	24.0	33.2	2.2	15.9	65.6	15.5	33.2 x 13.9	2.2 x 0.9
22	NGC2500	43.9	82.1	22.7	92.8	4.9	11.9	117.0	11.8	92.8 x 92.5	4.9 x 4.9
23	MCG71719	19.6	38.0	23.8	32.7	2.1	15.3	44.8	15.2	32.7 x 19.4	2.1 x 1.3
24	J0810+1837	5.5	15.6	23.6	10.4	1.2	18.3	15.5	18.2	10.4 x 4.8	1.2 x 0.5
25	J0812+4836	6.1	14.3	23.0	14.0	0.8	17.2	20.0	17.1	14.0 x 7.3	0.8 x 0.4
26	NGC2537	20.0	44.8	21.3	64.6	3.1	12.1	78.1	12.1	64.6 x 60.8	3.1 x 2.9
27	IC2233	125.0	320.3	23.8	212.7	11.0	13.4	380.5	13.0	212.7 x 22.1	11.0 x 1.1
28	NGC2541	70.5	155.0	23.4	143.2	8.3	12.1	186.7	12.1	143.2 x 85.9	8.3 x 5.0
29	NGC2552	51.8	96.5	23.6	97.9	5.3	12.8	123.2	12.7	97.9 x 66.2	5.3 x 3.6
30	KUG0821+321	6.1	15.3	22.8	15.1	0.9	16.7	20.5	16.6	15.1 x 10.1	0.9 x 0.6
31	HS0822+3542	1.1	5.4	20.4	6.4	0.4	17.7	9.7	17.7	6.4 x 5.0	0.4 x 0.3
32	SAO0822+3545	5.8	12.3	23.8	10.7	0.7	17.7	15.1	17.5	10.7 x 8.6	0.7 x 0.6
33	UGC4426	36.5	72.0	25.1	37.3	1.9	15.8	69.4	15.1	37.3 x 23.4	1.9 x 1.2
34	J0831+4104	3.5	10.6	22.7	8.7	0.5	17.5	13.0	17.4	8.7 x 7.8	0.5 x 0.4
35	J0843+4025	3.2	8.8	22.4	9.0	0.5	17.7	12.9	17.6	9.0 x 6.3	0.5 x 0.4
36	J0845+1519	3.5	9.8	23.4	7.0	0.8	18.5	11.5	18.3	7.0 x 5.5	0.8 x 0.7
37	J0852+1350	8.1	17.8	24.1	13.4	1.5	17.4	20.6	17.1	13.4 x 10.3	1.5 x 1.1
38	J0852+1351	1.2	4.9	22.2	4.4	0.5	19.6	6.4	19.5	4.4 x 2.8	0.5 x 0.3
39	UGC4704	83.8	235.9	24.6	87.8	5.0	15.1	200.5	14.6	87.8 x 11.4	5.0 x 0.7
40	J0859+3923	5.6	16.5	23.3	11.3	0.6	17.2	19.5	17.0	11.3 x 10.5	0.6 x 0.6
41	J0900+3222	4.6	10.2	24.2	7.2	0.5	18.9	11.1	18.7	7.2 x 4.6	0.5 x 0.3
42	UGC4722	45.0	163.1	23.7	76.1	10.3	14.9	122.8	14.7	76.1 x 13.3	10.3 x 1.8
43	J0900+4908	6.6	15.2	24.7	8.1	1.0	18.7	14.0	18.3	8.1 x 5.8	1.0 x 0.7

Таблица А17. Фотометрические параметры I. Продолжение.

№	Имя	R_{50} (g) "	R_{90} (g) "	$\mu_{\text{eff}}(g)$ m/\square''	R^{25} (g) "	a_{25} кпк	g^{25} mag	$R^{26.5}$ (g) "	$g^{26.5}$ mag	Opt.size "	Opt.size кпк
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
44	J0908+0657	8.3	21.0	23.4	15.9	1.8	16.9	24.3	16.8	15.9 x 9.0	1.8 x 1.0
45	J0908+0517	11.9	20.8	25.0	13.7	0.7	17.5	22.8	17.0	13.7 x 13.5	0.7 x 0.7
46	J0911+3135	2.1	5.3	22.0	6.6	0.4	17.8	9.1	17.8	6.6 x 5.8	0.4 x 0.4
47	IC2450	13.0	39.7	21.4	45.0	5.6	13.8	62.6	13.7	45.0 x 27.2	5.6 x 3.4
48	J0926+3343	22.1	47.5	25.0	21.5	1.1	17.8	47.9	17.2	21.5 x 5.4	1.1 x 0.3
49	J0928+2845	5.8	16.5	22.2	16.8	1.6	16.5	24.7	16.4	16.8 x 8.3	1.6 x 0.8
50	J0929+2502	5.5	11.0	25.3	5.3	0.7	19.7	10.0	19.1	5.3 x 4.7	0.7 x 0.6
51	J0929+1155	12.6	30.6	24.1	19.5	2.3	17.3	31.4	17.0	19.5 x 7.8	2.3 x 0.9
52	J0931+2717	6.2	16.8	23.7	11.0	1.3	18.0	18.2	17.8	11.0 x 5.8	1.3 x 0.7
53	CGCG035-007	9.1	23.0	22.3	23.6	1.1	15.1	34.3	15.1	23.6 x 18.3	1.1 x 0.8
54	KUG0934+277	11.1	24.1	23.8	20.4	2.5	16.4	29.6	16.2	20.4 x 15.2	2.5 x 1.9
55	J0940+4459	2.4	7.1	21.9	7.8	0.8	17.8	10.7	17.7	7.8 x 5.7	0.8 x 0.6
56	KISSB23	9.0	29.7	22.5	23.6	1.2	16.0	36.4	15.8	23.6 x 11.5	1.2 x 0.6
57	J0942+0937	8.8	17.0	25.0	9.7	1.0	18.4	16.8	17.9	9.7 x 7.9	1.0 x 0.8
58	UGC5186	14.6	46.6	23.2	30.2	1.6	15.8	50.2	15.6	30.2 x 12.1	1.6 x 0.6
59	J0943+4134	5.2	16.1	23.0	12.1	1.3	17.5	16.3	17.4	12.1 x 6.8	1.3 x 0.8
60	J0944+1000	10.6	20.9	24.4	16.4	1.8	16.9	24.3	16.7	16.4 x 14.8	1.8 x 1.6
61	IC559	13.6	43.6	22.7	35.7	1.6	14.3	58.0	14.2	35.7 x 31.2	1.6 x 1.4
62	UGC5209	15.4	31.9	24.4	22.7	1.2	16.3	29.8	16.1	22.7 x 17.1	1.2 x 0.9
63	J0947+4138	2.0	9.6	21.2	8.7	1.0	17.8	12.9	17.7	8.7 x 4.7	1.0 x 0.5
64	MRK407	2.6	10.2	19.5	15.8	1.9	15.0	23.7	15.0	15.8 x 11.7	1.9 x 1.4
65	J0947+3908	7.8	15.6	23.2	16.5	2.0	16.6	21.5	16.6	16.5 x 10.3	2.0 x 1.2
66	J0947+3905	4.9	19.2	23.4	8.5	1.0	18.1	15.9	17.9	8.5 x 5.4	1.0 x 0.6
67	UGC5272b	5.1	12.8	23.1	11.0	0.5	17.5	15.8	17.4	11.0 x 7.3	0.5 x 0.4
68	UGC5272	32.5	73.8	23.5	66.7	3.3	14.4	86.2	14.2	66.7 x 28.1	3.3 x 1.4
69	UGC5288	15.5	42.6	22.7	38.6	1.8	14.2	57.6	14.1	38.6 x 35.4	1.8 x 1.6
70	J0951+3842	6.2	15.4	23.8	11.2	1.3	17.4	16.7	17.2	11.2 x 10.0	1.3 x 1.1
71	J0954+3620	4.6	12.5	23.3	9.7	0.5	18.0	14.8	17.8	9.7 x 6.0	0.5 x 0.3
72	IC2520	8.5	17.3	21.1	25.7	2.5	13.8	31.4	13.8	25.7 x 22.3	2.5 x 2.2
73	J0956+2716	10.8	22.9	25.1	11.4	1.0	18.5	22.0	18.0	11.4 x 6.1	1.0 x 0.5
74	UGC5340	31.3	82.4	23.8	55.6	2.7	14.8	80.7	14.6	55.6 x 24.7	2.7 x 1.2
75	J0957+2745	4.4	10.2	23.3	9.3	0.9	18.0	13.3	17.9	9.3 x 5.6	0.9 x 0.5
76	UGC5354	25.6	53.6	23.0	53.8	5.1	13.9	74.4	13.9	53.8 x 30.4	5.1 x 2.9
77	PC0956+4751	9.3	25.1	23.4	18.3	1.7	17.0	29.0	16.8	18.3 x 8.3	1.7 x 0.8
78	J1000+3032	3.8	10.3	23.2	8.3	0.4	18.0	12.4	17.8	8.3 x 6.5	0.4 x 0.3
79	KUG0959+299	4.3	11.1	22.7	10.7	0.7	17.2	14.8	17.1	10.7 x 8.3	0.7 x 0.5
80	UGC5427	18.8	37.5	23.2	38.5	1.8	14.7	49.9	14.6	38.5 x 24.6	1.8 x 1.2
81	UGC5464	21.6	48.6	24.0	36.1	3.0	15.7	54.8	15.5	36.1 x 16.6	3.0 x 1.4
82	J1010+4617	2.8	8.9	22.0	9.2	0.8	18.0	12.9	18.0	9.2 x 4.1	0.8 x 0.4
83	UGC5540	24.5	61.8	22.9	57.8	5.4	14.4	81.1	14.3	57.8 x 20.6	5.4 x 1.9
84	HS1013+3809	1.6	8.9	19.1	12.4	1.2	15.9	18.1	15.9	12.4 x 8.1	1.2 x 0.8
85	J1019+2923	6.8	18.4	23.1	15.0	1.1	17.4	22.4	17.2	15.0 x 6.1	1.1 x 0.5

Таблица А18. Фотометрические параметры II.

№	Имя (1)	g_{tot} mag (2)	$(u - g)_{\text{tot}}$ mag (3)	$(g - r)_{\text{tot}}$ mag (4)	$(r - i)_{\text{tot}}$ mag (5)	$(u - g)_{\text{per}}$ mag (6)	$(g - r)_{\text{per}}$ mag (7)	$(r - i)_{\text{per}}$ mag (8)
1	HIPASS J0626	17.53±0.02	0.88±0.03	0.29±0.01	0.15±0.01	0.93±0.06	0.31±0.02	0.16±0.02
2	UGC3600	15.57±0.01	1.01±0.01	0.29±0.01	0.12±0.01	1.09±0.02	0.29±0.01	0.15±0.01
3	UGC3672	15.72±0.01	1.03±0.01	0.21±0.01	-0.01±0.01	0.96±0.04	0.21±0.02	0.09±0.02
4	J0713+2926	16.32±0.01	1.01±0.01	0.27±0.01	0.13±0.01	1.00±0.03	0.32±0.01	0.15±0.02
5	J0723+3621	16.65±0.01	1.17±0.02	0.35±0.01	0.18±0.01	0.99±0.03	0.31±0.02	0.17±0.02
6	J0723+3622	19.24±0.02	0.62±0.05	-0.01±0.04	0.21±0.05	0.60±0.06	0.01±0.05	0.07±0.07
7	J0723+3624	21.41±0.04	0.11±0.09	0.08±0.07	0.05±0.08	—	—	—
8	UGC3860	14.89±0.01	0.90±0.01	0.25±0.01	0.14±0.01	0.95±0.02	0.23±0.01	0.11±0.01
9	UGC3876	13.39±0.01	1.11±0.01	0.47±0.01	0.27±0.01	1.13±0.01	0.38±0.01	0.25±0.01
10	J0730+4109	16.34±0.01	0.94±0.01	0.25±0.01	0.15±0.01	1.15±0.03	0.43±0.02	0.24±0.02
11	J0737+4724	17.74±0.01	1.00±0.03	0.06±0.01	0.02±0.02	0.83±0.06	0.09±0.03	0.10±0.04
12	UGC3966	15.04±0.01	0.88±0.01	0.12±0.01	0.09±0.01	0.90±0.01	0.10±0.01	0.09±0.01
13	DDO47	14.55±0.01	0.96±0.01	0.31±0.01	0.15±0.01	1.13±0.02	0.35±0.01	0.18±0.01
14	KK65	15.17±0.01	1.08±0.01	0.32±0.01	0.20±0.01	1.18±0.03	0.43±0.01	0.23±0.01
15	J0744+2508	17.79±0.01	0.90±0.03	0.25±0.01	0.06±0.02	1.04±0.04	0.31±0.02	0.16±0.02
16	J0744+2506	20.11±0.02	1.03±0.09	0.37±0.04	0.15±0.05	1.17±0.16	0.51±0.07	0.29±0.08
17	MCG9-13-52	16.20±0.01	0.78±0.01	0.29±0.01	0.16±0.01	1.04±0.04	0.31±0.02	0.19±0.02
18	MCG9-13-56	14.81±0.01	0.67±0.01	0.20±0.01	0.05±0.01	1.13±0.03	0.45±0.01	0.24±0.01
19	UGC4115	14.49±0.01	0.82±0.01	0.28±0.01	0.20±0.01	0.90±0.03	0.31±0.01	0.20±0.02
20	UGC4117	15.07±0.01	0.89±0.01	0.15±0.01	0.10±0.01	0.81±0.02	0.05±0.01	0.06±0.02
21	UGC4148	15.35±0.01	0.86±0.01	0.21±0.01	0.09±0.01	0.87±0.03	0.26±0.02	0.02±0.02
22	NGC2500	11.79±0.01	0.92±0.01	0.35±0.01	0.23±0.01	1.07±0.01	0.44±0.01	0.22±0.01
23	MCG71719	15.13±0.01	0.88±0.01	0.29±0.01	0.15±0.01	1.10±0.02	0.39±0.01	0.23±0.01
24	J0810+1837	18.05±0.01	0.89±0.04	0.31±0.02	0.14±0.03	0.97±0.08	0.40±0.04	0.25±0.05
25	J0812+4836	17.05±0.01	0.96±0.02	0.20±0.01	0.06±0.01	0.92±0.05	0.23±0.03	0.15±0.03
26	NGC2537	12.11±0.01	1.01±0.01	0.45±0.01	0.25±0.01	—	—	—
27	IC2233	13.01±0.01	0.90±0.01	0.28±0.01	0.15±0.01	1.11±0.01	0.31±0.01	0.19±0.01
28	NGC2541	11.99±0.01	0.84±0.01	0.34±0.01	0.14±0.01	0.95±0.01	0.31±0.01	0.15±0.01
29	NGC2552	12.67±0.01	0.92±0.01	0.32±0.01	0.15±0.01	1.12±0.02	0.34±0.01	0.18±0.01
30	KUG0821+321	16.56±0.01	0.86±0.01	0.33±0.01	0.11±0.01	1.13±0.05	0.42±0.02	0.26±0.02
31	HS0822+3542	17.65±0.01	0.65±0.02	-0.03±0.02	-0.37±0.03	—	—	—
32	SAO0822+3545	17.50±0.01	0.77±0.02	0.00±0.01	0.01±0.02	0.75±0.07	0.03±0.04	0.04±0.05
33	UGC4426	15.01±0.01	1.24±0.01	0.33±0.01	0.27±0.01	1.09±0.04	0.30±0.02	0.19±0.02
34	J0831+4104	17.37±0.01	0.93±0.02	0.32±0.01	0.15±0.01	1.15±0.05	0.43±0.02	0.24±0.02
35	J0843+4025	17.58±0.01	0.98±0.03	0.26±0.01	0.14±0.01	1.00±0.06	0.30±0.03	0.16±0.03
36	J0845+1519	18.25±0.01	1.21±0.04	0.41±0.02	0.25±0.02	0.92±0.08	0.38±0.03	0.25±0.03
37	J0852+1350	17.06±0.01	0.85±0.02	0.32±0.01	0.14±0.01	1.11±0.07	0.42±0.03	0.22±0.03
38	J0852+1351	19.48±0.02	0.79±0.06	0.33±0.03	0.02±0.03	0.91±0.11	0.33±0.05	0.20±0.06
39	UGC4704	14.50±0.01	0.89±0.01	0.27±0.01	0.14±0.01	1.03±0.01	0.35±0.01	0.24±0.01
40	J0859+3923	16.91±0.01	1.10±0.02	0.32±0.01	0.18±0.01	1.16±0.05	0.42±0.02	0.25±0.03
41	J0900+3222	18.60±0.01	1.20±0.04	0.43±0.02	0.20±0.02	1.13±0.07	0.43±0.03	0.22±0.03
42	UGC4722	14.56±0.01	0.92±0.01	0.19±0.01	0.07±0.01	1.10±0.03	0.33±0.01	0.18±0.02
43	J0900+4908	18.17±0.01	1.18±0.05	0.29±0.02	0.21±0.03	0.97±0.05	0.38±0.03	0.19±0.03

Таблица А18. Фотометрические параметры II. Продолжение.

№	Имя	g_{tot} mag	$(u - g)_{\text{tot}}$ mag	$(g - r)_{\text{tot}}$ mag	$(r - i)_{\text{tot}}$ mag	$(u - g)_{\text{per}}$ mag	$(g - r)_{\text{per}}$ mag	$(r - i)_{\text{per}}$ mag
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
44	J0908+0657	16.70±0.01	1.16±0.02	0.37±0.01	0.16±0.01	1.10±0.04	0.44±0.02	0.25±0.02
45	J0908+0517	16.90±0.01	0.74±0.02	0.22±0.01	-0.13±0.01	1.03±0.06	0.24±0.03	0.11±0.03
46	J0911+3135	17.76±0.01	0.62±0.02	0.18±0.02	0.06±0.02	1.02±0.06	0.28±0.03	0.18±0.03
47	IC2450	13.67±0.01	1.27±0.01	0.48±0.01	0.23±0.01	1.43±0.02	0.55±0.01	0.32±0.01
48	J0926+3343	17.05±0.01	0.81±0.02	0.07±0.01	-0.08±0.02	0.98±0.06	0.14±0.03	0.07±0.04
49	J0928+2845	16.39±0.01	1.13±0.02	0.45±0.01	0.24±0.01	1.31±0.04	0.55±0.01	0.25±0.01
50	J0929+2502	18.95±0.02	0.87±0.05	0.16±0.03	0.11±0.04	0.94±0.08	0.19±0.05	0.13±0.06
51	J0929+1155	16.89±0.01	0.95±0.02	0.22±0.01	0.15±0.01	1.04±0.08	0.35±0.04	0.20±0.04
52	J0931+2717	17.70±0.01	1.17±0.04	0.22±0.02	0.11±0.02	1.04±0.08	0.26±0.01	0.15±0.05
53	CGCG035-007	15.05±0.01	1.13±0.01	0.42±0.01	0.20±0.01	1.29±0.02	0.51±0.01	0.22±0.01
54	KUG0934+277	16.17±0.01	0.99±0.01	0.30±0.01	0.15±0.01	0.96±0.04	0.37±0.02	0.20±0.02
55	J0940+4459	17.67±0.01	0.97±0.03	0.34±0.01	0.19±0.02	1.15±0.07	0.40±0.03	0.20±0.04
56	KISSB23	15.77±0.01	0.75±0.01	0.20±0.01	0.16±0.01	1.08±0.03	0.38±0.01	0.23±0.02
57	J0942+0937	17.80±0.03	1.02±0.03	0.37±0.01	0.26±0.01	0.94±0.07	0.38±0.04	0.24±0.04
58	UGC5186	15.68±0.01	1.09±0.01	0.27±0.01	0.18±0.01	1.12±0.03	0.39±0.01	0.22±0.01
59	J0943+4134	17.30±0.01	1.10±0.02	0.34±0.01	0.16±0.01	1.06±0.05	0.40±0.03	0.21±0.03
60	J0944+1000	16.62±0.01	0.91±0.01	0.32±0.01	0.13±0.01	0.93±0.04	0.34±0.02	0.24±0.02
61	IC559	14.43±0.01	1.02±0.01	0.33±0.01	0.18±0.01	1.10±0.02	0.43±0.01	0.26±0.01
62	UGC5209	15.98±0.01	0.95±0.01	0.33±0.01	0.18±0.01	0.95±0.03	0.37±0.02	0.21±0.02
63	J0947+4138	17.65±0.01	0.87±0.03	0.12±0.02	-0.03±0.03	0.93±0.06	0.28±0.03	0.17±0.04
64	MRK407	14.96±0.01	0.86±0.01	0.28±0.01	0.10±0.01	—	—	—
65	J0947+3908	16.54±0.01	0.91±0.01	0.23±0.01	0.08±0.01	0.95±0.03	0.27±0.02	0.14±0.02
66	J0947+3905	17.71±0.01	1.21±0.03	0.27±0.01	0.15±0.02	1.16±0.06	0.41±0.03	0.21±0.03
67	UGC5272b	17.29±0.01	0.92±0.02	0.12±0.01	0.08±0.02	0.89±0.06	0.18±0.03	0.11±0.04
68	UGC5272	14.18±0.01	0.67±0.01	0.13±0.01	0.07±0.01	0.87±0.03	0.17±0.02	0.15±0.02
69	UGC5288	14.08±0.01	0.89±0.01	0.34±0.01	0.19±0.01	1.02±0.02	0.41±0.01	0.27±0.01
70	J0951+3842	17.16±0.01	0.93±0.02	0.21±0.01	0.14±0.01	0.98±0.05	0.37±0.03	0.19±0.03
71	J0954+3620	17.75±0.01	1.10±0.03	0.21±0.02	0.08±0.02	1.11±0.07	0.28±0.04	0.19±0.05
72	IC2520	13.85±0.01	1.05±0.01	0.59±0.01	0.25±0.01	0.98±0.04	0.43±0.02	0.27±0.02
73	J0956+2716	17.81±0.01	0.87±0.03	0.28±0.02	0.15±0.02	1.05±0.08	0.32±0.04	0.20±0.04
74	UGC5340	14.46±0.01	0.64±0.01	0.03±0.01	0.03±0.01	0.77±0.01	0.06±0.01	0.07±0.01
75	J0957+2745	17.85±0.01	1.04±0.03	0.24±0.01	0.10±0.01	0.93±0.07	0.33±0.03	0.14±0.04
76	UGC5354	13.84±0.01	0.94±0.01	0.27±0.01	0.14±0.01	1.03±0.02	0.24±0.01	0.13±0.01
77	PC0956+4751	16.72±0.01	0.84±0.01	0.31±0.01	0.07±0.01	0.98±0.04	0.34±0.02	0.18±0.03
78	J1000+3032	17.78±0.01	1.14±0.03	0.40±0.01	0.12±0.01	1.06±0.09	0.39±0.05	0.17±0.05
79	KUG0959+299	17.05±0.01	0.95±0.02	0.23±0.01	0.07±0.01	1.10±0.06	0.37±0.03	0.20±0.03
80	UGC5427	14.58±0.01	0.94±0.01	0.29±0.01	0.18±0.01	1.09±0.02	0.33±0.01	0.21±0.01
81	UGC5464	15.42±0.01	0.91±0.01	0.38±0.01	0.18±0.01	1.06±0.03	0.43±0.01	0.25±0.01
82	J1010+4617	17.92±0.01	0.78±0.03	0.25±0.02	0.11±0.02	0.86±0.08	0.31±0.04	0.20±0.04
83	UGC5540	14.30±0.01	0.98±0.00	0.32±0.01	0.17±0.01	1.09±0.02	0.42±0.01	0.26±0.01
84	HS1013+3809	15.82±0.01	0.59±0.02	-0.11±0.02	-0.31±0.04	—	—	—
85	J1019+2923	17.17±0.01	1.12±0.02	0.23±0.01	0.03±0.01	1.08±0.05	0.27±0.02	0.13±0.03

Таблица А19. Фотометрические параметры III.

№	Имя (1)	$\mu_0(g)$ m/\square'' (2)	$\mu_0(r)$ m/\square'' (3)	$\mu_0(B)$ m/\square'' (4)	$\mu_{0,c,i}(B)$ m/\square'' (5)	$\alpha(g)$ " (6)	$n(g)$ Sersic (7)
1	HIPASSJ0626+24	23.54±0.06	22.79±0.05	24.00	22.83	8.68±0.38	1.64±0.10
2	UGC3600	22.92±0.08	22.55±0.07	23.26	24.31	11.57±0.35	1.00±0.01
3	UGC3672	23.13±0.25	23.20±0.19	23.34	23.72	13.22±2.42	1.19±0.15
4	J0713+2926	22.49±0.04	22.09±0.05	22.84	23.21	8.15±0.28	1.26±0.03
5	J0723+3621	22.58±0.04	22.16±0.07	22.94	24.15	6.69±0.21	1.10±0.02
6	J0723+3622	24.13±0.20	24.14±0.14	24.35	24.60	5.44±0.67	2.19±0.57
7	J0723+3624	24.29±0.16	24.14±0.23	24.56	25.77	2.11±0.22	1.00±0.01
8	UGC3860	22.99±0.06	22.60±0.05	23.34	24.00	22.42±0.86	1.79±0.10
9	UGC3876	22.01±0.05	21.27±0.06	22.47	22.91	27.16±0.99	1.49±0.05
10	J0730+4109	21.08±0.16	20.57±0.15	21.47	22.00	3.30±0.14	1.00±0.01
11	J0737+4724	22.93±0.12	22.78±0.12	23.20	24.17	5.13±0.48	1.27±0.10
12	UGC3966	23.71±0.11	23.30±0.14	24.07	24.04	30.19±1.95	1.91±0.21
13	DDO47	23.18±0.05	23.05±0.03	23.45	24.30	22.24±1.14	1.01±0.03
14	KK65	21.97±0.08	21.70±0.06	22.28	23.76	9.74±0.64	1.07±0.04
15	J0744+2508	22.12±0.13	21.85±0.05	22.43	22.48	3.92±0.34	1.66±0.16
16	J0744+2506	22.90±0.07	22.79±0.06	23.16	23.23	1.81±0.09	1.37±0.07
17	MCG9-13-52	23.41±0.06	23.06±0.09	23.75	23.90	15.11±0.59	1.68±0.07
18	MCG9-13-56	20.29±0.08	20.19±0.06	20.55	20.69	5.30±0.35	1.08±0.04
19	UGC4115	22.13±0.17	21.97±0.16	22.41	22.89	16.36±2.27	1.16±0.14
20	UGC4117	22.02±0.03	21.78±0.04	22.32	22.46	11.43±0.30	1.21±0.02
21	UGC4148	23.42±0.09	23.14±0.10	23.73	24.61	14.42±0.46	1.00±0.01
22	NGC2500	21.20±0.05	21.24±0.04	21.41	21.25	39.00±1.16	1.43±0.03
23	MCG71719	22.17±0.16	22.02±0.13	22.44	22.83	10.54±1.18	1.15±0.08
24	J0810+1837	22.44±0.11	22.20±0.07	22.74	24.10	3.10±0.30	1.01±0.06
25	J0812+4836	22.06±0.08	21.74±0.05	22.39	23.27	5.02±0.29	1.39±0.07
26	NGC2537	20.56±0.08	19.89±0.07	21.00	20.83	15.10±0.36	1.00±0.01
27	IC2233	22.29±0.12	21.74±0.10	22.69	23.60	27.54±1.19	1.00±0.01
28	NGC2541	22.18±0.06	21.60±0.06	22.59	22.97	52.15±2.42	1.34±0.05
29	NGC2552	22.59±0.02	22.12±0.03	22.96	23.33	53.37±0.77	1.96±0.04
30	KUG0821+321	21.80±0.10	21.54±0.10	22.11	22.49	5.30±0.41	1.27±0.08
31	HS0822+3542	21.92±0.14	20.80±0.12	22.50	22.65	2.01±0.08	1.00±0.01
32	SAO0822+3545	22.96±0.05	22.90±0.09	23.21	23.30	6.60±0.21	1.62±0.06
33	UGC4426	23.62±0.05	23.16±0.04	23.99	24.37	25.95±1.18	1.30±0.06
34	J0831+4104	21.65±0.15	21.42±0.14	21.95	21.93	2.99±0.41	1.08±0.10
35	J0843+4025	21.62±0.20	21.49±0.07	21.89	22.25	2.84±0.48	1.14±0.14
36	J0845+1519	22.37±0.19	22.07±0.19	22.69	22.92	2.77±0.47	1.05±0.11
37	J0852+1350	23.02±0.11	22.80±0.08	23.32	23.53	7.76±0.63	1.39±0.10
38	J0852+1351	22.13±0.09	22.41±0.23	22.27	22.76	1.31±0.05	1.00±0.01
39	UGC4704	23.99±0.20	23.49±0.10	24.37	24.50	32.01±0.90	1.10±0.09
40	J0859+3923	23.04±0.46	22.21±0.31	23.53	23.52	7.20±2.02	1.32±0.27
41	J0900+3222	22.76±0.09	22.44±0.07	23.09	23.60	3.09±0.24	1.18±0.07
42	UGC4722	22.29±0.16	22.35±0.27	22.50	23.46	12.66±1.49	1.02±0.06
43	J0900+4908	23.27±0.05	22.75±0.11	23.66	24.04	4.90±0.20	1.24±0.05

Таблица А19. Фотометрические параметры III. Продолжение

№	Имя (1)	$\mu_0(g)$ m/\square'' (2)	$\mu_0(r)$ m/\square'' (3)	$\mu_0(B)$ m/\square'' (4)	$\mu_{0,c,i}(B)$ m/\square'' (5)	$\alpha(g)$ " (6)	$n(g)$ Sersic (7)
44	J0908+0657	21.78±0.14	21.46±0.07	22.11	22.58	4.09±0.43	1.00±0.05
45	J0908+0517	23.46±0.11	23.28±0.10	23.74	23.56	8.50±0.91	1.11±0.09
46	J0911+3135	21.52±0.20	21.37±0.18	21.79	21.91	2.78±0.40	1.39±0.16
47	IC2450	20.73±0.05	20.17±0.04	21.13	21.58	9.00±0.15	1.00±0.01
48	J0926+3343	23.32±0.07	23.26±0.07	23.57	24.82	7.29±0.50	1.04±0.06
49	J0928+2845	21.01±0.16	20.67±0.14	21.34	22.10	3.65±0.54	1.07±0.09
50	J0929+2502	24.10±0.18	23.98±0.15	24.36	24.38	5.61±0.82	1.38±0.23
51	J0929+1155	22.88±0.35	22.77±0.10	23.14	24.15	6.73±1.73	1.12±0.19
52	J0931+2717	22.58±0.47	22.81±0.43	22.74	23.75	3.91±1.27	1.07±0.19
53	CGCG035-007	20.79±0.09	20.47±0.09	21.12	21.29	5.73±0.45	1.02±0.04
54	KUG0934+277	22.52±0.05	22.26±0.04	22.83	23.09	8.91±0.38	1.25±0.04
55	J0940+4459	21.23±0.14	20.91±0.12	21.56	21.96	2.24±0.25	1.14±0.08
56	KISSB23	22.28±0.36	22.03±0.34	22.59	23.82	6.71±1.53	1.02±0.11
57	J0942+0937	23.70±0.09	23.16±0.08	24.10	24.27	7.79±0.53	1.43±0.10
58	UGC5186	22.71±0.09	22.37±0.11	23.04	24.88	9.03±0.24	1.00±0.01
59	J0943+4134	21.68±0.06	21.41±0.05	21.99	22.84	2.97±0.08	1.00±0.01
60	J0944+1000	23.42±0.02	23.07±0.04	23.76	23.76	12.55±0.19	1.75±0.04
61	IC559	22.62±0.43	22.12±0.46	23.00	23.04	16.82±4.84	1.11±0.18
62	UGC5209	23.28±0.06	22.99±0.04	23.60	23.91	15.41±0.60	1.61±0.07
63	J0947+4138	22.45±0.21	22.18±0.24	22.76	23.72	2.78±0.18	1.00±0.01
64	MRK407	20.71±0.69	20.77±1.13	20.92	21.20	6.58±2.39	1.17±0.22
65	J0947+3908	22.45±0.04	22.19±0.04	22.76	23.23	8.50±0.22	1.95±0.07
66	J0947+3905	23.03±0.21	22.74±0.17	23.35	23.95	3.82±0.33	1.00±0.01
67	UGC5272b	22.09±0.12	22.05±0.08	22.33	22.82	4.23±0.41	1.23±0.09
68	UGC5272	21.76±0.05	21.58±0.03	22.04	23.00	12.84±0.26	1.00±0.01
69	UGC5288	21.88±0.40	21.92±0.25	22.09	22.04	3.44±1.02	1.02±0.13
70	J0951+3842	22.47±0.06	22.39±0.03	22.72	22.79	5.13±0.26	1.16±0.04
71	J0954+3620	22.15±0.08	22.16±0.06	22.37	23.04	3.23±0.22	1.10±0.05
72	IC2520	19.69±0.07	18.72±0.07	20.22	20.29	7.26±0.36	1.32±0.05
73	J0956+2716	23.64±0.12	23.37±0.13	23.95	24.88	6.21±0.74	1.04±0.09
74	UGC5340	21.99±0.04	21.87±0.04	22.25	23.16	11.63±0.20	1.00±0.01
75	J0957+2745	21.68±0.12	21.54±0.16	21.95	22.64	2.47±0.25	1.05±0.06
76	UGC5354	21.42±0.06	20.87±0.06	21.82	22.42	13.98±0.78	1.11±0.04
77	PC0956+4751	22.33±0.24	21.93±0.06	22.68	24.14	5.19±0.84	1.03±0.08
78	J1000+3032	22.17±0.13	22.08±0.18	22.43	22.67	3.38±0.35	1.16±0.08
79	KUG0959+299	21.56±0.12	21.49±0.11	21.81	22.07	3.5±0.34	1.13±0.07
80	UGC5427	21.92±0.04	21.56±0.03	22.26	22.68	14.97±0.41	1.44±0.03
81	UGC5464	22.62±0.05	22.26±0.07	22.96	23.79	12.79±0.44	1.23±0.03
82	J1010+4617	21.25±0.14	21.18±0.04	21.50	23.00	1.85±0.24	1.03±0.08
83	UGC5540	21.63±0.13	21.23±0.23	21.98	23.25	12.03±1.13	1.09±0.06
84	HS1013+3809	21.44±0.56	21.66±0.85	21.60	22.02	2.98±1.02	0.97±0.14
85	J1019+2923	21.79±0.06	21.52±0.05	22.10	23.77	3.34±0.08	1.00±0.01