

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

*На правах рукописи*

*УДК 524.7:520.2/8*

**ТЕПЛЯКОВА Арина Леонидовна**

**ЭВОЛЮЦИЯ КАРЛИКОВЫХ ГАЛАКТИК И ЕЕ СВЯЗЬ С  
ОКРУЖЕНИЕМ**

(01.03.02 – астрофизика, радиоастрономия)

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

Нижний Архыз – 2012

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

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук  
С. А. Пустильник  
(Специальная астрофизическая  
обсерватория РАН,  
ведущий научный сотрудник)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор  
А. В. Засов  
(Государственный Астрономический  
институт им. Штернберга, МГУ,  
руководитель отдела Внегалактической Астрономии)

кандидат физико-математических наук  
А. И. Копылов  
(Специальная астрофизическая  
обсерватория РАН  
ведущий научный сотрудник)

Ведущая организация: Южный Федеральный Университет

Защита состоится "\_\_\_\_" апреля 2012 г. в \_\_\_\_ часов на открытом заседании  
Диссертационного совета Д 002.203.01 при Специальной Астрофизической  
Обсерватории РАН по адресу: 369167, КЧР, Зеленчукский район, пос.  
Нижний Архыз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан "\_\_\_\_" марта 2012 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета  
кандидат физ.-мат. наук \_\_\_\_\_ Майорова Е.К.

## Общая характеристика работы

### Актуальность проблемы

Хорошо известно, что взаимодействие галактик влияет на их эволюцию. Эволюция галактик в плотном окружении (скопления и группы) изучена уже достаточно хорошо (Haynes, Giovanelli & Chincarini 1984, Boselli & Gavazzi 2006). Но галактики в окружении с пониженной плотностью (пустоты или войды) если и изучались, то не с точки зрения эволюционных параметров.

К эволюционным параметрам галактик относятся:

- Содержание тяжелых элементов (массовая доля элементов тяжелее гелия,  $z$ . Для Солнца  $z=0.014$ )<sup>1</sup>. Чем больше их, тем дальше галактика продвинулась по пути эволюции.
- Массовая доля газа ( $f_{\text{gas}}$ , отношение полной массы газа к полной барионной массе). По современным представлениям галактики формируются как чисто газовые объекты, затем газ расходуется на звездообразование, и в процессе эволюции его становится все меньше и меньше.

Малометаллическими галактиками традиционно называли объекты с содержанием кислорода в межзвездном газе  $12+\log(\text{O}/\text{H}) < 7.65$  или  $Z < Z_{\odot}/10$ , см. например, обзор Кюнты и Остлина (Kunth & Ostlin 2000). Когда открыли первые такие галактики (в частности I Zw 18, открытую в начале 1970-х Сирлом и Саргентом (Searle & Sargent 1972)), они были редкими, выдающимися объектами. В связи с их необычными свойствами была выдвинута гипотеза об их молодости. На сегодня известно более сотни галактик с таким пониженным содержанием тяжелых элементов, однако абсолютное большинство их содержит старые звезды. Наблюдательно это проявляется в виде красных цветов периферийных областей диска, свободных от текущего или недавнего звездообразования.

Массовые исследования свойств дисковых галактик показывают, что их металличность коррелирует со светимостью и массой. Массивные галактики эволюционируют быстрее. Поэтому, чем меньше масса и светимость галактики, тем в среднем ниже ее металличность (т.н. down-sizing, см. например Pilyugin et al. 2011). Известно несколько галактик

<sup>1</sup>В данной работе чаще всего речь будет идти не о массовой доле тяжелых элементов, а об аналоге этого параметра, используемом для оценки металличности газа — содержании кислорода  $12+\log(\text{O}/\text{H})$ . Для Солнца мы принимаем  $12+\log\text{O}/\text{H} = 8.66$  согласно (Asplund et al. 2004).

очень низкой светимости в Местном Объеме (например, Leo A и UG-CA 292), которые, имея  $Z \sim Z_{\odot}/20$ , вполне укладываются в общую зависимость металличности от светимости. С другой стороны, небольшая доля известных карликовых галактик (таких как I Zw 18, SBS 0335–052 E и W) имеет металличности намного ниже, чем можно ожидать для их светимости и массы. Они демонстрируют наименьшие из известных для тысяч галактик металличности ( $Z \sim Z_{\odot}/50$ – $Z_{\odot}/20$ ) и очень большие массовые доли газа (до 95–99%). Такие редкие галактики естественно отнести к эволюционно-молодым. Их наблюдаемые свойства могут быть результатом как очень медленной эволюции и возможной потери части металлов, так и следствием формирования галактик и первых звезд с большим запозданием относительно стандартной эпохи, соответствующей возрастам галактик  $\sim 12$ – $13$  млрд.лет. Разделить эти варианты в принципе возможно, получив оценки возрастов наиболее старого звездного населения.

Очень редко малометаллические галактики демонстрируют очень голубые цвета, соответствующие звездам некосмологических возрастов, в частях диска, свободных от текущего или недавнего звездообразования а также от вклада небулярной эмиссии (I Zw 18 (Izotov & Thuan 2004), SBS 0335–052 (Pustilnik et al. 2004), DDO 68 (Pustilnik et al. 2005, Pustilnik et al. 2008)). Хотя уверенно говорить об отсутствии старого звездного населения можно только после разрешения объекта на звезды и фотометрии этих звезд, нетипичные цвета внешних частей служат указанием на то, что галактика заслуживает пристального изучения.

Из общих соображений понятно, что чем меньше масса галактики, тем она чувствительнее к внешнему воздействию. Поэтому если мы интересуемся тем, насколько отличается эволюция галактик в условиях, характерных для войдов, естественно обратиться к галактикам малых масс. Существуют разные определения понятия "войд". В зависимости от специфики исследования, войдами называют области пространства либо совершенно пустые (Tikhonov, Karachentsev 2006), либо не содержащие достаточно крупных объектов (Kauffmann & Fairall 1991). В моделях — темных гало с массой выше определенного предела, в наблюдательной астрономии — галактик ярче определенной светимости (часто этот предел выбирается равным  $L^{*2}$ ).

Изучение населения войдов затрудняет наблюдательная селекция. Большинство выборок галактик с известными лучевыми скоростям имеют

---

<sup>2</sup> $L^*$  — характеристическая величина в функции светимости (LF) галактик, выше которой число галактик падает экспоненциально.

Таблица 1: Параметры ближайших войдов

Designation	Size	RA	Dec	$cz$	$l$	$b$	$SGX$	$SGY$	$SGZ$
	км/с	hour	°	км/с	°	°	км/с	км/с	км/с
Cetus	500	02.0	-20	700	192	-72	100	-600	-200
Cepheus	500	23.5	+65	800	112	+05	700	0	300
Crater	500	11.5	-15	1500	126	-28	1300	-700	200
Volans	700	07.0	-70	800	281	-25	-600	-300	-500
Monoceros	1000	08.0	+05	800	216	+17	200	430	-970
Lynx-Cancer main	1200	07.9	+27	1030	194	+25	660	660	-930
Lynx-Cancer subvoid	870	08.5	+29	770	195	+34	470	674	-680
Inner Local Void	2000	18.5	-01	900	30	+02	-500	-200	700

ограничение по видимой звездной величине в районе  $m_B \sim 18$ . Это значит, что за пределами Местного Сверхскопления, где располагаются большинство крупных войдов (размером 30–50 Мпк), на расстояниях, соответствующих  $cz > 6000$  км/с, в выборки попадают в основном галактики не слабее  $-16$  абс.вел. в фильтре  $B$ . То есть, всего на 3–4 величины слабее  $M^*$  (так как  $L^*$  соответствует  $M_B^* \sim -20$ ).

В монографии Фэйрела (Fairall 1998) представлен список известных войдов в ближней части Метагалактики. В таблице 1 мы приводим координаты и размеры нескольких самых близких из них, с расстояниями до центров менее  $\sim 20$  Мпс. Параметры внутренней части Местного Войда даны в соответствии с работой Талли и др. (Tully et al. 2008). Параметры войда Lynx-Cancer и его подвойда даны в соответствии с описанием в статье Пустильника и Тепляковой (Pustilnik & Terliakova, 2011). Местный Войд ближе всего подходит к Местной Группе, но систематическое изучение эволюционных свойств галактик в нем затруднено, так как пока их там найдено совсем немного. Тем не менее, одна из представителей этого войда, карликовая иррегулярная галактика КК 246, исследованная в работе Крекель и др. (Kreckel et al. 2011), имеет один из наиболее протяженных HI дисков, что указывает на ее нетипичное состояние. Насонова и Караченцев (Nasonova & Karachentsev 2011) недавно изучили пекулярные скорости в окрестностях Местного Войда и представили список 16 галактик с абсолютными величинами  $M_B$  от  $-9.9$  до  $-18.7$ , которые попадают внутрь этого войда. Изучение этих галактик может дополнить выводы, полученные при исследовании выборки, представленной в данной работе.

Мы выбрали для изучения эффектов окружения в областях низкой плотности войд Lynx-Cancer, расположенный в области отрицательных

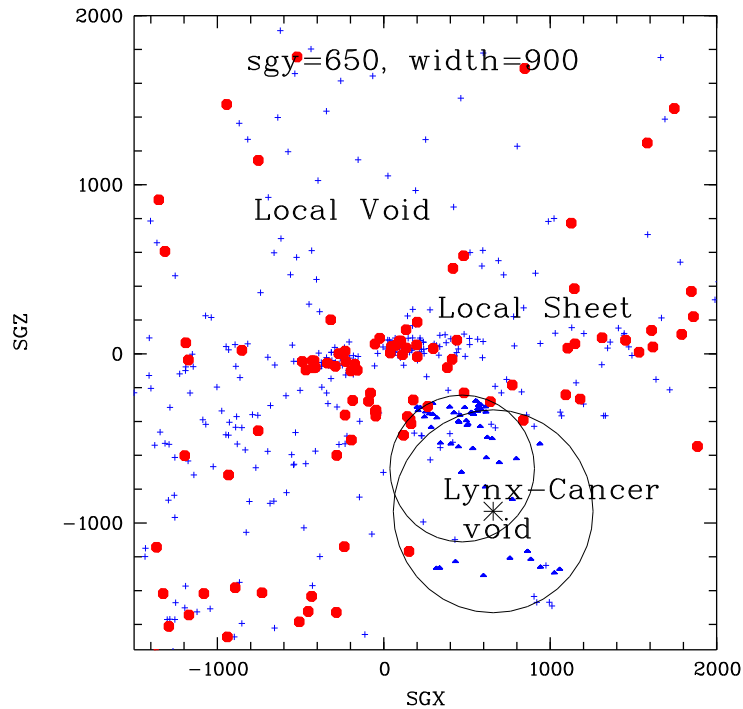
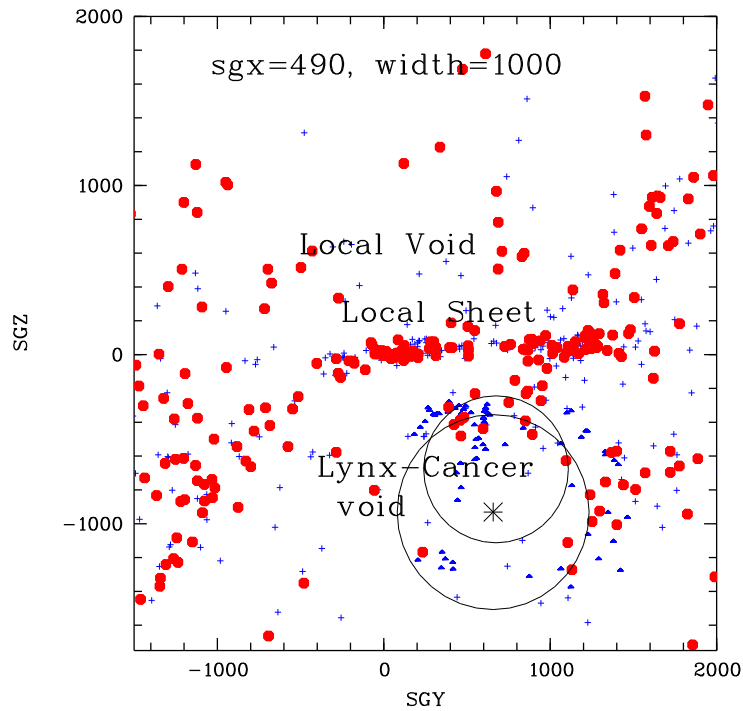


Рис. 1: Положение Lynx-Cancer войда относительно других структур ближней Вселенной — Местного Войда и Местного Слоя. *Вверху*: Проекция слоя пространства на плоскость SGY–SGZ (в км/с). Середина слоя соответствует  $SGX=490$  км/с, толщина  $\Delta SGX=1000$  км/с. *Внизу*: То же для плоскости SGX–SGZ. Середина слоя на  $SGY=650$  км/с, толщина  $\Delta SGY=900$  км/с. Жирные красные точки обозначают яркие ( $M_B < -19.0$ ) галактики. Мелкие синие крестики — слабые галактики с известными независимыми расстояниями (Tully et al. 2008). Синие треугольники — галактики Lynx-Cancer войда (не все). Проекции сферы главного войда Lynx-Cancer и его субвойда очерчены черным контуром. Центр главного войда обозначен звездочкой.

сверхгалактических  $Z$ , с противоположной стороны от Местного Слоя по отношению к войду Талли (Local Void). Этот выбор обусловлен тем, что, во-первых, данный войд расположен достаточно близко, следовательно, даже слабые галактики в нем будут доступны для наблюдения, а во-вторых, эта область неба хорошо покрывается обзором SDSS и слепыми HI-обзорами, результаты которых ожидаются в ближайшие годы.

В работах последних лет было отмечено, что ряд очень низкометаллических (XMD) галактик находятся внутри войдов. К ним относятся голубые компактные галактики SBS 0335–052 (Pustilnik et al. 2004, характеристика окружения — в Peebles 2001), HS 0822+2542 (Pustilnik et al. 2003), HS 0837+4717 (Pustilnik et al. 2004), HS 2134+0040 и HS 2236+1344 (Pustilnik et al. 2006). Галактика SBS 0335–052 также имеет цвета внешних частей, указывающие на сравнительно молодой возраст старого звездного населения. Эти факты можно рассматривать как свидетельства в пользу того, что галактики в войдах эволюционируют медленнее. Однако это были отдельные примеры, из которых еще нельзя делать статистических выводов. К тому же, все это были галактики одного типа — BCG, а значит, нельзя было с уверенностью утверждать, что наблюдаемый эффект не является эффектом селекции. Кроме очень низкометаллических BCG, в войдах были обнаружены галактики SAO 0822+3545 и DDO 68, не относящиеся к BCG, но, как и SBS 0335–052, не показывающие существенного вклада излучения старых звезд с типичными возрастaми в 10 млрд.л.

Нам необходима была достаточно большая выборка галактик войда, во-первых, чтобы исследовать и более типичное население, во-вторых, чтобы иметь материал для статистики.

Такая выборка была создана в рамках данного исследования (Pustilnik & Terliakova, 2011). В нее вошли 79 галактик до  $-12$  абс.зв.вел. в фильтре  $B$ , преимущественно карликовые иррегулярные и спирали поздних типов. Существенная неполнота выборки начинается с  $M_B \sim -14$ .

## Цели и задачи исследования

Целями данной работы являются:

- Определение параметров близкого войда Lynx-Cancer и создание выборки галактик, его населяющих.
- Оценки металличности газа для галактик этого войда и сравнение их

по этому параметру с галактиками в более плотном окружении.

- Детальное спектральное и фотометрическое исследование наиболее интересных галактик войда, отличающихся низкой металличностью и/или необычно голубыми цветами.

## Научная новизна

- Сформирована выборка 79 маломассивных галактик в войде, которая является самой большой и глубокой на данный момент.
- Впервые по выборке из полусотни галактик войда Lynx-Cancer показано, что галактики в этом войде имеют систематически пониженное содержание тяжелых элементов по сравнению с галактиками из более плотных областей.
- Открыто 15 галактик с металличностью  $Z < 1/10 Z_{\odot}$ , и среди них четыре с металличностями вблизи рекордно низких  $1/35 Z_{\odot} \lesssim Z \lesssim 1/20 Z_{\odot}$ : SDSS J0926+3343, J0737+4724, J0744+2508, J0852+1350.
- Для объектов SDSS J0926+3343, J0723+3621, J0723+3622, J0737+4724, J0852+1350, J0852+1351 впервые сделана детальная поверхностная фотометрия в фильтрах  $u, g, r, i$ . Обнаружено, что у галактик SDSS J0926+3343, J0723+3622, J0737+4724 цвета внешних частей соответствуют возрастам  $\sim 1-3$  млрд.л.
- Получено новое, более точное значение металличности необычной галактики And IV.

## Основные положения, выносимые на защиту

1. Описание Lynx-Cancer войда, определение его положения на небесной сфере, расстояния до центра и размеров. Создание выборки 79 галактик, находящихся в нем, и описание ее основных параметров. Построение нескорректированной функции светимости галактик войда и анализ эффектов селекции, которые влияют на полноту выборки.
2. Результаты спектроскопии на БТА галактик Lynx-Cancer войда, оценки металличностей по спектральным данным БТА и SDSS. Сравнение содержания кислорода в 48 галактиках войда с аналогичными данными для галактик в более плотном окружении и



вывод о том, что галактики в Lynx-Cancer войде имеют систематически более низкую металличность.

3. Результаты глубокой *ugri* поверхностной фотометрии шести самых необычных галактик войда, включая два самых низкометаллических объекта ближней Вселенной — DDO 68 и SDSS J0926+3343 — а также J0723+3621, J0723+3622, J0737+4724 и J0852+1350. Оценка возраста их наиболее старого видимого звездного населения. Вывод об эволюционной молодости (очень низкой металличности, высокой массовой доле газа и отсутствии видимых признаков звездного населения возрастом  $\sim 10$  млрд.л.)  $\sim 10\%$  галактик войда — первое наблюдательное указание на необычную эволюцию галактик в войде.
4. Открытие в галактике DDO 68 массивной переменной звезды на поздней стадии эволюции (типа luminous blue variable — LBV), которая образовалась из вещества с металличностью  $Z = Z_{\odot}/33$ , то есть, в несколько раз ниже, чем все известные до сих пор звезды этого типа. Дальнейшее изучение этого редкого объекта является перспективным с точки зрения проверки моделей эволюции массивных звезд при очень низких металличностях.
5. Получение правильного значения O/H в наиболее богатой газом галактике Местного Объемы And IV ( $12 + \log(O/H) = 7.50 \pm 0.06$ ), что позволяет отнести ее к немногочисленной группе известных низкометаллических галактик и приводит к намного лучшему соответствию ее эволюционного статуса по содержанию газа и по его металличности.

## Апробация результатов

Результаты данной работы докладывались на следующих конференциях:

- Международная конференция "Физика космоса", Нижний Архыз, май 2007 г.
- Международная конференция "Ближние карликовые галактики", Нижний Архыз, сентябрь 2009 г.
- Всероссийская Астрономическая Конференция, Нижний Архыз, август 2010 г.

- Конференция "Окружение и формирование галактик: 30 лет спустя", Лиссабон, сентябрь 2010 г.
- Ежегодных конкурсах-конференциях САО февраль 2008, 2009, 2011 гг.

**Основные результаты, полученные в диссертации, представлены в следующих работах:**

- Pustilnik S. A., Tepliakova A. L., Kniazev A. Y., Burenkov A. N. Andromeda IV: A new local volume very metal-poor galaxy. — *Astrophysical Bulletin* 2008, Volume 63, Issue 2, pp. 102–111
- Pustilnik S. A., Tepliakova A. L., Kniazev A. Y.: DDO 68: new evidences for galaxy youth. — *Astronomy Letters* 2008, v. 34, pp.457–467
- Pustilnik S. A., Tepliakova A. L., Kniazev A. Y., Burenkov A. N.: Discovery of a massive variable star with  $Z = Z_{\odot}/36$  in the galaxy DDO68. — *MNRAS* 2008, Volume 388, pp. L24–L28
- Pustilnik S. A., Tepliakova A. L., Kniazev A. Y., Martin J.-M., Burenkov A. N.: SDSS J0926+3343: a nearby unevolved galaxy. — *MNRAS* 2010, Volume 401, p.333–341
- Pustilnik S. A., Tepliakova A. L.: Study of galaxies in the Lynx-Cancer void. I. Sample description. — *MNRAS* 2011, Volume 415, Issue 2, pp. 1188–1201
- Pustilnik S. A., Tepliakova A. L., Kniazev A. Y.: Study of galaxies in the Lynx-Cancer void. II. The element abundances. — *Astrophysical Bulletin* 2011, Volume 66, No 3, pp.255–292
- Pustilnik S. A., Martin J.-R., Tepliakova A. L., Kniazev A. Y.: Study of galaxies in the Lynx-Cancer void. III. New extreme LSB dwarfs. — *MNRAS* 2011, Volume 417, pp. 1335–1349

### **Личный вклад автора**

В перечисленных выше работах автору принадлежат:

Определение параметров Lynx-Cancer войда, создание выборки галактик в войде и компиляция их основных параметров, а также предварительный анализ свойств выборки — равной мере с соавтором этой работы Пустильником С.А.

Первичная обработка всех спектров, полученных на БТА. Последующий анализ спектров, определение физических параметров и O/H, сравнение с галактиками в более плотном окружении и выводы о систематически пониженной металличности галактик войда — наравне с Пустильником С.А.

Поверхностная фотометрия всех объектов. Анализ результатов измерений — наравне с соавторами.

Вклад во все этапы обработки и анализа данных по LBV-звезде в галактике DDO 68 — наравне с С.А. Пустильником.

Первичная обработка спектров галактики And IV. Последующий анализ спектров — наравне с основным соавтором С.А. Пустильником.

**Достоверность и обоснованность** результатов, представленных в диссертации, определяется надежностью и точностью использованных методов.

Достоверность определения параметров Lynx-Cancer войда а также списка галактик, отнесенных к его населению, определяется хорошей точностью измерения лучевых скоростей галактик и использованием поправки за пекулярную скорость в данной области местной Вселенной, открытой Талли и др (Tully et al. 2008). Точность поправки была дополнительно проверена нами на контрольной выборке галактик с известными независимыми расстояниями.

Достоверность оценок содержания кислорода в галактиках Lynx-Cancer войда (а также в галактике And IV) определяется надежностью классического метода электронной температуры а также современных эмпирических и полуэмпирических методов (Izotov & Thuan 2007, Pilyugin & Mattsson 2010). Точность эмпирического и полуэмпирического метода была дополнительно проверена по контрольной выборке галактик с известными оценками содержания кислорода, сделанными классическим методом.

Достоверность оценок возраста старого звездного населения в галактиках определяется надежностью методов поверхностной фотометрии (Kniazev et al. 2004) в комбинации с использованием хорошо известного пакета программ, моделирующих эволюционные треки (PEGASE, Fioc M. & Rocca-Volmerange B. 1999).

Достоверность открытия LBV в галактике DDO 68 подтверждена последующими исследованиями этого объекта с более высоким спектральным разрешением (Izotov & Thuan 2008).

Выводы о систематически пониженной металличности галактик в войде по сравнению с галактиками в окружении обычной плотности и об эволюционной молодости некоторой части ( $\sim 10\%$ ) населения войда основаны на достаточно большом количестве наблюдательного материала и на сравнении этого материала с достоверными результатами исследования карликовых галактик в более плотном окружении (Lee et al. 2003, van Zee & Haynes 2006, van Zee et al. 2006).

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из Введения, пяти глав, Заключение, списка цитируемой литературы и Приложения, содержащего 5 рисунков и 15 таблиц.

Во **Введении** приводится обоснование актуальности работы. Обсуждаются ее цель, новизна полученных результатов и основные положения, выносимые на защиту, приводится список работ, в которых опубликованы результаты диссертации.

**Первая** глава посвящена описанию наблюдений и обработки. Мы использовали наблюдательный материал, полученный на шестиметровом телескопе CAO (БТА) с прибором SCORPIO в режиме длинной щели. Для части объектов использованы спектры из базы данных SDSS. Также мы использовали прямые изображения SDSS в фильтрах  $u, g, r, i$ . Описаны основные этапы обработки наблюдательных данных с применением пакетов MIDAS и IRAF.

Во **второй** главе детально описана процедура создания выборки галактик Lунх-Сансер войда. Вначале были отобраны галактики и группы галактик, которые должны играть роль границ войда. Это достаточно яркие (массивные) объекты с абсолютными величинами  $M_B > -19$ , лежащие на небе между  $06^h$  и  $11^h$  по прямому восхождению и выше  $0^\circ$  по склонению, с гелиоцентрическими лучевыми скоростями до 1800 км/с. Когда речь идет о пространственном распределении галактик, желательно знать независимые расстояния до них, а не только лучевые скорости. Для части галактик мы использовали расстояния, полученные по зависимости период-светимость для цефеид, по положению ветви красных гигантов (TRGB), методом флуктуаций поверхностной яркости (SBF) и методом Талли-Фишера (в случае достаточно малых ошибок). Для тех, для которых независимые расстояния неизвестны, мы использовали их лучевые скорости с учетом возможных поправок за крупномасштабное движение галактик

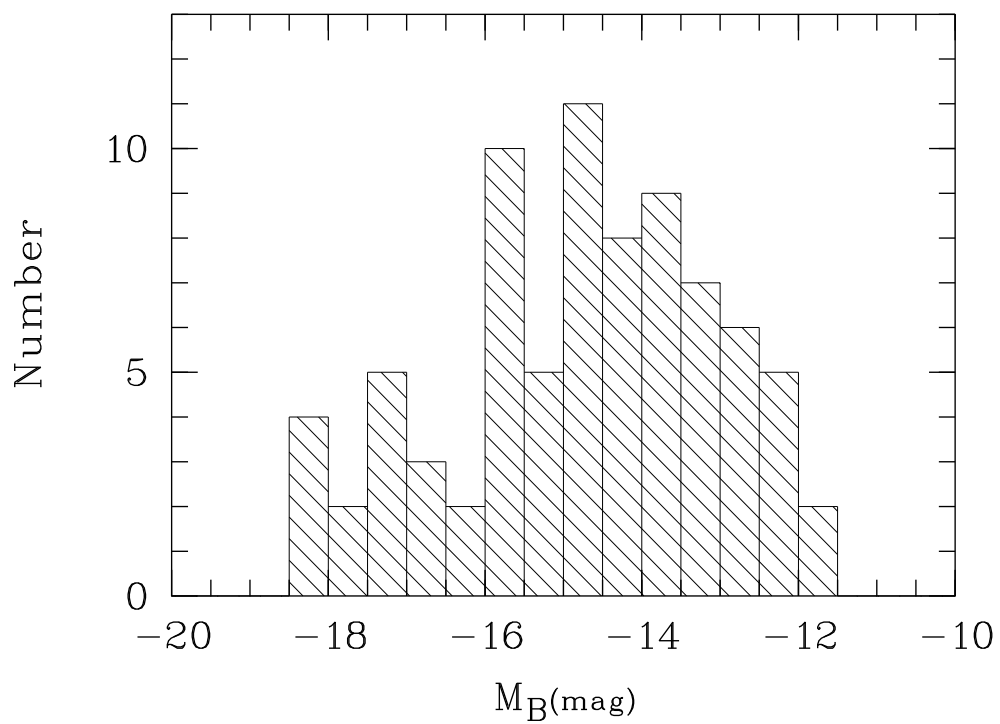
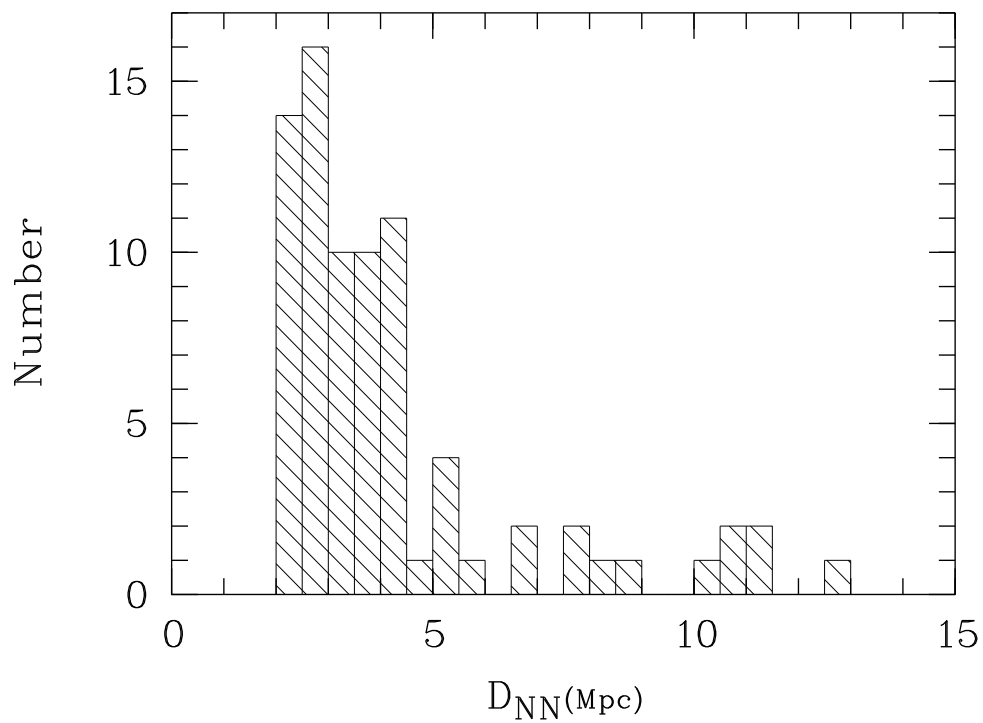


Рис. 2: *Вверху*: распределение расстояний до ближайшей яркой галактики ( $D_{NN}$ ) для галактик в войде. *Внизу*: распределение абсолютных звездных величин  $M_B$  для них же.

в этой области неба (Tully et al. 2008). Для галактик, входящих в группы и пары, мы принимали расстояние до группы за расстояние до каждой галактики.

Затем методом вписывания максимальных пустых сфер были определены координаты центра войда и его размер. Из выборки ярких галактик выброшены те, которые не находятся вблизи границ этой пустой области.

Затем в изучаемой области была рассмотрена выборка всех галактик с  $M_B > -19$ , и исключены из нее все объекты, имеющие достаточно близких соседей "высокой" светимости. Эта процедура проводилась в два этапа. Вначале мы отобрали все галактики, чье проекционное расстояние до ближайшей яркой составляет более 1 Мпк. Такие объекты считались заведомо гравитационно несвязанными с яркими (массивными) галактиками. Для тех, для которых оно оказывалось меньше, применяли дополнительный критерий отбора, основанный на результатах работы Прада и др. (Prada et al. 2003), которые исследовали спутники изолированных галактик. Согласно их данным, дисперсия  $\sigma$  лучевых скоростей спутников относительно хозяйских галактик со светимостью  $L^*$  составляет 120 км/с на расстоянии 20 кпк, 80 км/с на расстоянии 200 кпк и 60 км/с на 350 кпк соответственно. Мы отобрали галактики, для которых разница лучевых скоростей между ними и их ближайшими яркими соседями составляет больше  $2 \times \sigma$ .

После этого для каждой галактики было вычислено трехмерное расстояние до ближайшей яркой галактики или группы ( $D_{NN}$ ), и те карликовые галактики, для которых оно составило меньше 2 Мпк, были исключены из выборки как недостаточно удаленные от агрегатов, включающих яркие галактики. Оставшиеся после этой селекции можно уверенно считать удаленными от массивных галактик или групп.

Распределение галактик войда по абсолютной величине имеет максимум вблизи  $M_B = -14$ . Так как модели и данные других выборок предсказывают, что функция светимости в этом диапазоне должна расти, это является указанием на существенную неполноту нашей выборки для  $M_B \geq -14$ .

Распределение галактик по  $D_{NN}$  таково, что для примерно половины всех объектов этот параметр составляет от 2 до 3.5 Мпк. Это хорошо согласуется с теоретическими предсказаниями о том, что галактики в войдах должны располагаться в основном вблизи их границ (Gottlöber et al. 2003).

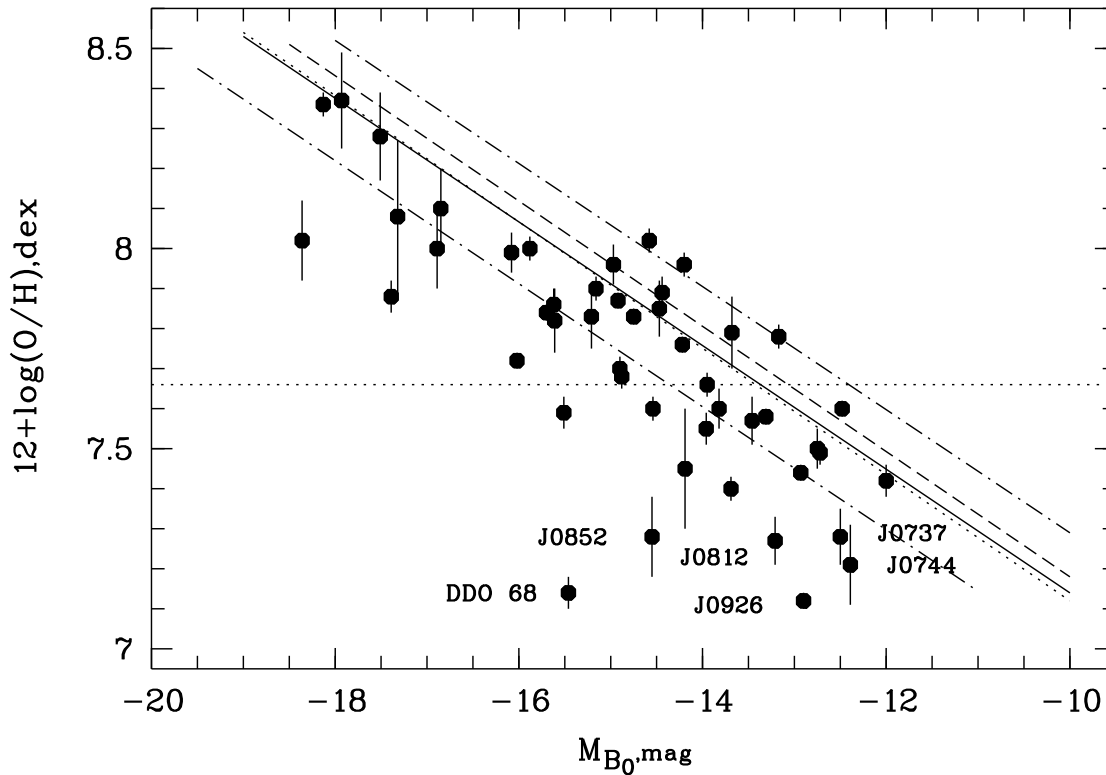


Рис. 3: Соотношение светимость-металличность ( $L-Z$ ) для 48 галактик войда Лупу-Сансер. Сплошной, штрихованной и пунктирной линиями показаны известные линейные приближения для  $L-Z$  соотношения, полученные для 3-х выборок: изолированные галактики поздних типов (van Zee & Haynes 2006), близкие dI галактики (van Zee et al. 2006) и близкие dI и I галактики из выборки Ли и др. (Lee et al. 2003). Две штрих-пунктирные линии проведены на 0.15 dex ниже и выше сплошной линии, для которой (согласно van Zee & Haynes 2006) среднеквадратичное отклонение составляет 0.15 dex. Если бы распределение галактик в этом войде совпадало с тем, для которого получено ‘стандартное’  $L-Z$  соотношение, можно было бы ожидать, что ниже нижней штрих-пунктирной линии попадет только  $\sim 1/6$  от всех 48 галактик, т.е. 8 штук. В реальности в эту область диаграммы  $M_B - O/H$  попадает 20 галактик войда.

**Третья** глава посвящена измерению содержания кислорода в галактиках Lynx-Cancer войда из выборки, описанной во второй главе, и сравнению полученных данных с результатами изучения похожих галактик в более плотном окружении. В сумме, были получены или взяты из литературы величины  $O/H$  для 48-ми галактик войда. Для 21 из них  $O/H$  были найдены по спектрам, полученным на БТА, еще для 21 были использованы спектры из базы данных обзора SDSS и для 6 галактик оценки  $O/H$  взяты из литературы. Мы сравнили наши результаты с данными по галактикам в окружении средней плотности, полученными ранее ван Зее и др. (van Zee & Haynes 2006, van Zee et al. 2006) и Ли и др. (Lee et al. 2003). После учета небольшой разницы между старой и новой шкалой  $O/H$  (Izotov et al. 2006) мы нанесли наши результаты на диаграмму светимость-металличность. Соотношение  $O/H$  и  $M_B$  для галактик контрольных выборок описывается линейной зависимостью. Галактики войда демонстрируют зависимость с тем же наклоном, но лежат в среднем ниже. Даже если исключить из выборки явно отскакивающие точки, соответствующие объектам с экстремально низкой металличностью, смещение линии, описывающей зависимость светимость-металличность для галактик войда, соответствует понижению металличности примерно на 30% для каждой светимости по сравнению с галактиками в окружении обычной плотности. Также в войде открыто несколько галактик с предельно низкими металличностями, которые лежат на этой диаграмме вне общего тренда, и, вероятно, имеют нетипичную историю звездообразования. То, что такое количество этих довольно редких объектов находится в сравнительно небольшом объеме близкого войда, указывает на связь между разреженным окружением и замедленной эволюцией карликовых галактик.

В **четвертой** главе описаны детальные исследования наиболее интересных объектов Lynx-Cancer войда. Все они отличаются очень низкой металличностью  $Z \lesssim 1/20 Z_{\odot}$  (не считая одной, для которой нам не удалось уверенно оценить металличность), высокой массовой долей газа ( $f_{\text{gas}} = 0.92\text{--}0.98$ ), а некоторые также имеют голубые цвета внешних частей, указывающие на то, что возраст самого старого звездного населения в них, в отличие от подавляющего большинства других галактик, существенно меньше космологического.

DDO 68 — одна из двух (вместе с SDSS J0926+3343) самых низометалличных галактик Местного Объема. Содержание кислорода



в ней  $12+\log(\text{O}/\text{H}) = 7.14$ . Сильно возмущенная морфология при отсутствии галактик-соседей указывает на то, что скорее всего она является результатом слияния. Фотометрические наблюдения на БТА в фильтрах  $V$  и  $R$  показали, что подстилающий диск галактики имеет очень голубые цвета, указывающие на сравнительно молодой возраст старого звездного населения. Мы предприняли независимое фотометрическое исследование этого объекта на основе прямых изображений SDSS в фильтрах  $u, g, r, i$ . Сравнение цветов подстилающего диска с модельными треками для трех разных сценариев звездообразования (постоянное, мгновенная вспышка и мерджинг) дает оценку возраста самого старого звездного населения  $\sim 1$  млрд.л. Также мы оценили массу звезд в галактике и, пользуясь данными наблюдений в H $\alpha$ , вычислили массовую долю газа.

Во время спектральных наблюдений DDO 68 в 2008 году в одной из областей звездообразования у эмиссионных линий водорода и гелия обнаружили широкие компоненты, которых не было на спектрах 2005 года. Также изменилась звездная величина этой HII-области. Мы исследовали спектр, вычтя из него небулярную составляющую, и сделали вывод, что транзиентный компонент в спектре и повышение светимости может объясняться присутствием в этой HII-области массивной переменной звезды (LBV). Звезды этого типа относятся к весьма короткой стадии эволюции очень массивных звезд после главной последовательности. Поэтому даже в нашей Галактике их найдено совсем немного. Различия в свойствах таких звезд при малых металличностях важны для проверки современных моделей эволюции звезд. В нашей Галактике такие звезды сформировались из газа с металличностью порядка солнечной. Из других галактик, где такие звезды были обнаружены, наиболее низкую металличность имеют MМО ( $Z \sim Z_{\odot}/8$ ) и PHL 293B ( $Z \sim Z_{\odot}/9$ ). LBV звезда, открытая нами в DDO 68, образовалась из газа с  $Z = Z_{\odot}/33$ . Поэтому более детальное изучение этой LBV уже ведется другими группами (Vomans & Weis 2011).

Галактика очень низкой поверхностной яркости SDSS J0926+3343 была открыта в обзоре SDSS и наблюдалась нами на БТА с длинной щелью среди других галактик Lynx-Cancer войда. Мы впервые измерили ее металличность, которая оказалась равной  $12+\log(\text{O}/\text{H}) = 7.12 \pm 0.02$ . Таким образом, J0926+3343 является самой низкометалличной галактикой в Местном Объеме. Поверхностная фотометрия этой галактики в фильтрах  $u, g, r, i$  показывает, что возраст самого старого видимого звездного

населения в ней составляет 1–3 млрд лет.

Кроме DDO 68 и J0926+3343, в этом войде найдено еще несколько LSB карликов с металличностью  $Z < Z_{\odot}/20$  и/или высокой массовой долей газа и необычно голубыми цветами. Мы приводим для них результаты детальной поверхностной фотометрии, определение O/H, оценки массовой доли газа. Для двух из них — SDSS J0737+4724 и J0852+1350 — в базе данных SDSS имелись измеренные лучевые скорости, и согласно им эти галактики были включены в выборку. Для J0723+3621 лучевая скорость была определена по наблюдениям на БТА в рамках поиска новых LSBD галактик в этом войде. Для двух других очень слабых LSB галактик: J0723+3622 и J0852+1351 принадлежность к войду также была подтверждена по результатам спектральных наблюдений на БТА. Они оказались физическими компаньонами J0723+3621 и J0852+1350 соответственно.

**Пятая** глава посвящена галактике And IV. Эта близкая галактика привлекла наше внимание из-за своего рекордно высокого содержания нейтрального газа  $M(\text{HI})/L_B = 13$ , что может быть указанием на ее необычный эволюционный статус. Авторы ее наиболее полного исследования (Ferguson et al. 2000) оценили содержание кислорода в ней как довольно высокое:  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 7.9$ , но мы наблюдали эту галактику на БТА и провели более тщательное спектральное исследование двух HII-областей, которое показало, что металличность на самом деле составляет  $7.49 \pm 0.06$  и  $7.55 \pm 0.23$  для одной и другой области соответственно.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

В приложении к диссертации представлены следующие результаты по галактикам Lynx-Cancer войда:

- Полный список ярких галактик и групп, ограничивающих войд. Для всех галактик даны координаты, скорости, расстояния, выраженные в км/с (с указанием способа определения расстояния), звездные величины (с указанием источника).
- Спектры 39 галактик войда, для которых получены оценки O/H в третьей главе.
- Спектры 9 галактик, лежащих вне войда, для сравнения.
- Таблицы интенсивностей эмиссионных линий для галактик войда с известными значениями O/H, таблицы электронной температуры, электронной плотности и содержаний кислорода для них же.

## Список литературы

- Asplund M., Grevesse N., Sauval A.J., Allende Prieto C., & Kiselman D., — *Astronomy and Astrophysics* **417**, 751 (2004)
- Bomans, Dominik J.; Weis, Kerstin — *Société Royale des Sciences de Liège, Bulletin*, **80**, 341 (2011)
- Boselli A., Gavazzi G., *PASP*, **118**, 517, 2006
- Fairall A., 1998: Large-Scale Structures in the Universe — Wiley-Praxis, 196 pp.
- Fioc M. & Rocca-Volmerange B. — arXiv:astro-ph/9912179 (1999)
- Gottlöber, Stefan; Lokas, Ewa L.; Klypin, Anatoly; Hoffman, Yehuda: — *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **344**, Issue 3, 715 (2006)
- Haynes M.P., Giovanelli R., & Chincarini G.L.: — *Annual review of astronomy and astrophysics.*, **22**, 445, (1984)
- Izotov Y.I., & Thuan T.X., — *Astrophysical Journal*, **616**, 768 (2004)
- Izotov Y.I., Stasinska G., Meynet G., et al., — *Astronomy and Astrophysics*, **448**, 955 (2006)
- Y.I. Izotov, and T.X. Thuan, : — *Astrophysical Journal*, **665**, 1115 (2007)
- Y.I. Izotov, and T.X. Thuan, : — *Astrophysical Journal*, **690**, 1797 (2008)
- Karachentsev, I. D.; Makarov, D. I.; Karachentseva, V. E.; Melnyk, O. V. — *Astrophysical Bulletin* **66**, issue 1 ,1 (2011)
- Kauffmann, G.; Fairall, A. P. — *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **248**, 313, 1991
- Kniazev A.Y., Grebel E.K., Pustilnik S.A., Pramskij A.G., Kniazeva T.F., Prada F., & Harbeck D., *Astronomical Journal*, **127**, 704, 2004
- Kreckel, K.; Peebles, P. J. E.; van Gorkom, J. H.; van de Weygaert, R.; van der Hulst, J. M. — *Astronomical Journal*, **141**, 6, 204 (2011).
- Kunth, D.; Ostlin, G. — *The Astronomy and Astrophysics Review*, **10**, 1 (2000)
- Lee H., et al.: — *Astronomical Journal*, **125**, 146, 2003
- Nasonova O.G. & Karachentsev I.D. — *Astrophysics*, **54**, 1 (2011)
- Peebles P.J.E., — *Astrophysical Journal*, **557**, 459 (2001)
- L.S. Pilyugin and L. Mattsson,: — *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **412**, 1145 (2010)
- Pilyugin, Leonid S.; Thuan, Trinh X.: — *The Astrophysical Journal Letters*, **726**, issue 2, L23 (2011)
- Prada F., Vitvitska M., Klypin A., et al.: *Astrophysical Journal*, **598**, 260 (2003)
- Pustilnik S.A., Kniazev A.Y., Pramsky A.G., Ugryumov A.V., Masegosa J.: — *Astronomy and Astrophysics*, 409, 917, 2003
- Pustilnik S.A., Kniazev A.Y., Pramsky A.G., Izotov Y.I., Foltz C., Brosch N.,

- Martin J.-M., Ugryumov A., — *Astronomy and Astrophysics*, **419**, 469 (2004)
- Pustilnik S.A., Pramskij A.G., Kniazev A.Y., *Astronomy and Astrophysics*, **425**, 51 (2004)
- Pustilnik S.A., Kniazev A.Y., Pramskij A.G., — *Astronomy and Astrophysics*, **443**, 91, (2005)
- Pustilnik S.A., Engels D., Kniazev A.Y., Pramskij A.G., Ugryumov A.V., Hagen H.-J., *Astronomy Letters* **32**, 228 (2006)
- Pustilnik S.A., Tepliakova A.L., Kniazev A.Y., — *Astronomy Letters* **34**, 457 (2008)
- Pustilnik S.A., Tepliakova A.L., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 415, 1188 (2011)
- L. Searle, and W. L. W. Sargent, — *Astrophysical Journal* **173**, 25 (1972)
- Tikhonov A.V., Karachentsev I.D., *The Astrophysical Journal*, **653**, 969 (2006)
- Tully R.B., Shaya E.J., Karachentsev I.D., Courtois H.M., Kocevski D.D., Rizzi L., Peel A., — *Astrophysical Journal* **676**, 184 (2008)
- van Zee L., Haynes M.P.: — *Astrophysical Journal*, **636**, 214 (2006)
- van Zee L., Haynes M.P., Skillman E.: — *Astrophysical Journal*, **637**, 269 (2006)





Бесплатно