

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

имени П.К. Штернберга

На правах рукописи

Прошина Ирина Сергеевна

**Комплексное исследование звездообразования
в галактиках раннего типа**

1.3.1 — Физика космоса, астрономия
(01.03.02 – Астрофизика и звёздная астрономия)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
д.ф.-м.н. О.К. Сильченко

Москва – 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Глава 1. История обнаружения газа в галактиках раннего типа	12
1.1 Атомарный водород	12
1.2 Молекулярный газ	16
1.3 Ионизованный газ и следы звездообразования	21
1.4 Возможные источники газа в галактиках раннего типа	26
Глава 2. Исследование историй звездообразования в S0-галактиках	34
2.1 От звёздных колец к звездообразующим кольцам	34
2.2 Наблюдательные данные и их обработка	36
2.3 Анализ спектральных данных: кинематика звёзд и газа и их металличность	38
2.4 Изофотный анализ: структура галактик	48
2.5 Темпы современного звездообразования: алгоритм и результаты	51
2.6 Выводы по Главе 2: эволюционные сценарии.	60
Глава 3. S0-галактики с противоположным вращением газа и звёзд	66
3.1 Галактика IC 560 со звездообразованием в околядерном кольце.	67
3.1.1 Наблюдательные данные и их первичная обработка	67
3.1.2 Кинематика и свойства звёзд и ионизованного газа и структура галактики	67
3.2 Галактика NGC 4513 со звездообразованием во внешнем кольце	73
3.2.1 Наблюдательные данные и их первичная обработка	73
3.2.2 Структура галактики, кинематика и свойства звёзд и газа	74
3.3 Выводы по Главе 3: сопоставление темпов звездообразования и источники газа	82
Глава 4. Молодые звездообразующие комплексы в галактиках раннего типа	88
4.1 Наблюдения и обработка данных	88
4.2 Молодые звёздные комплексы в эллиптической (?) галактике NGC 5173	89
4.3 Регулярно расположенные звездообразующие комплексы в кольце S0-галактики NGC 4324	97
4.4 Выводы по Главе 4: сравнение темпов звездообразования и размеров газо-звёздных комплексов	106
Заключение	114
Список литературы	117

Введение

Актуальность темы исследования

В 1936 году Эдвином Хабблом была опубликована морфологическая классификация галактик [1], которая делит галактики на три типа по их внешнему виду. И в течение прошедших восьмидесяти пяти лет астрономы непрерывно и упорно изучают структуру, кинематику и свойства звёздного населения галактик; а ввод в строй крупных радиотелескопов позволил астрономам изучать кинематику и распределение газовых компонент галактик. Стало ясно, что галактики различаются не только по внешнему виду, но и по характеристикам своих звёздных и газовых компонент, а также по темпам звездообразования как в современную эпоху, так и на далёких красных смещениях (т. е. в более ранние эпохи). Пожалуй, правильнее сказать, что внешний облик галактики отражает характеристики её звёздного населения и газового компонента и их эволюцию; а эволюция характеризуется темпами звездообразования — процесса преобразования газовой составляющей галактики в звёздное население. Однако до сих пор остаётся открытым и весьма дискуссионным вопрос о том, чем именно определяется морфологический тип галактики: начальными условиями (т. е. условиями формирования) или эволюцией (обзор существующих концепций и теорий формирования галактик приведён в книге О. К. Сильченко [2]). До сих пор нет единой, всеми принятой теории, способной охватить все наблюдательные факты и тем самым дать ответ на этот актуальный вопрос. И причина, очевидно, в том, что на морфологию галактик влияет множество факторов. И, следовательно, нужны более всесторонние исследования, нужны новые наблюдательные факты, позволяющие выявить все факторы и тем самым способствующие развитию теории формирования и эволюции галактик.

Предметом данного диссертационного исследования является процесс звездообразования, протекающий в некоторых галактиках раннего типа. Галактиками раннего типа Э. Хаббл назвал эллиптические (E) и линзовидные (S0) галактики. Они отличаются друг от друга по структуре: эллиптические галактики имеют сфероидальную или триаксиальную структуру, а линзовидные галактики, помимо балджа — сфероидальной структуры в центре, имеют явно и дисковую составляющую. На классификационной схеме Хаббла, имеющей вид камертона, линзовидные галактики располагаются между эллиптическими и спиральными галактиками. Общим внешним признаком эллиптических и линзовидных галактик является их однородно красный цвет, который обусловлен преобладанием старого звёздного населения, а, значит, как долгое время полагали астрономы, и отсутствием текущего звездообразования. Поскольку звёзды

образуются из газа, то отсутствие текущего звездообразования астрономы поспешили связать с отсутствием газа. Однако с начала 70-х годов XX века стали появляться результаты наблюдений в радиодиапазоне, которые показали, что в некоторых галактиках раннего типа присутствует газ, как нейтральный [3 — 23], так и молекулярный [24 — 36]. Анализ оптических спектров галактик раннего типа показал в некоторых из них наличие ионизованного газа [37 — 44]. А с конца 80-х годов XX века стали появляться сообщения о наблюдении в некоторых галактиках раннего типа признаков текущего [44 и приведённые там ссылки; 45] или недавнего звездообразования [46 — 49]. Таким образом, обзоры в линиях радиодиапазона показали наличие значительного количества холодного газа в дисках некоторых галактик раннего типа; но масштабное звездообразование в них отсутствует, и причины его отсутствия пока не ясны.

Наличие газа является *необходимым* условием для протекания звездообразования, но *недостаточным*. На процесс звездообразования влияет множество факторов, среди которых главными, как подчёркивают МакКи и Острайкер [50], являются турбулентность, магнитные поля, самогравитация. Причём авторы обращают внимание, что турбулентность играет двойную роль: с одной стороны, создаёт избыточную плотность, вызывающую гравитационное сжатие или коллапс, и, с другой стороны, противодействует эффектам гравитации в этих сверхплотных областях. Рассматривая современное понимание процесса звездообразования в своей большой обзорной статье 2007 года [50], МакКи и Острайкер делят его на *мелкомасштабное* (т. е. на масштабах от плотных ядер отдельных молекулярных облаков до протозвёздных систем, доступных наблюдению в Млечном Пути, что позволяет исследовать условия в конкретных очагах звездообразования) и *крупномасштабное* (когда изучаются интегральные характеристики совокупности областей звездообразования в других (более далёких) галактиках) и рассматривают их по отдельности.

О ключевой роли линзовидных галактик в выяснении механизмов инициирования или остановки звездообразования на масштабах галактик говорится в работе Салима и др. [49], поскольку эти регулятивные механизмы трудно изучать на фоне «нормального» процесса звездообразования в галактиках с интенсивным звездообразованием. Поэтому **объектом** этого диссертационного исследования стали преимущественно линзовидные галактики с признаками текущего или недавнего звездообразования (наличие H_{α} -эмиссии и УФ-излучения [51]).

Предположение о связи между тем, *где* идёт звездообразование, и тем, *почему* оно происходит, высказывают Подж и Эскридж в своей работе [44]. О возможной критической роли морфологии галактики в структуре и эволюции межзвёздной среды и в крупномасштабных процессах звездообразования было сказано и в работе Тронсона и др. [29].

В большой обзорной статье [51], опубликованной в 2012 году, Кенникатт и Эванс обобщают накопленный к тому моменту наблюдательный и теоретический материал по темпам

звездообразования в галактиках. Авторы, отмечая обозначенную в работе МакКи и Острайкер [50] тенденцию рассматривать по отдельности мелкомасштабное (локальное) и крупномасштабное звездообразование, говорят о необходимости взаимодействия между внегалактическими и галактическими исследованиями, поскольку ключевые процессы, влияющие на звездообразование, могут действовать на границе между масштабами внутри отдельных молекулярных облаков и масштабами галактических дисков, и связь между локальными и глобальными процессами ещё не совсем понятна: требуется более глубокое понимание механизмов, которые запускают и регулируют формирование звездообразующих облаков в галактических масштабах, которые, в свою очередь, устанавливают граничные условия для звездообразования в пределах облаков. По мнению Кенникатта и Эванса [51], разные физические процессы могут привести к звездообразованию в разных межзвёздных и галактических средах.

Возможные источники газа (газ, оставшийся от эпохи формирования галактик; газ, возвращённый эволюционирующими звёздами; газ, аккрецированный из внешнего источника) были перечислены ещё в самых ранних работах, посвящённых обнаружению газа в галактиках раннего типа [3 — 49], однако, до сих пор вопрос о происхождении газа является дискуссионным, поскольку, как отмечают Дэвис и др. [52], выявление доминирующего источника газа в галактиках раннего типа может прояснить их формирование и эволюцию. Так, в статье Каткова и др. [53] выдвигается гипотеза о том, что морфологический тип дисковых галактик в поле полностью определяется внешним режимом аккреции холодного газа, а чуть позже в статье Сильченко и др. [54] формулируется похожее, но более осторожное предположение о принципиальном отличии геометрии внешней аккреции газа в линзовидных галактиках от геометрии аккреции в спиральных галактиках (что сказывается и на темпах звездообразования): аккреция газа в S0-галактиках часто происходит вне плоскости звёздного диска. Однако для определения источника газа в каждом конкретном случае требуется проведение комплексного анализа.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является исследование процесса звездообразования, протекающего в современную эпоху в некоторых галактиках раннего типа, что подразумевает определение таких количественных характеристик, как темпы и временная шкала звездообразования; выявление источников газа; изучение локализации областей звездообразования в рамках общей структуры галактик.

Поставленная цель предполагает решение следующих задач.

- Получение и обработка спектральных данных и изображений предварительно отобранных галактик раннего типа с признаками недавнего звездообразования.
- Анализ обработанного наблюдательного материала с целью определения и последующего сопоставления кинематики газового и звёздного компонентов галактик, их металличности, выделение структурных компонентов галактик и локализаций областей звездообразования.
- Количественная оценка локальных и интегральных темпов звездообразования на трёх временных шкалах и количественный анализ историй звездообразования в галактиках раннего типа в современную эпоху.

Научная новизна

- Для выполнения диссертационной работы был получен уникальный наблюдательный материал, в том числе впервые получены оптические изображения галактики NGC 2697 в полосах g и r , впервые получены изображения галактики NGC4324 в узких эмиссионных линиях H_{α} и $[NII]$, которые впервые выявили регулярное расположение очагов звездообразования в кольцеобразной области галактики.
- Впервые применён комплексный подход к изучению процесса звездообразования в галактиках раннего типа, включающий в себя исследование кинематики и характеристик звёздного населения и газовой составляющей галактик, а также определение темпов и истории звездообразования в них.

Научная и практическая значимость работы

В ходе выполнения исследования был отработан алгоритм оценки темпов звездообразования в локализованных очагах звездообразования исследуемых галактик на различных временных шкалах, что позволяет оценить временную шкалу звездообразования в каждом конкретном случае. Данный алгоритм может быть применён для различных областей звездообразования в галактиках любого типа в случае наличия необходимых многоволновых наблюдательных данных.

Приведённые в данной диссертационной работе результаты (временная шкала и темпы звездообразования в галактиках раннего типа и их связь с кинематическими и другими характеристиками газа, локализация областей звездообразования в рамках общей структуры галактик) получены на основе наблюдательного материала и представляют научную ценность в качестве базовых элементов для построения теории формирования и эволюции галактик.

Положения, выносимые на защиту

1. Звездообразование в галактиках раннего типа NGC 809, NGC 4324, NGC 2697, NGC 7808, PGC 48114 в современную эпоху происходит на временной шкале нескольких сотен миллионов лет, т. е. в виде коротких вспышек.
2. Наиболее правдоподобным источником газа в рассмотренных галактиках раннего типа (NGC 809, NGC 4324, NGC 2697, NGC 7808, PGC 48114, IC 560, NGC 4513, NGC 5173) является поглощение богатых газом спутников.
3. Пониженное значение поверхностных плотностей темпов звездообразования в галактиках с противоположным вращением газового компонента по отношению к звёздному компоненту подтверждает и дополняет гипотезу о влиянии геометрии аккреции газа на протекание процессов звездообразования.
4. Очаги звездообразования в линзовидной галактике NGC 4324 регулярно расположены вдоль кольца, причём характерное расстояние между ними меняется со временем. Характерный размер областей звездообразования составляет ~ 0.5 кпк, что соответствует характерному размеру звёздных комплексов, наблюдаемых в рукавах спиральных галактик.

Степень достоверности результатов

При обработке наблюдательных данных были применены стандартные алгоритмы и проверенное временем и многими исследователями специальное программное обеспечение, разработанное в Специальной Астрофизической Обсерватории РАН [55], а также использовалась доступная для широкого круга пользователей специальная программа SAOImageDS9¹ для работы с астрономическими изображениями.

Используемый в данной работе алгоритм оценки темпов звездообразования на различных временных шкалах был составлен на основе калибровочных соотношений и методологических рекомендаций, изложенных в статьях из рецензируемых журналов [51 и ссылки там].

При интерпретации полученных результатов использовались общенаучные **методы**: анализ, дедукция, индукция.

О достоверности результатов исследования свидетельствуют публикации в рецензируемых астрономических журналах и их апробация на всероссийских и международных конференциях.

1 <https://sites.google.com/cfa.harvard.edu/saoimageds9>

Апробация результатов

- Международные конференции

1. Formation and Evolution of Galaxy Outskirts, Толедо, Испания, 14-18 марта 2016, *Outer stellar disks and starforming rings in S0 galaxies* (стендовый)

2. The interplay between local and global processes in galaxies, Козумель, Мексика, 11-15 апреля 2016, *Outer Starforming Rings in S0s — Growth By Accretion* (стендовый)

3. Multi-spin Galaxies 2016, п. Нижний Архыз, Карачаево-Черкессия, Россия, 26-30 сентября 2016, *Counterrotating starforming disk in the S0 galaxy IC 560* (устный)

4. Multi-spin Galaxies 2019, Асьяго, Италия, 20-23 мая 2019, *Star formation in counterrotating gaseous disks* (устный)

5. Diversity of the Local Universe, п. Нижний Архыз, Карачаево-Черкессия, Россия, 30 сентября - 4 октября 2019, *Circlet of starforming clumps in NGC 4324* (устный)

- Всероссийские конференции

6. XIII Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», ИКИ РАН, Москва, Россия, 13-15 апреля 2016, *Кольца звездообразования в S0-галактиках* (устный)

7. XXXIII Всероссийская конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии», Пущино, Россия, 19-22 апреля 2016, *Кольца звездообразования в S0-галактиках* (устный)

8. XXXIV Всероссийская конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии», Пущино, Россия, 18-21 апреля 2017, *Оценки темпов и временных масштабов звездообразования в кольцах S0-галактик* (устный)

9. XXXV Всероссийская конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии», Пущино, Россия, 24-27 апреля 2018, *NGC 4513: аккреционное кольцо высокометаллического газа вокруг линзовидной галактики пониженной металличности* (устный)

10. VII Пулковская молодёжная астрономическая конференция, Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Россия, 28-31 мая 2018, *Кольца звездообразования в S0-галактиках* (устный)

11. Современная звёздная астрономия — 2019, САО РАН, п. Нижний Архыз, Карачаево-Черкессия, Россия, 7-11 октября 2019, *Кольца звездообразования в S0-галактиках* (устный)

12. Ломоносовские чтения 2021, секция астрономии и геофизики, ГАИШ МГУ, Москва, Россия, 22 апреля 2021, *Внешние кольца звездообразования в линзовидных галактиках* (устный)

13. Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра 2021, ИКИ РАН, Москва, Россия, 21-24 декабря 2021, *Молодые звездообразующие комплексы в галактиках раннего типа* (стендовый)

Публикации по теме диссертации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 печатных изданиях, 5 из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science/Scopus/RSCI, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

1. Прошина И.С., Князев А.Ю., Сильченко О.К. *Противовращающийся газовый диск в S0 галактике IC 560* / Письма в Астрономический журнал. — 2016. — Т. 42. — С. 861—868. DOI: 10.7868/S0320010816120056 (РИНЦ IF: 1.469) // Переводная версия: Proshina I.S., Kniazev A.Y., Sil'chenko O.K. *Counter-rotating gas disk in the S0 galaxy IC 560* / Astronomy Letters.— 2016.— Vol. 42.— P.783—789. DOI:10.1134/S1063773716120057 (WoS IF: 1.384)
2. Proshina Irina S., Kniazev A. Yu., Sil'chenko Olga K. *Star-forming Rings in Lenticular Galaxies: Origin of the Gas* / The Astronomical Journal.— 2019.—Vol. 158.— A.id.5.— 13pp. DOI: 10.3847/1538-3881/ab1d54 (WoS IF: 6.281)
3. Proshina I., Sil'chenko O., Moiseev A. *Star formation in outer rings of S0 galaxies II. NGC4513 – a multi-spin ringed S0 galaxy* /Astronomy and Astrophysics.—2020.—Vol. 634.— A102. DOI: 10.1051/0004-6361/201936912 (WoS IF: 5.803)
4. Сильченко О.К., Прошина И.С., Моисеев А.В., Опарин Д.В. *Звездообразование в эллиптической (?) галактике NGC 5173* / Астрофизический бюллетень.—2022.— Т. 77.— С. 43 — 54. (РИНЦ IF: 1.207) // Переводная версия: Sil'chenko O.K., Proshina I.S., Moiseev A.V., Oparin D.V. *Star formation in the elliptical (?) galaxy NGC 5173* / Astrophysical Bulletin.—2022.—Vol. 77.— P. 40 — 50. DOI: 10.1134/S1990341322010102 (WoS IF: 1.109)
5. Прошина И.С., Моисеев А.В., Сильченко О.К. *Молодые звездообразующие комплексы в кольце S0 галактики NGC 4324* / Письма в Астрономический журнал.—2022.— Т. 48.— С. 153 — 166. DOI: 10.31857/S0320010822020048 (РИНЦ IF: 1.469)

а также две публикации — в сборниках трудов конференций:

1. Proshina I.S., Kniazev A.Y., Sil'chenko O.K. *Outer stellar disks and star-forming rings in S0 galaxies* / Formation and Evolution of Galaxy Outskirts, IAUS, Cambridge Univ. Press. — 2017. — Vol. 321. — P. 286. DOI: 10.1017/S1743921316011066
2. Прошина И.С., Князев А.Ю., Сильченко О.К. *Кольца звездообразования в S0-галактиках* / Известия Главной Астрономической Обсерватории В Пулкове. — Серия «Труды VII Пулковской молодежной астрономической конференции». — 2018.—Т. 226.— С. 77 — 85.

Личный вклад автора

Автором выполнен спектральный (Главы 2, 3) и фотометрический (Главы 2 — 4) анализ наблюдательного материала: извлечена кинематика газового и звёздного компонентов галактик и определены их характеристики путём измерения Ликских индексов, эквивалентных ширин эмиссионных линий, а также потоков в них, в компактных областях и в УФ-кольцах галактик. Отработан алгоритм и произведён расчёт темпов звездообразования на трёх временных шкалах (Главы 2 — 4), произведена оценка историй звездообразования (Глава 2). Интерпретация полученных результатов и написание текстов научных статей проводились совместно с соавторами.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из Введения, четырёх Глав, Заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 128 страниц, включая 37 рисунков и 19 таблиц. Список литературы включает 175 наименований на 12 страницах.

Во **Введении** показана актуальность работы, обозначены цели и задачи исследования, научная новизна, научная и практическая ценность полученных результатов, степень их достоверности и их апробация, сформулированы положения, выносимые на защиту, и приведён список работ, в которых опубликованы основные результаты диссертации.

Глава 1 является обзорной: в ней прослежена история обнаружения газа в галактиках раннего типа, показана эволюция представлений о содержании газа в них (а, следовательно, и о самих галактиках раннего типа в целом), а также о роли аккреции газа в эволюции галактик.

В **Главе 2** представлены результаты спектрального и фотометрического анализов наблюдательных данных для небольшой выборки галактик с УФ-кольцами (NGC809, PGC48114, NGC 2697, NGC 7808, NGC 4324). Спектры были получены на спектрографе с длинной щелью на 11-метровом телескопе SALT Южно-Африканской обсерватории (ЮАР). Общим для исследуемых линзовидных галактик является наличие в их спектрах сильных эмиссионных линий H_{α} , [NII], а в некоторых галактиках видны и линии [SII], H_{β} , [OIII]. В ходе анализа определена кинематика газовых и звёздных компонент галактик, измерены эквивалентные ширины эмиссионных линий, с помощью диагностических BPT-диаграмм выявлен механизм возбуждения газа на различных удалениях от центров галактик. В результате обнаружены кольцеобразные области звездообразования в исследуемых линзовидных галактиках. Произведена оценка среднего возраста и металличности звёздного населения каждой галактики на различных удалениях от центров галактик. Замечено, что в исследуемых галактиках газ, в котором детектируется звездообразование (возбуждаемый молодыми звёздами), имеет

околосолнечную металличность, тогда как звёзды, расположенные на тех же удалениях от центров галактик, имеют металличность ниже солнечного значения. Представлены результаты изотопного анализа оптических изображений, взятых из Слоановского цифрового обзора неба SDSS [56]. (А для галактики NGC 2697, не представленной в обзоре SDSS, были получены оптические изображения на одном из телескопов сети обсерватории Лас Кумбрес (LCO) [57].) Определены темпы звездообразования по потокам в NUV и FUV (по данным GALEX [58], взятым из архива Б.А. Микульски для космических телескопов (MAST)²) и в эмиссионной линии H_α (по спектрам, полученным на телескопе SALT) с учётом поглощения пылью в исследуемых галактиках, для чего использовались инфракрасные изображения WISE в полосе W4 (22 мкм), взятые из архива инфракрасной науки (IRSA)³. На основе полученных темпов звездообразования оценена временная шкала современного звездообразования в исследуемых галактиках. Рассмотрены вероятные сценарии эволюции исследованных галактик.

В **Главе 3** по той же методике исследованы две галактики (IC 560 и NGC 4513) с противоположным вращением газового и звёздного компонентов, что явно указывает на внешнее происхождение этого газа. В итоге выявлено пониженное значение поверхностных плотностей темпов звездообразования, что вероятно связано с иным характером движения газа: в случае противоположного вращения газового и звёздного компонентов эффективность звездообразования ниже, чем при со-направленном вращении. Эти результаты подтверждают и дополняют идею, высказанную в работе Сильченко и др. [54], о влиянии геометрии аккреции газа на протекание процессов звездообразования.

В **Главе 4** приведены результаты детального исследования отдельных областей звездообразования на основе узкополосных изображений, полученных с помощью фотометра с перестраиваемым фильтром MaNGaL [59] на 2.5-метровом телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ, для двух галактик раннего типа — NGC 5173 и NGC 4324. Выявлены компактные эмиссионные области и молодые звёздные комплексы с характерными размерами (0.5–1.2 кпк) и массами (10^4 – $10^7 M_\odot$), соответствующими параметрам газо-звёздных комплексов, наблюдаемых в спиральных и неправильных галактиках. В кольце *линзовидной* галактики NGC4324 впервые обнаружено регулярное расположение комплексов звездообразования, что характерно для спиральных ветвей галактик; замечено изменение со временем характерных расстояний между комплексами звездообразования, что указывает на распространение звездообразования вдоль кольца. Сделан вывод об единстве физических процессов звездообразования на локальных масштабах в галактиках ранних и поздних типов.

В **Заключении** делаются основные выводы по результатам диссертационного исследования и обозначается вектор дальнейших исследований.

² <https://galex.stsci.edu/GR6/>

³ <https://irsa.ipac.caltech.edu/applications/wise/>

Глава 1. История обнаружения газа в галактиках раннего типа

Традиционное представление о том, что у галактик раннего типа мало или вовсе нет газовой межзвёздной среды, стало оспариваться наблюдениями по мере ввода в эксплуатацию крупных радиотелескопов. Со временем стало возрастать число свидетельств того, что умеренная доля галактик раннего типа имеет признаки недавнего (и даже текущего) звездообразования и, следовательно, должны быть резервуары холодного газа для его подпитки.

Газовая межзвёздная среда включает в себя различные химические элементы и их соединения (как химические, так и физические: например, пыль), но самым распространённым элементом во Вселенной является, конечно, водород. Поэтому в литературе под словом «газ» обычно подразумевают водород, если иное не оговорено. Для оценки вклада других химических элементов в состав газовой среды используется специальный термин — «металличность» (которую оценивают, как правило, по обилию кислорода). В зависимости от физических условий (температуры, давления) водород может находиться в разных фазовых состояниях: в молекулярном, нейтральном (атомарном) и ионизованном. Проследим историю обнаружения газа в галактиках раннего типа по каждому фазовому состоянию отдельно; а в конце этой главы рассмотрим вопрос о возможных источниках газа в галактиках.

1.1 Атомарный водород

Присутствие атомарного водорода (HI) может быть выявлено по излучению в линии 21 см.

Одним из первых сообщений о детектировании нейтрального водорода (HI) в галактиках раннего типа стала работа Боттинелли и др. [3], вышедшая в 1970 году: с помощью радиотелескопа в Нансе (Франция) было измерено содержание нейтрального водорода (HI) в 34 галактиках, среди которых четыре галактики — линзовидные. Выборка, состоящая из галактик разных морфологических типов, позволила авторам выявить корреляцию: отношение массы нейтрального водорода к светимости галактики увеличивается при переходе от галактик раннего типа к галактикам позднего типа. Затем та же группа астрономов совместно с Балковски [4] сообщила о детектировании нейтрального водорода в ещё 18 галактиках раннего типа, однако, отмеченная выше корреляция теперь отсутствовала.

Позже Кнапп и др. [5] с помощью радиотелескопов Национальной радиоастрономической обсерватории (NRAO, США) провели поиск эмиссии HI в 40 галактиках раннего типа, но

уверенно обнаружили сигнал только в семи галактиках, а в трёх галактиках сигнал был на уровне порога обнаружимости.

Крамм и Солпитер с помощью радиотелескопа в Аресибо (Пуэрто-Рико) провели обзор 81 галактики раннего типа в скоплении Девы и обнаружили протяжённую эмиссию в линии 21 см лишь в 16 из них [6]. Позже та же группа авторов совместно с Джованарди [7] на том же телескопе провели наблюдения 145 галактик раннего типа (S0, S0/a, Sa) как внутри скопления Девы, так и за его пределами. Сигнал был обнаружен в 64 галактиках, из которых 25 являются S0-галактиками. Основной вывод этой работы: для любого данного морфологического типа содержание HI ниже в галактиках скопления, чем в галактиках вне скопления. Частота обнаружения HI в S0-галактиках мала (по сравнению с частотой обнаружения в галактиках более позднего типа), но при этом авторы отмечают отсутствие скученности возле нижнего порога детектирования, т. е. наблюдается большой разброс содержания HI в S0-галактиках. Подобный результат был получен чуть позже другой группой астрономов, возглавляемой Шамару [8]: в ходе исследования 122 линзовидных галактик с помощью радиотелескопа в Аресибо сигнал был обнаружен в 31 объекте. Шамару и др. отмечают, что содержание нейтрального водорода (HI) в спиральных галактиках раннего типа (Sa) в скоплении не превосходит содержания HI в S0-галактиках вне скопления. В следующей работе [9] Шамару и др. исследовали галактики с видимым диаметром до двух угловых минут. Из 56 галактик линзовидными оказались 47, и лишь в 12 из них был зафиксирован сигнал (а также в четырёх спиральных галактиках раннего типа). Причём в двух галактиках авторы заметили *кольцеобразное* распределение газа.

Ван Вёрден, ван Дриель и др. [10] с помощью Вестерборкского радиоинтерферометра (WSRT, Нидерланды) исследовали распределение атомарного водорода в 11 линзовидных галактиках и обнаружили, что в большинстве случаев нейтральный водород детектируется за оптическими пределами этих галактик, где образует *кольцевые конфигурации* диаметром вдвое превосходящим оптический диаметр, которые нередко расположены под углом к плоскости звёздного диска галактики [12, 13, 14]. Газ в этих внешних кольцах распределён неравномерно в виде сгустков (клампов) [15], имеет круговое движение. В некоторых галактиках наблюдаются внутренние газовые кольца (диаметром менее половины оптического диаметра галактики), которые расположены как в плоскости звёздного диска [14], так и под углом к нему [11]. Помимо ярко выраженных колец, в некоторых галактиках наблюдаются и целые газовые диски [11, 12, 16]. А в двух галактиках газ распределён нерегулярно, что связано, по мнению авторов, с приливными эффектами. Обобщение результатов, полученных в ходе исследования распределения атомарного водорода (HI) в 24 галактиках раннего типа, и их сравнение с результатами исследования распределения атомарного водорода в 15 спиральных галактиках

авторы приводят в своей статье [17]. Так, ван Дриель и ван Вёрден отмечают, что внутренние и внешние кольца чаще встречаются в линзовидных галактиках, нежели в спиральных. В спиральных галактиках без бара наблюдаются полностью заполненные HI-диски, а при наличии бара — в HI-диске наблюдается дыра диаметром сравнимым с размером бара; тогда как в линзовидных галактиках (как с баром, так и без него) в распределении атомарного водорода в центре, как правило, наблюдается дыра диаметром, превышающим размер бара в 2 — 4 раза. В целом, распределение HI в линзовидных галактиках более протяжённое, чем в спиральных, и достигает двух оптических радиусов галактики. Максимальная азимутально осреднённая поверхностная плотность атомарного водорода Σ_{HI} составляет $1.3 \pm 0.5 \text{ M}_{\odot} / \text{пк}^2$ в линзовидных (S0) галактиках — слишком низкая для поддержания крупномасштабного звездообразования; в ранних спиральных галактиках (S0/a) это значение составляет $3 \pm 1.5 \text{ M}_{\odot} / \text{пк}^2$; а в спиральных галактиках — $7 \pm 3 \text{ M}_{\odot} / \text{пк}^2$.

Дюпри и Шнайдер [18] продолжили исследования распределения атомарного водорода вокруг галактик раннего типа, расширив исследования на их окрестности, а также сфокусировавшись на группах, состоящих преимущественно из галактик раннего типа. С помощью радиотелескопов в Аресибо (Пуэрто-Рико) и Грин Бэнк (США), обладающим более широкой диаграммой направленности, они провели наблюдения 34 индивидуальных галактик раннего типа и 7 групп галактик, в которых преобладают галактики раннего типа, и подтвердили, что протяжённое распределение HI имеет примерно половина галактик раннего типа и менее 1% спиральных галактик позднего типа. Но, как отмечают авторы, возможно, внешние области HI легче выявить в галактиках раннего типа, поскольку в них содержится в 2-3 раза меньшее количество HI, чем в спиральных галактиках; в скоплениях, где доминируют эллиптические и линзовидные галактики, содержание HI ещё меньше (возможно, отмечают авторы, он стал межгалактическим газом в скоплениях). Однако в разреженных группах галактик раннего типа авторы обнаружили высокую встречаемость необычных HI-структур, что приводит авторов к выводу об аккреционном происхождении газа в этих галактиках.

Гросси и др. [19] тоже обнаружили пониженную (в 10 раз) встречаемость атомарного водорода в галактиках раннего типа из скопления Девы (только в 9 из 457 галактик раннего типа, причём в тех, что расположены на периферии скопления) по сравнению с галактиками раннего типа из разреженных групп (в 15 из 62 галактик раннего типа) при сопоставлении результатов наблюдений в рамках обзора ALFALFA, выполненного на радиотелескопе в Аресибо, и тем самым подтвердили, что окружение оказывает фундаментальное воздействие на газовую составляющую галактик. Авторы обнаружили, что около четверти галактик в разреженном окружении с проявлением эмиссии в линии HI имеют богатые газом спутники.

Морганти и др. [20] с помощью радиоинтерферометра в Вестерборке (WSRT, Нидерланды) исследовали 12 галактик раннего типа (четыре эллиптических и восемь линзовидных) из разреженного окружения, отобранных из выборки SAURON: нейтральный водород был уверенно зарегистрирован в восьми галактиках (по четыре среди E- и S0-галактик) как в виде регулярных дисков, так и в виде облаков и газовых хвостов, отходящих от галактик. Более того, один из газовых (HI) дисков был обнаружен в эллиптической (!) галактике NGC4278. Наблюдаемая полная масса HI в этих галактиках варьирует от нескольких миллионов до миллиарда солнечных масс.

Более полное исследование содержания нейтрального водорода в галактиках раннего типа было выполнено Серра и др. в рамках проекта ATLAS^{3D} [21], в котором изучалась полная ограниченная по объёму выборка из 260 близких галактик раннего типа, видимых в северном полушарии Земли. Авторами были проведены наблюдения 166 галактик раннего типа и установлено, что нейтральный водород присутствует в ~40% галактик раннего типа вне скопления Девы и в ~10% галактик раннего типа в скоплении Девы. В большинстве случаев нейтральный водород распределён по диску или в кольцах (в 25% галактик раннего типа вне скопления), кроме того встречаются приливные или аккрецированные газовые хвосты, а также системы облаков, разбросанные возле галактик. Авторы делят обнаруженные HI-диски на два типа: 1) маленькие диски, не превышающие оптических размеров галактик и содержащие менее $10^8 M_{\odot}$ атомарного водорода; и 2) протяжённые диски/кольца, простирающиеся на десятки кпк от центров галактик, содержащие до $5 \times 10^9 M_{\odot}$ атомарного водорода и в половине случаев кинематически рассогласованные со звёздным компонентом. Хотя в целом содержание HI в галактиках раннего типа малó по сравнению со спиральными галактиками, некоторые галактики раннего типа столь же богаты нейтральным водородом, как и спиральные галактики. Однако главное различие, отмечают Серра и др., состоит в том, что в галактиках раннего типа нет высоких колонковых плотностей HI, характерных для ярких звёздных дисков спиральных галактик. Кроме того, богатые газом галактики раннего типа располагаются в беднейшем окружении. Таким образом, Серра и др. подтверждают ранее установленную корреляцию: масса HI уменьшается с увеличением плотности окружения; и находят ещё одну — зависимость морфологии HI от плотности окружения: в случае низкой плотности окружения газ распределён в протяжённых регулярных дисках или кольцах, тогда как искажённая морфология HI встречается в богатых группах.

Первые результаты исследования содержания нейтрального водорода в 2552 галактиках раннего типа (526 эллиптических и 2026 линзовидных), выполненного с помощью радиообсерватории Паркса (Австралия) в рамках слепого обзора HIPASS, покрывающего всё южное небо, изложены в конференционном сообщении [22]. Так, наличие HI было

зарегистрировано в 5 % эллиптических и 12 % линзовидных галактик; масса нейтрального водорода в большинстве задетектированных галактик находится в диапазоне 10^9 — 10^{10} $M_{\odot}$. Однако этот предварительный анализ данных HIPASS страдает путаницей, поскольку около половины эллиптических галактик, демонстрирующих HI, имеют более одного (спирального) соседа с похожей скоростью (по оптическим данным) в пределах 15 угловых минут — размер диаграммы направленности радиотелескопа Паркс, и поэтому невозможно провести анализ влияния окружения галактик на содержание нейтрального водорода в них.

Позже Оостерлоо и др. [23] с помощью Австралийского компактного массива радиотелескопов (ATCA) исследовали морфологию и кинематику для выборки, состоящей из 30 богатых газом галактик раннего типа из обзора HIPASS. В 2/3 галактик этой выборки нейтральный водород расположен в протяжённых регулярных дисках или кольцеобразных структурах (в некоторых случаях — сильно искривлённых). В остальных случаях газ распределён нерегулярно в виде хвостов или облаков. Огромные регулярные структуры могут достигать размеров до 200 кпк в диаметре и содержать до 10^{10} $M_{\odot}$ HI. Иррегулярные структуры чаще встречаются в эллиптических галактиках, а протяжённые регулярные структуры наблюдаются и в линзовидных, и в эллиптических галактиках, и строго не связаны со звёздными дисками галактик. Размер и регулярная кинематика HI-структур указывают на то, что газ в этих галактиках осел несколько млрд лет назад. Авторы подтверждают, что колонковая плотность нейтрального газа мала, так что ожидается слабое звездообразование, в результате чего эти галактики на долгое время останутся богатыми газом. Как полагают авторы, эти галактики могут являться галактиками низкой поверхностной яркости (LSB), подобны галактике Malin 1.

1.2 Молекулярный газ

Звездообразование начинается в плотных ядрах холодных молекулярных облаков, основным компонентом которых является молекулярный водород (H_2). Однако наиболее распространенным индикатором молекулярного газа является CO-эмиссия в линиях вращательных переходов $J = 2 \rightarrow 1$ и $J = 1 \rightarrow 0$. Соотношение интенсивностей этих линий может быть использовано для исследования физического состояния молекулярного газа, хотя интерпретация сложна. Так, значения $0.5 \leq I_{21}/I_{10} \leq 1$ указывают на то, что газ холодный ($T \sim 10$ K) и плотный.

Сообщения о детектировании молекулярного газа в галактиках раннего типа стали появляться в конце 80-х годов XX века. Первый сигнал в линии CO от галактики раннего типа был зарегистрирован в 1986 году — это была карликовая эллиптическая галактика NGC 185

[24]. Позже Уиклинд и Хенкель [25] обнаружили CO-эмиссию в 24 галактиках раннего типа (преимущественно S0) в результате обзора, выполненного в радиоастрономической обсерватории Унсала (Швеция), а также с помощью 30-метрового телескопа Института миллиметровой радиоастрономии (IRAM, Испания) и Субмиллиметрового телескопа Швеции и Европейской Южной Обсерватории (SEST, Чили). Поскольку для своего обзора они выбрали галактики раннего типа с высокой светимостью в далёком инфракрасном диапазоне (что считалось признаком текущего или недавнего звездообразования), то уровень обнаружения молекулярного газа в данной выборке достиг почти 100%. Полученные эмиссионные профили указывают на то, что молекулярный газ часто располагается в виде вращающихся дисков (не всегда совпадающих со звёздными дисками), что подтверждают карты распределения, которые были построены для четырёх галактик из их выборки и показали, что в трёх случаях молекулярный газ сосредоточен в центре галактик. Причём в двух линзовидных галактиках молекулярный газ сосредоточен в виде околядерных *колец*: в NGC 3593 [26] и NGC 404 [27] (любопытно, что атомарный водород (HI) в этой галактике распределён в виде кольца на краю оптического диска). Используя конверсионное соотношение, авторы оценили, что содержание молекулярного водорода (H_2) в этих галактиках находится в диапазоне 10^7 — 10^9 $M_\odot$ (что на порядок меньше, чем в спиральных галактиках). Кроме того, авторы делают вывод, что спиральные волны плотности вовсе не обязательны для формирования массивных молекулярных комплексов облаков.

Сэйдж и Врубель [28] с помощью радиотелескопа Национальной радиоастрономической обсерватории (NRAO, США) провели наблюдения в линии ^{12}CO ($J = 1-0$) 11 ярких S0-галактик, и в пяти из них (в одной пекулярной и четырёх нормальных S0-галактиках) был уверенно обнаружен молекулярный газ. Таким образом, заключают авторы, встречаемость молекулярного газа в линзовидных галактиках ниже, чем в спиральных. Расчёты авторов показали, что медианное значение поверхностной плотности молекулярного водорода (H_2) в пределах оптической площади галактик по крайней мере в пять раз ниже, чем для спиральных галактик. Авторы подчёркивают, что главное различие между линзовидными и спиральными галактиками состоит в распределении молекулярного газа: в S0-галактиках он сосредоточен в центре, тогда как в спиральных галактиках он занимает до четверти оптического размера.

Тронсон и др. [29] с помощью радиотелескопов радиоастрономической обсерватории Пяти колледжей и Национальной радиоастрономической обсерватории (NRAO, США) провели наблюдения в эмиссионной линии CO ($J = 1-0$) выборки галактик раннего типа, состоящей из 13 нормальных S0-галактик и семи S0/a и Sa-галактик. В результате сигнал был получен от шести нормальных S0 и пяти S0/a и Sa галактик. Авторы подметили тенденцию, что более сильная CO-эмиссия наблюдается в пекулярных галактиках из их выборки, нежели в

нормальных. Типичная наблюдаемая масса молекулярного газа в исследованных ими галактиках на порядок величины меньше, чем в спиральных галактиках позднего типа (Sb, Sc), хотя в некоторых галактиках раннего типа обилие газа сопоставимо с тем, что наблюдается в спиральных галактиках. Авторы отмечают широкий диапазон отношений массы молекулярного водорода к массе нейтрального водорода ($M(\text{H}_2)/M(\text{HI})$) и слабое свидетельство вариации в связи с морфологическим типом и приходят к выводу, что морфологический тип галактики — не единственный фактор, определяющий отношение масс молекулярного и атомарного водорода.

Позже Уиклинд и др. [30] с помощью 30-метрового телескопа Института миллиметровой радиоастрономии (IRAM, Испания) и Субмиллиметрового телескопа Швеции и Европейской Южной Обсерватории (SEST, Чили) провели поиск CO-эмиссии в 29 эллиптических галактиках и зарегистрировали сигнал только в 16 из них. Масса молекулярного водорода, по их оценкам, варьируется в диапазоне 2×10^6 — 10^9 $M_\odot$. Авторы установили, что эллиптические галактики, расположенные в поле, с большей вероятностью содержат доступный наблюдению молекулярный газ, нежели эллиптические галактики, расположенные в группах и скоплениях. Объединив результаты своих наблюдений с результатами обнаружения молекулярного газа в ещё 12 эллиптических галактиках, взятыми из литературы (ссылки приведены в работе [30]), Уиклинд и др. пришли к следующим выводам: 1) молекулярный газ в эллиптических галактиках не связан с подстилающим звёздным населением (что указывает на внешнее происхождение газа) и 2) среднее отношение молекулярного водорода к атомарному $M_{\text{H}_2}/M_{\text{HI}}$ для эллиптических галактик в 2 — 5 раз меньше, чем для спиральных.

Стоит отметить, что знаковой работой, стимулирующей в направлении поиска газа в галактиках раннего типа, стала статья Фабер и Галлахера [31], опубликованная ещё в 1976 году; в ней показано, что вследствие потери газа эволюционирующими звёздами галактики должны содержать достаточное для наблюдения количество газа.

Так, Уэлч и Сэйдж [32, 33] предприняли попытку выяснить, какое количество газа содержится в линзовидных галактиках и как оно соотносится с предсказываемым теорией звёздной эволюции значением возвращаемого газа. Для этих целей они отобрали 27 линзовидных галактик, расположенных вне богатых скоплений (т. н. «галактики поля»). Кроме того, их обзор был нацелен на поиск газа вдали от центров галактик. Для оценки полного содержания газа авторы провели наблюдения как молекулярного компонента [32] с помощью двух радиотелескопов: 30-метрового телескопа Института миллиметровой радиоастрономии (IRAM, Испания) и 12-метрового телескопа Национальной радиоастрономической обсерватории (NRAO, США), так и атомарного водорода [33] с помощью двух крупных радиотелескопов: 305-метрового телескопа Аресибо (Пуэрто-Рико) и Очень Большого Массива антенн (VLA, США).

Молекулярный газ был обнаружен у 78% галактик из выборки. Однако количество газа во всех случаях не превышало 10% от предсказываемого количества газа, возвращаемого звёздами. Другими словами, даже самые богатые газом линзовидные галактики потеряли 90% или более всего газа, когда-либо возвращённого их звёздами. Также, авторы отмечают, что молекулярный газ располагается в центральных областях галактик размером до 1–3 кпк; не обнаружено значительных количеств молекулярного газа на больших расстояниях. Для семи галактик, у которых удалось пронаблюдать не только центральную часть, обнаружено сильное снижение интенсивности СО-эмиссии вдоль по радиусу.

На картах поверхностной плотности нейтрального водорода (HI), приведённых в статье Сэйджа и Уэлча [33], видно, что нейтральный водород распространяется гораздо шире, чем молекулярный газ и видимый звёздный компонент галактик. Таким образом, заключают авторы, атомарная и молекулярная фазы оказываются разделёнными: молекулярный газ сильно сконцентрирован к центру галактик, даже сильнее, чем в спиральных галактиках, и вращается в одном направлении со звёздами, так что этот газ может быть тем самым возвращённым звёздами газом. Более протяжённый атомарный водород, выходящий за пределы видимого звёздного компонента возможно имеет внешнее происхождение. Массы атомарного водорода (HI) в галактиках выборки из работы [33] варьируются от $10^6 M_{\odot}$ до $4 \times 10^8 M_{\odot}$.

Уэлч и Сэйдж не нашли никакой связи между совокупными оптическими свойствами линзовидных галактик из их выборки и их обнаруживаемостью в СО-эмиссии. Зато ими обнаружен широкий разброс полного содержания газа (молекулярного и атомарного) среди галактик схожей светимости. Наиболее поразительным, по мнению авторов, является обнаружение ограничения по верхнему пределу полного содержания газа (молекулярного и атомарного), которое распространяется на весь диапазон светимостей галактик. Кроме того, авторы выделили в своей выборке две подгруппы галактик: 1) бедные газом (по сравнению с предсказываемой теорией величиной массы газа) галактики, в которых доминирует молекулярный газ; и 2) (относительно) богатые газом галактики, в которых в основном доминирует атомарный газ. Но авторы не находят различия в оптических свойствах галактик из этих подгрупп. Вполне может быть, полагают они, что свойства газа выявляют разные истории, и что это и есть реальная отличительная черта этих двух групп.

Позже Серра и др. в своей работе [21] на основе выборки галактик из проекта ATLAS^{3D} отметят, что в центрах всех тех галактик раннего типа, в которых обнаружен атомарный водород в пределах эффективного радиуса, доминирует молекулярный газ.

Однако более полные результаты исследования содержания молекулярного газа в галактиках раннего типа из выборки проекта ATLAS^{3D} представлены в работе Янг и др. [34]. Так, из 259 близких галактик раннего типа в ходе наблюдений, проведённых с помощью 30-

метрового телескопа Института миллиметровой радиоастрономии (IRAM, Испания), СО-эмиссия была зарегистрирована в 56 галактиках, причём никакой зависимости от светимости в К-полосе не обнаружено, но замечена умеренная корреляция от динамической массы. Более значительной оказалась корреляция между содержанием молекулярного газа и удельным угловым моментом звёздного компонента галактики: в галактиках с низким угловым моментом редко регистрируется СО-эмиссия, что обусловлено, по мнению авторов, более эффективным процессом формирования этих галактик, приведшим к разрушению молекулярного газа или предотвращению его оседания. Поскольку использовалась крупнейшая (в своём роде) полная, ограниченная по объёму выборка галактик из проекта ATLAS^{3D}, содержащая много галактик раннего типа из скопления Девы, то был проведён анализ влияния окружения, показавший, что СО-эмиссия была зарегистрирована только в десяти членах скопления, а влияние скопления на их молекулярные массы в лучшем случае незаметно, хотя (в отличие от спиральных галактик) они кажутся вириализованными внутри скопления; таким образом, по мнению авторов, эти галактики сохранили свой молекулярный газ на протяжении нескольких млрд лет пребывания в скоплении. Янг и др. обнаружили лишь несколько очень богатых газом галактик раннего типа (с массой молекулярного водорода (H_2) $\gtrsim 10^9 M_\odot$), но все они находятся в разреженном окружении.

Дэвис и др. [35] провели сопоставление протяжённости, профилей поверхностной яркости и кинематики молекулярного газа в галактиках раннего типа и в спиральных галактиках. Выборка галактик раннего типа включала в себя 41 богатую газом галактику, причём для 28 из них были выполнены интерферометрические наблюдения с помощью радиотелескопов Комбинированного Массива для Исследований в Астрономии Миллиметровых волн (CARMA, США), а для остальных галактик данные были взяты из литературы. Так, Дэвис и др. обнаружили, что протяжённость молекулярного газа в галактиках раннего типа меньше в абсолютном выражении, чем в галактиках поздних типов, но аналогична, если нормировать на оптические (звёздные) характерные шкалы длин галактик; причём протяжённость газа не зависит от кинематического рассогласования между газом и звёздами, но зависит от окружения: галактики в пределах скопления Девы имеют менее протяжённый газовый компонент, из чего авторы делают вывод о разных эволюционных путях для галактик внутри скопления и в поле. Дэвис и др. [35] отмечают, что примерно половина галактик раннего типа имеют профили поверхностной яркости молекулярного газа, повторяющие профили поверхностной яркости звёздного компонента галактик, т. е. газ в этих галактиках отрелаксирован, что указывает на отсутствие в недавнем прошлом таких галактик событий слияния или аккреции. Треть выборки галактик демонстрирует более медленный спад профиля поверхностной яркости молекулярного газа по сравнению с профилем поверхностной яркости звёздного компонента, а иногда имеет место усечённый профиль. Эти галактики часто имеют низкую массу и либо искажённую

морфологию молекулярного газа, либо располагаются внутри скопления, что предполагает недавние слияния, обдирание лобовым давлением или наличие горячего газа, поджигающего/усекающего газ. В остальных галактиках наблюдаются *кольца*, или сложные профили, которые, по утверждению авторов, вызваны влиянием баров. В большинстве галактик, заключают авторы, молекулярный газ является динамически холодным, а, значит, более уместен для непосредственного отслеживания круговой скорости, нежели ионизованный газ.

Анализ морфологии молекулярного газа для описанной выше выборки сорока богатых газом галактик раннего типа, выполненный Алатало и др. [36], показал большое разнообразие: в половине случаев молекулярный газ распределён в виде диска; в 15% случаев молекулярный газ образует кольца; в 10% случаев наблюдаются и кольца, и бар; в 5% случаев видны спиральные ветви; в остальных случаях молекулярный газ имеет умеренно (12.5%) или сильно (7.5%) искажённую морфологию. Авторы обнаружили слабую корреляцию между массой галактик и морфологией молекулярного газа, согласно которой самые массивные галактики в выборке обычно имеют молекулярный газ в форме диска.

1.3 Ионизованный газ и следы звездообразования

Пожалуй, одной из первых галактик раннего типа, в которой был обнаружен ионизованный газ, является эллиптическая галактика NGC 5128 с пылевой полосой: Бёрбидж и Бёрбидж [37] в 1959 году в оптических спектрах этой галактики обнаружили эмиссионные линии H_{α} и [NII], указывающие на вращение ионизованного газа. Позже Грэхэм [38] в ходе детальных спектральных наблюдений этой галактики обнаружил широкий набор эмиссионных линий: H_{α} , H_{β} , [NII] $\lambda\lambda 6548, 6584$, [SII] $\lambda\lambda 6716, 6731$ [OI] $\lambda\lambda 6300, 6364$; [OIII] $\lambda\lambda 4959, 5007$; и установил, что компактные области ионизованного водорода (HII) организованы во вращающееся кольцо (радиусом ~ 4 кпк), которое является частью наклонённого протяжённого вращающегося диска ионизованного газа, содержащего также и звёзды.

Спустя несколько лет ещё в двух галактиках раннего типа по эмиссионным линиям [OII] $\lambda 3727$ и [OIII] $\lambda 5007$ в их спектрах Калдвелл [39] установил наличие наклонных внутренних дисков ионизованного газа.

В 1986 году Филлипс и др. [40] выполнили спектроскопический обзор 203 галактик раннего типа, видимых на южном небе: в половине случаев в ядре галактик обнаружена эмиссия [NII] $\lambda 6584$ независимо от морфологии, но выявлена корреляция с абсолютной звёздной величиной, а также сильная корреляция с эмиссией в рентгеновском диапазоне. Наличие связи регистрируемой эмиссии [NII] $\lambda 6584$ с «радио-громкими» галактиками приводит авторов к выводу о том, что возбуждение газа обусловлено активностью ядра. Масса обнаруженного

ионизованного газа, по оценкам авторов, составляет $10^3 — 10^4 M_{\odot}$. Для восьми галактик из этой выборки, а также ещё для семи E и S0 галактик, взятых из литературы, в оптических спектрах которых ранее были обнаружены протяжённые эмиссионные линии, Бузон и др. [41] получили изображения в узкой полосе, охватывающей эмиссионные линии $H_{\alpha} + [NII]$, и выполнили изофотный анализ этих изображений и изображений в континууме. Авторы заключают, что эмиссионные области имеют регулярную, дискообразную (иногда — *кольцеобразную*) структуру и сильно сконцентрированы к ядру галактики; профили поверхностной яркости ионизованного газа в этих галактиках $\sim r^{1/4}$ (в отличие от ионизованного газа в спиральных галактиках, в которых поверхностная плотность ионизованного газа следует экспоненциальному закону) со шкалой длины меньше, чем у звёздного компонента; сравнение изофот ионизованного газа и подстилающего звёздного компонента показывает, что газ часто располагается в наклонных (по отношению к звёздному) дисках. Бузон и др. [41] предполагают, что ионизованный газ в большинстве этих галактик связан с холодной межзвёздной средой, нежели с горячим рентгеновским газом, причём более высокая доля ионизованного газа в этих галактиках, по мнению авторов, обусловлена активностью их ядер (их излучение в радио-континууме в 10 — 15 раз более мощное, чем в нормальных эллиптических галактиках той же оптической яркости). Этот вывод был подтверждён в работе Гудфруиш и др. [42], посвящённой построению изображений в широкополосных (B, V, I) и узкополосном ($H_{\alpha} + [NII]$) фильтрах для полной ограниченной по оптической звёздной величине $B_T^0 < 12$ выборки, включающей 56 эллиптических галактик. Ионизованный газ, демонстрирующий различную морфологию, был обнаружен в 32 галактиках (57%), пылевые полосы — в 23 галактиках (41%).

Позже с помощью установленного на телескопе им. В. Гершеля спектрографа интегрального поля SAURON, в рабочий диапазон которого попадают эмиссионные линии H_{β} , $[OIII]\lambda\lambda 4959,5007$ и $[NI]\lambda\lambda 5198,5200$, Сарзи и др. [43] исследовали 48 эллиптических (E) и линзовидных (S0) галактик, и для 75% из них были получены карты распределения ионизованного газа (в т. ч. карты распределения эквивалентных ширин эмиссионных линий) и определена его кинематика. Авторы резюмируют, что ионизованный газ демонстрирует разнообразие как в своём распределении, так и в кинематическом поведении и чаще детектируется в линзовидных галактиках и галактиках поля (только в 55% галактик из скопления Девы были зарегистрированы эмиссионные линии). Ионизованный газ имеет регулярную кинематику, но она редко соответствует простому круговому движению. В большинстве случаев кинематика ионизованного газа отличается от звёздной кинематики. В трети случаев распределение и кинематика газа подчеркивают наличие неосесимметричных возмущений гравитационного потенциала. Сарзи и др. [43] обнаружили вариацию отношения интенсивностей линий $[OIII]/H_{\beta}$ как в пределах одной галактики, так и в целом во всей выборке,

что указывает на различные механизмы возбуждения газа или неоднородную металличность межзвёздной среды.

Области НII — области ионизованного водорода — являются составной частью ионизованной межзвёздной среды и, в отличие от других эмиссионных линий, как правило, указывают на наличие текущего звездообразования. Под «звездообразованием» в данном случае понимают образование массивных звёзд, достаточно горячих, чтобы образовывать области НII, которые являются индикаторами их рождения. Маломассивное звездообразование не предлагает столь же удобных оптических индикаторов.

Для поиска областей НII и следов звездообразования в галактиках раннего типа Подж и Эскридж [44] отобрали 40 линзовидных галактик, содержащих атомарный водород (HI), и получили их изображения в узкой полосе, соответствующей эмиссионным линиям $H_\alpha + [NII]$, на телескопе Ликской обсерватории. В результате области НII были обнаружены более, чем у одной трети галактик (в 14 галактиках из 40). В большинстве случаев (в 10 из 14 галактик) области НII образуют *кольцеобразные* структуры. Авторы высказывают предположение о связи между тем, где идёт звездообразование, и тем, *почему* оно происходит. По их мнению, кольца в линзовидных галактиках имеют резонансную природу и играют ту же роль, что и спиральные рукава в галактиках более поздних типов: они оказывают кинематическое содействие, чтобы собрать достаточно газа для начала звездообразования. Авторы делят обнаруженные кольца на «внутренние» и «внешние». К внутренним кольцам они относят те, у которых отношение диаметра кольца к оптическому диаметру галактики $D_{\text{кольца}}/D_0 \leq 1/3$, а к внешним — те кольца, у которых это отношение $D_{\text{кольца}}/D_0 > 1/3$. Внутренние кольца встречаются в 7 из 10 галактик с кольцами, внешние кольца видны в 4 из 10 галактик, а одна галактика, NGC 7013, имеет как внутреннее, так и внешнее кольца. В большинстве случаев внутренние кольца появляются вблизи звёздных балджей галактик или внутри них, тогда как внешние кольца явно связаны с диском галактики. Дополнительное отличие состоит в том, что внутренние кольца, как правило, плотно заполнены областями НII, в то время как внешние кольца более разрежены и пятнисты. В остальных галактиках наблюдается аморфное распределение областей НII.

Таким образом, в отличие от поздних спиральных и неправильных галактик, в которых области звездообразования покрывают большую часть их дисков, области НII в линзовидных галактиках сильно локализованы в радиальном направлении.

Подж и Эскридж [44] отмечают дихотомию между линзовидными галактиками с обнаруженными областями НII и без них: галактики без областей НII имеют меньший вклад атомарного газа в барионную массу галактики, оцениваемую по светимости в *B*-полосе.

Для сравнения со спиральными галактиками авторы использовали результаты работы других исследователей и пришли к выводу, что активность звездообразования уменьшается

вдоль последовательности Хаббла от спиральных галактик к эллиптическим и зависит от локальных эффектов. Авторы заключают, что важным регулирующим фактором в звездообразовании для данного морфологического Хаббловского типа галактик является соотношение глобальной и локальной нестабильностей в газовых дисках.

Серра и др. [21] отмечают, что галактики, содержащие атомарный водород (HI) в пределах эффективного радиуса, демонстрируют признаки текущего звездообразования примерно в 70% случаев, что в пять раз чаще, чем в тех галактиках, где в центре отсутствует HI.

Исследованию звездообразования в *кольцеобразных* структурах и прояснению роли бара в этом процессе посвящена работа Гроучи и др. [45]: для 20 галактик с кольцами (16 SA галактик без бара и четырёх SAB галактик со слабым баром) были получены изображения в фильтре шириной 75 Å, центрированном на эмиссионную линию H_{α} , были измерены потоки в эмиссионной линии H_{α} (вычтен вклад эмиссии [NII]) и рассчитаны темпы звездообразования (по потоку в H_{α}), выполнен изофотный анализ; для сравнения темпов звездообразования в галактиках с баром и без бара была привлечена выборка из ранее опубликованной работы, состоящая из пяти SA, четырёх SAB и 15 SB галактик с кольцами. Авторы не находят корреляции между наличием бара и темпами звездообразования во внутренних кольцах, но предполагают, что это может быть обусловлено различными механизмами формирования рассматриваемых колец.

С запуском космических телескопов появилась возможность по ультрафиолетовым (УФ) изображениям галактик выявить наличие очень молодого звёздного населения в них.

Так, Донас и др. [46], используя данные из каталогов оптической фотометрии RC3 [60] и ультрафиолетовой фотометрии по изображениям, полученным с помощью космического телескопа GALEX [61], провели анализ двухцветных диаграмм ($FUV - NUV$) vs ($B - V$) для 130 галактик раннего типа и заподозрили наличие недавнего звездообразования у 10% галактик.

Марино и др. [47] выполнили исследование звёздного населения кольцевых структур, отчётливо видимых на УФ-изображениях (что указывает на недавнее звездообразование в них), для пяти линзовидных галактик из разреженного окружения. Авторы использовали изображения GALEX [58] в далёком (FUV) и близком (NUV) диапазонах, а также оптические данные из обзора SDSS [62]. В трёх галактиках видны полные кольца, в одной галактике кольцо имеет клочковатую структуру, и в двух галактиках прослеживаются дугообразные структуры. Структура внешних колец на УФ-изображениях выглядит менее сглаженной, чем на оптических изображениях (несмотря на лучшее разрешение SDSS-изображений), а в одном случае внешнее кольцо незаметно на оптическом изображении. Бары, видимые на оптических изображениях четырёх галактик, едва различимы на УФ-изображениях; а голубые звёздообразующие кольца в этих галактиках располагаются на концах баров. Авторы полагают, что эпизоды

звздообразования могут быть спровоцированы различными механизмами: как влиянием бара, так и эпизодами взаимодействия.

Салим и др. [48, 49] задались целью изучить слабое звздообразование, которое иногда встречается в пассивных галактиках раннего типа. Для этого они отобрали из каталогов SDSS [62] и GALEX [61] 27 галактик на красном смещении $z \sim 0.1$, в которых наблюдается избыток УФ-излучения (вдвое превышающий УФ-подъём, характерный для старого звёздного населения), что является признаком недавнего звздообразования, и отсутствуют эмиссионные линии в центре (что исключает активные галактики), и получили УФ-изображения этих галактик с высоким пространственным разрешением с помощью УФ-детектора, установленного на борту космического телескопа им. Хаббла. В большинстве случаев (в 19 галактиках) было обнаружено протяжённое звздообразование, простирающееся до оптических границ галактик (а иногда и дальше). В остальных случаях звздообразование было сконцентрировано в областях меньше оптического размера галактик. Причём протяжённое звздообразование часто локализовано в *кольцеобразных* структурах различной морфологии: регулярные широкие кольца (в восьми галактиках), узкие кольца (в четырёх галактиках), неправильные кольца (в двух галактиках), диски с малыми центральными дырами (в трёх галактиках), арки/ветви (в двух галактиках). Таким образом, кольца являются доминирующей структурой на УФ-изображениях, тогда как на оптических изображениях они не столь яркие. Авторы отмечают, что менее чем у половины галактик с УФ-кольцами на оптических изображениях виден бар, а, значит, видимые в УФ кольца не во всех случаях поддерживаются резонансом бара. Салим и др. [49] установили, что протяжённое звздообразование характерно для галактик поля, встречается только в дисковых галактиках раннего типа и наиболее часто в тех, у которых звёздная масса находится в диапазоне $10.6 < \log M_* < 11.1$; а в галактиках с высокой оптической концентрацией протяжённое звздообразование редко встречается. Также авторами обнаружено, что галактики с протяжённым звздообразованием имеют более протяжённые оптические диски, чем пассивные галактики той же массы. Средний темп звздообразования в исследованных галактиках раннего типа, по оценке авторов, составляет $\sim 0.5 \text{ } M_\odot/\text{год}$, что согласуется с оценками других исследователей.

Так, Гроучи и др. [45] по измеренным потокам в эмиссионной линии H_α получили широкий диапазон значений темпов звздообразования в кольцах исследуемых ими SA галактик: от $0.008 \pm 0.003 \text{ } M_\odot/\text{год}$ до $5.8 \pm 2.1 \text{ } M_\odot/\text{год}$.

Уиклинд и Хенкель [25] для своей выборки галактик раннего типа на основе излучения в далёком инфракрасном диапазоне оценили типичный темп звздообразования: $0.1\text{—}1 \text{ } M_\odot/\text{год}$, а эффективность звздообразования (оценённая по отношению ИК и СО-светимостей) в исследованных ими галактиках раннего типа оказалась того же порядка, что и в спиральных

галактиках. Оценив темпы исчерпания газа, авторы приходят к выводу, что звездообразование в этих галактиках носит *эпизодический* характер на временной шкале 10^8 лет. Но соотношение текущего и среднего темпов звездообразования, измеренное по светимостям в дальнем ИК и *B*-полосе, оказалось одинаковым для галактик раннего типа и для спиральных галактик, из чего авторы заключают, что на промежутке 10^9 лет темпы звездообразования постоянны.

Тронсон и др. [29] для четырёх галактик из своей выборки, для которых имелись данные по эмиссии в оптическом диапазоне, оценили темпы звездообразования и пришли к выводу, что они на порядок величины меньше, чем в спиральных галактиках позднего типа той же светимости, однако эффективность звездообразования такая же, как в спиралях. На основе этого Тронсон и др. [29] делают вывод, что *спиральная структура в значительной степени не имеет отношения к глобальному темпу и эффективности звездообразования*. (Любопытно, этот вывод близок к выводу, высказанному Уиклинд и Хенкель в их работе [25] и приведённому выше в разделе 1.2.)

1.4 Возможные источники газа в галактиках раннего типа

Пожалуй, первой работой, в которой был проведён анализ газового бюджета галактик раннего типа, является статья Фабер и Галлахера [31], вышедшая в 1976 году: в ней рассмотрены как процессы убыли газа (посредством звездообразования, либо выдуванием галактическим ветром, либо в результате обдирания при взаимодействии с другой галактикой или межгалактической средой скопления), так и процессы, пополняющие запасы газа в галактике (возврат газа эволюционирующими звёздами, аккреция газа при взаимодействии или слиянии галактик). И практически во всех последующих статьях, которые посвящены обнаружению газа в галактиках (перечислены выше в разделах 1.1 — 1.3), авторы обсуждают возможные источники газа.

Итак, существуют следующие возможные варианты происхождения/эволюции газа в галактиках раннего типа.

Во-первых, газ мог сохраниться от эпохи формирования самой галактики, если не был полностью исчерпан в ходе длительной эволюции. (Но в таком случае возникает дискуссионный вопрос о причинах остановки/уменьшения темпов звездообразования.)

Во-вторых, газ мог накапливаться внутри галактики в результате потери массы эволюционирующими звёздами [31]. Так, по оценкам, приведённым в работе [36], ожидается, что каждая галактика из выборки ATLAS^{3D} возвращает в межзвёздную среду в среднем $0.1M_{\odot}/\text{год}$ за счет потери массы только старым звёздным населением. А Тронсон и др. [29] для некоторых галактик раннего типа из своей выборки, в которых обнаружено рентгеновское

излучение, предполагая, что это излучение обусловлено горячим протяжённым газом, оценили темп его охлаждения и показали, что он сравним с темпом потери массы эволюционирующими звёздами, но в совокупности эти темпы значительно ниже темпов наблюдаемого звездообразования, т. е. сегодняшняя межзвёздная среда создана не только газом, возвращаемым эволюционирующими звёздами, но и, по мнению авторов, содержит газ, оставшийся от более ранних эпох звездообразования.

В-третьих, газ может аккрецировать из внешнего источника в результате приливных обдирааний, холодной аккреции и/или малых слияний с богатыми газом спутниками.

Таким образом, галактики могут восстанавливать/пополнять содержание газа как из *внешних*, так и из *внутренних* источников.

Салим и др. [49] в результате сопоставления морфологии галактик на УФ- и оптических изображениях пришли к выводу, что для галактик с широкими УФ-кольцами наиболее вероятным механизмом пополнения газа является аккреция межгалактического газа, тогда как угасание первоначального процесса звездообразования наблюдается в галактиках с УФ-дисками с малыми центральными дырами (т. н. эволюция «изнутри — наружу») и в галактиках с ветвями. Поскольку на оптических изображениях не видно возмущений структуры, то авторы рассматривают только малые слияния как возможный источник газа в случае наблюдаемого в центрах галактик мелкомасштабного звездообразования. Авторы резюмируют, что аккреция межгалактической среды ответственна за звездообразование в 55% галактик из их выборки, малые слияния — в 20% галактик выборки, а угасание первоначального звездообразования имеет место в 25 % галактик выборки. Таким образом, по оценке авторов, в 75% галактик из их выборки газ имеет внешнее происхождение.

Оостерлоо и др. [23] по результатам исследования распределения нейтрального водорода в галактиках раннего типа приходят к выводу, что даже если два типа галактик — эллиптические и линзовидные — являются результатом различного пути формирования, то это не отражено в характеристиках распределения HI. По их мнению, слияния и аккреция межгалактической среды — возможные объяснения происхождения газа в этих галактиках.

Однако Дэвис и др. [52] полагают, что определение доминирующего источника холодной межзвёздной среды в галактиках раннего типа существенно для понимания их формирования и эволюции. В своём исследовании Дэвис и др. [52] руководствуются следующими рассуждениями. Поскольку модели звёздной эволюции предсказывают, что в среднем звёздное население возвращает в межзвёздную среду порядка половины своей звёздной массы в течение Хаббловского времени, то этот выброшенный газ может остыть из ионизованной фазы и стать молекулярным, возрождая резервуар холодного газа. Из-за сохранения углового момента потеря массы звёздами ведёт к производству газа, кинематически совпадающего с основной массой

звёзд, которые его произвели. А вещество из внешних источников (слияния галактик и/или холодная мода аккреции газа из межгалактической среды) может войти в галактику с любым угловым моментом, так что можно ожидать увидеть равное количество галактик с со-вращающимся и противоположно вращающимся газом, если внешняя аккреция и слияния значимы (и если нет предпочтительного направления аккреции).

Таким образом, для определения того, является ли источник внешним или внутренним, Дэвис и др. [52] предлагают сравнивать угловые моменты газа и подстилающего звёздного населения, что возможно сделать, имея соответствующие двумерные кинематические карты, полученные из наблюдений с помощью спектрографа интегрального поля. Кинематический угол рассогласования ψ определяется как разность кинематических позиционных углов (РА) двух компонентов галактики. (Кинематический позиционный угол (РА) определяется как направление максимального градиента лучевых скоростей, связанных с проекцией скорости вращения.) Однако стоит иметь в виду, что медленно вращающиеся галактики имеют небольшое или не имеют когерентного вращения по определению (в отличие от быстро вращающихся галактик), что приводит в таком случае к большой неопределённости в определении углов кинематических рассогласований.

Дэвис и др. в своей работе [52] использовали полную, ограниченную по объёму выборку ATLAS^{3D}, состоящую из 260 галактик раннего типа, расположенных в пределах 42 Мпк. В своём исследовании авторы для каждой галактики из выборки комбинировали кинематические карты, полученные для звёзд и газа с помощью спектрографа интегрального поля SAURON, кинематические карты нейтрального водорода (HI), полученные на Вестерборкском синтезирующем радиотелескопе (WSRT), и кинематические карты молекулярного газа (CO), полученные с помощью Комбинированного массива радиоантенн для исследований в астрономии миллиметровых волн (CARMA) или взятые из литературы. Авторы обнаружили, что молекулярный, ионизованный и атомарный газ во всех зарегистрированных случаях из данной выборки галактик кинематически согласованны, даже когда они кинематически смещены относительно звёзд, и предположили, что все три фазы межзвёздной среды могут иметь общее происхождение. Хотя, замечают авторы, учитывая столкновительную природу газа, было бы трудно сохранять две кинематически различные фазы межзвёздной среды в течение любого промежутка времени, если только они не были широко разделены по радиусу, например, как отдельные кольца.

Дэвис и др. [52] обнаружили, что среди быстро вращающихся галактик раннего типа из их выборки 36% имеют ионизованный газ, кинематически смещённый по отношению к звёздам, что, по мнению авторов, устанавливает строгий нижний предел на значимость полученного извне газа (например, в результате слияния и холодной аккреции). Медленно вращающиеся

галактики имеют плоское распределение кинематических смещений. Более того, несмотря на то что, ионизованный газ встречается в медленных ротаторах, молекулярный газ — почти никогда. Всё это, как пишут авторы, указывает на то, что для медленно вращающихся галактик преобладающим источником ионизованного газа является внешний.

Кроме того, после разделения выборки на две подгруппы: галактики из скопления Девы (плотное окружение) и галактики поля (разреженное окружение), Дэвис и др. [52] обнаружили чёткую дихотомию в распределении углов кинематических рассогласований. Так, галактики в плотных группах и в скоплении Девы почти всегда имеют кинематически согласованные звёзды и молекулярный газ, что, по мнению авторов, согласуется с чисто внутренним происхождением газа (предположительно, в результате его потери звёздами). А вот среди галактик поля более 40% близких быстро вращающихся галактик раннего типа имеют кинематические расхождения между молекулярным и звёздным компонентами, что указывает на внешнее происхождение их газа. Однако стоит иметь в виду, что даже кинематически согласованный газ может иметь внешнее происхождение (если релаксация кинематически смещённого газа происходит в течение короткого периода времени). Так, авторы обнаружили, что 6 из 16 галактик с обнаруженным атомарным (HI) газом, у которых газ кинематически совмещён со звёздами, на больших радиусах имеют кинематические возмущения атомарного (HI) газа, что указывает на продолжающуюся аккрецию из внешних источников.

Для всей выборки галактик Дэвис и др. [52] построили график зависимости угла кинематического рассогласования от абсолютной звёздной величины в K_s -полосе, позволяющей посчитать массу звёздного компонента галактики, и обнаружили, что наиболее массивные быстро вращающиеся галактики в их выборке ($M_K \leq -24$ mag; звёздная масса $\approx 8 \times 10^{10} M_\odot$), как в разреженном окружении, так и в плотном, всегда имеют кинематически согласованный газ. Однако самыми яркими и самыми массивными галактиками в плотном окружении обычно являются медленно вращающиеся галактики. Таким образом, авторы предполагают, что для быстро вращающихся галактик масса и окружение могут быть важными *независимыми* параметрами, определяющим происхождение молекулярного и ионизированного газа.

Дэвис и др. [52] заключают, что слияния и/или аккреция важны в эволюции медленно вращающихся галактик. А вот чисто внутреннее происхождение молекулярного и ионизованного газа имеет место быть в трёх типах популяций галактик (частично перекрывающихся): в быстро вращающихся галактиках скопления Девы, в самой плотной части групп из их выборки и в быстро вращающихся галактиках с самой высокой светимостью. И, следовательно, резюмируют авторы, медленно вращающиеся галактики эволюционировали иначе, чем быстрые ротаторы, — с большим количеством внешних событий таких, как слияния.

Здесь следует отметить, что о признаках внешнего происхождения газа сообщалось и в более ранних работах по обнаружению газа в галактиках раннего типа. Так, Ван Вёрден, ван Дриель и др. в ходе исследования распределения атомарного водорода в 11 линзовидных галактиках обнаружили, что нередко внешние кольцевые структуры нейтрального водорода (а иногда и внутренние кольца) расположены под углом к плоскости звёздного диска галактики [11, 12, 13, 14]. Уиклинд и др. [30] пишут о признаках внешнего происхождения молекулярного газа в эллиптических галактиках. О наклонных дисках ионизованного газа указывается в работах Грэхэма [38], Калдвелла [39], Бузона и др. [41].

Морганти и др. [20] обнаружили, что во всех исследованных ими галактиках раннего типа, где был зарегистрирован нейтральный водород, также содержится и ионизованный газ, причём кинематика нейтрального водорода и ионизованного газа совпадают — это указывает на то, что они образуют единую структуру. А кинематика звёздного компонента почти во всех случаях оказалась рассогласована с кинематикой газа, что указывает на аккреционное происхождение газа. Причём авторы отмечают, что газовая аккреция (преимущественно через слияния и реже — посредством холодной аккреции) является общим явлением для галактик любого морфологического типа и, таким образом, галактики раннего типа по сей день продолжают наращивать свою массу.

Серра и др. [21] в результате исследования нейтрального водорода в галактиках выборки ATLAS^{3D} установили, что наблюдаемые внешние кольца HI в половине случаев кинематически рассогласованы со звёздным населением галактик.

Отдельные примеры эллиптических и линзовидных галактик с рассогласованной кинематикой газа и звёзд рассмотрены в работах Бертола и др. [63, 64 и ссылки там], и авторы заключают, что газ в 40% из рассмотренных ими 15 галактик раннего типа имеет внешнее происхождение, причём в 20% случаев он вращается в направлении противоположном вращению звёзд, в других случаях наблюдаются полярные кольца, а промежуточные положения характерны, по мнению авторов, для случаев недавно приобретённого газа и являются транзиентными фазами. Авторы высказывают предположение, что внешняя аккреция газа имеет место и в спиральных галактиках, но не имеет ярко выраженного проявления вследствие взаимодействия с уже существующим в диске газом.

Зеилингер и др. [65] попытались восстановить кинематические карты газа для шести галактик раннего типа путём получения спектров с длинной щелью в нескольких положениях для каждой галактики. В результате в пяти галактиках наблюдается сильное рассогласование кинематики звёзд и ионизованного газа (что явно указывает на его внешнее происхождение), при этом газ обладает регулярной морфологией, а, значит, газ находится в равновесном состоянии, что, по мнению авторов, указывает на триаксиальную форму потенциала галактики.

Каннапанн и Фабрикант [66] на основе данных длиннощелевой спектроскопии попытались оценить частоту встречаемости противоположного вращения газового и звёздного компонентов. Для этого они использовали выборку из 67 галактик, взятых из обзора галактик ближнего поля (репрезентативного вплоть до $M_B \sim -15^m$), и обнаружили четыре случая противоположного вращения среди 17 E/S0-галактик с протяжённой эмиссией в газе, но среди 38 спиральных галактик Sa-Sbc типа не нашли чётких признаков противовращения (лишь одна Sa-галактика из их выборки имеет пекулярную газовую кинематику). И среди Sc и более поздних типов галактик только одна галактика предположительно имеет противоположное вращения газа и звёзд.

С той же целью определения частоты встречаемости феномена рассогласованной кинематики в полной популяции галактик в рамках обзора MANGA [67] из исходной выборки галактик различных морфологических типов (1351 объект) были отобраны и исследованы 66 галактик с кинематически рассогласованными газовым и звёздным компонентами. Выяснилось, что независимо от морфологического типа эти галактики располагаются преимущественно в разреженном окружении, либо являются изолированными. В соответствии с удельными темпами звездообразования галактики были поделены на три категории: 1) звездообразующие (10 галактик); 2) галактики из т. н. «зелёной долины» (область на диаграмме «цвет-звёздная величина») — 26 галактик; 3) пассивные (30 галактик). Около 90% пассивных галактик и из категории «зелёная долина» являются галактиками раннего типа (индекс Серсика $n > 2$), тогда как звездообразующие галактики являются дисковыми. Авторы статьи [67] отмечают регулярный характер кинематических карт газового и звёздного компонентов, несмотря на рассогласованную кинематику газа и звёзд (подобное было ранее отмечено в упомянутой выше работе [65] Зеилингера и др.). Кроме того, были построены карты эквивалентных ширин эмиссионной линии H_α , на которых были замечены такие субструктуры, как центральные концентрации (в 23% галактик), биконические структуры (у 6% галактик), кольцеобразные структуры (в 10 из 66 галактик), остальные карты (для 56 % галактик) выглядят сглаженными без видимых субструктур. Авторы статьи [67], следуя предположению Бертола и др. [63, 64], предлагают следующий сценарий внешней аккреции, объясняющий различия, наблюдаемые в трёх категориях галактик. В кинематически рассогласованных звездообразующих галактиках аккрецированный газ сталкивается с уже существующим газом, теряя угловой момент и провоцируя звездообразование в центральных областях, что приводит к быстрому росту центральных областей. Напротив, пассивные галактики и галактики из «зелёной долины» с рассогласованной кинематикой сформировались в результате аккреции кинематически обособленного газа (от карликовых спутников) на бедные газом прародители.

Похожее по целям и объёму выборки исследование было выполнено чуть позже командой австралийских астрономов в рамках обзора со спектрографом интегрального поля SAMI [68] с акцентом на оценку влияния окружения, для чего была увеличена доля галактик из скоплений (поскольку среди 66 галактик выборки MANGA, описанной выше, было лишь четыре галактики из скопления — слишком мало для статистических выводов). Из 1213 галактик выборки кинематические позиционные углы газового и звёздного компонентов были определены для 618 галактик, среди которых лишь 11% показали рассогласование, превышающее 30° (как в галактиках поля, так и в галактиках скоплений): в 45% галактик раннего типа и в 5% галактик позднего типа. Брайант и др. [68] согласны с выводами из работы [67] о том, что доля галактик с рассогласованной кинематикой не является индикатором доли галактик с внешним газом, поскольку в галактиках позднего типа доминирует внешний газ, аккрецированный с угловым моментом, совпадающим с угловым моментом звёзд, либо развёрнутый в этом направлении уже существующим газом; а также авторы подтверждают результаты Дэвиса и др. [52] о малой доле обнаруженных кинематических рассогласований в галактиках скоплений (несмотря на более высокую вероятность взаимодействий и слияний в плотном окружении), однако объясняют наблюдаемое рассогласование газовой и звёздной кинематики в галактиках скоплений не аккрецией, а оттоком газа вследствие обдирания лобовым давлением межгалактической среды. Брайант и др. [68] приходят к выводу, что кинематические рассогласования обусловлены скорее морфологией галактик, нежели слияниями: рассогласованная кинематика встречается преимущественно в галактиках раннего типа.

Ранее к похожим результатам и кардинально другим выводам пришли Катков и др. в ходе исследования совокупной выборки 18 абсолютно изолированных линзовидных галактик, как северного [69], так и южного [53] неба. В 13 из 18 галактик наблюдаются протяжённые диски ионизованного газа, по кинематике часто отличающиеся от звёздных дисков, и в половине из них имеет место противоположное вращение ионизованного газа по отношению к звёздам. Поскольку именно такая доля ожидается в случае изотропно распределённых внешних источников газа, то авторы заключают, что во всех этих случаях газ имеет внешнее происхождение (несмотря на видимую изолированность этих галактик), и выдвигают гипотезу о том, что морфологический тип дисковой галактики в поле полностью определяется внешним режимом аккреции холодного газа. Причём диагностика механизмов возбуждения газа показала, что возбуждение молодыми звёздами встречается редко.

Ранее любопытную особенность заметили Куйкен и др. [70]: они предприняли попытку найти противовращающийся звёздный (а не только газовый) компонент в выборке из 28 линзовидных галактик и не нашли ни одного случая, и пришли к выводу, что галактики с выявленными двумя звёздными компонентами, вращающимися в противоположном

направлении, являются редкими исключениями, оценив их долю в $\sim 1\%$ среди S0-галактик, что сильно контрастирует с большей долей случаев противовращения газового компонента (в 17 из 28 исследованных галактик обнаружен ионизованный газ, и в четырёх из них газ движется по ретроградным орбитам) и находится в согласии с видимым отсутствием современного звездообразования в газовых дисках большинства линзовидных галактик. Куйкен и др. отмечают, что обычно противовращающийся звёздный компонент наблюдается в центральных областях галактик [70 и ссылки там] — в пределах мелкомасштабных газовых противоположно вращающихся дисков; а случаи крупномасштабного противоположно вращающегося звёздного компонента — единичны. Причиной этому, по мнению авторов, может быть подавление звездообразования вследствие взаимодействия аккрецированного газа со звёздным ветром, сдуваемым по ходу вращения основного звёздного диска.

Однако, например, Катков и др. [71] диагностируют текущее звездообразование, протекающее в *кольцевой* области противовращающегося крупномасштабного газового диска в линзовидной галактике IC 719. Ещё несколько примеров галактик с противовращающимся вторым звёздным компонентом приведены в статье Каткова и др. [72 и ссылки там].

Сильченко и др. [54] в ходе исследования посредством панорамной и длиннощелевой спектроскопии 18 линзовидных галактик тоже обнаружили в большинстве случаев рассогласованную кинематику газа и звёзд: в семи галактиках наблюдаются околядерные полярные диски, в пяти галактиках крупномасштабные газовые диски сильно наклонены к звёздным дискам, а в одной галактике — NGC 2551 — газ противовращается в плоскости звёздного диска. Причём авторы диагностируют текущее звездообразование, протекающее в кольцеобразных областях, совпадающих с УФ-кольцами, в 12 из 18 галактик, и приходят к выводу, что звездообразование обычно происходит там, где газ лежит строго в плоскостях звёздного диска и имеет круговое вращение; направление вращения газа не имеет значения (противоположно вращающийся газ в NGC 2551 образует звёзды). В галактиках без текущего звездообразования протяжённые газовые диски либо находятся в стационарной квазиполярной ориентации, либо были приобретены недавно в ходе аккреции под углом к основному диску, что вызывает ударное возбуждение.

Помимо рассогласованной кинематики, на внешнее происхождение газа может указывать и различие в металличности газа и подстилающего звёздного населения [73].

Глава 2. Исследование историй звездообразования в S0-галактиках

Итак, как показано в Главе 1, в дисках некоторых галактик раннего типа стали обнаруживать значительное количество холодного газа. Однако масштабное звездообразование в них отсутствует: оно локализовано, как правило, в *кольцеобразных* структурах [44 — 49].

При написании данной Главы диссертации использована публикация [87], выполненная соискателем Прошиной И.С. в соавторстве, в которой, согласно Положению о присуждении учёных степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования.

2.1 От звёздных колец к звездообразующим кольцам

Прежде чем перейти к кольцам звездообразования в галактиках раннего типа, хотелось бы упомянуть, что крупномасштабные звёздные кольца в дисковых галактиках — хорошо известные структуры. Так, уже в 1960 году Б.А. Воронцов-Вельяминов после изучения Паломарского атласа неба предложил рассматривать кольца как отдельный структурный элемент, характеризующий морфологическую классификацию наравне со спиральными ветвями и барами [74, 75]. В 1975 году И.П. Костюк опубликовала список галактик с внешними кольцевыми структурами [76]. Фью и Мадоре в 1986 году опубликовали результаты морфологического исследования 69 кольцевых галактик, которые были ими разделены на два типа: 1) «О»-тип — регулярные кольца, центрированные на ядра галактик, и 2) «Р»-тип — неоднородные по яркости кольца часто со смещённым относительно ядра галактики центром, что указывает на столкновительное происхождение этих колец, подкрепляемое присутствием спутников возле этих галактик в пределах двукратного радиуса их колец [77]. В 1995 году Бута опубликовал каталог кольцевых галактик Южного неба, в котором приведена детальная морфологическая классификация 3692 галактик [78], включающая внешние, внутренние, околядерные кольца, а также линзы; а позже каталог был пересмотрен и дополнен [79]. Комерон и др. составили каталог и атлас из 724 галактик с резонансными кольцами (ARRAKIS) [80], отобранных среди изображений в полосах 3.6 мкм и 4.5 мкм, полученных в ходе обзора неба космическим инфракрасным телескопом Spitzer [81], и оценили, что кольцевые структуры различных масштабов присутствуют более, чем у половины дисковых галактик. Кольца, представленные в атласе ARRAKIS [80], являются чисто звёздными, поскольку на длине волны 4 мкм мы видим в основном старое звёздное население. Тогда как в ближнем ультрафиолете (NUV) мы видим в основном молодые звёзды возрастом не более пары сотен миллионов лет [51]. Морфологию ближайших галактик в этой области длин волн можно изучать, используя

общедоступные данные космического телескопа GALEX [61]. Комерон [82] сопоставил выборку галактик с внутренними звёздными кольцами из каталога ARRAKIS [80] с их изображениями в дальнем ультрафиолете (FUV) из GALEX [61] и изображениями в узкой полосе H_α и пришёл к выводу, что среди дисковых галактик раннего типа лишь $21 \pm 3\%$ и $28 \pm 5\%$ колец являются пассивными по таким индикаторам звездообразования, как FUV и H_α , соответственно. Причём Комерон отмечает, что кольца, пассивные по индикатору FUV, всегда пассивны по индикатору H_α , но не всегда верно обратное. Костюк и Сильченко [83, 84] выполнили подобный анализ, применив его для галактик с внешними звёздными кольцами (окончательная выборка включает 34 галактики), и обнаружили, что следы недавнего звездообразования присутствуют примерно в половине галактик с «чистыми» (регулярными) внешними кольцами, а среди галактик с псевдокольцами (незамкнутые кольца), которые, как правило, являются спиральными галактиками, недавнее звездообразование наблюдается почти во всех случаях. В 2011 году Ильина и Сильченко [85], используя каталог УФ-изображений близких галактик, полученных космическим телескопом GALEX [61], каталог галактик с внешними кольцевыми структурами [76], составленный Костюк, и данные из архива Б.А. Микульски для космических телескопов (MAST⁴), отобрали 14 линзовидных галактик с УФ-кольцами, провели фотометрический анализ их оптических изображений в полосах g (4686 Å) и r (6165 Å), взятых из архива Слоановского цифрового обзора неба (SDSS⁵) [62], и обнаружили хорошее согласие между локализациями оптических и УФ-колец. Позже Ильина и др. [86] для четырёх линзовидных галактик без баров, но с УФ-кольцами из обозначенной выше выборки провели спектральный анализ с целью выявить природу этих колец.

Представленные в этой Главе диссертации результаты являются продолжением начатых ранее (и описанных выше) исследований и были опубликованы в статье Прошиной и др. [87].

Для того чтобы разобраться в условиях протекания процессов звездообразования в линзовидных галактиках, нами было проведено детальное спектрофотометрическое исследование пяти линзовидных галактик (NGC 809, PGC 48114, NGC 2697, NGC 7808, NGC 4324), в которых наблюдаются кольца в оптическом и в УФ-диапазонах. Галактики NGC 809 и NGC 7808 приведены в атласе GALEX [61], а результаты фотометрического анализа их изображений представлены в статье Ильиной и Сильченко [85]. Галактика NGC 4324 вошла в состав выборки ATLAS^{3D} [88] и была изучена фотометрически в работах Комерона и др. [80] и Кортеше и Хьюджеса [89]. Более далёкая линзовидная галактика PGC 48114 была отмечена как кольцевая галактика в каталоге И.П. Костюк [76], а при просмотре УФ-изображений этой галактики нами обнаружено и УФ-кольцо. Также при просмотре УФ-изображений наше внимание привлекла кольцеподобная структура у галактики NGC 2697.

4 <https://galex.stsci.edu/GR6/>

5 <https://www.sdss.org/>

Исследуемые галактики классифицируются как галактики раннего типа без баров, их основные характеристики, взятые из баз данных HyperLeda⁶ и NED⁷, приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 — Основные характеристики исследуемых галактик

Галактика	NGC 809	NGC 2697	NGC 4324	NGC 7808	PGC 48114
Тип галактики (NED)	(R)S0 ⁺	SA0 ⁺ (s)	SA(r)0 ⁺	(R')SA0 ⁰	S? (S0)
V_{sys} , км/с (NED)	5340	1824	1667	8865	7077
Расстояние галактоцент- рическое, Мпк	73.3	22.7	26.2 ⁸	122.4	96.6
Шкала, кпк/''	0.355	0.110	0.127	0.594	0.468
R_{25} , '' (RC3 [60])	44	55	83	38	20
R_{25} , кпк	15.6	6.1	10.5	22.6	9.4
M_B (LEDA)	-20.03 ^m	-18.67 ^m	-19.75 ^m	-21.39 ^m	-19.73 ^m
M_H (NED)	-23.74 ^m	-22.26 ^m	-23.64 ^m	-24.71 ^m	-23.34 ^m
$(g-r)$ (SDSS)	0.77 ^m	-	0.74 ^m	0.77 ^m	0.80 ^m
$PA_{\text{фот}}$ (LEDA)	173°.	123°	54°.	-	89°
Наклон i (NED)	36.2°	52.3°	64.6°	8.2°	16.6°
$M(\text{HI})$, $10^8 M_{\odot}$ ⁸	-	6	17	-	-
$M(\text{H}_2)$, $10^8 M_{\odot}$ (по [36])	-	4.1	0.9	-	-
Окружение	Изолированная галактика (в 670 кпк от галактики MCG-02-06-027)	Галактика из группы NGC2698 (8 объектов) [90]	Галактика из группы NGC4303 (23 объекта) [91]	Галактика из группы MR18_02412 (5 объектов) [92]	В паре с галактикой на 1,5 ^m слабее в 160 кпк от неё

2.2 Наблюдательные данные и их обработка

По нашей программе (основной заявитель — А.Ю. Князев) для пяти исследуемых галактик были проведены спектральные наблюдения в режиме длинной щели с помощью спектрографа Роберта Стоби (RSS; [93, 94]) на 11-метровом Южно-Африканском большом телескопе (SALT; [95, 96]).

⁶ Lyon-Meudon Extragalactic Database (<http://leda.univ-lyon1.fr>)

⁷ NASA/IPAC Extragalactic Database (<http://ned.ipac.caltech.edu>)

⁸ Источник данных по содержанию HI — Extragalactic Distance Database (<http://edd.ifa.hawaii.edu>)

Ориентация щели соответствовала положению больших осей изофот дисков исследуемых галактик, кроме галактики NGC 7808, у которой изофоты круглые; поэтому для NGC 7808 было получено два спектра в разных позиционных углах, которые показали идентичные профили лучевых скоростей, что позволило сложить их в один спектр и сделать вывод о расположении кинематической большой оси между этими разрезами. Во время наблюдений использовалась объёмно-фазовая решётка PG0900 — 900 штрихов/мм, охватывающая спектральный диапазон от 3760 Å до 6860 Å с обратной дисперсией 0,97 Å/пиксель и спектральным разрешением 5.5 Å. Ширина щели составляла 1.25", эффективное поле зрения вдоль щели — 8'; размер пикселя — 0.1267". Был применён двух- либо четырёхкратный биннинг при считывании, что дало окончательный пространственный масштаб — 0.253"/пиксель либо 0.507"/пиксель, соответственно. Качество атмосферы во время наблюдений варьировалось в диапазоне 1.5" — 3.5". Более подробные параметры наблюдений приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 — Журнал спектральных наблюдений с длинной щелью

Галактика	Дата наблюдений	Экспозиция, сек	Биннинг	РА _{щели} , градусы	Качество изображения (FWHM), уг. сек.
NGC 809	7 октября 2011	1020 × 3	2 × 2	173	2.5
NGC 2697	22 ноября 2012;	900 × 3	2 × 4	305	2.2 – 2.7
	16 февраля 2013	900 × 3	2 × 4	305	2.7
NGC 4324	10 марта 2013	800 × 3	2 × 4	233	3.5
NGC 7808	2 декабря 2012;	600 × 3	2 × 4	50	1.5
	4 декабря 2012	600 × 3	2 × 4	123	3.5
PGC 48114	20 февраля 2013	600 × 3	2 × 4	275	2.7–3.2

Каждую ночь после наблюдений каждой галактики снимался спектр аргонной лампы сравнения для калибровки шкалы длин волн, а также регулярно снималось плоское поле. После наблюдений объектов в сумерки снимались стандартные спектрофотометрические звёзды с той же спектральной конфигурацией спектрографа RSS, что позволило осуществить калибровку относительного спектрального потока в полученных спектрах галактик.

Обработка первичных данных была выполнена А. Ю. Князовым с помощью стандартного пакета обработки SALT [97]. После этого скорректированные за смещение и усиление мозаичные данные длинных щелей (камера спектрографа RSS представляет собой мозаику из трёх ПЗС-приёмников) были обработаны способом, описанным в статье Князева и др. [98]. Точность спектральной линеаризации проверялась по положениям линий ночного неба

[OI] λ 5577 и [OI] λ 6300; среднеквадратичный разброс, измеренный вдоль щели, составил 0,04 Å. Для оценки фона во время экспозиций галактик использовались спектры неба с краёв щели.

2.3 Анализ спектральных данных: кинематика звёзд и газа и их металличность

В спектрах исследуемых галактик обнаружены сильные эмиссионные линии H_α и дублета [NII] в срединных и периферийных частях их газовых дисков. У двух наиболее близких к нам галактик — NGC 4324 и NGC 2697 — наблюдаются также сильные эмиссионные линии дублета [SII], для более далёких галактик — NGC 7808, NGC 809 и PGC 48114 — эта область не попала в спектральный диапазон решётки спектрографа из-за большего красного смещения у этих галактик. Кроме того, в спектрах галактик NGC 4324, NGC 7808 и NGC 2697 встречаются эмиссионные линии H_β и [OIII] на тех же расстояниях от их центров, что и эмиссии H_α и [NII].

По указанным эмиссионным линиям путём гаусс-анализа бледами H_α + [NII] λ 6548,6583 (с учётом абсорбционной линии H_α звёздного населения), а также бледами H_β + [OIII] λ 5007 (с учётом абсорбционных линий H_β и TiI λ 5007+TiI λ 5015) и дублета [SII] λ 6716.4,6730.6 (на участках тех спектров галактик, где они проявляются) были определены лучевые скорости компонент ионизованного газа, измерены эквивалентные ширины эмиссионных линий и их отношения: [NII] λ 6583 к H_α , [OIII] λ 5007 к H_β , [SII] λ 6717 к [SII] λ 6731 (либо отношения потоков в этих линиях), что позволило диагностировать механизм возбуждения газа в областях на различных удалениях от центров галактик с помощью так называемых BPT-диаграмм, предложенных Болдуином, Филлипсом и Терлевичем в 1981 году [99], а по отношению потоков в линиях дублета серы — оценить электронную плотность [100].

Лучевые скорости звёздного компонента были определены для всех галактик путём кросс-корреляции сине-зеленой части их спектров (4050–5590 Å) со спектром звезды HD58972, яркого К-гиганта, снятым в той же конфигурации спектрографа. Для улучшения отношения сигнал/шум (S/N) в периферийных частях галактик спектры были просуммированы в бины с учётом радиальной структуры галактик (о которой будет изложено ниже в подразделе 2.4).

Погрешности измерения лучевых скоростей звёзд и компонент ионизованного газа находятся в диапазоне 2 — 20 км/с, а эквивалентных ширин — в пределах 0.15 — 0.9 Å.

На рисунке 2.1 *вверху* показаны оптические изображения исследуемых пяти галактик в комбинированных цветах, взятые из архива SDSS и повернутые так, чтобы нанесённые на них положения щелей располагались горизонтально; *внизу* показаны кривые лучевых скоростей звёзд и компонент ионизованного газа; *посередине* показаны графики изменений с расстоянием от центров галактик (измеренным вдоль щели) эквивалентных ширин (EW) эмиссионных линий H_α , [NII] λ 6583, [SII] λ 6716, [SII] λ 6731 и H_β , [OIII] λ 5007 и величина $\lg\{[NII]\lambda 6583/H_\alpha\}$.

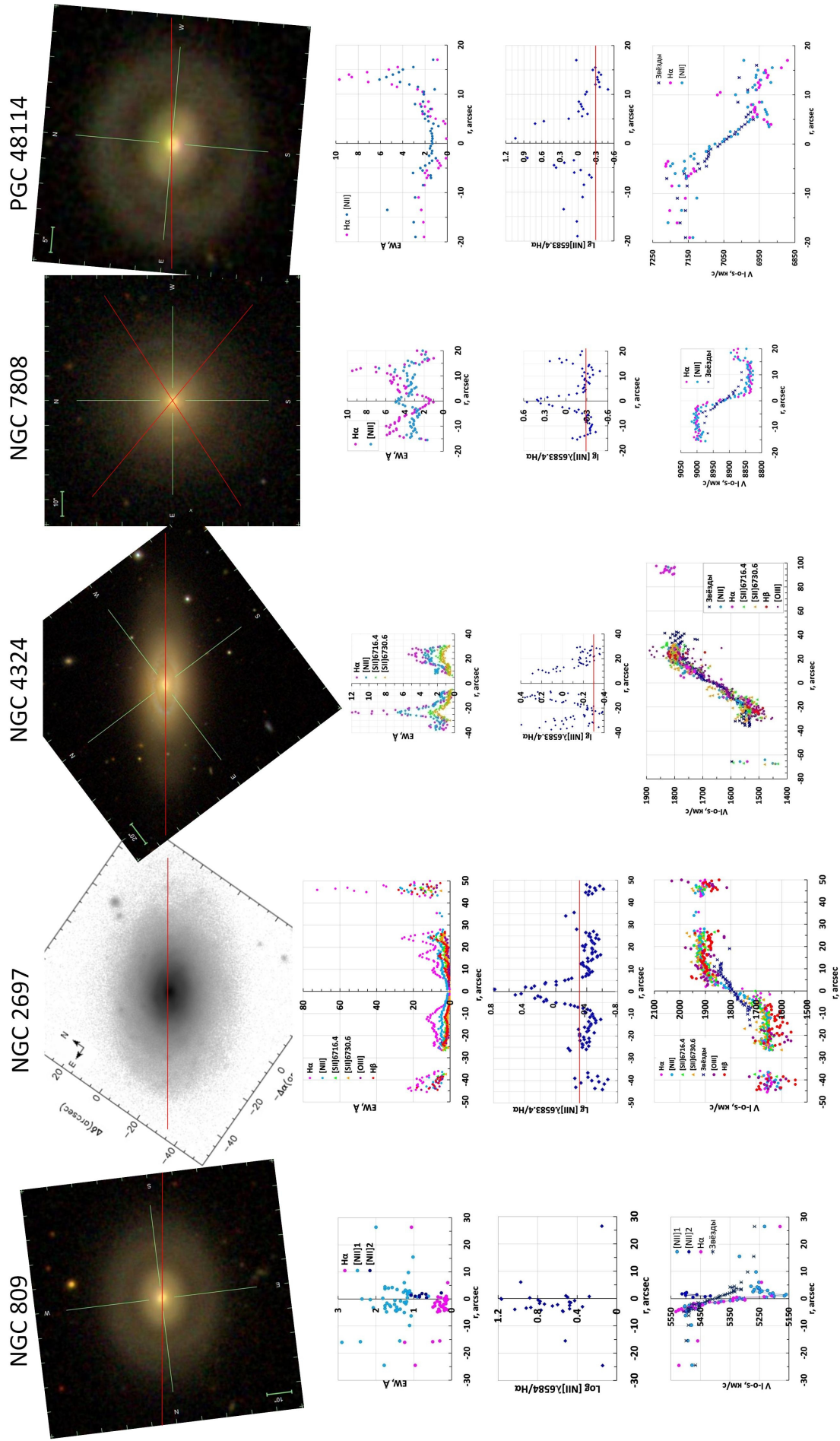


Рисунок 2.1 – Оптические изображения галактик (верхний ряд) с нанесёнными линиями положениями щелей и результаты спектрального анализа: радиальные изменения эквивалентных ширин эмиссионных линий и величины $\lg\{[NII]\lambda 6583.4/H\alpha\}$ (посередине) и лучевые скорости ионизованного газа и звёзд (нижний ряд)

На графиках лучевых скоростей звёзд и газа видно, что в целом в исследуемых пяти галактиках газовый компонент вращается в одну сторону со звёздным компонентом. Так, у галактик NGC 4324 и PGC 48114 в целом профили скоростей звёзд и газа совпадают, и такое согласие в динамически холодных системах подразумевает совпадение их плоскостей вращения.

Однако у галактик NGC 2697 и NGC 7808 звёздный компонент вращается медленнее газового, что может указывать на наклонное положение газового диска по отношению к звёздному диску, либо в галактике NGC 7808 разница может быть результатом асимметричного дрейфа, поскольку NGC 7808 — самая яркая галактика в нашей выборке, и потому можно ожидать высокую дисперсию скоростей в её звёздном диске. Что касается NGC 2697, то, согласно данным, полученным с помощью спектрографа SAURON и извлечённым нами из открытого архива группы телескопов Исаака Ньютона (ING⁹), во-первых, звёздный компонент и ионизованный газ демонстрируют очень разные видимые скорости вращения: звёзды вращаются с видимой скоростью менее 80 км/с, а ионизованный газ — со скоростью ~ 200 км/с, что согласуется с нашими данными. Во-вторых, на карте дисперсии скоростей звёзд для NGC2697 (рисунок 2.2) есть две нетипичные особенности: 1) минимумы дисперсии звёздных скоростей вдоль малой оси, что подразумевает отсутствие балджа, и 2) нецентральные максимумы дисперсии звёздных скоростей (более 100 км/с) вдоль большой оси диска на расстоянии 10"–15" от центра, что указывает на возможное существование двух кинематически рассогласованных звёздных подсистем — двух звёздных дисков с несколько разными наклонами. Один из них может формироваться в настоящее время из свежее накопившегося газа. Но низкое спектральное разрешение наших наблюдений не позволяет уверенно констатировать наличие двух кинематически различных звёздных дисков. Также из-за низкого спектрального разрешения нельзя измерить асимметричный дрейф звёзд в диске галактики NGC 7808.

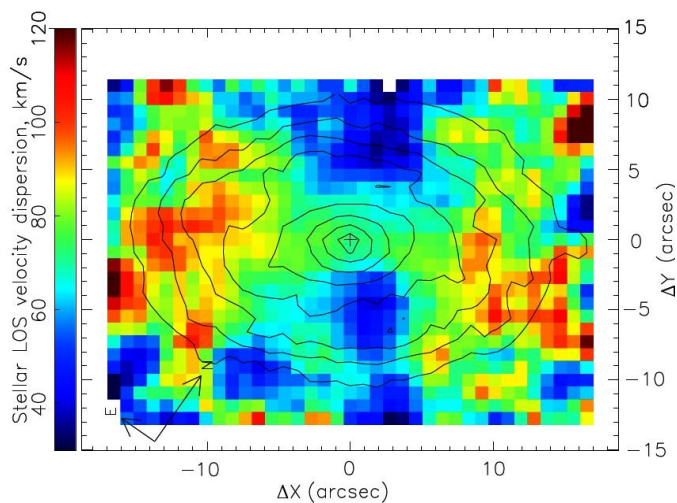


Рисунок 2.2 — Карта дисперсии скоростей звёзд для галактики NGC 2697 по данным SAURON

9 <https://www.ing.iac.es//Astronomy/telescopes/wht/archive.html>

В галактике NGC 809 наблюдаются сильные возмущения в динамике газового диска — чуть южнее ядра мы видим двугорбые профили эмиссионной линии $[\text{NII}]\lambda 6583$ — это можно объяснить предполагаемым наличием компактного бара в центральной части этой галактики, на что указывают и фотометрические данные (см. ниже рисунок 2.7): большая ось изофот разворачивается примерно на 70° в пределах $5''$ от центра вдоль по радиусу. На краях баров часто возникают удары. Двугорбый профиль эмиссионных линий, отражающий наличие на луче зрения двух кинематически различных газовых подсистем, можно ожидать, если щель спектрографа одновременно захватила и замедленный на кромке бара возбуждённый ударом газ, и вращающийся в диске газ, возбуждённый звездообразованием.

На рисунке 2.1 видно, что эквивалентные ширины (EW) эмиссионных линий изменяются вдоль радиуса галактик и демонстрируют один или несколько пиков. Предположительно, эти пики обозначают кольца, содержащие области сильных эмиссионных линий в газовых дисках галактик. Однако для галактики NGC 2697 положение пиков слева и справа от центра не совпадает. Попытки вписать в эти пики логарифмические спирали с двумя и тремя ветвями оказались безуспешными. А значит, узор в «плане» представляет собой дуги либо является флоккулентной структурой.

Наличие в зелёной части спектров трёх галактик эмиссионных линий H_β и $[\text{OIII}]\lambda 5007$, видимых на тех же расстояниях от центров галактик, что и эмиссионные линии H_α и $[\text{NII}]$, т. е. в кольцеобразных областях, делает возможным сопоставление отношений интенсивностей низко и высоко возбуждённых запрещённых линий к близлежащим бальмеровским линиям, и тем самым позволяет диагностировать механизм возбуждения газа с помощью BPT (Болдуин-Филлипс-Терлевиц)-диаграмм [99]. Для определения природы возбуждения газа — светом молодых звёзд или иными механизмами (активными ядрами, ударными волнами) — использовались диагностические BPT-диаграммы вместе с моделями Кьюли и др. [101], а также эмпирические границы, найденные Кауффманн и др. [102] в ходе измерений спектров ядер нескольких тысяч близких галактик из обзора SDSS. На рисунке 2.3 представлены BPT-диаграммы $\lg\{[\text{OIII}]/\text{H}_\beta\} - \lg\{[\text{NII}]\lambda 6583/\text{H}_\alpha\}$ для галактик с полным набором измеренных эмиссионных линий: NGC 2697 (на участке $r = 16'' - 46''$), NGC 4324 (на участке $r = 20'' - 26''$) и NGC 7808 (на участке $r = 10'' - 14''$). Для галактики NGC 2697 измеренные точки находятся в области, соответствующей возбуждению газа молодыми звёздами; для галактик NGC 4324 и NGC 7808 измеренные точки лежат в переходной зоне, где имеет место смешение механизмов возбуждения: как светом молодых звёзд, так и ударными волнами. В случае NGC 4324 заметен тренд в положении точек, характеризующих соотношения интенсивностей линий на внутреннем и внешнем краях кольца, с одной стороны, и его серединой, с другой стороны. На трёх радиусах $r=20'', 22''.5$ и $25''$ были объединены измерения для северо-восточного и юго-западного концов

щели и нанесены на ВРТ-диаграмму. На рисунке 2.3 видно, что измерения посередине кольца (как на северо-восточном, так и на юго-западном концах щели) наиболее близки к линии, разделяющей область возбуждения НII и переходную зону. Таким образом, можно диагностировать, что на краях кольца в NGC 4324 имеют место ударные фронты.

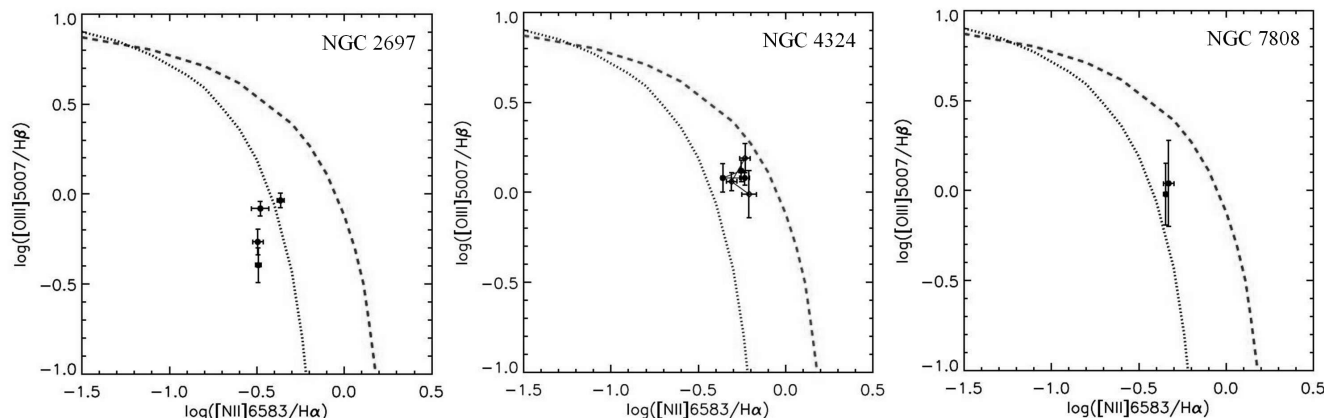


Рисунок 2.3 — Диагностические ВРТ-диаграммы для галактик NGC 2697, NGC 4324, NGC 7808 (штриховая линия отмечает теоретическую границу возбуждения газа звездообразованием согласно Кьюли и др. [101], пунктирная линия обозначает эмпирическую границу между звездообразующими ядрами галактик и иными типами возбуждения эмиссии в ядрах галактик)

Для остальных галактик, в которых не видны эмиссионные линии $H\beta$ и $[OIII]\lambda 5007$, после анализа ВРТ-диаграмм, представленных в работе Кьюли и др. [103], нами было принято, что значения величины $\lg\{[NII]\lambda 6583/H\alpha\} < -0.3$ соответствуют возбуждению газа в результате звездообразования, и на графиках рисунка 2.1 красная прямая линия отмечает эту самую границу между областями газа, ионизованного излучением молодых звёзд (ниже красной линии), и областями, где газ возбуждён ударными процессами (выше красной линии). За исключением галактики NGC 809, в которой отношение эмиссионных линий $[NII]\lambda 6583/H\alpha$ везде больше 1, т. е. в этой галактике, несмотря на наличие газа и яркого УФ-кольца, нет областей с текущим ($T < 20$ млн лет) звездообразованием, и газ в центре NGC 809 возбуждён ударными процессами; в остальных галактиках максимумы (пики) в распределении вдоль по радиусам галактик эквивалентных ширин (EW) эмиссионных линий приходятся на области, где газ возбуждён в результате звездообразования (т. н. НII-области), т. е. *звездообразующие области образуют кольцевые структуры в дисках исследуемых линзовидных галактик.*

Важно отметить, на рисунке 2.1 хорошо видно, что звездообразование протекает в кольцах неоднородно. Так, для кольца в NGC 4324 профиль эквивалентных ширин демонстрирует сильный пик в северо-восточном направлении и усечённый пик в юго-западном направлении. Похожий профиль эквивалентных ширин эмиссионных линий и в кольце галактики NGC 7808: сильный пик на западе и усечённый — на востоке. У NGC 2697 видны отчётливо три пика в

северо-западном направлении и пара менее выраженных пиков — на юго-востоке. В галактике PGC 48114 только в западной половине кольца диагностируется текущее звездообразование, где на расстоянии $r \approx +13''$ располагается острый пик интенсивности эмиссионных линий.

Для оценки свойств звёздного населения галактик (их среднего возраста и металличности) были измерены Ликские индексы линий поглощения H_β , Mgb , $Fe5270$, $Fe5335$ [104] вдоль щелей, установленных в большинстве случаев по большим осям изофот исследуемых галактик.

Поскольку в спектрах некоторых исследуемых галактик на определённых радиусах присутствуют эмиссионные линии, то их звёздные Ликские индексы H_β оказываются загрязнёнными бальмеровской эмиссионной линией ионизованного водорода (даже если визуально эта линия не видна). Эквивалентные ширины эмиссионной линии H_α , измеренные по красной части спектров и представленные выше, использовались для учёта вклада эмиссии и расчёта поправки к Ликскому индексу H_β следующим образом. Интенсивности эмиссионных линий H_β связаны с интенсивностями эмиссионных линий H_α через бальмеровский декремент, который зависит от модели ионизации в предположении определённого механизма возбуждения водорода. Для определения природы механизма возбуждения, как было описано выше, использовались диагностические BPT-диаграммы [99]. В случае, если $\lg\{[NII]\lambda 6583/H_\alpha\} < -0.3$ и газ возбуждён светом молодых звёзд, поток в эмиссионной линии H_β рассчитывался как поток в эмиссионной линии H_α , делённый на 2.85; в противном случае газ мог быть возбуждён ударными волнами [105] и/или старыми горячими звёздами [106], и тогда поток в эмиссионной линии H_β равен четверти потока в эмиссионной линии H_α , т. е. $\Delta EW(H_\beta) = 0.25 EW(H_\alpha)$ [107].

Перевод инструментальных Ликских индексов, полученных на спектрографе RSS/SALT с решёткой VRN900, в стандартную Ликскую систему осуществлялся по формулам, приведённым в работе Каткова и др. [53].

Изменение Ликских индексов вдоль по радиусу галактик показано на рисунке 2.4, где видно, что на определённых радиальных участках Ликские индексы почти не меняются, что указывает на схожесть характеристик звёздного населения, располагающегося на этих радиусах, а, значит, и на общность их происхождения, и позволяет произвести усреднение Ликских индексов на этих радиальных участках и использовать полученные средние величины для дальнейшего анализа, а именно — для сравнения с моделями Простых Звёздных Населений (SSP) Томаса и др. [108] с целью определения таких средних характеристик звёздного населения, как эквивалентный возраст, металличность и соотношение содержаний магния и железа. Границы выделенных радиальных участков со схожими параметрами звёздного населения обозначены на рисунке 2.7 закрашенными областями.

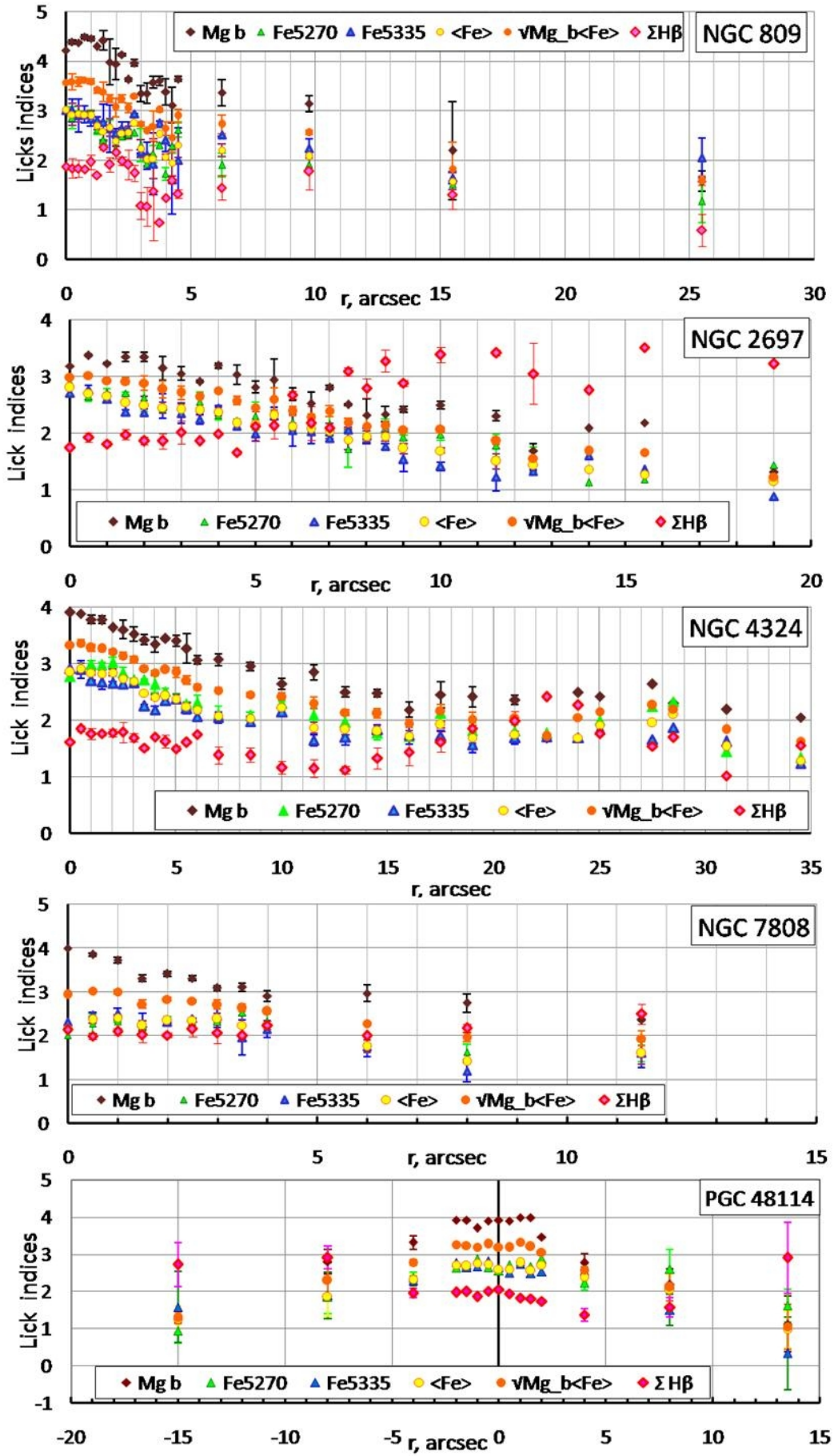


Рисунок 2.4 — Изменение Ликских индексов вдоль радиусов исследуемых галактик

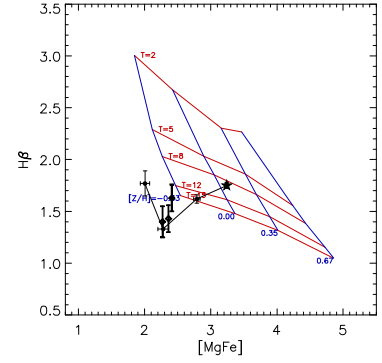
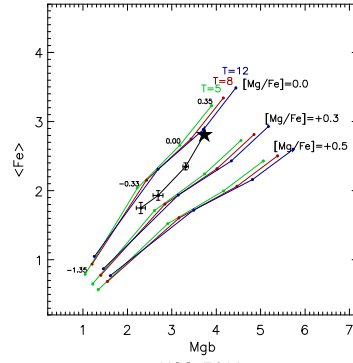
Модели Томаса и др. [108] рассчитаны для нескольких значений отношения $[Mg/Fe]$, что позволяет определить обилие α -элементов в звёздном населении на разных удалениях от центров галактик и оценить продолжительность последнего крупного эпизода звездообразования. Модели химической эволюции учитывают разницу во времени между выбросом магния и железа одним звёздным поколением. Кратковременное звездообразование (менее 1 млрд лет) даёт значительный избыток магния до $[Mg/Fe]=+0.3-+0.5$, и только непрерывное звездообразование в течение более 2 — 3 млрд лет даёт солнечное отношение содержания магния и железа, согласно расчётам Маттеуччи и Греджио [109].

На рисунке 2.5 показаны диагностические диаграммы «индекс–индекс» для пяти исследуемых галактик: диаграммы обилия α -элементов (*слева*), где $\langle Fe \rangle = (Fe5270 + Fe5335)/2$, и диаграммы «возраст–металличность» (*справа*), где $[MgFe] = (Mgb - \langle Fe \rangle)^{1/2}$, на которые нанесены усреднённые значения Ликских индексов, полученные для различных галактических локаций (обозначенных на рисунке 2.7 закрашенными областями). Так, символом «звёздочка» обозначены ядра галактик, затем ломаными линиями соединены измерения, относящиеся к радиальным участкам со схожими параметрами звёздного населения, расположенные в порядке возрастания расстояния от центров галактик.

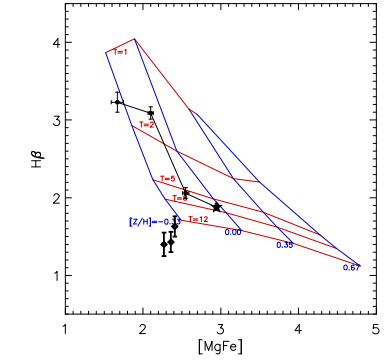
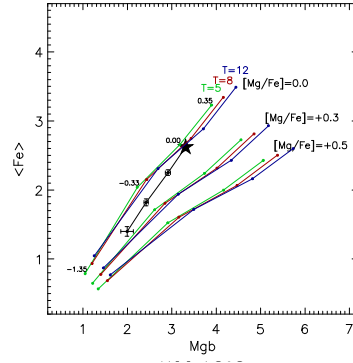
Для сравнения на диагностические диаграммы (рисунок 2.5) нанесены наблюдательные данные (показаны ромбиками) для трёх шаровых скоплений балджа нашей Галактики (NGC6838, NGC 6356, NGC 6539) из статьи Бисли и др. [110], так как из-за неопределенностей с морфологией горизонтальной ветви и временем жизни звёзд на ней модели плохо вычисляют индекс H_β для низких металличностей ($[Z/H] < -0.4$). Для этих трёх шаровых скоплений балджа Галактики, согласно данным Диаса и др. [111], $[Fe/H] = -0.6$, а полная металличность, с учётом их несолнечного отношения магния к железу, составляет около « -0.4 ». И в самом деле, на диагностических диаграммах видно, что при возрасте 10 — 12 млрд лет они имеют явно меньший индекс H_β , нежели прогнозирует модель.

Таким образом, с помощью этих диагностических диаграмм для звёздного населения можно проследить, как изменяется средний возраст, металличность и отношение магния к железу по радиусу в каждой исследуемой галактике. В целом можно отметить, что звёздное население в центральных регионах всех пяти галактик имеет промежуточный возраст, 5 — 8 млрд лет, и солнечную или сверхсолнечную металличность, при этом в ядрах и балджах не обнаружено ни текущего, ни даже недавнего звездообразования. Истории звездообразования в их звёздных дисках весьма различны, но везде средние звёздные металличности в дисках, включая звёздные кольца, ниже $[Z/H] \approx -0.3$.

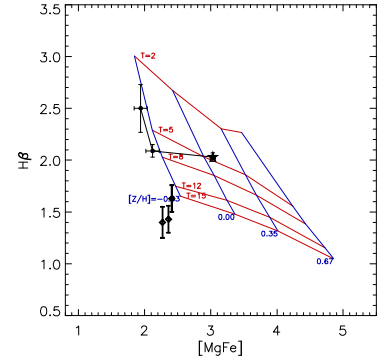
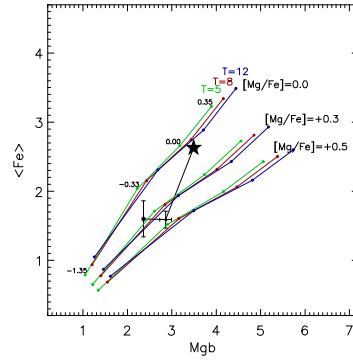
NGC 4324



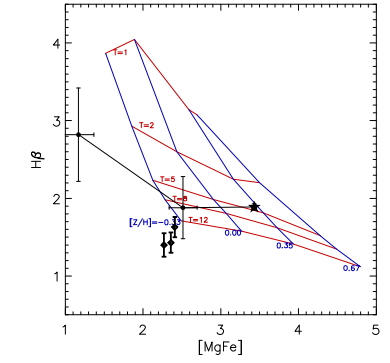
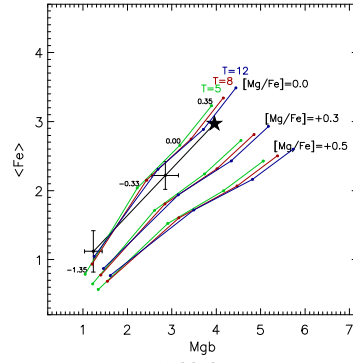
NGC 2697



NGC 7808



PGC 48114



NGC 809

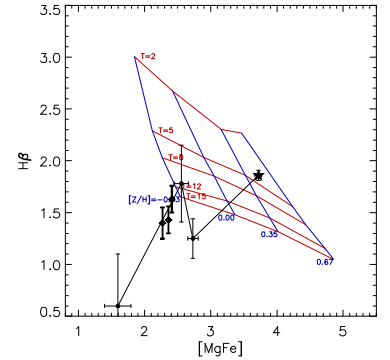
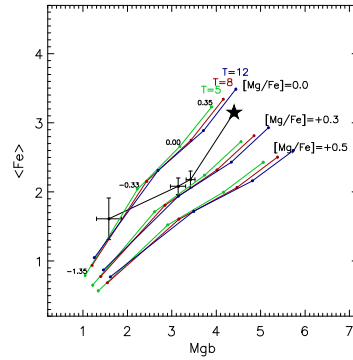


Рисунок 2.5 — Оценка среднего возраста, металличности и обилия α -элементов с помощью модельных диагностических диаграмм «возраст — металличность» Томаса и др. [108]

Отношения интенсивностей сильных эмиссионных линий позволяет оценить физико-химические характеристики газа, например, его металличность. Так, для определения содержания кислорода в областях, где в возбуждении газа доминирует процесс звездообразования, была использована калибровка Марино и др. [112] для двух индикаторов: $O3N2$ и $N2$. Солнечное обилие кислорода было принято равным 8.69 ± 0.05 согласно рекомендации Асплунда и др. [113]. Результаты представлены в таблице 2.3 (указанные радиусы соответствуют пикам интенсивности эмиссионных линий в газовых дисках). Металличность газа в кольцах звездообразования рассматриваемых галактик выглядит однородной и является лишь немного субсолнечной, но при этом везде *выше*, чем металличность подстилающего звёздного населения галактических дисков, которая, как было показано ранее, обычно в 2 раза меньше солнечной металличности. (Стоит отметить, что похожие результаты — околосолнечное значение металличности газа во внешних кольцах и пониженная металличность окружающего звёздного населения — были ранее получены в работах Ильиной и др. [86] и Каткова и др. [53] для ещё семи линзовидных галактик и в недавних работах Сильченко и др. [54, 114] для десятка других S0-галактик. Гораздо раньше Подж и Эскридж [115] в ходе обзора НII-областей в богатых газом S0-галактиках обнаружили солнечное содержание кислорода в ионизованном газе всех шести галактик, в т.ч. с противоположно вращающимися газовыми дисками.)

Таблица 2.3 — Сравнение свойств ионизованного газа и звёзд в кольцах галактик

Галактика	Расстояние от центра галактики	Электронная плотность $\langle N_e \rangle$, см ⁻³	Металличность газа (по отношению к солнечному значению), $12+\lg(O/H)-8.69$		Металличность звёзд, $[Z/H]$
			по индикатору $O3N2$	по индикатору $N2$	
NGC 2697	-40"		-0.24 ± 0.03	-0.17 ± 0.02	
	-12.5"	100–250		-0.17 ± 0.01	-0.4 ± 0.1
	+9.5"	100–250	-0.17 ± 0.03	-0.12 ± 0.02	-0.1 ± 0.05
	+16"	100–250	-0.14 ± 0.04	-0.19 ± 0.05	-0.4 ± 0.1
	+24"	100–250	-0.15 ± 0.03	-0.18 ± 0.05	
	+46"	< 60	-0.21 ± 0.03	-0.19 ± 0.05	
NGC 4324	-23"	100	-0.26 ± 0.03	-0.11 ± 0.04	-0.5 ± 0.1
	+94"			-0.18 ± 0.06	
NGC 7808	-12"		-0.24 ± 0.07	-0.11 ± 0.04	-0.4 ± 0.1
	+12"		-0.24 ± 0.02	-0.12 ± 0.01	-0.4 ± 0.1
PGC 48114	+13"			-0.11 ± 0.04	-1.0 ± 0.2

Оценка электронной плотности в ионизованном газе производилась по отношению интенсивности двух линий дублета серы $[\text{SII}]\lambda 6716.4/[\text{SII}]\lambda 6730.6$ с помощью номограммы из книги Остерброка и Фёрланда [100]. Так, на рисунке 2.6 показано радиальное изменение этого отношения и соответствующей ему электронной плотности для галактики NGC 4324.

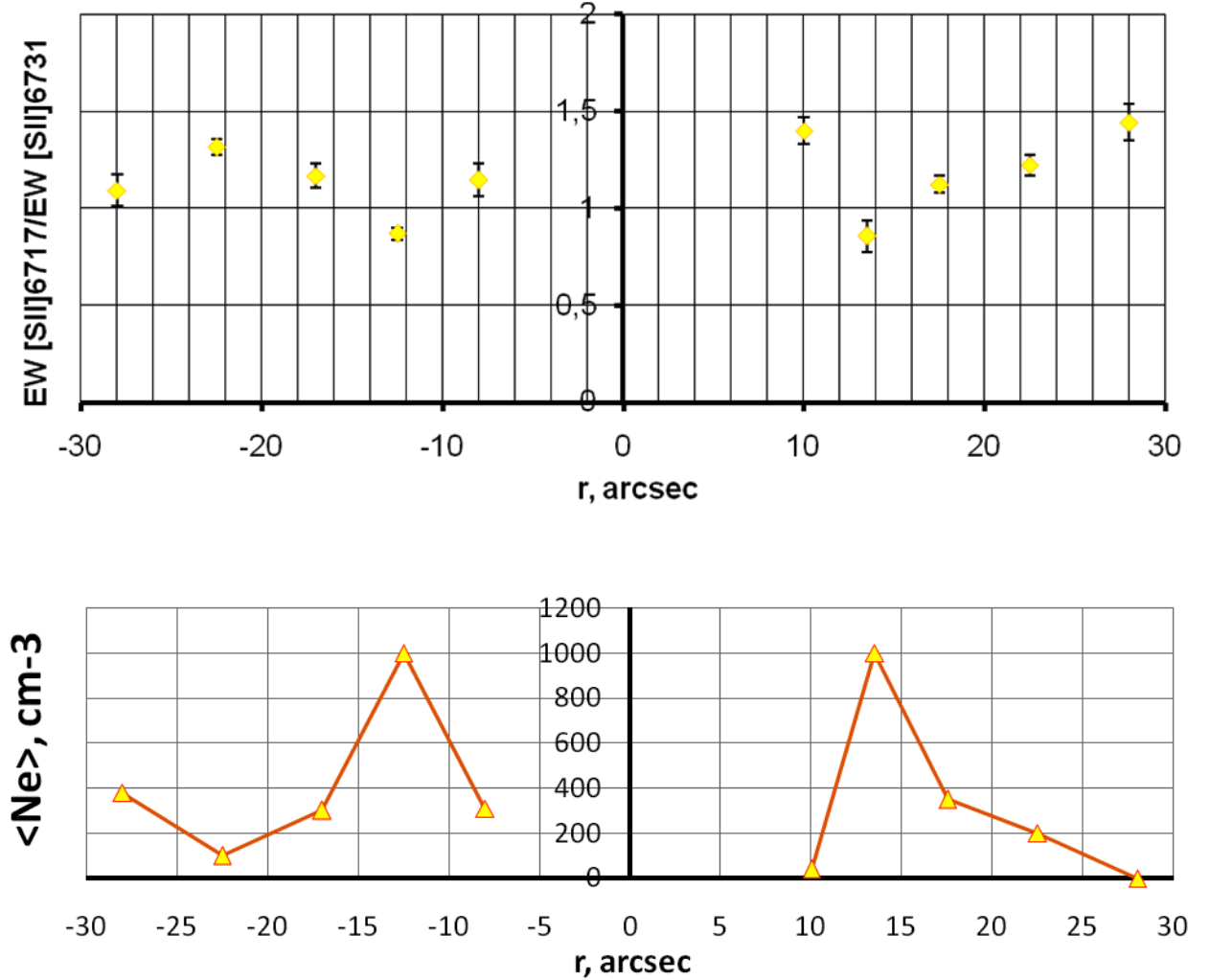


Рисунок 2.6 — Изменение электронной плотности вдоль большой оси галактики NGC 4324

2.4 Изофотный анализ: структура галактик

Для изучения структуры рассматриваемых галактик нами был выполнен их изофотный анализ. Для четырёх галактик использовались оптические изображения из архива SDSS (DR9) [56] в r -полосе; а для галактики NGC 2697 были проведены специальные наблюдения с помощью сети телескопов обсерватории Лас Кумбрес (LCO) [57], так как эта галактика не входит в зону охвата обзора SDSS. Во всех случаях использовалась фотометрическая система SDSS, gri . На рисунке 2.7 представлены радиальные профили параметров изофот и поверхностной яркости, азимутально усреднённые с пробегающими значениями эллиптичности

изофот и углов ориентации. На профилях поверхностной яркости видны изгибы и изломы, которые указывают на границы структурных компонентов галактик: балдж, диск, кольца; закрашенными областями отмечены диапазоны радиусов, на которых были усреднены Ликские индексы и по ним выполнен анализ характеристик звёздного населения. Как видно, в целом диапазоны усреднения Ликских индексов, характеризующие области со схожими свойствами звёздного населения, совпадают со структурными границами, выявленными по изофотному анализу. В некоторых случаях в пределах одной структуры выделяются несколько областей, различающихся по свойствам населяющих их звёзд.

Таким образом, просматривается связь между структурными и эволюционными параметрами галактик, однако, пока неясно — что первично: определяет ли структура галактик их эволюция, обусловленная различными внешними факторами, или же структура галактик определяет их дальнейшую эволюцию? Или же они — структура и эволюция — взаимно обусловлены?

Из структурных особенностей стоит отметить, что у NGC 2697 нет классического балджа (как и ожидалось из анализа карты дисперсии скоростей звёзд — рисунок 2.2), а для далёких галактик NGC 7808 и PGC 48114 оказалось недостаточно нашего пространственного разрешения для разделения ядер и балджей, поскольку они довольно компактны. В некоторых галактиках были обнаружены вторые кольца только путем изучения профилей поверхностной яркости. Стоит отметить, что здесь определяются звёздные кольца так, как они видны на широкополосных изображениях. Газовые кольца, отмеченные выше по пикам эквивалентных ширин эмиссионных линий, не обязательно точно совпадают со звёздными кольцами, как видно из приведённой ниже таблицы 2.5. В целом галактики выборки выглядят осесимметричными в соответствии с их номинальной классификацией. Только в PGC 48114 оба кольца имеют эллиптическую форму, демонстрируя локальные максимумы эллиптичности изофот на радиусах 6" и 15", а угол положения большой оси изофот (PA) поворачивается на этих радиусах на 20° – 25° от направления линии узлов. В центральной части галактики NGC 809 предполагается наличие компактного бара. Поскольку NGC 7808 видна почти «плашмя», вариации позиционного угла (PA) большой оси изофот в этой галактике можно объяснить низкой точностью её определения (т. к. изофоты почти круглые). У NGC 4324 обнаружена довольно любопытная особенность: на радиусе $r = 15''$, как раз внутри внутреннего кольца, расположенного на расстоянии $r = 23''$ от центра, изофоты демонстрируют поворот большой оси и минимум эллиптичности. Такое поведение изофот может быть связано с небольшим баром, ортогональным линии узлов. Хотя на этом радиусе не наблюдается кинематического возмущения газового диска. Однако на радиусе $r = 13''$ по обе стороны от центра NGC 4324 наблюдаются пики электронной плотности (как видно выше на рисунке 2.6).

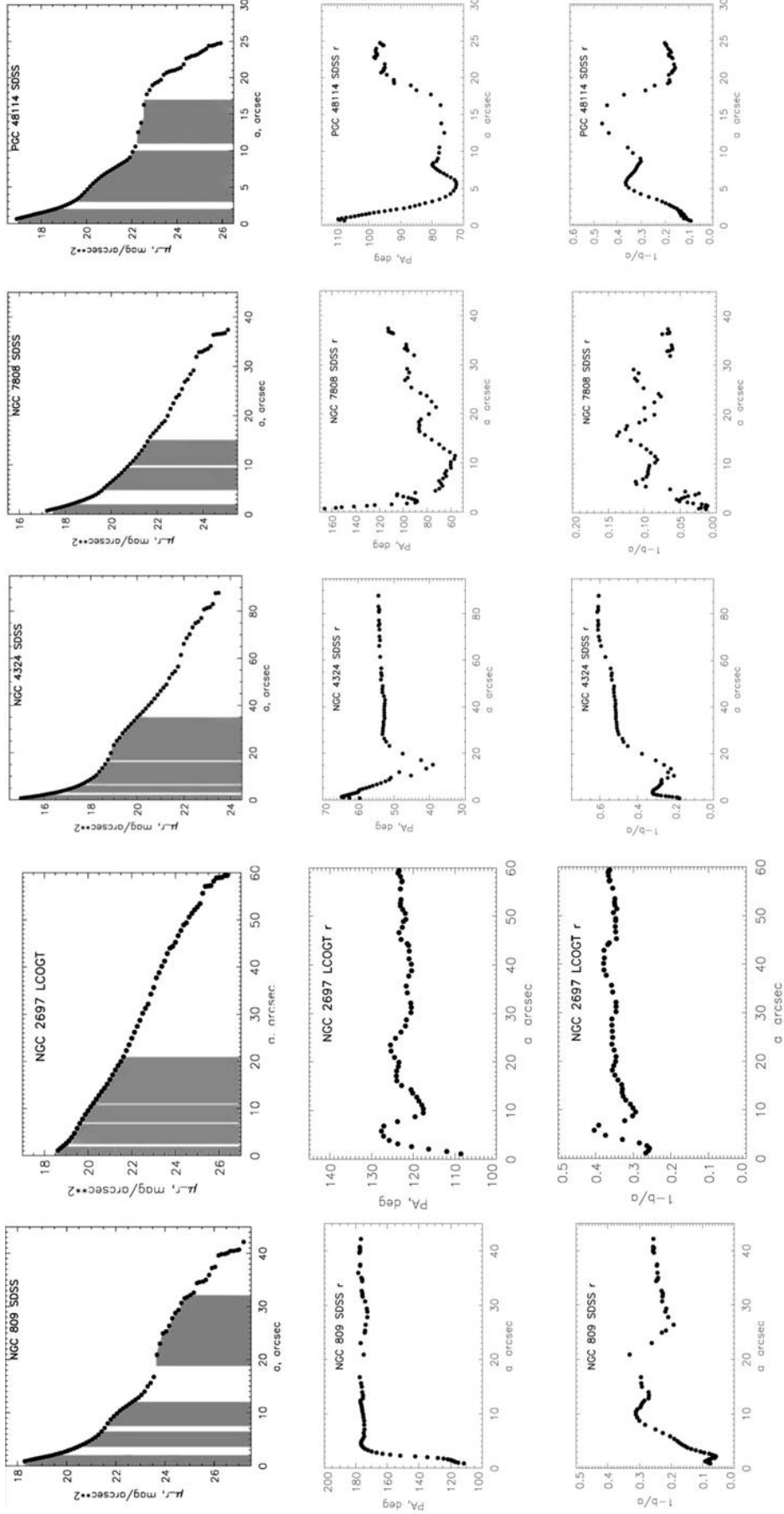


Рисунок 2.7 – Результаты изотопного анализа галактик: радиальные профили поверхностной яркости (верхний ряд), радиальные изменения позиционных углов больших осей (посередине) и эллиптичности (нижний ряд)

2.5 Темпы современного звездообразования: алгоритм и результаты

Как отмечалось в начале этой Главы, изначально для исследования были отобраны линзовидные галактики с кольцевыми структурами, видимыми на УФ-изображениях, полученных космическим телескопом GALEX. На рисунке 2.8 показаны изображения галактик в оптическом (SDSS, *верхний ряд*), ультрафиолетовых (FUV и NUV, *два средних ряда*) диапазонах и в инфракрасной полосе WISE W4 (*нижний ряд*) в инвертированных цветах.

Изображения GALEX в FUV (1539 Å) и NUV (2316 Å) диапазонах взяты из публичного архива Б.А. Микульски для космических телескопов (MAST¹⁰), а инфракрасные изображения WISE в полосе W4 (22 мкм) взяты из открытого архива инфракрасной науки (IRSA¹¹).

Времена экспозиций, а также обозначение программы и даты УФ-наблюдений, в ходе которых были получены УФ-изображения исследуемых галактик, приведены в таблице 2.4.

Как показано в обзорной статье Кенникатта и Эванса [51], существуют различные индикаторы звездообразования: по УФ-излучению отслеживаются звёзды, сформированные менее 100 млн лет назад (по потоку в FUV-диапазоне) и за последние 200 млн лет (по потоку в NUV-диапазоне); косвенным индикатором *текущего* звездообразования является эмиссия H_{α} , производимая зонами Стрёмгрена вокруг массивных звёзд (с массами более 10 $M_{\odot}$), поскольку такие звёзды живут не более 10 — 20 млн лет.

Оценка темпов звездообразования по этим трём независимым индикаторам проводилась по следующему алгоритму.

1. На взятые из архива MAST УФ-изображения GALEX с вычтенным фоном неба (файлы типа *-intbgsb.fits) с помощью программы SAOImage DS9¹² накладывались апертуры в виде эллиптических колец так, чтобы полностью охватить ими видимые УФ-кольца (сопоставление границ УФ-колец, колец, выделенных в результате изофотного анализа, и областей с текущим звездообразованием приведено в таблице 2.5), и измерялись интегральные УФ-потоки в FUV- и NUV-диапазонах в условных единицах (отсчётах) GALEX. Кроме того, накладывались апертуры в виде щелей в положениях, соответствующих позиционным углам длинных щелей при спектральных наблюдениях (см. таблицу 2.2), и шириной 1.25", равной ширине длинной щели, а длина щелевой апертуры ограничивалась размерами радиального участка, где диагностируется текущее звездообразование (диапазоны см. в таблице 2.5).

Как видно из таблицы 2.5, в целом расположение УФ-колец совпадает с положением колец, выделенных в результате изофотного анализа, проведённого по изображениям в полосе r , что находится в согласии с результатами, полученными Ильиной и др. [85] для других галактик.

¹⁰ <https://galex.stsci.edu/GR6/>

¹¹ <https://irsa.ipac.caltech.edu/applications/wise/>

¹² <https://sites.google.com/cfa.harvard.edu/saoimageds9>

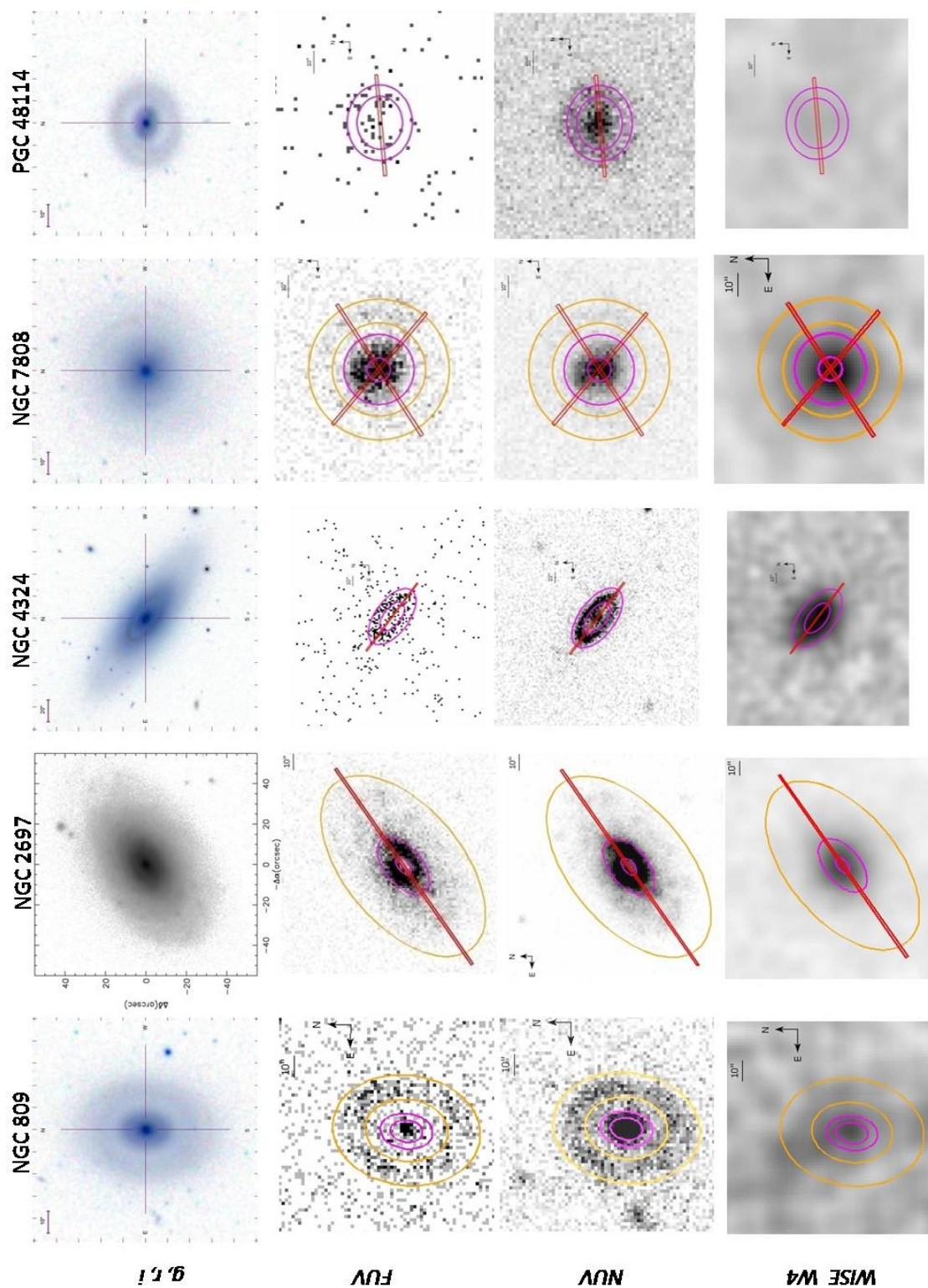


Рисунок 2.8 – Инвертированные изображения галактик в оптическом диапазоне (верхний ряд), в УФ-диапазоне (полосы FUV и NUV) (посередине) и в ИК-полосе WISE W4 (нижний ряд) с нанесёнными на них кольцевыми апертурами и положениями длинных щелей

Таблица 2.4 — Перечень УФ-наблюдений галактик телескопом *GALEX*

Галактика	Полоса	Идентификатор программы	Дата наблюдений	Экспозиция, сек
NGC 809	FUV	MISDR1 18031 0666	14 октября 2003	1178.9
	NUV	MISDR1 18031 0666	14 октября 2003	2841.2
	FUV	GI3 104005 J020329m091020	2 ноября 2007	1600
	NUV	GI3 104005 J020329m091020	2 ноября 2007	1600
	FUV	AIS 269 0002 sg97	19 октября 2004	208
	NUV	AIS 269 0002 sg97	19 октября 2004	208
NGC 2697	FUV	GI1 109005 NGC2699	19 февраля 2005	1696
	NUV	GI1 109005 NGC2699	13 февраля 2005	3286
	FUV	AIS 201 0001 sg39	22 февраля 2006	175
	NUV	AIS 201 0001 sg39	22 февраля 2006	175
	FUV	AIS 201 0002 sg40	22 февраля 2006	163
	NUV	AIS 201 0002 sg40	22 февраля 2006	165
	FUV	GI1 109016 NGC2695	20 января 2006	1744
	NUV	GI1 109016 NGC2695	20 января 2006	1744
	FUV	GI5 028012 W2 24457 0202	2 марта 2009	1657
	NUV	GI5 028012 W2 24457 0202	2 марта 2009	1658
NGC 4324	FUV	AIS 228 0001 sg27	31 марта 2004	112
	NUV	AIS 228 0001 sg27	31 марта 2004	200
	FUV	AIS 228 0001 sg28	31 марта 2004	106.05
	NUV	AIS 228 0001 sg28	31 марта 2004	193.05
	NUV	GI6 001033 GUVICS033	18 марта 2010	1668.2
	NUV	MISGCSN1 13360 0229	1 апреля 2011	1739.7
NGC 7808	FUV	MISDR1 29571 0650	17 сентября 2003	1546.1
	NUV	MISDR1 29571 0650	17 сентября 2003	1546.1
PGC 48114	FUV	AIS 221 0001 sg12	16 апреля 2004	112
	NUV	AIS 221 0001 sg12	16 апреля 2004	112
	NUV	MISGCSN3 33572 0222	5 мая 2011	1684.1

Таблица 2.5 — Сопоставление границ колец, выделенных в разных диапазонах

Галактика	Области звездообразования (HII), уг.сек	Кольцевые структуры, выделенные по изофотному анализу в полосе r , уг.сек	УФ-кольца, уг. сек	
			FUV	NUV
NGC 809	-	$7.5 < r \leq 12$	-	$7.5 < r \leq 12$
		$19 \leq r < 33$	$19 < r \leq 34$	$19 < r \leq 34$
NGC 2697	$-44 \leq r \leq -36.5$	$2.5 < r \leq 7$		
	$-7.5 \leq r \leq -25$	$7 < r < 11$	$6 \leq r \leq 20.5$	$6 \leq r \leq 20.5$
	$+6.5 \leq r < +13$	$11 \leq r < 22$	$20.5 < r \leq 65$	$20.5 < r \leq 65$
	$+13 \leq r \leq 20$	$22 \leq r < 44$		
	$+20.5 \leq r < +27$			
	$+43.5 \leq r \leq +48$			
NGC 4324	$-25 \leq r \leq -22.5$	$16 \leq r \leq 30$	$15.5 \leq r \leq 30$	$15.5 \leq r \leq 30$
	$+23.5 \leq r \leq +24$			
NGC 7808	$-14.5 \leq r \leq -7.5$	$5 < r < 15$	$5 \leq r \leq 15$	$5 \leq r \leq 15$
	$+6.5 \leq r \leq +13.5$	$20 < r < 30$	$20 < r < 30$	$20 < r < 30$
PGC 48114		$3 \leq r \leq 10$		
	$+11 < r \leq +14.5$	$10 < r \leq 16$	$10 \leq r \leq 16$	$10 \leq r \leq 16$

2. Переход от потоков, измеренных в условных отсчётах f_{UV} GALEX, к потокам в энергетических единицах осуществлялся путём их перевода в АВ-величины по формулам из Моррисси и др. [116]:

$$m_{UV} = m_{UV}^0 - 2.5 \log f_{UV}, \quad (2.1)$$

где $m_{FUV}^0 = 18.82$; $m_{NUV}^0 = 20.08$.

Используя приведённые в базе данных NED ультрафиолетовые фотометрические данные (измеренные потоки в энергетических единицах и соответствующие им АВ-величины), для перехода к потокам в энергетических единицах были рассчитаны калибровочные константы: $C_{NUV} = -0.82^m$ и $C_{FUV} = -0.375^m$ (для NGC 2697, NGC 4324, PGC 48114); $C_{NUV} = -0.80^m$ и $C_{FUV} = -0.358^m$ (для NGC 7808 и NGC 809).

Кроме того, УФ-величины были скорректированы за поглощение в нашей Галактике в направлении на исследуемые галактики. Для этого, приняв $R_V = A_V/E(B - V) = 3.1$, выразив из него $A_V = 0.756A_B$ и подставив в равенства из работ Ли и др. [117, 118]: $A_{NUV} = 8.0E(B - V)$ и $A_{FUV} = 7.9E(B - V)$, были получены и применены формулы для коррекции УФ-величин за поглощение:

$$m_{\text{FUV}}^{\text{кор}} = m_{\text{FUV}} - 1.93A_{\text{B}}^{\text{G}}, \quad (2.2)$$

$$m_{\text{NUV}}^{\text{кор}} = m_{\text{NUV}} - 1.95A_{\text{B}}^{\text{G}}, \quad (2.3)$$

где A_{B}^{G} — поглощение в полосе B .

Значения A_{B}^{G} для исследуемых галактик были взяты из базы данных NED, где размещены результаты измерений Шлафли и Финкбайнера [119], и приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 — Поглощение A_{B}^{G} в нашей Галактике в направлении исследуемых галактик

Галактика	NGC 809	NGC 2697	NGC 4324	NGC 7808	PGC 48114
$A_{\text{B}}^{\text{G}}(\text{NED})$	0.087	0.069	0.087	0.158	0.091

Для перевода потоков в эмиссионных линиях H_{α} в абсолютные энергетические единицы красный континуум, измеренный в спектрах галактик вдоль щели, был нормализован к известным фотометрическим профилям поверхностной яркости в r -полосе (см. рисунок 2.7).

3. Оценка темпов звездообразования осуществлялась по рекомендациям, приведённым в обзорной статье Кенникатта и Эванса [51]. Авторы приводят обобщённую формулу для различных индикаторов темпов звездообразования:

$$\lg \dot{M}_{*} [\text{M}_{\odot}/\text{год}] = \lg L_{\text{x}} - \lg C_{\text{x}}, \quad (2.4)$$

где L_{x} — светимость в эрг/с; C_{x} — логарифмическая калибровочная константа, различная для разных индикаторов: $\lg C_{\text{x}}^{\text{FUV}} = 43.35$, $\lg C_{\text{x}}^{\text{NUV}} = 43.17$, $\lg C_{\text{x}}^{\text{H}\alpha} = 41.27$ (согласно Хао и др. [120]). Причём светимости были поправлены за поглощение пылью в исследуемых галактиках в соответствии с формулами, предложенными в работе Хао и др. [120]:

$$L(\text{FUV})_{\text{кор}} = L(\text{FUV})_{\text{набл}} + 3.89L(25 \text{ мкм}), \quad (2.5)$$

$$L(\text{NUV})_{\text{кор}} = L(\text{NUV})_{\text{набл}} + 2.26L(25 \text{ мкм}), \quad (2.6)$$

$$L(\text{H}_{\alpha})_{\text{кор}} = L(\text{H}_{\alpha})_{\text{набл}} + 0.020L(25 \text{ мкм}), \quad (2.7)$$

Для учёта поглощения пылью в исследуемых галактиках использовались их изображения в полосе W4 (22 мкм), полученные космическим инфракрасным телескопом WISE, на которые накладывались те же самые эллиптические кольцевые апертуры, что и на УФ-изображения, вычитался фон и в апертурах измерялись потоки f_{W4} в условных отсчётах WISE. После чего, пользуясь формулами и калибровочными соотношениями из руководства по обработке данных WISE, выложенного на сайте¹³, можно либо сразу перевести условные отсчёты в энергетические единицы (Ян) с помощью коэффициента преобразования $C_{\text{W4}} = 5.2269 \times 10^{-5}$, либо вычислить откалиброванные звёздные величины для полосы W4 по формуле:

13 https://wise2.ipac.caltech.edu/docs/release/allwise/expsup/sec4_3a.html

$$MAG = 13 - 2.5 \lg f_{W4}, \quad (2.8)$$

где f_{W4} — поток (с вычтенным фоном) в условных отсчётах.

А затем вычислить поток в абсолютных единицах (Ян) по формуле:

$$F = f_0 10^{-0.4MAG}, \quad (2.9)$$

где $f_0 = 8.2839$ Ян.

Полученные значения темпов звездообразования (и их поверхностных плотностей) в кольцеобразных областях исследуемых галактик, рассчитанные по потокам в УФ-диапазоне, представлены в таблице 2.7, а в таблице 2.8 приведены темпы звездообразования (и их поверхностные плотности), посчитанные по потокам, измеренным вдоль щелей на тех участках, где диагностируется текущее звездообразование. Для большинства исследуемых галактик (но не для всех) имеется по несколько изображений в FUV- и NUV-диапазонах, полученных в рамках различных наблюдательных программ (указаны в таблице 2.4), что даёт возможность оценить погрешности рассчитанных темпов звездообразования и их поверхностных плотностей. Кроме того, для галактики NGC 2697 в разное время было получено два спектра при одном и том же положении щели (см. таблицу 2.2), что позволило оценить погрешность полученных по потоку в эмиссионной линии H_α темпов звездообразования и их поверхностных плотностей. В итоге относительные погрешности темпов звездообразования (SFR) и их поверхностных плотностей (Σ_{SFR}) в кольцах галактик (табл. 2.7) находятся в диапазоне 0.5% — 7.7%; а в тех областях вдоль щелей, где диагностируется текущее звездообразование (табл. 2.8), они составляют 0.8%— 17%.

Таблица 2.7 — Темпы звездообразования в кольцах исследуемых галактик

Галактика	Границы кольца в УФ-диапазоне		Темп звездообразования, $M_\odot/\text{год}$		Поверхностная плотность темпов звездообразования, $M_\odot/(\text{год} \times \text{кпк}^2)$	
	г, уг. сек	R, уг. сек	SFR_{FUV}	SFR_{NUV}	$\Sigma(SFR_{FUV})$	$\Sigma(SFR_{NUV})$
NGC 809	7.5	12	0.013	0.020	0.0004	0.0006
	19	34	0.067	0.082	0.0002	0.0003
NGC 2697	6	20.6	0.062	0.076	0.0042	0.0052
	20.6	65	0.104	0.114	0.0007	0.0008
NGC 4324	15.5	30	0.078	0.094	0.0023	0.0027
NGC 7808	5	15	0.646	0.773	0.0029	0.0035
	20	30	0.367	0.419	0.0007	0.0008
PGC 48114	10	16	0.048	0.073	0.0004	0.0007

Таблица 2.8 — Темпы звездообразования в областях текущего звездообразования (вдоль щелей)

Галактика	Области звездообразования, уг. сек	Темп звездообразования, М _о /год			Поверхностная плотность темпов звездообразования, М _о /(год×кпк ²)		
		SFR _{Hα}	SFR _{FUV}	SFR _{NUV}	Σ(SFR _{Hα})	Σ(SFR _{FUV})	Σ(SFR _{NUV})
NGC 2697	-36.5"...-44" SE	0.00007	0.00011	0.00016	0.0006	0.0011	0.0015
	-17"...-25" SE	0.00025	0.00050	0.00058	0.0021	0.0046	0.0053
	-6.5"...-17" SE	0.00088	0.00138	0.00163	0.0055	0.0084	0.0100
	+6.5"...+12.5" NW	0.00051	0.00075	0.00093	0.0056	0.0092	0.0113
	+13"...+20" NW	0.00045	0.00087	0.00089	0.0043	0.0080	0.0082
	+20.5"...+26.5" NW	0.00024	0.00033	0.00039	0.0026	0.0037	0.0043
	+43.5"...+48" NW	0.00009	0.00013	0.00010	0.0013	0.0019	0.0015
NGC 4324	-67"...-67.5" NE	0.00001	0	0.00002	0.0013	0	0.0021
	-22"...-25" NE	0.00066	0.00045	0.00061	0.0109	0.0075	0.0101
	+23.5"...+24.5" SW	0.00013	0.00028	0.00030	0.0063	0.0137	0.0146
	+93.5"...+94" SW	0.00002	0	0.00002	0.0019	0	0.0016
NGC 7808	-7"...-14.5" W (PA50)	0.00868	0.01367	0.01442	0.0026	0.0034	0.0045
	-7"...-14.5" W (PA123)	0.00408	0.00720	0.00886	0.0012	0.0023	0.0028
	+5.5"...+13.5"E (PA.50)	0.00965	0.01555	0.01743	0.0027	0.0039	0.0044
	+5.5"...+13.5"E (PA.123)	0.00893	0.01512	0.01765	0.0025	0.0038	0.0045
PGC 48114	-15.5"...-11" E	0	0	0.00123	0	0	0.0010
	+11"...+15.5" W	0.00097	0	0.00099	0.0008	0	0.0008

Анализ табличных данных показывает, что для каждой отдельно взятой галактики, несмотря на близкие значения темпов звездообразования, оценённые по потокам в FUV и NUV диапазонах, имеется тенденция роста темпов звездообразования в сторону тех, что посчитаны по потокам в ближнем УФ-диапазоне. Согласно Кенникатту и Эвансу [51], такой тренд означает, что звездообразование длится в этих областях около 200 млн. лет и уже затухает.

Имея в своём распоряжении для каждой галактики (кроме NGC 809, в которой нет текущего звездообразования) по три значения плотности темпов звездообразования, оценённые по трём независимым индикаторам на разных временных масштабах: недавние 200 млн лет — по потоку в NUV, недавно прошедшие 100 млн лет — по потоку FUV, в пределах прошедших 10 млн лет — по потоку в эмиссионной линии H_α, можно определить истории звездообразования в современную эпоху, что и отражено на рисунке 2.9 для четырёх областей в трёх галактиках.

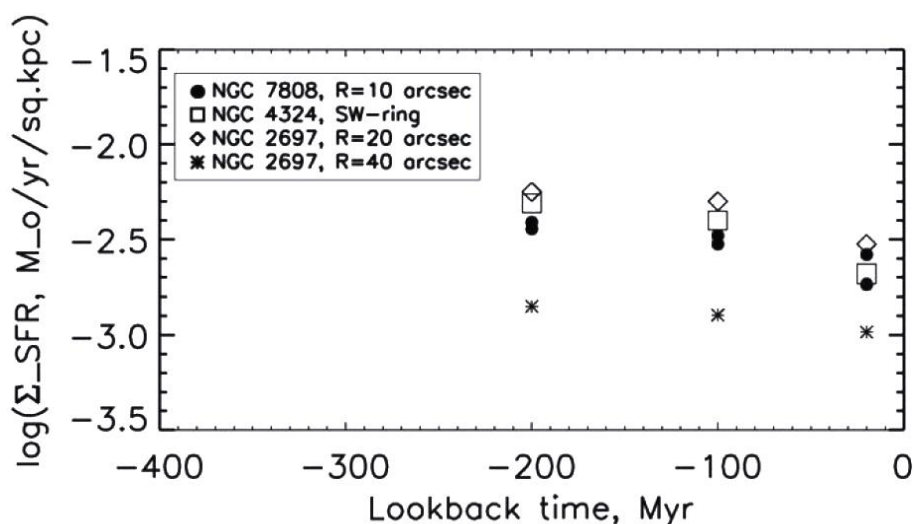


Рисунок 2.9 — Истории современного звездообразования в исследуемых галактиках

Почти все истории звездообразования ведут себя одинаково: они спадают со временем на временной шкале нескольких сотен млн лет. Лишь северо-восточная оконечность кольца NGC4324 демонстрирует совсем недавнее начало локального звездообразования (оценки темпов звездообразования, полученные по потокам в H_α , превышают значения, полученные по УФ-потокам) — в этой галактике звездообразование вдоль кольца очень неоднородно (оно будет более детально рассмотрено в Главе 4). Соединив отметки темпов звездообразования для каждого кольца прямой линией, можно примерно оценить время затухания звездообразования (т. е. его временную шкалу, т. н. *e*-folding time). Временные масштабы лежат в диапазоне 200 — 350 млн лет, при этом во внешнем кольце NGC 2697 время затухания звездообразования составляет 600 млн лет, что, однако, намного короче, чем типичное время затухания звездообразования в дисках спиральных галактик. Здесь стоит отметить, что это верхний предел времени затухания звездообразования, потому что, если звездообразование началось позже, чем 200 млн лет назад, то точки при $T = 200$ млн лет назад на рисунке 2.9 должны быть сдвинуты на более поздние времена, и такая коррекция сделает затухание звездообразования более крутым.

Как видно из таблицы 2.7, для исследуемых линзовидных галактик в целом интегральные темпы звездообразования (SFR) (очевидно связанные с кольцами в этих конкретных галактиках) составляют от 0.1 $M_\odot$ /год (PGC 48114, NGC 4324, NGC 809) — 0.2 $M_\odot$ /год (NGC 2697) до 1.2 $M_\odot$ /год в NGC 7808, которая является довольно интенсивно формирующей звёзды линзовидной галактикой. Средние поверхностные плотности темпов звездообразования в исследуемых кольцах находятся в диапазоне от $0.2 \times 10^{-3} M_\odot/(\text{год} \times \text{кпк}^2)$ до $5.2 \times 10^{-3} M_\odot/(\text{год} \times \text{кпк}^2)$. Полученные в данной работе оценки темпов звездообразования и их поверхностных плотностей находятся в согласии с оценками, полученными ранее Костюк и др. [121] для внешних колец в других линзовидных галактиках.

Если полученные по потоку в NUV-диапазоне в кольцевых областях оценки темпов звездообразования и их плотностей (из таблицы 2.7) нанести на график, иллюстрирующий интегральные характеристики звездообразования в галактиках различных типов в локальной Вселенной (рисунок 9 из статьи Кенникатта и Эванса [51]), то обнаружим, что исследуемые линзовидные галактики попадают в область нормальных (спиральных) и irregулярных галактик, как показано на рисунке 2.10 оранжевыми ромбиками. Причём каждая цветная точка на рисунке 9 из статьи Кенникатта и Эванса [51] представляет либо отдельную галактику, либо основной регион звездообразования. И приведённые там поверхностные плотности темпов звездообразования рассчитаны именно для площадей основного региона звездообразования.

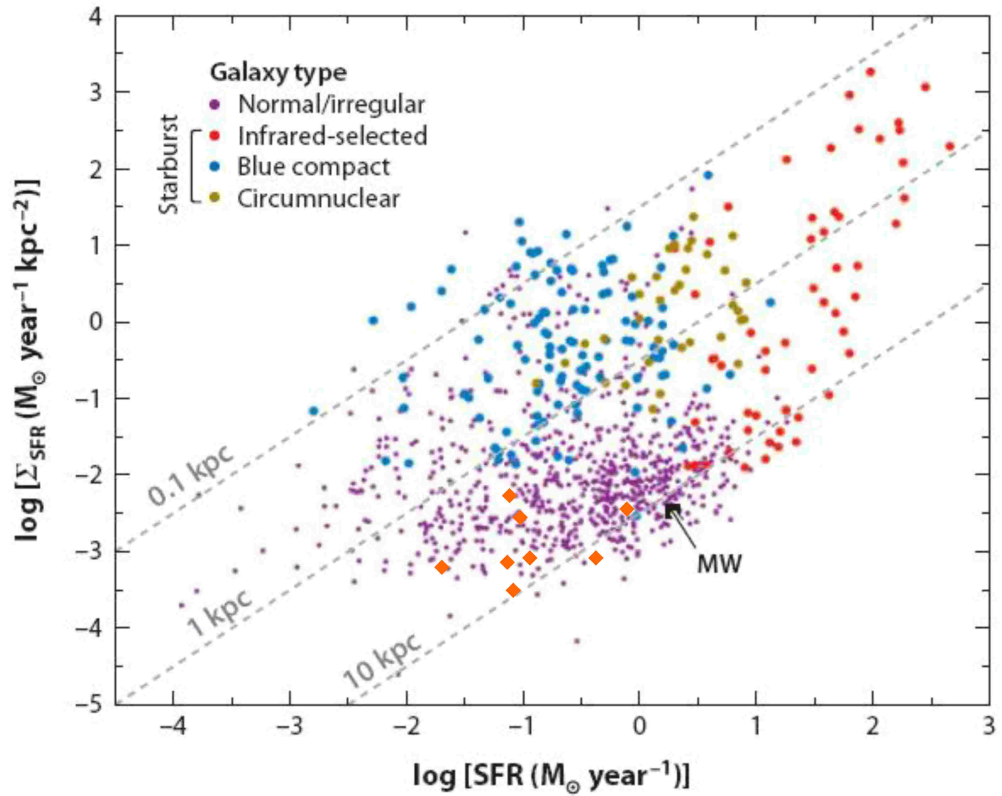


Рисунок 2.10 — Интегральные характеристики звездообразования в галактиках различных типов в локальной Вселенной (подложка — рисунок 9 из работы Кенникатта и Эванса [51]; оранжевыми ромбиками отмечены положения исследуемых колец звездообразования; серыми штриховыми линиями обозначены места постоянного радиуса звездообразования)

Таким образом, по темпам звездообразования на масштабах областей звездообразования исследуемые линзовидные галактики сопоставимы со спиральными и irregулярными галактиками, однако, звездообразование в них протекает не в распротёртых по диску спиралях, а сосредоточено в кольцевых структурах.

2.6 Выводы по Главе 2: эволюционные сценарии

Пять исследуемых в этой Главе галактик были отобраны по критерию наличия кольца в УФ-диапазоне, и действительно, проведённый спектрофотометрический анализ показал, что в кольцах четырёх из пяти галактик есть области текущего звездообразования.

Проанализировав результаты спектрофотометрического исследования, для каждой исследованной галактики можно предположить свой эволюционный сценарий.

В галактике **NGC 809** по результатам изофотного анализа выделяются ядро, балдж и два кольца: внутреннее на расстоянии $r \sim 10''$ (3.5 кпк) от центра, и внешнее, отчётливо видимое в УФ-диапазоне на удалении $r = 19'' - 32''$ от центра. Между тем во внешнем кольце звёздное население старше 15 млрд лет; относительное содержание α -элементов близко к солнечному, а металличность звёзд составляет $[Z/H] \sim -1$, что указывает на непрерывное малоэффективное звездообразование, характерное, например, для карликовых галактик. Звёздное население внутренней части галактики в области $3'' < |r| < 19''$ имеет средний возраст 15 млрд лет, металличность $[Z/H] \sim -0.3$, отношение $[Mg/Fe] \sim +0.3$, что предполагает короткую эпоху давнего звездообразования в диске галактики. Сильное различие между химическими свойствами внешнего звёздного кольца и остальной (внутренней) части галактики с учётом обособленности внешнего кольца, наблюдаемой во всех фотометрических диапазонах (рисунок 2.8), подразумевает возможную аккрецию на периферию и близко к плоскости основного диска галактики NGC 809 небольшого спутника с большим орбитальным моментом. Ещё одно малое слияние с богатым газом спутником в прошлом могло привести к продолжительному эффективному эпизоду звездообразования в центральной части галактики ($|r| < 3''$), завершившемся около 3.5 — 5 млрд лет назад и омоловившему звёздное население галактического центра. В результате средний возраст звёздного населения в ядре NGC 809 составляет 4 — 5 млрд лет, металличность $[Z/H] \sim +0.5$, отношение $[Mg/Fe] = +0.1$. Видно, что в центре относительное содержание α -элементов ниже, чем в диске галактики, но немного превышает солнечное, так как не всё железо от последней вспышки звездообразования успело войти в последнее поколение вновь родившихся звёзд перед прекращением звездообразования.

Галактика **NGC 2697** не имеет классического балджа (см. профиль поверхностной яркости на рисунке 2.7), по результатам изофотного анализа в ней выделяются ядро, околярное кольцо на расстоянии $3'' \leq |r| < 7''$, на удалении $7'' \leq |r| \leq 11''$ от центра проявляется малоcontrastное внутреннее звёздное кольцо в полосе r и регулярный звёздный диск с расстояния $|r| > 21''$. Яркое внутреннее УФ-кольцо видно на расстоянии $7'' \leq |r| \leq 21''$, здесь же наблюдаются сильные эмиссионные линии, возбуждаемые молодыми звёздами. На расстояниях $|r| > 7''$ от центра звёздное население довольно молодое, со средним возрастом 1.5 млрд лет и относительным содержанием α -элементов $[Mg/Fe] \approx +0.2 - +0.3$. В звёздном компоненте

наблюдается градиент металличности от $[Z/H] \sim -0.1$ на радиусах $7'' < |r| < 11''$ до $[Z/H] < -0.33$ на радиусах $11'' \leq |r| < 21''$. Во внутренней части галактики ($2'' < |r| \leq 7''$) средний (эквивалентный) возраст звёздного населения составляет 5 — 7 млрд лет, отношение содержаний $[Mg/Fe] \approx +0.1$, металличность $[Z/H] \approx -0.2$. В центре ($|r| \leq 2''$) средний возраст звёздного населения составляет 7 млрд лет, а обилие α -элементов, как и общая металличность, близко к солнечному значению, что указывает на длительное звездообразование в центральной части галактики. Отрицательные градиенты металличности и возраста в NGC 2697 подтверждают идею формирования диска «изнутри-наружу» в соответствии с классической парадигмой [122]. Это подразумевает, что звездообразование началось с центра галактики и прекратилось там около 7 млрд лет назад, затем звездообразование протекало дальше от центра, в области $2'' < |r| \leq 7''$, где оно было менее эффективным и прекратилось около 2.5 — 4 млрд лет назад (о связи между эквивалентным возрастом и возрастом затухания звездообразования говорится в работе Смита и др. [123]). После этого в процессе звездообразования наступила пауза. Предположительно, около 1.5 млрд лет назад произошло слияние богатой газом карликовой галактики с NGC 2697, в результате чего было инициировано интенсивное звездообразование во внутреннем диске галактики, произошла серия коротких вспышек звездообразования, очаги которых мы до сих пор наблюдаем как комковатый узор диска, а к внешним частям галактики добавились звёзды с низким содержанием металлов.

В галактике NGC 4324 выделяются по своим свойствам ядро, балдж, округлая линза на расстоянии $7'' < |r| < 11''$ и область УФ-кольца ($16'' \leq |r| \leq 30''$). На рисунке 2.5 видно, что в центре ($|r| \leq 3''$) NGC 4324 средний возраст звёздного населения составляет около 8 млрд лет, обилие α -элементов близко к солнечному, $[Mg/Fe] \geq 0$, а металличность чуть выше солнечного значения, $[Z/H] \sim +0.1$, что указывает на продолжительное эффективное звездообразование в ядре галактики. На радиусах $3.5'' \leq |r| \leq 6''$ от центра, в области преобладания балджа, средний возраст звёздного населения составляет около 13 млрд лет, обилие α -элементов возрастает до $[Mg/Fe] = +0.15$, а металличность уменьшается до $[Z/H] = -0.2$ — -0.3 . Во внутренней части диска ($7'' \leq |r| < 16''$) звёздное население старое, отношение $[Mg/Fe] = +0.2$, а металличность уменьшается до $[Z/H] < -0.33$, что точно соответствует характеристикам звёздного населения шаровых скоплений в балдже нашей Галактики, которые также нанесены на диагностические диаграммы «возраст — металличность» для сравнения. Такие характеристики подразумевают короткую одиночную вспышку звездообразования, произошедшую более 10 млрд лет назад и сформировавшую крупномасштабный звёздный диск NGC 4324. В области диска, где наблюдается кольцо ($16'' \leq |r| \leq 35''$), преобладающее звёздное население также старое, хотя и несколько моложе, чем во внутреннем диске (скорее всего, это влияние протекающего там звездообразования), а средние химические характеристики звёзд почти одинаковы.

В галактике **NGC 7808** по свойствам звёздного населения удаётся выделить совместно ядро+балдж, диск и внутреннее кольцо звездообразования на расстоянии $5'' < |r| < 15''$ (внешнее, заметное в УФ кольцо, расположенное на расстоянии $20'' < |r| < 30''$, слишком слабо в континууме, что не позволяет исследовать свойства его звёздного населения). Для этой галактики было получено два длиннощелевых спектра в разных ориентациях щели, но поскольку профили скорости оказались идентичными, оба спектра были сложены перед анализом свойств звёздного населения. В результате получены характеристики звёздного населения, расположенного примерно в 36° от большой оси. На рисунке 2.5 видно, что в центре ($|r| < 2''$) средний возраст звёздного населения составляет 4 — 5 млрд лет, отношение $[Mg/Fe] \approx +0.1$, металличность звёзд близка к солнечному. Все эти характеристики указывают на длительное звездообразование, остановившееся около 2.5 млрд лет назад. История ядра в NGC7808 напоминает историю ядра NGC 809. Во внутреннем диске на расстоянии $5'' \leq |r| \leq 9.5''$ средний возраст звёздного населения составляет 8 млрд лет, обилие α -элементов возрастает до $[Mg/Fe] \geq +0.3$, а металличность снижается до $[Z/H] \leq -0.33$. А на расстояниях $10'' \leq |r| < 15''$, где наблюдается максимум эквивалентных ширин эмиссионной линии H_α , что указывает на текущее звездообразование, средний возраст звёздного населения уменьшается до 3 млрд лет, но обилия остаются почти такими же, как и во внутреннем звёздном диске. По-видимому, вспышки звездообразования в кольце кратковременны и происходили по крайней мере дважды на одном и том же радиусе, около 2.5 млрд лет назад и совсем недавно. Как и в случае галактики NGC 2697, формирование диска в NGC 7808 шло «изнутри-наружу».

В галактике **PGC 48114** по результатам изофотного анализа выделяются ядро и два звёздных кольца: в области $3'' \leq |r| \leq 10''$ (1.5 — 4.8 кпк) и на расстоянии $11'' \leq |r| \leq 16''$, где отчётливо видно кольцо в УФ-диапазоне. В пределах центральных $3''$ можно заподозрить наличие слабого бара. Во внешнем ярком неоднородном кольце, начиная с расстояния $|r| > 12''$, обнаружены сильные эмиссионные линии, частично возбужденные процессом звездообразования (в нашем длиннощелевом спектре — только к западу от ядра). В центре галактики PGC 48114 ($|r| < 2''$) средний возраст звёздного населения составляет около 5 млрд лет, отношение $[Mg/Fe] \approx +0.1$, металличность $[Z/H] = +0.3$ — типичные значения для ядер линзовидных галактик [124, 125]. Однако низкие значения $[Mg/Fe] = 0$ — $+0.1$, сохраняющиеся на всём протяжении галактики, совершенно нетипичны для современных линзовидных галактик [126], поскольку подразумевают продолжительную эпоху звездообразования в диске. Возможно, в диске этой галактики содержится вещество поглощённых карликовых спутников. Внутреннее эллиптическое кольцо довольно старое, возрастом 9 ± 5 млрд лет, с типично низкой звёздной металличностью, $[Z/H] = -0.3$. Однако в области внешнего звездообразующего кольца средний возраст звёзд уменьшается до 3 млрд лет, и металличность также снижается до $[Z/H] < -1$.

Обобщая приведённые выше результаты, можно сделать следующие выводы по Главе 2.

- В пяти исследованных S0-галактиках обнаружен ионизованный газ с разной природой возбуждения. Газ, возбуждённый звездообразованием, образует кольцеподобные структуры на разных удалениях от центров галактик. Звездообразование в этих областях длится несколько сотен миллионов лет и со временем затухает.
- Металличность звёзд и газа на одних и тех же расстояниях от центров галактик различны: металличность газа имеет околосолнечное значение, а металличность звёздного населения много меньше солнечного значения. Причём металличность звёздного населения достигает максимальных (солнечных и околосолнечных) значений в центральных частях галактик и уменьшается от центра к их периферии.

Таким образом, наблюдаемое звездообразование в исследуемых галактиках протекает в областях с продвинутой химической эволюцией газа.

- Вопрос о происхождении газа (имеет ли он внутреннее происхождение или был приобретён извне) кажется на первый взгляд сложным и запутанным, но приведённые в этой Главе результаты могут его разрешить.

С одной стороны, во всех рассмотренных галактиках газ и звёзды вращаются в одном направлении, а, значит, этот газ может иметь внутреннее происхождение, т.е. быть газом, возвращённым эволюционирующими звёздами родительской галактики. Однако существенное различие в металличностях газа и подстилающего звёздного населения заставляет усомниться в этом варианте происхождения газа. Есть модели, разработанные Мариначчи и др. [127], в которых рассматривается перенос газа из центральных, обогащённых тяжёлыми химическими элементами (т.е. с продвинутой химической эволюцией) областей галактик на их периферию так называемыми *галактическими фонтанами*. Этот механизм мог бы объяснить околосолнечное значение металличности газа в кольцеобразных областях исследуемых пяти S0-галактик, если бы не расхождение во временных оценках действия этого механизма. По результатам численных расчётов [127], время переноса составляет около 50 млн лет, т.е. для применения такого механизма переноса обогащённого газа в исследуемых галактиках требуется недавнее звездообразование в их центральных частях, тогда как на самом деле оно прекратилось в них более 2.5 млрд лет назад. Хотя, возможно, наблюдаемое звездообразование имело «отложенный старт», т.е. ему предшествовал долгий период оседания/накопления газа на периферии галактик.

Другой вариант поступления газа в галактики — это его аккреция извне. Это может быть столь популярная сегодня у космологов аккреция внешнего холодного газа из так называемых *космологических филаментов* крупномасштабной структуры Вселенной, в которых, по определению, содержится первичный газ. Но следов аккреции низкометаллического газа нами не обнаружено. Однако некоторые недавние модели газохимической эволюции в дисках спиральных галактик, включающие постоянный приток и отток газа (например, Кудрицки и др. [128] и ссылки там), показывают, что содержание кислорода в газе довольно быстро достигает некоторого асимптотического уровня обогащения, близкого к солнечной металличности. Таким образом, солнечное содержание кислорода в газе колец звездообразования рассмотренных линзовидных галактик согласуется с их аккреционным происхождением: аккреция чистого газа за период в несколько сотен млн лет с темпом порядка половины от темпа звездообразования обеспечивает асимптотическое содержание кислорода в ионизованном газе внутри колец звездообразования уже после исчерпания половины запасов газа [128]. При найденной временной шкале порядка 200 — 350 млн лет это означает, что текущее наблюдаемое содержание кислорода в газе достигается всего через 150 — 200 млн лет непрерывного звездообразования. Но в этом сценарии есть неувязка: как объяснить *спорадическую* аккрецию газа из филаментов (т.е. в определенные моменты времени), ведь если бы аккреция была постоянной, то и обилие α -элементов у звёздного населения в кольцах звездообразования было бы иным. Полученные в данной работе результаты указывают на короткие вспышки звездообразования.

Ещё один (более реалистичный) вариант приобретения газа извне — падение богатых газом спутников — *малые слияния* (так называемый *малый мерджинг*). Именно малые, т.к. рассматриваемые галактики принадлежат «полю», находятся в разреженном окружении (см. таблицу 2.1), и ни в одной из них нет никаких признаков взаимодействия. Этот сценарий очевидно подходит для галактик NGC 809 и PGC 48114, в которых УФ-кольца отделены от основных тел галактик и в оптическом диапазоне; кроме того, проведённый спектральный анализ выявил значительное различие свойств звёздного населения между кольцами и внутренними частями этих галактик: кольца демонстрируют солнечное отношение магния к железу и очень низкую металличность звёзд, $[Z/H] \approx -1$, в отличие от сверхсолнечного отношения магния к железу и металличности на уровне половины солнечной в обычных дисках линзовидных галактик [126]. Очень вероятно, что и газ, и основная часть звёзд в кольцах этих двух галактик имеют внешнее происхождение, а наиболее вероятным источником аккреции представляется галактика-спутник позднего типа. Этот же сценарий поглощения богатых

газом спутников подходит и для остальных галактик, поскольку наблюдается различие свойств звёздного населения на разных расстояниях от их центров (рисунок 2.5), к тому же для NGC 2697 анализ карты дисперсии скоростей звёзд (рисунок 2.2) указывает на наличие двух звёздных подсистем.

На самом деле, все перечисленные варианты приобретения газа могут иметь место в той или иной мере, но именно событие падения спутника могло стать решающим и спровоцировать начало звездообразования в уже накопленном газе.

Таким образом, разница в химическом составе между ионизованным газом колец и подстилающими звёздными дисками рассмотренных галактик, которые оказались бедны металлами, подразумевает всплеск звездообразования менее 1 млрд лет назад, вызванный недавним событием, как, например, падение небольшого богатого газом спутника.

Глава 3. S0-галактики с противоположным вращением газа и звёзд

В Главе 2 были рассмотрены линзовидные галактики, в которых звёзды и газ вращаются в одном направлении, и поэтому для прояснения вопроса происхождения газа в этих галактиках (имеет ли он внутреннее происхождение или был приобретён извне) требовалось изучение и сопоставление характеристик газа и подстилающего звёздного населения. Однако среди галактик, исследованных в рамках данной диссертационной работы, нашлось две галактики (IC560 и NGC 4513), в которых звёзды и газ вращаются в противоположных направлениях, что явно указывает на внешнее происхождение газа в них. Как было показано в Главе 1, такое рассогласование кинематики встречается в галактиках раннего типа [53, 54, 64, 69 — 72]. Как показано в работе Сильченко и др. [54], особый научный интерес представляет сопоставление характеристик газа и темпов звездообразования в галактиках с со- и противоположно направленным вращением газового и звёздного компонентов. С этой целью обе галактики были подробно изучены, их основные параметры приведены в таблице 3.1. При написании данной Главы диссертации использованы следующие публикации, выполненные соискателем Прошиной И.С. в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении учёных степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования: [129] и [130].

Таблица 3.1 — Основные характеристики галактик, исследуемых в Главе 3

Галактика	IC 560	NGC 4513
Тип галактики (NED)	S0 ⁺	(R)SA0 ⁰
V_{sys} , км/с (NED)	1853	2286
Расстояние галактоцентрическое, Мпк	23.3	33
Шкала, кпк/''	0.113	0.16
R_{25} , '' (RC3 [60])	40	43
R_{25} , кпк	4.5	7
M_B (LEDA)	-18.3 ^m	-18.99 ^m
$(g-r)$ (SDSS)	0.88 ^m	0.82 ^m
$PA_{\text{фот}}$ (LEDA)	19°.6	15°.7
Наклон i (NED)	62°.5	43°.3
Окружение	Галактика из группы [МК2011]NGC2967 (6 объектов) [90]	В паре с галактикой PGC2683704 [90]

3.1 Галактика IC 560 со звездообразованием в околоядерном кольце

Галактика IC 560 вошла в состав выборки ATLAS^{3D} по нижней границе диапазона светимостей выборки, $M_K = -22.1$ (Каппеллари и др. [88]), и в ходе анализа данных этой выборки нами было заподозрено противоположное вращение ионизованного газа по отношению к звёздному компоненту. При этом ни нейтральный, ни молекулярный водород в ней не был обнаружен, а потому и не обсуждался в рамках обзора ATLAS^{3D}. Для выяснения физических свойств ионизованного газа, его протяжённости, свойств звёздного населения этой галактики нами (основной заявитель — А.Ю. Князев) были проведены спектральные наблюдения.

3.1.1 Наблюдательные данные и их первичная обработка

Наблюдения галактики IC 560 проводились на спектрографе с длинной щелью RSS [93, 94] на 11-метровом телескопе SALT Южно-Африканской астрономической обсерватории в январе 2013 года в две ночи: 4 января — с суммарной экспозицией 30 мин и 6 января — с суммарной экспозицией 30 мин. Т.е. общая экспозиция составила 1 час. Щель спектрографа, шириной 1.25", была ориентирована вдоль большой оси изофот диска галактики, PA = 15°. Гризма с объёмной фазовой решёткой PG0900 обеспечила спектральное разрешение 5.5 Å в спектральном диапазоне 3760 — 6860 Å. Масштаб вдоль щели при четырёхкратном биннинге составил 0.507"/пиксель. Эффективное поле зрения спектрографа — 8 минут дуги вдоль щели, что позволило (с учётом небольших размеров галактики IC 560) измерять фон неба на краях щели экспонированного спектра галактики для его вычитания из спектра объекта. Все другие необходимые процедуры во время наблюдений, а также первичная обработка наблюдательных данных выполнялись А. Ю. Князевым также, как описано в подразделе 2.2 Главы 2.

3.1.2 Кинематика и свойства звёзд и ионизованного газа и структура галактики

Анализ спектральных данных проводился таким же образом, как описано в Главе 2 (подраздел 2.3). Результаты анализа представлены ниже. На рисунке 3.1 вверху показано оптическое изображение галактики IC 560 в инвертированных цветах, взятое из архива SDSS и повернутое так, чтобы нанесённое на него положение длинной щели (обозначено на рисунке 3.1 красной линией) располагалось горизонтально; внизу показан отмасштабированный график изменения лучевых скоростей звёзд и компонент ионизованного газа вдоль щели. Вращение звёзд удалось проследить примерно до расстояния 30" от центра (до 3.5 кпк), тогда как эмиссионные линии — H α , [NII] λ 6583, [SII] λ 6717, [SII] λ 6731, [OIII] λ 5007 — прослеживаются только в центральной части галактики, $r < 10''$ (до 1.1 кпк от центра).

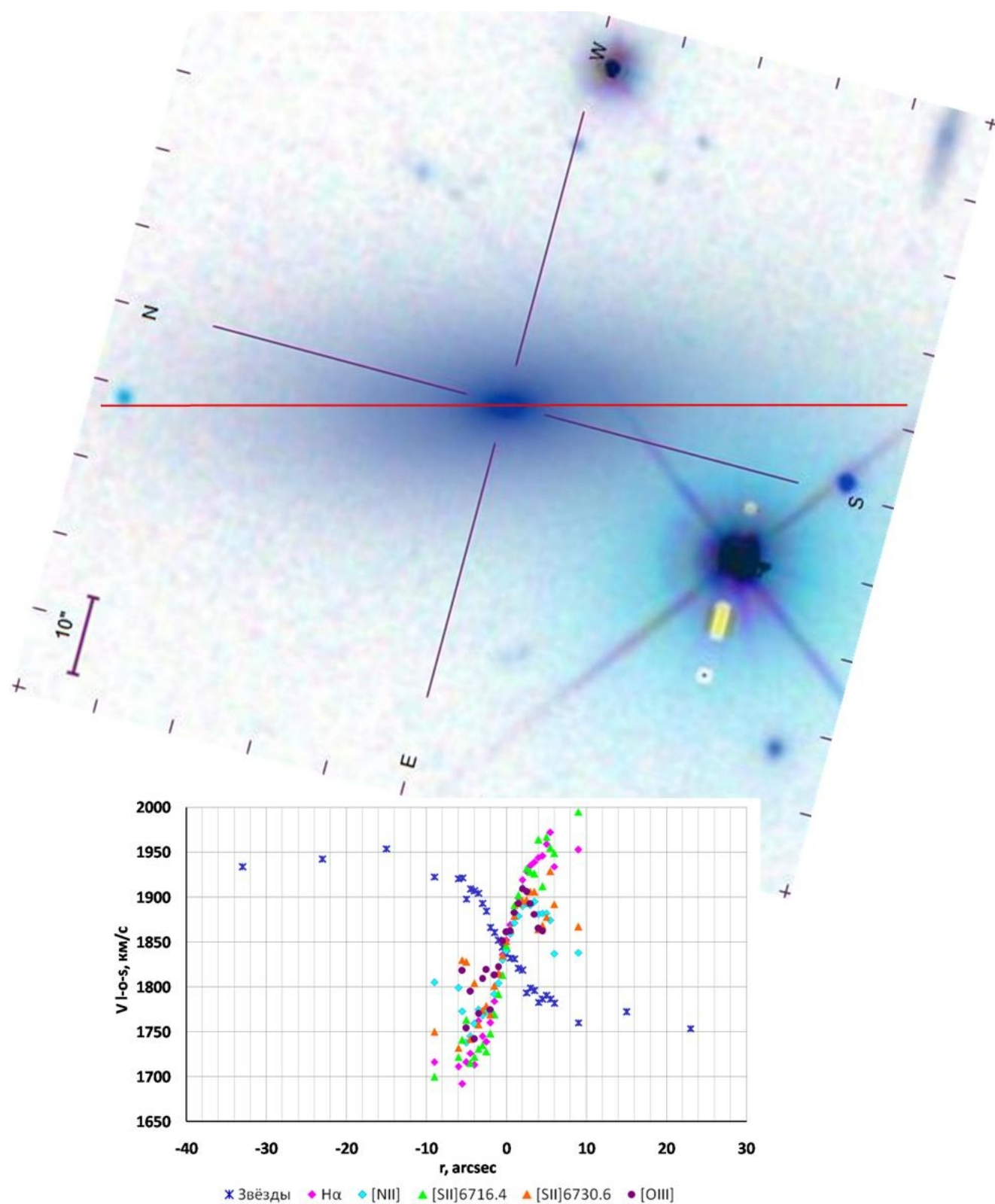


Рисунок 3.1 — Оптическое изображение галактики IC 560 в инвертированных цветах (вверху) и отмасштабированный график кривых лучевых скоростей звёзд и ионизованного газа (внизу)

Как видно из рисунка 3.1, ионизованный газовый околоядерный диск в галактике IC 560 вращается в сторону, противоположную направлению вращения звёзд. Признаков противоположно вращающегося звёздного компонента не видно. Причём лучевые скорости, измеренные по линии H_α и по запрещённым линиям $[\text{NII}]\lambda 6583.4$ и $[\text{OIII}]\lambda 5007$, расходятся за пределами центральных четырёх угловых секунд, что возможно, если на луч зрения попадает газ из областей с разной кинематикой и с разным типом возбуждения.

Проверить, какой именно механизм ответственен за возбуждение газа (процесс звездообразования либо ударные процессы), можно по отношению интенсивностей низко- и высоковозбуждённых запрещённых линий к близлежащим бальмеровским линиям с помощью так называемых BPT-диаграмм, предложенных Болдуином и др. [99]. На рисунке 3.2 показаны графики изменения по радиусу галактики вдоль щели эквивалентных ширин эмиссионных линий и величины $\lg\{[\text{NII}]\lambda 6583/H_\alpha\}$. Красной линией отделена нижняя область значений, которые соответствуют возбуждению светом молодых звёзд. Как видно, такой тип возбуждения присутствует в газе на расстояниях $4'' - 6''$ от центра IC 560, где величина $\lg([\text{NII}]\lambda 6583/H_\alpha)$ достигает « -0.4dex », а средняя величина $\lg([\text{OIII}]\lambda 5007/H_\beta) = 0.20 \pm 0.15$. Полученные величины логарифмов измеренных отношений потоков эмиссионных линий были нанесены на диагностические диаграммы: 1) из работы Кьюли и др. [103], где линиями отображены модели Кьюли и др., а также приведены измерения спектров ядер нескольких тысяч близких галактик из обзора SDSS из работы [102]; 2) из работы Аллена и др. [105], где представлены модели возбуждения газа разной металличности ударными волнами. Эти диаграммы, с нанесёнными на них измерениями для околоядерной кольцевой области IC 560, показаны на рисунке 3.3; как видно, околоядерное кольцо в галактике IC 560 располагается на BPT-диаграмме между областями звездообразования и ударных волн, т. е. газ имеет смешанный тип возбуждения, как и предполагалось выше из анализа графика лучевых скоростей компонент ионизованного газа.

Погрешности измерения лучевых скоростей звёзд и компонент ионизованного газа находятся в диапазоне $2 - 17$ км/с, а эквивалентных ширин — в пределах $0.1 - 0.7 \text{ \AA}$.

Для HII-областей по отношению интенсивностей линий $[\text{NII}]\lambda 6583$ и H_α можно оценить металличность газа. Так, используя калибровку Петтини и Пэйджела [131] для индикатора $N2$, если полагать, что в возбуждении газа доминируют молодые звёзды, получаем для интервала радиусов $4'' - 6''$ обилие кислорода $12 + \lg (\text{O}/\text{H}) = 8.74 \pm 0.03$, т.е. чуть выше солнечного. По калибровке Марино и др. [112] для индикатора $N2$ получается $12 + \lg (\text{O}/\text{H}) = 8.63 \pm 0.03$, т. е. чуть ниже солнечного значения. Если же основной вклад в возбуждение газа вносят ударные волны, то согласно расчётам Аллена и др. [105] отношения эмиссионных линий в IC 560 в интервале расстояний $4'' - 6''$ соответствуют металличности газа $-0.2 - +0.3 \text{ dex}$, т. е. тоже вблизи солнечного значения.

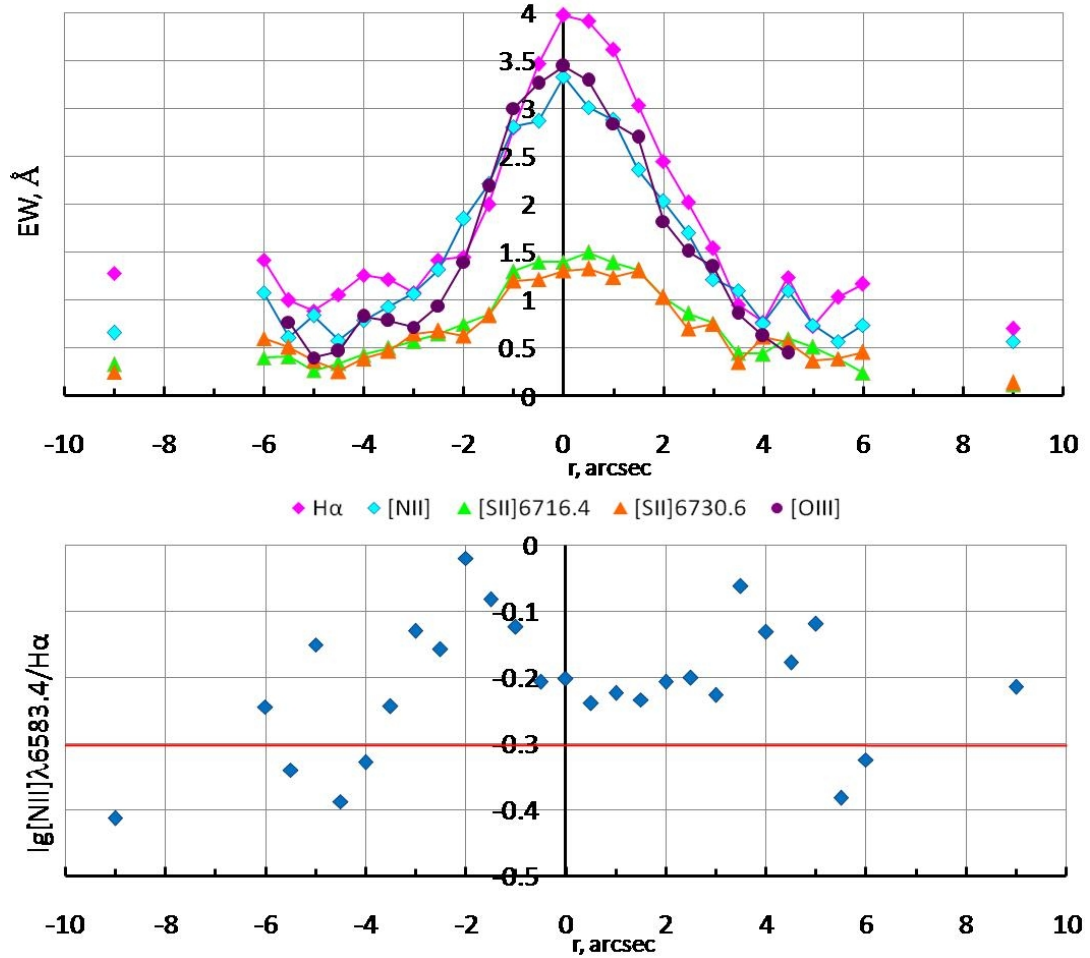


Рисунок 3.2 — Графики изменения эквивалентных ширин эмиссионных линий (вверху) и величины $\lg\{[NII]\lambda 6583.4/H\alpha\}$ (внизу) по радиусу галактики IC 560 вдоль щели

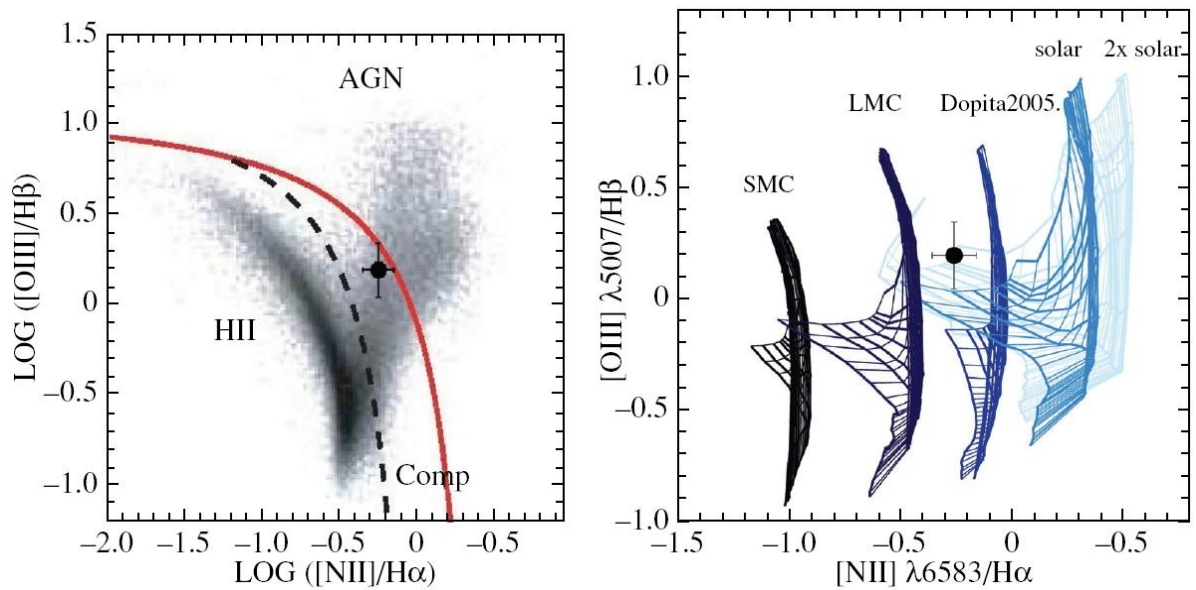


Рисунок 3.3 — Диагностические диаграммы для определения механизма возбуждения газа из работ Кьюли и др. (слева) и Аллена и др. (справа) с нанесёнными на них значениями для IC 560

Полученное значение металличности газа в околядерной кольцевой области галактики IC560 находится в полном согласии с результатами, полученными ранее Сарзи и др. в их работе [132], посвящённой изучению звездообразования и звёздного населения в околядерных кольцах, в которой они отмечают, что околядерные кольца характеризуются значениями металличности газа в диапазоне от чуть ниже до чуть выше солнечной, и что в ядрах всех исследованных ими восьми галактик имеются эмиссионные линии — как и в случае IC 560!

По отношению линий дублета серы с помощью номограммы из книги Остерброка и Фёрланда [100] была оценена электронная плотность ионизованного газа. В интервале расстояний от центра 4" — 9" среднее отношение $[\text{SII}]\lambda 6717/[\text{SII}]\lambda 6731$ равно 0.96 ± 0.08 , и отсутствует градиент по радиусу. Такому отношению компонент дублета серы соответствует электронная плотность 350 — 800 cm^{-3} . Для сравнения в работе Сарзи и др. [132] из восьми исследованных ими галактик с околядерными кольцами звездообразования только у двух галактик, NGC 6951 и NGC 7217, наблюдается сопоставимая электронная плотность в областях околядерного звездообразования, а остальные галактики демонстрируют меньшую плотность.

Несмотря на то, что на представленном на рисунке 3.1 (вверху) изображении галактики IC560 в инвертированных цветах, взятом из открытого архива SDSS (DR9 [56]), проступают очертания околядерного кольца, изофотный анализ, выполненный по SDSS-изображению в r -полосе, результаты которого показаны на рисунке 3.4, не выявляет наличия околядерного кольца: профиль поверхностной яркости изменяется плавно, переходя на расстоянии примерно 15" от центра галактики от формы, соответствующей закону Вокулёра и описывающей балдж галактики, к крупномасштабному звёздному диску с экспоненциальным профилем поверхностной яркости на расстоянии $r > 15''$. Таким образом, всё звездообразование сосредоточено внутри балджа — в пределах 1 кпк от центра.

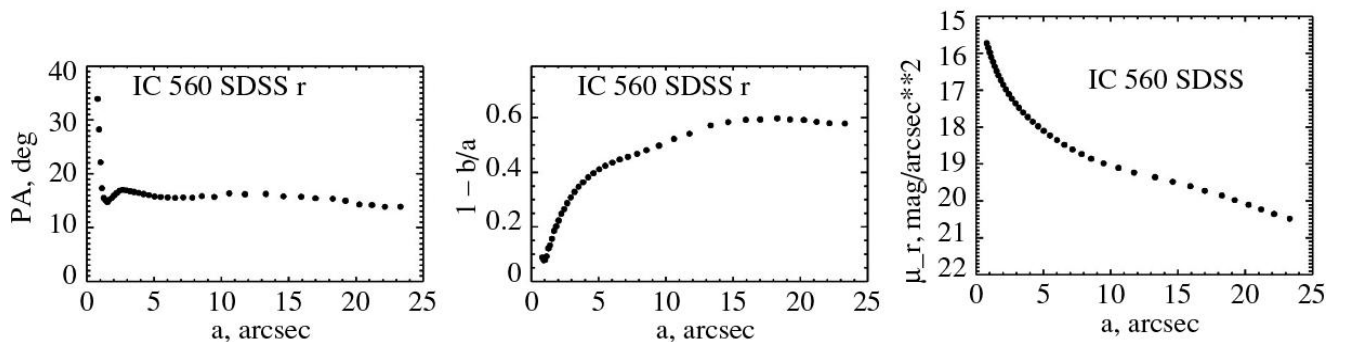


Рисунок 3.4 — Результаты изофотного анализа SDSS-изображения IC 560 в r -полосе: изменения позиционного угла большой оси изофот (слева), изменения эллиптичности изофот (в центре), профиль поверхностной яркости, осреднённый по азимуту вдоль изофот (справа)

Для оценки параметров звёздного населения были измерены и рассчитаны Ликские индексы [104], как описано в подразделе 2.3 Главы 2. Индекс линии поглощения H_β был исправлен за вклад эмиссионной компоненты там, где она присутствует, т.е. в центре ($r < 10''$). Для расчёта поправки использовалась измеренная эквивалентная ширина эмиссионной линии H_α , поскольку в спектре ионизованного газа она в несколько раз сильнее линии H_β . Для ядра, где диагностируется ударный механизм возбуждения газа, принята поправка $\Delta H_\beta = 0.25 \times EW(H_\alpha)$, а для остальных измерений, лежащих в области газа, ионизованного молодыми звёздами, использовался классический бальмеровский декремент $H_\alpha/H_\beta = 2.85$. Затем полученные простые и комбинированные Ликские индексы для IC 560 были нанесены на диагностические диаграммы «индекс — индекс» для сравнения с эволюционными моделями Простых Звёздных Населений (SSP) Томаса и др. [108], как показано на рисунке 3.5. Точки измерений относятся к определённому интервалу радиусов и соединены ломаной линией в порядке удаления от центра галактики. Так, звёздочкой обозначено ядро ($r < 4''$), следующие две точки для диапазонов, где идёт звездообразование ($4'' \leq r \leq 6''$) и присутствует газ ($6'' < r < 12''$), и крайние две точки, для интервалов $12'' < r \leq 18''$ и $18'' < r \leq 28''$, — это внешний диск, где нет газа и молодых звёзд. На диаграмме, представленной на рисунке 3.5 слева, видно, что в центре звёзды имеют солнечное отношение α -элементов, что указывает на длительную эпоху основного звездообразования в центре IC 560, тогда как в диске отношение обилий магния и железа резко возрастает до $[Mg/Fe] = +0.3$ — $+0.5$, что свойственно коротким (менее 1 млрд лет) эпохам звездообразования. Диаграмма справа позволяет оценить средние возраст и металличность звёздного населения. Так, средний возраст звёзд в ядре IC 560 около 4 млрд лет, что согласуется с примерно постоянным звездообразованием за прошедшие 10 млрд лет, а металличность звёзд в ядре $[Z/H] = -0.3$. Затем свойства звёздного населения демонстрируют переходный от ядра к диску характер (это область балджа галактики), но и здесь металличность звёзд $[Z/H] < -0.4$, т.е. очень низкая для центра обычной галактики раннего типа. И снова — металличность подстилающего звёздного населения ниже металличности газа в области звездообразования, как и в случае галактик, рассмотренных в Главе 2.

Как уже упоминалось в подразделе 2.3 Главы 2, при низких металличностях ($[Z/H] < -0.4$) модели плохо вычисляют индекс H_β , поэтому и на эти диаграммы нанесены наблюдательные данные для нескольких шаровых скоплений Галактики, взятые из статьи Бисли и др. [110] (см. подраздел 2.3), и одно из них (NGC 6171) попадает на линию, соединяющую точки балджа и диска галактики: на внутренний край диска IC 560; металличность NGC 6171, согласно данным Диаса и др. [111], $[Fe/H] = -0.95$ и $[Mg/H] = -0.67$. Итак, внешний диск галактики IC 560 имеет старое звёздное население возрастом более 10 млрд лет и металличностью $[Z/H] \approx -1$. Но столь низкая металличность нетипична для галактики со светимостью $M_B = -18.3^m$ (см. [126]).

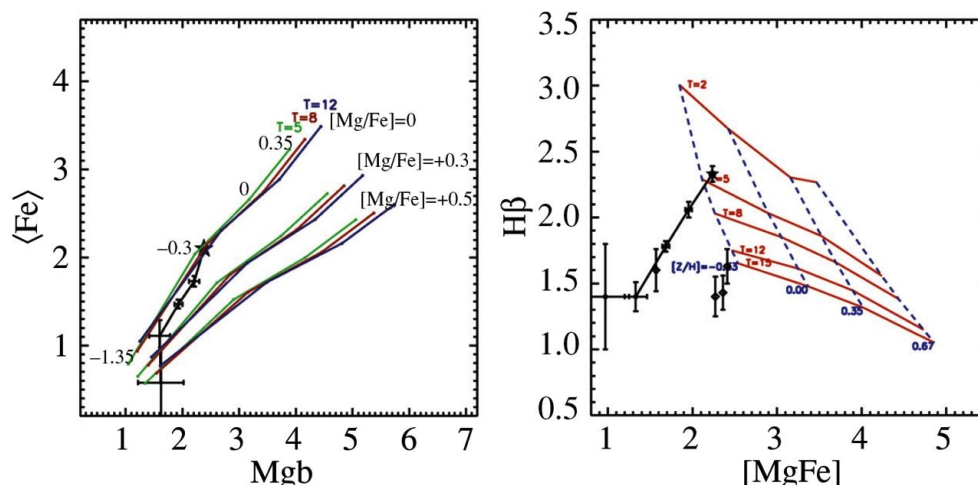


Рисунок 3.5 — Диагностические диаграммы « $\langle \text{Fe} \rangle$ — Mgb » (слева) и « $\text{H}\beta$ — $[\text{MgFe}]$ » (справа) с нанесёнными на модельные сетки Томаса и др. Ликскими индексами, измеренными для IC560

3.2 Галактика NGC 4513 со звездообразованием во внешнем кольце

В 1975 году галактика NGC 4513 была замечена И.П. Костюк и внесена в список галактик с внешней кольцеобразной структурой [76], а позже Костюк и др. [133] провели спектральные наблюдения этой галактики на 6-метровом телескопе БТА САО РАН в рамках программы по определению радиальных скоростей галактик с внешними кольцами. В 2008 году Танг и др. [134] обнаружили в этой галактике нейтральный водород массой $(0.27 \pm 0.14) \times 10^9 M_{\odot}$, сконцентрированный в кольцевой структуре. В 2011 году Ильиной и Сильченко [85] в ходе фотометрического исследования было установлено совпадение яркого УФ-кольца с едва различимым кольцом в оптике. А в 2014 году Ильиной и др. [86] были опубликованы первые результаты спектральных наблюдений этой галактики, которые выявили на периферии галактики ионизованный газ, вращающийся в сторону, противоположную звёздной компоненте. В этой Главе приводятся результаты более тщательного анализа этих спектральных данных, а также оценки темпов звездообразования по описанной выше методике, выполненные автором.

3.2.1 Наблюдательные данные и их первичная обработка

Спектральные наблюдения с длинной щелью галактики NGC 4513 проводились 8 февраля 2011 года с помощью универсального редуктора SCORPIO-2 [135], установленного в прямом фокусе 6-метрового телескопа БТА САО РАН. Щель, шириной 1", была ориентирована вдоль большой оси изофот диска галактики, $\text{PA}=15^{\circ}$. Суммарная экспозиция составила 80 минут. Качество изображения $\text{FWHM} \approx 3.5''$. Гризма VPHG1200 обеспечила спектральное разрешение $5\text{\AA}$ в спектральном диапазоне 4000 — 7200 $\text{\AA}$. Масштаб вдоль щели при биннинге 1×2 составил

0.357"/пиксель. Длина щели — 6 угловых минут, что позволило использовать края экспонированного спектра галактики для вычитания фона неба из спектра объекта. Изменения чувствительности детектора с длиной волны были скорректированы путём наблюдения спектрофотометрической звезды-стандарта GRW+70d5824 в течение той же ночи. Наблюдения и первичная обработка наблюдательных данных выполнялись А.В. Моисеевым.

3.2.2 Структура галактики, кинематика и свойства звёзд и газа

Оптическое изображение галактики NGC 4513 в инвертированных цветах, взятое из архива SDSS DR9 [56], с нанесением на него положения щели, показано на рисунке 3.6 (*вверху*); там же (*в центре*) показаны графики лучевых скоростей звёзд и компонент ионизованного газа.

На рисунке 3.7 показаны результаты изофотного анализа, выполненного О.К. Сильченко по взятым из архива SDSS DR9 [56] изображениям галактики NGC 4513 в g - и r -полосах, а именно: радиальные изменения позиционного угла большой оси, эллиптичности и профилей поверхностной яркости. Так, локальный максимум эллиптичности и поворот большой оси изофот указывают на наличие бара, оканчивающегося на расстоянии $r = 8''$. Начиная с расстояния $r \geq 14''$ и до $\sim 40''$ профиль поверхностной яркости имеет экспоненциальную форму, а параметры изофот остаются почти постоянными — это область доминирования крупномасштабного экспоненциального диска, его радиальная шкала равна $11.5''$ (~ 1.8 кпк). В диапазоне радиусов $55'' \leq |r| \leq 72''$ заметно повышение поверхностной яркости — это признак внешнего звёздного кольца на радиусе около $10 - 12$ кпк, т. е. за пределами основного звёздного диска, для которого $R_{25} = 43''$ или 7 кпк (по Вокулёру и др. [60]). После вычитания модели внешнего экспоненциального диска из изображения NGC 4513 в r -полосе для остаточного изображения также был построен его осреднённый по азимуту профиль поверхностной яркости с бегущими по радиусу параметрами эллиптической апертуры, и, как видно на рисунке 3.7 (*внизу справа*), в диапазоне радиусов $8'' \leq |r| \leq 14''$ снова выделяется экспоненциальный профиль с масштабом $2.8''$ (~ 0.5 кпк) — это псевдобалдж в NGC 4513.

Звёздная кинематика была посчитана путём кросс-корреляции спектра галактики со спектром звезды-гиганта спектрального класса K2.5 HD 102328, снятым той же ночью. Кинематика ионизованного газа определялась по эмиссионным линиям H_α , $[\text{NII}]\lambda 6583$, $[\text{SII}]\lambda 6717, 6731$ и $[\text{OIII}]\lambda 5007$ как путём гаусс-анализа блендами $H_\alpha + [\text{NII}]\lambda 6548, 6583$ (с учётом абсорбционной линии H_α), $H_\beta + [\text{OIII}]\lambda 5007$ (с учётом абсорбционных линий H_β и $\text{TiI}\lambda 5007 + \text{TiI}\lambda 5015$) и дублета $[\text{SII}]\lambda \lambda 6716.4, 6730.6$, так и путём определения положения барицентров линий. На некоторых радиусах вдоль щели проводилось суммирование одиночных спектров для повышения отношения сигнала к шуму.

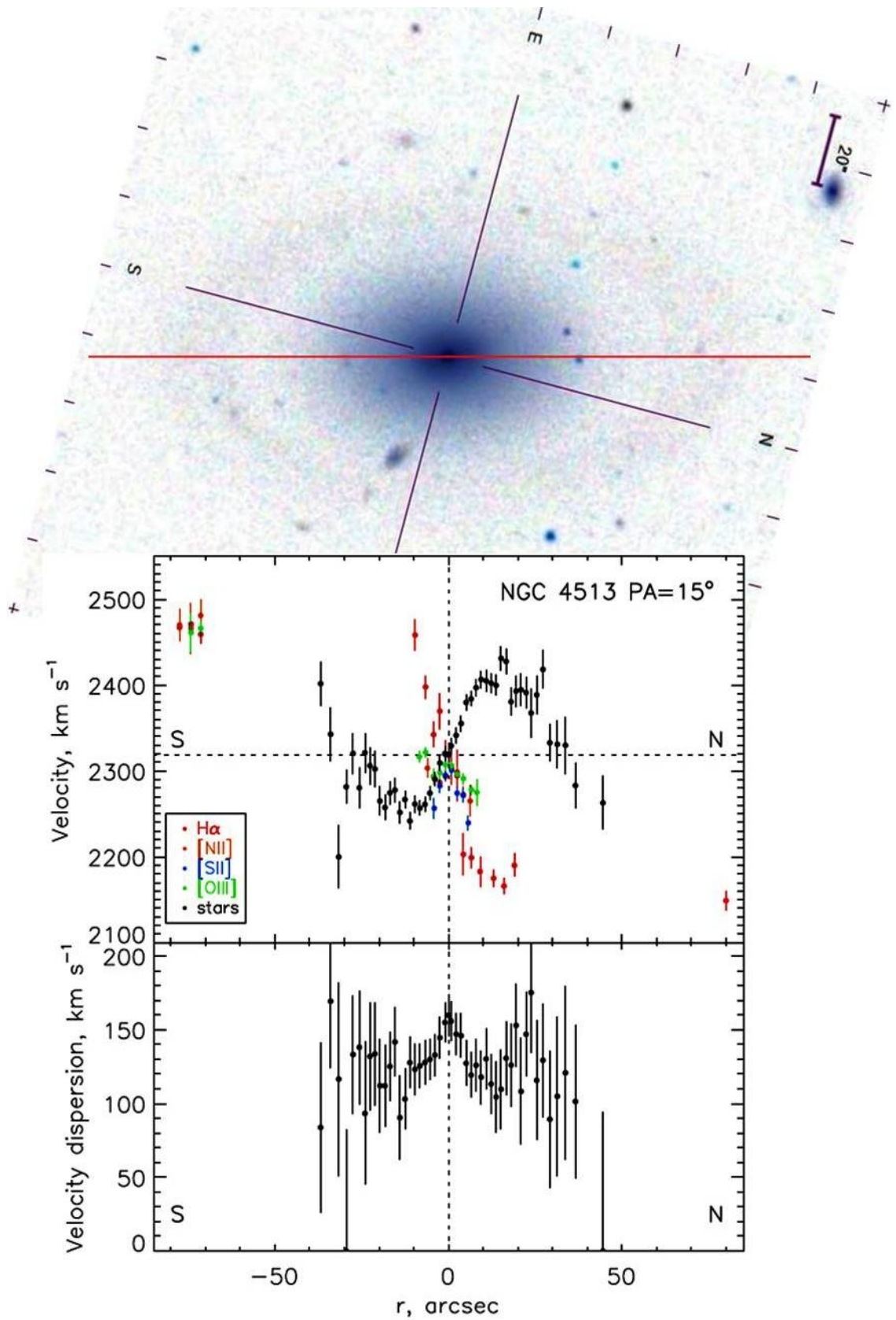


Рисунок 3.6 — Оптическое изображение галактики NGC 4513 в инвертированных цветах из архива SDSS DR9, с обозначенным на нём красной линией положением длинной щели (вверху), отмасштабированные графики лучевых скоростей звёзд и компонент ионизованного газа (посередине) и дисперсии скоростей звёзд (внизу)

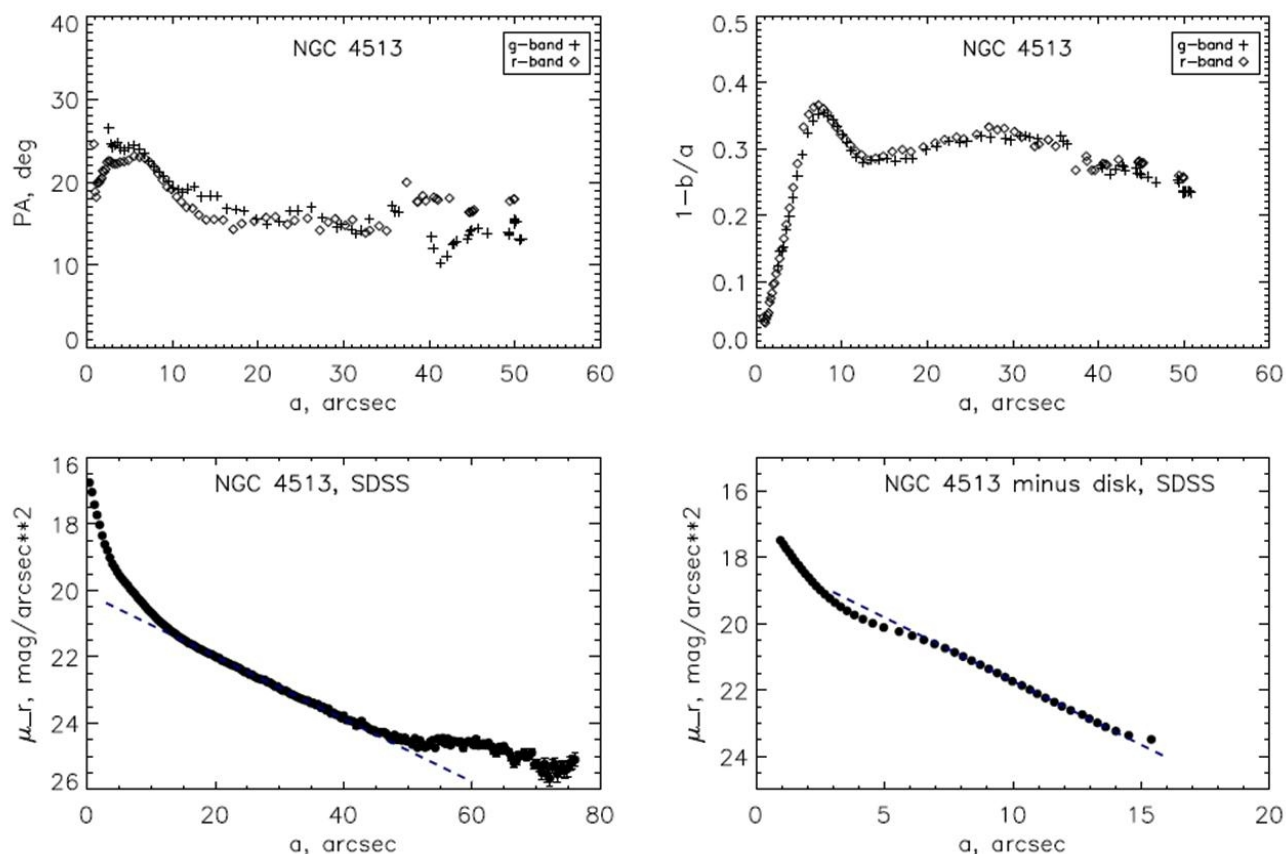


Рисунок 3.7 — Результаты изофотного анализа SDSS-изображений NGC 4513 в r - и g -полосах: изменения позиционного угла большой оси изофот (вверху слева), изменения эллиптичности изофот (вверху справа), профили поверхностной яркости полного изображения (внизу слева) и изображения галактики, оставшегося после вычитания модели внешнего диска (внизу справа)

На рисунке 3.6 (посередине) хорошо видно, что ионизованный газ вращается в направлении, противоположном вращению звёзд, расположенных в центральной части галактики. Но с расстояния $r \approx 15''$ от центра кривая лучевых скоростей звёзд начинает падать и переходит в режим встречного вращения на внешней кромке диска с радиуса $r \geq 30''$. Это предполагает возможное существование вторичного звёздного компонента, вероятно связанного с газом. Существование двух звёздных компонентов, вращающихся в противоположных направлениях, в результате суперпозиции может дать нулевую среднюю скорость вращения на расстоянии $r \approx 25'' - 30''$ от центра, т.е. там, где по результатам изофотного анализа преобладает диск. Для проверки этого предположения А.В. Моисеевым были проведены тщательные измерения и по их результатам построен профиль измеренной дисперсии скоростей звёзд, оценённой как σ распределения лучевых скоростей звёзд (LOSVD) (рисунок 3.6, внизу). Хотя наше спектральное разрешение не позволяет надёжно измерять дисперсию скоростей звёзд ниже 100 км/с, типичную для диска, но качественно заметно увеличение видимой дисперсии скоростей звёзд после разворота кривой вращения. Такое поведение профиля дисперсии

скоростей звёзд подтверждает предположение о том, что на нашем луче зрения в области доминирования диска находятся два звёздных компонента, отличающихся по кинематике.

Вращение ионизованного газа в NGC 4513 прослеживается по нескольким сильным эмиссионным линиям (рисунок 3.6, *посередине*). В центральной части галактики ($r < 10''$) наблюдается плоский участок профиля скоростей газа, что можно объяснить замедлением газа на краях бара. Затем в области псевдобалджа кривая лучевых скоростей газа круто возрастает (до радиуса $r \approx 10''$). Скорости газа во внешнем кольце равны скоростям газа на интервале радиусов $r = 10'' - 15''$, что подразумевает плоскую форму кривой кругового вращения на всём протяжении диска NGC 4513, хотя никаких эмиссионных линий между внутренним краем диска и внешним кольцом не видно, что согласуется с обнаруженной Тангом и др. [134, рис. 19] заметной центральной депрессией в распределении нейтрального водорода (HI). Причём нейтральный водород вращается в ту же сторону и с той же скоростью, что и ионизованный газ.

Эмиссионная линия H_α слабая во всей центральной части NGC 4513, а самая сильная эмиссионная линия — $[\text{NII}]\lambda 6583$. Это видно из рисунка 3.8, где показаны радиальные изменения эквивалентных ширин (EW) эмиссионных линий (*вверху*). Такое соотношение линий может быть в случае возбуждения газа старыми звёздами (согласно работе Бинетт и др. [106]), что согласуется с выполненной нами оценкой среднего возраста звёздного населения в центральной части NGC 4513 (как будет показано ниже по тексту в этом подразделе). Либо газ в пределах $|r| < 8''$ может иметь ударное возбуждение, что согласуется с наличием бара. Вклад бара в возбуждение газа может также объяснить сильно асимметричное распределение электронной плотности вдоль щели. Как показано на рисунке 3.8 (*внизу*), для отношения линий дублета серы $[\text{SII}]\lambda 6717/[\text{SII}]\lambda 6731$ имеется тренд от 0.71 ± 0.07 к югу от ядра до 1.13 ± 0.04 к северу от ядра, что соответствует разнице в электронной плотности ($\langle N_e \rangle$) примерно на порядок: 2400 см^{-3} против 300 см^{-3} соответственно, согласно номограмме из книги Остерброка и Фёрланда [100].

В области кольца, на расстояниях $r = \text{«-69''»} - \text{«-79''»}$ (т. е. к югу от центра), вновь видны сильные эмиссионные линии, но соотношение интенсивностей потоков в линиях иное, как видно из рисунка 3.9 (*внизу*). Измеренное отношение потоков для всей южной оконечности кольца нанесено на ВРТ-диаграмму [99] и показано на рисунке 3.10 в виде звёздочки. Видно, что оно лежит ниже теоретической границы звездообразования, рассчитанной Кьюли и др. [101] (отмечена штриховой линией), и ровно на эмпирической последовательности звездообразования Кауффманн и др. [102] (отмечена пунктирной линией), а, значит, ионизованный газ кольца возбуждён в основном светом молодых звёзд. Однако при отдельном рассмотрении внешнего ($r = -76.5''$) и внутреннего ($r = -71.5''$) краёв южной части кольца, проявляется смещение: внутренний край кольца на ВРТ-диаграмме попадает в область комбинированного возбуждения, т. е. там есть заметный вклад диффузного межзвёздного газа (DIG) или ударных волн.

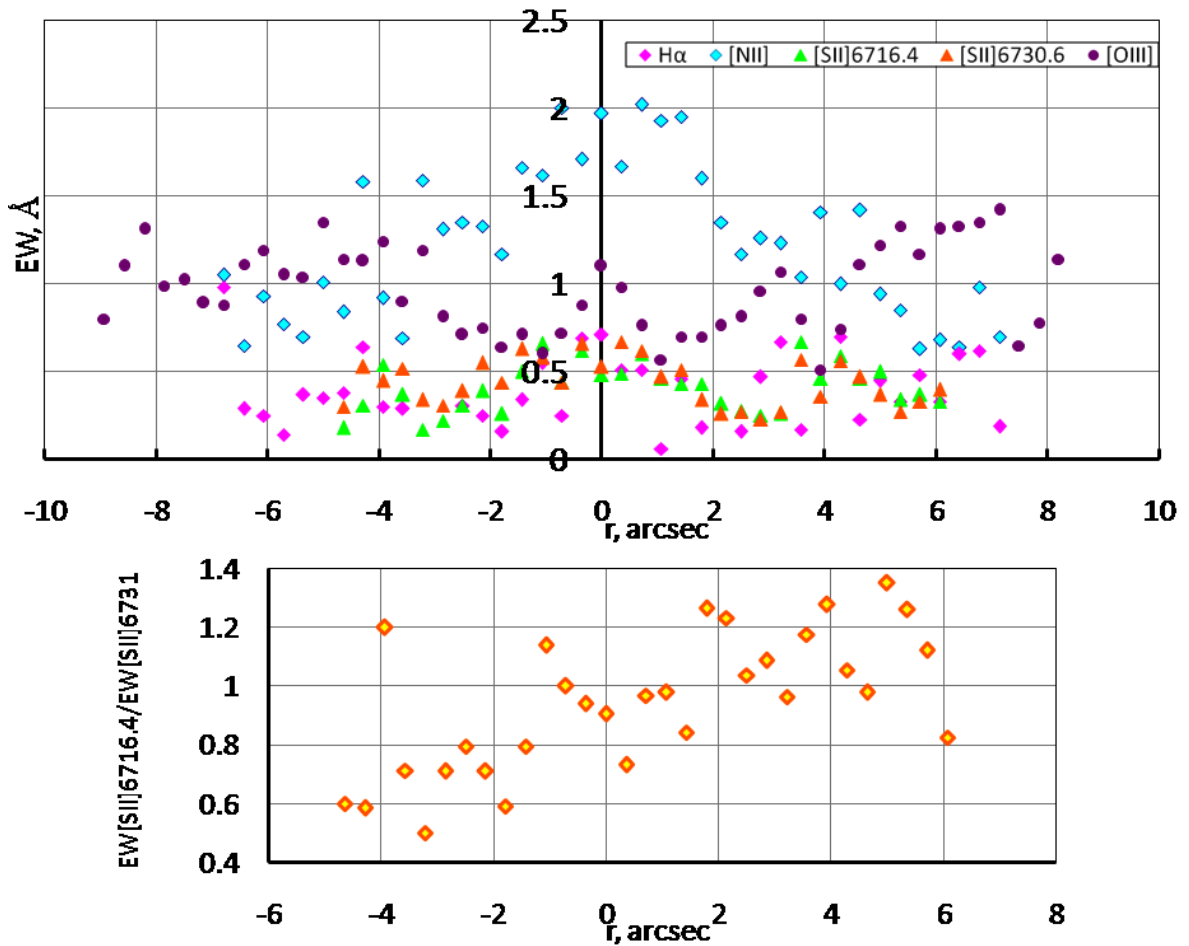


Рисунок 3.8 — Радиальные изменения эквивалентных ширин (EW) эмиссионных линий (вверху) и отношения линий дублета серы [SII] λ 6717/[SII] λ 6731 (внизу) в центре галактики NGC 4513

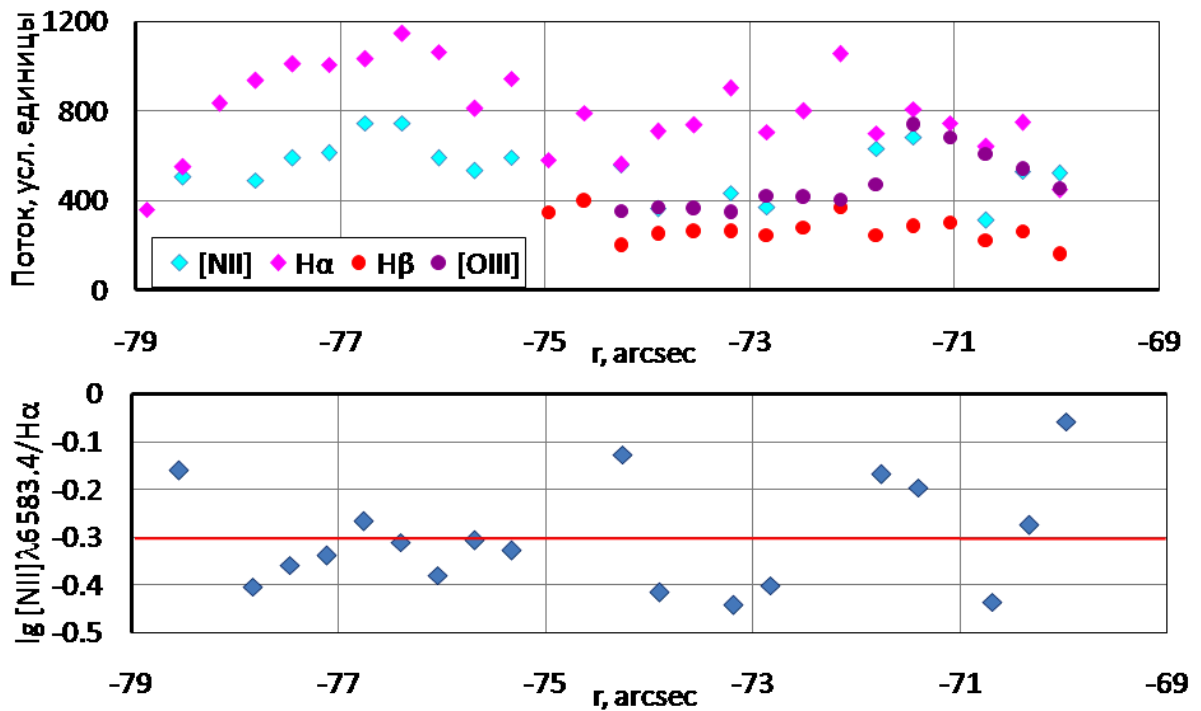


Рисунок 3.9 — Графики изменения потоков в эмиссионных линиях (вверху) и величины $\lg\{[\text{NII}]\lambda 6583/\text{H}\alpha\}$ (внизу) внутри южной части кольца галактики NGC 4513

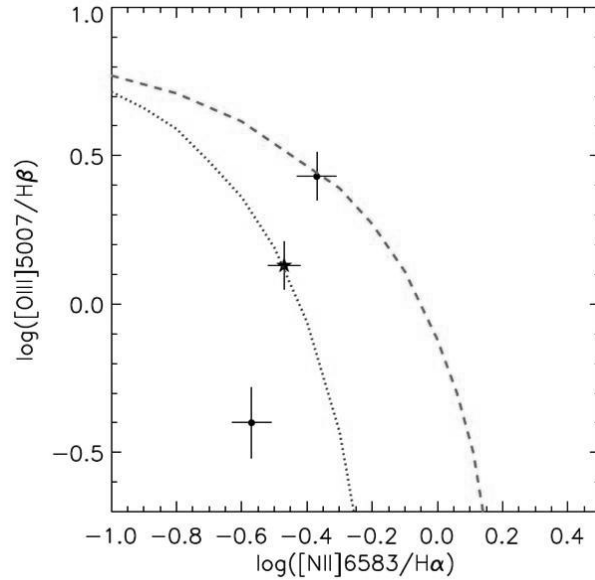


Рисунок 3.10 — BPT-диаграмма для южной части кольца (отмечено звёздочкой) и отдельно для его внутреннего края (верхняя точка) и для внешнего края (нижняя точка) галактики NGC 4513 (штриховая линия отмечает теоретическую границу возбуждения газа звездообразованием согласно Кьюли и др. [101], пунктирная линия обозначает эмпирическую последовательность звездообразования по данным Кауффманн и др. [102])

Согласно недавним исследованиям Кумари и др. [136], в присутствии диффузного ионизованного газа (DIG) наиболее надёжную калибровку металличности газа даёт метод $O3N2$. Используя две калибровки $O3N2$: Петтини и Пэйжла [131] и Марино и др. [112], для внутреннего края кольца NGC 4513 обилие кислорода получилось равным $12 + \log (O/H) = 8.42 \pm 0.06$ dex. Для внешнего края кольца, попавшего внутрь HII-области на BPT-диаграмме, и для всей ширины южной части кольца, оказавшейся на последовательности звездообразования Кауффманн и др. [102], применялись методы $N2$ и $O3N2$ из работ Петтини и Пэйжла [131] и Марино и др. [112]. В результате обилие кислорода в газе на внешнем крае кольца составляет $12 + \log (O/H) = 8.57 \pm 0.06$ dex и $12 + \log (O/H) = 8.54 \pm 0.06$ dex — для всей ширины южной части кольца. Все эти оценки подразумевают металличность газового кольца около -0.2 dex по отношению к металличности Солнца [113], что довольно близко к значению металличности звёзд в крупномасштабном диске NGC 4513, как будет показано ниже (на рисунке 3.12). Полученное значение содержания кислорода в газе во внешнем кольце NGC 4513 совпадает с обилием кислорода в других внешних кольцах S0-галактик, исследованных в Главе 2 и опубликованных в работе Прошиной и др. [87], а также находится в согласии с результатами Сильченко и др. [54], которые для выборки из дюжины S0-галактик с газовыми внешними кольцами, получили $\langle [O/H] \rangle = -0.15$ dex.

Для оценки среднего возраста и металличности звёздного населения были измерены и рассчитаны Ликские индексы. Во внутренней части галактики, где есть газ и диагностируется ударный механизм его возбуждения, индекс H_β был скорректирован за эмиссию с помощью поправки $\Delta H_\beta = 0.25 \times EW(H_\alpha)$, как было описано выше в подразделах 2.3 и 3.1.2. Для приведения инструментальных Ликских индексов, полученных нами по наблюдениям с редуктором SCORPIO-2, к стандартной Ликской системе были проведены наблюдения нескольких звёзд-стандартов из выборки Уорси и др. [104]. Калибровочные линейные зависимости приведены в статье Прошиной и др. [130, рис. 4]. Разброс значений индивидуальных измерений звёзд от линейных зависимостей $\sim 0.2\text{\AA}$ — сопоставим по точности с измерениями Уорси и др. [104].

На рисунке 3.11, где показано радиальное изменение вдоль щели Ликских индексов (приведённых к стандартной системе) для NGC 4513, видно, что в центральной части галактики ($|r| < 10''$) изменение плавное, сглаженное, согласованное, а с расстояния $|r| > 10''$ от центра преобладает сильный разброс значений, что можно объяснить влиянием/вливанием второго звёздного компонента, отличающегося по своим свойствам (а не только по кинематике) от основного звёздного населения NGC 4513. Таким образом, есть дополнительный аргумент в пользу предположения о существовании двух звёздных компонентов. Опираясь на эти профили и с учётом границ структурных компонентов галактики, выделенных по итогам изофотного анализа и указанных выше, полученные Ликские индексы были усреднены на интервалах: $|r| \leq 4''$ (ядро), $4'' < |r| < 8''$ (бар), $8'' \leq |r| \leq 14''$ (псевдобалдж), $14'' < |r| < 40''$ (диск).

Затем усреднённые в этих радиальных бинах Ликские индексы для NGC 4513 были сопоставлены с моделями эволюционного синтеза Томаса и др. [108] путём нанесения их на диагностические диаграммы «индекс-индекс», как показано на рисунке 3.12. Звёздой отмечено ядро галактики ($|r| \leq 4''$), и линией соединены последовательно участки, расположенные далее от центра. Точка, соответствующая внешнему диску ($14'' < |r| < 40''$), обозначена квадратом.

Звёздное население центральной части галактики ($|r| \leq 4''$) однородно старое, имеет избыток магния и сверхсолнечную металличность. Однако крупномасштабный звёздный диск NGC 4513 ($14'' < |r| < 40''$) отличается от центра галактики по свойствам звёздного населения: металличность звёзд диска лишь немного ниже солнечной; соотношение $[Mg/Fe]$ в нём ближе к солнечному значению, что указывает на продолжительную историю звездообразования, которая, судя по более молодому среднему возрасту его звёздного населения, остановилась всего несколько миллиардов лет назад. Это необычно, т. к. в разреженном окружении внешние звёздные диски S0-галактик являются ровесниками их балджей (Катков и др. [53]) или старше (Сильченко и др. [126]). Но скорее всего такое разногласие в возрасте звёзд связано с наличием вторичного, вероятно, молодого звёздного компонента, пришедшего во внешний диск NGC 4513 вместе с газом, явно находящимся в противовращении к «родным» звёздам в центре галактики.

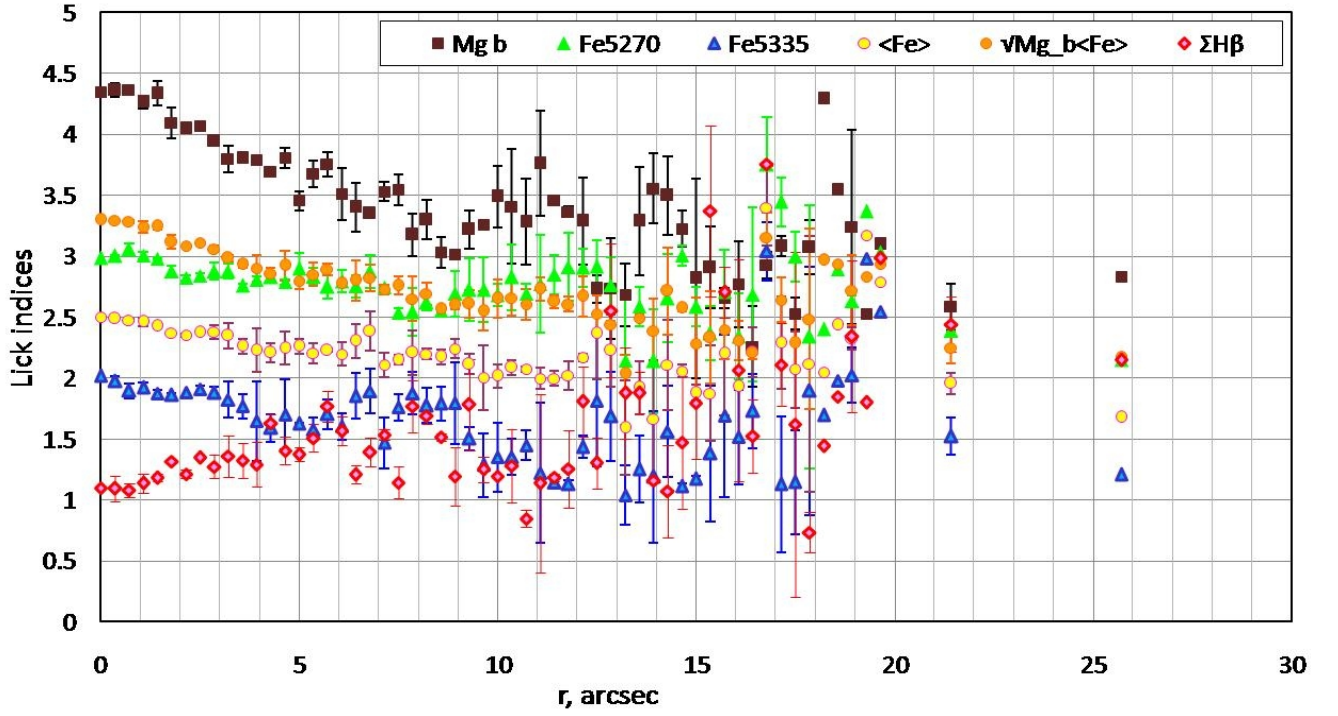


Рисунок 3.11— Радиальные изменения Ликских индексов вдоль щели в галактике NGC 4513

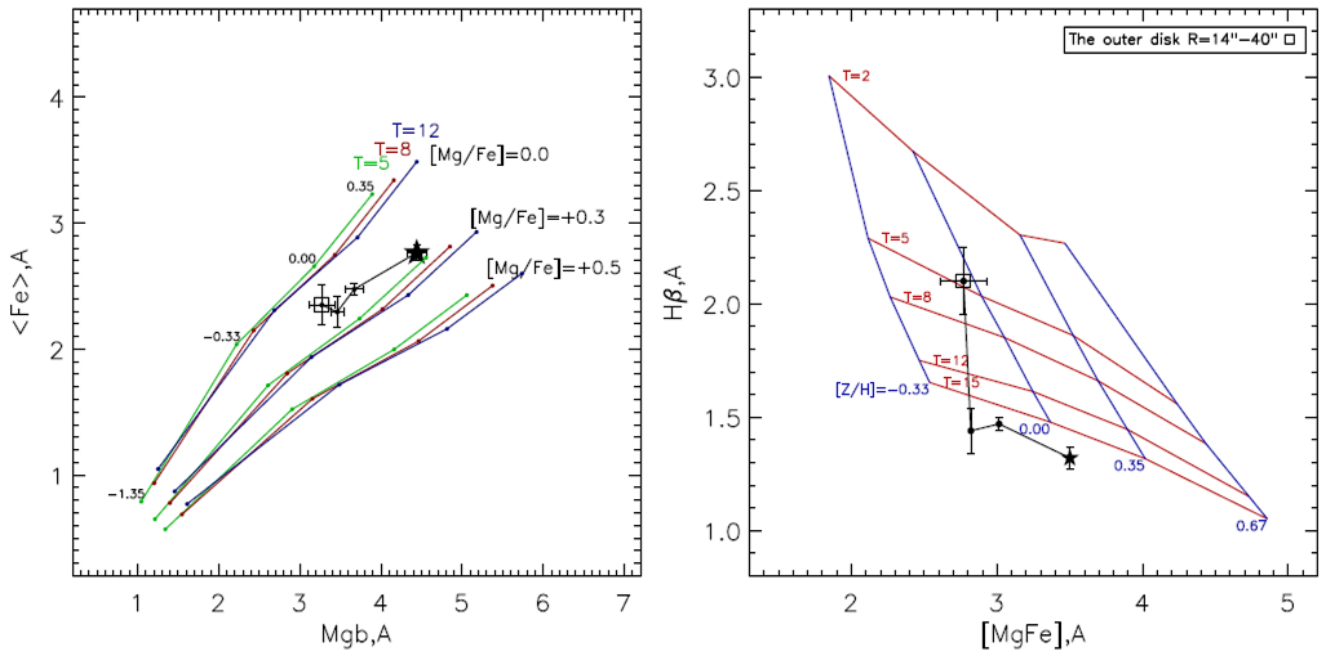


Рисунок 3.12 — Диагностические диаграммы « $\langle \text{Fe} \rangle$ — Mg b » (слева) и « $\text{H}\beta$ — $[\text{MgFe}]$ » (справа) с нанесёнными на модельные сетки Томаса и др. Ликскими индексами, измеренными вдоль радиуса галактики NGC 4513

3.3 Выводы по Главе 3: сопоставление темпов звездообразования и источники газа

Оценка темпов звездообразования в околядерной кольцевой области галактики IC 560, где диагностируется звездообразование, и во внешнем ярком УФ-кольце галактики NGC 4513 была проведена по методике, изложенной в подразделе 2.5 Главы 2.

Из публичного архива Б.А. Микульски для космических телескопов (MAST) были взяты изображения GALEX в FUV (1539Å) и NUV (2316 Å) диапазонах (информация о них — продолжительность экспозиции, обозначение программы и даты УФ-наблюдений — приведены в таблице 3.2), а также из архива инфракрасной науки (IRSA) взяты изображения WISE в полосе W4 (22 мкм). Используемые ультрафиолетовые и инфракрасные изображения галактик IC 560 и NGC 4513 показаны на рисунке 3.13. На эти изображения накладывались длинные щели и эллиптические кольцевые апертуры (их размеры приведены в таблице 3.3, а их положения показаны на рисунке 3.13), затем измерялись потоки в апертурах и в тех областях щелей, где было диагностировано текущее звездообразование, и рассчитывались темпы звездообразования. Для учёта пыли в галактиках использовались их изображения в инфракрасной полосе WISE W4, а также учитывалось поглощение в нашей Галактике в направлении на исследуемые галактики: для IC 560 $A_{\text{В}}^{\text{Г}} = 0.491^{\text{м}}$, для NGC 4513 $A_{\text{В}}^{\text{Г}} = 0.059^{\text{м}}$ (по данным базы NED).

Таблица 3.2 — Перечень УФ-наблюдений галактик телескопом GALEX

Галактика	Полоса	Идентификатор программы	Дата наблюдений	Экспозиция, сек
IC 560	FUV	MISDR1 24342 0266	25 февраля 2007	2470.05
	NUV	MISDR1 24342 0266	25 февраля 2007	2470.05
	FUV	AIS 335 0002 sg93	17 марта 2004	122
	NUV	AIS 335 0002 sg93	17 марта 2004	122
NGC 4513	FUV	AIS 97 0001 sg48	3 января 2007	105
	NUV	AIS 97 0001 sg48	3 января 2007	105
	FUV	GI1 045009 VIIZw466	11 апреля 2007	4286.15
	NUV	GI1 045009 VIIZw466	21 января 2005	8198.35

Полученные оценки темпов звездообразования и поверхностных плотностей темпов звездообразования в околядерном кольце галактики IC560 и во внешнем кольце NGC 4513 по двум УФ-индикаторам приведены в таблице 3.3, а в областях текущего звездообразования, расположенных вдоль длинных щелей — в таблице 3.4. Кроме того, на рисунке 3.14 полученные оценки из таблицы 3.3 наложены на рисунок 9 из статьи Кенникатта и Эванса [51] для сопоставления интегральных характеристик звездообразования в галактиках различных типов.

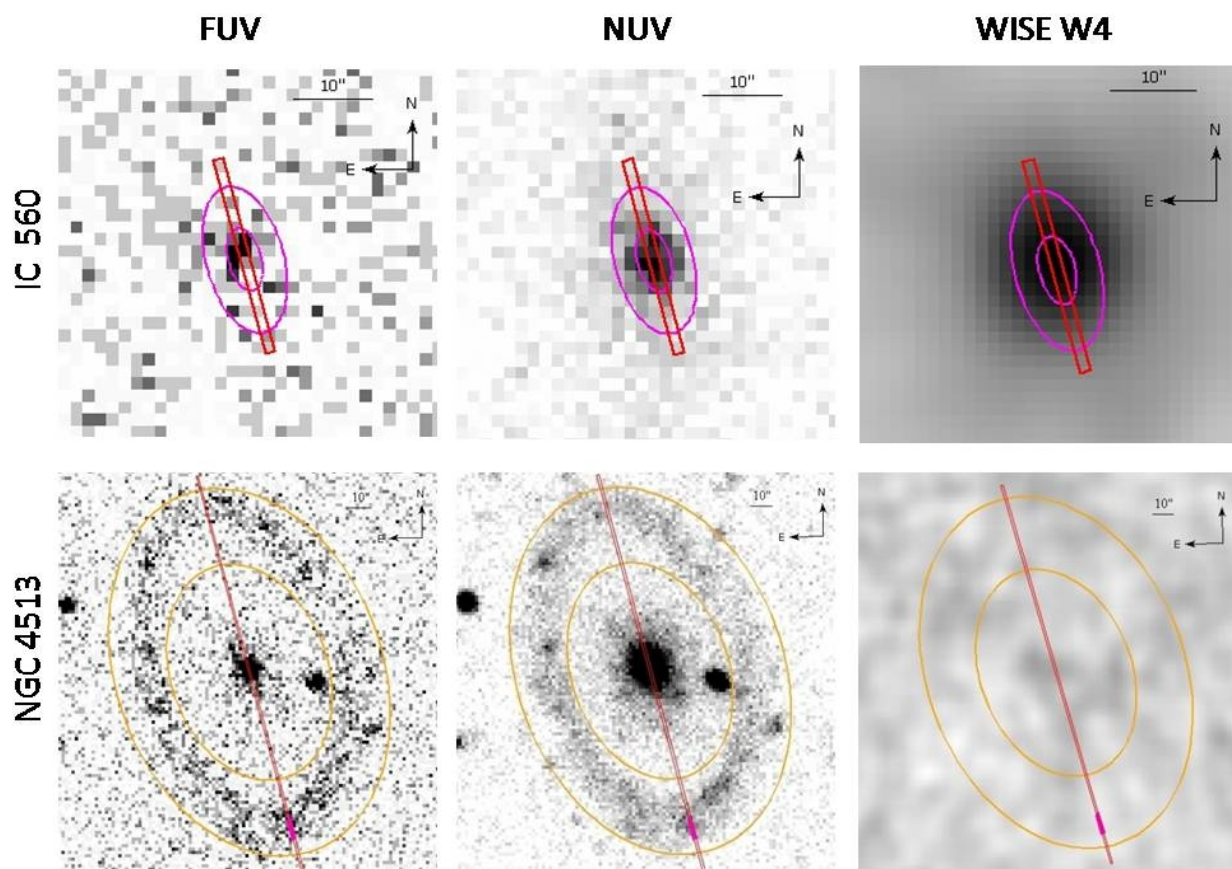


Рисунок 3.13 — Изображения галактик IC 560 (вверху) и NGC4513 (внизу) в ультрафиолетовых диапазонах FUV (слева), NUV (посередине) и в инфракрасной полосе WISE W4 (справа) с нанесёнными положениями используемых длинных щелей и кольцевых апертур

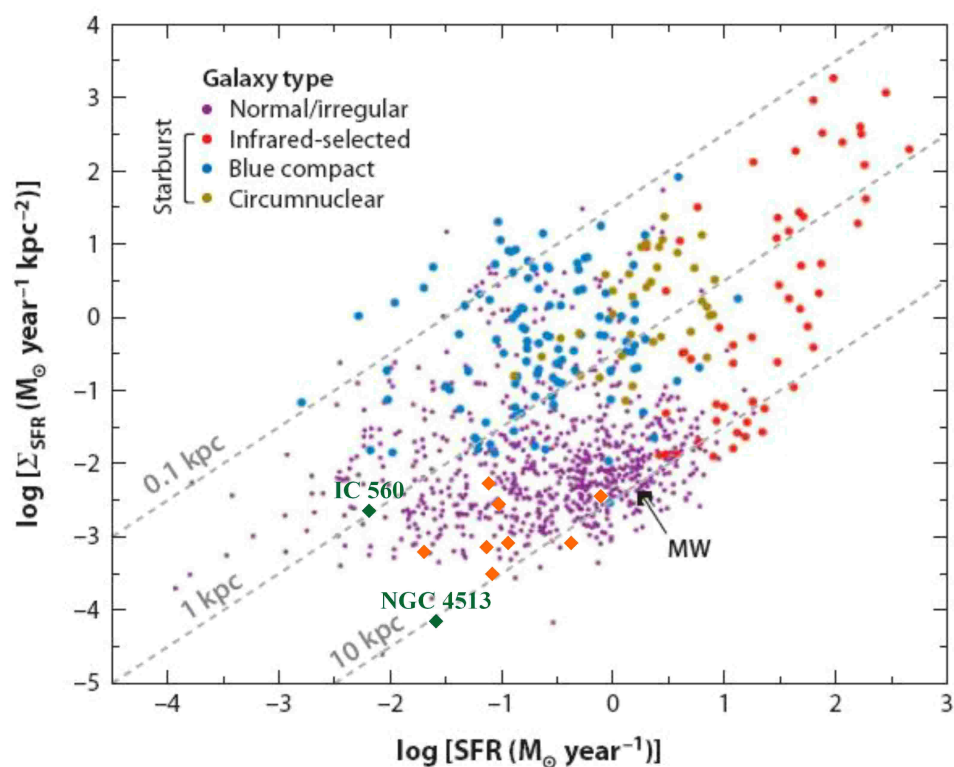


Рисунок 3.14 — Сопоставление интегральных характеристик звездообразования в IC 560 и NGC4513 и галактиках локальной Вселенной (подложка — из работы Кенникатта и Эванса [51])

Таблица 3.3 — Темпы звездообразования в кольцах исследуемых галактик

Галактика	Границы кольца в УФ-диапазоне		Темп звездообразования, $M_{\odot}/\text{год}$		Поверхностная плотность темпов звездообразования, $M_{\odot}/(\text{год} \times \text{кпк}^2)$	
	r, уг. сек	R, уг. сек	SFR_{FUV}	SFR_{NUV}	$\Sigma(SFR_{FUV})$	$\Sigma(SFR_{NUV})$
IC 560	4	9.4	0.0049	0.0064	0.0017	0.0022
NGC 4513	50	85	0.022	0.026	0.000056	0.000067

Таблица 3.4 — Темпы звездообразования в областях текущего звездообразования (вдоль щелей)

Галактика	Области звздообразования, уг. сек	Темп звездообразования, $M_{\odot}/\text{год}$			Поверхностная плотность темпов звездообразования, $M_{\odot}/(\text{год} \times \text{кпк}^2)$		
		$SFR_{H\alpha}$	SFR_{FUV}	SFR_{NUV}	$\Sigma(SFR_{H\alpha})$	$\Sigma(SFR_{FUV})$	$\Sigma(SFR_{NUV})$
IC 560	-3.5"...-9" N	0.00040	0.00031	0.00038	0.0045	0.0036	0.0044
	+5.5"...+9" S	0.00022	0.00018	0.00026	0.0040	0.0032	0.0046
NGC 4513	-70"...-79" S	0.00024	0.00006	0.00006	0.0010	0.00025	0.00024

Поскольку для IC 560 и NGC 4513 имеется по два изображения в каждом (FUV и NUV) диапазоне, полученных в рамках различных наблюдательных программ (указаны в таблице 3.2), то это даёт возможность оценить погрешности рассчитанных темпов звездообразования и их поверхностных плотностей. Кроме того, спектр галактики IC 560 был получен за две ночи при одном и том же положении щели, что позволяет оценить погрешность полученных по потоку в эмиссионной линии H_{α} темпов звездообразования и их поверхностных плотностей. В результате относительные погрешности темпов звездообразования (SFR) и их поверхностных плотностей (Σ_{SFR}) в кольцах галактик (табл. 3.3) находятся в диапазоне 2.5% — 12.5%; а в тех областях вдоль щелей, где диагностируется текущее звездообразование (табл. 3.4), они составляют 0.1%— 16%.

На рисунок 3.14 помимо полученных по потоку в NUV-диапазоне значений темпов звездообразования и их плотностей для IC 560 и NGC 4513 (обозначены зелёными ромбами) нанесены также значения, полученные ранее в Главе 2, для исследованных колец в пяти других S0-галактиках (обозначены оранжевыми ромбами). Видно, что полученные значения для IC 560 и NGC 4513 легли рядом с серыми пунктирными линиями исходной диаграммы Кенникатта и Эванса [51], которые прослеживают места постоянного радиуса звездообразования; и действительно, текущее звездообразование в IC 560 диагностируется нами на расстояниях $|r| = 4''$ — $6''$ от центра, а яркое УФ-кольцо NGC 4513 находится на удалении $\sim 70''$ от центра галактики, и, с учётом масштабов, приведённых в таблице 3.1, это соответствует расстояниям 0.8 кпк и 11 кпк, соответственно.

Но несмотря на то, что полученное значение поверхностной плотности темпов звездообразования в околядерном кольце IC 560 сопоставимо с некоторыми значениями, полученными для (более внешних) колец в пяти других линзовидных галактиках (исследованных в Главе 2), на рисунке 3.14 точка, характеризующая звездообразование в околядерной области IC 560, располагается на периферии облака точек, характеризующих звездообразование в нормальных/иррегулярных галактиках, и гораздо ниже и левее облака точек, характеризующих звездообразование в околядерных кольцах, отмеченных на диаграмме Кенникатта и Эванса [51] бежевым цветом.

Что касается точки, характеризующей звездообразование во внешнем кольце NGC 4513, то она расположилась вне каких-либо облаков точек и демонстрирует очень низкую поверхностную плотность звездообразования ($< 10^{-4} \text{ M}_\odot/(\text{год} \times \text{кпк}^2)$), не характерную никакому типу галактик со звездообразованием (рисунок 3.14). Средний темп звездообразования во внешнем кольце NGC 4513 примерно в 5 раз ниже среднего темпа звездообразования в диске NGC 2697, хотя содержание нейтрального водорода (HI) в NGC 4513 лишь в 2 раза меньше содержания HI в NGC 2697. Причём эллиптичность УФ-кольца, измеренная путём наложения кольцевой эллиптической апертуры, охватывающей видимое внешнее УФ-кольцо галактики (рисунок 3.13, *внизу*), оказалась равной 0.29, т.е. почти совпадает с эллиптичностью звёздного диска, полученной в ходе изофотного анализа (рисунок 3.7, *вверху справа*), а это означает, что газ находится в той же плоскости, что и звёзды родительской галактики (в предположении кругового характера движения), но вращаются они в противоположные стороны.

Принимая во внимание, что вращение газа и в IC 560, и в NGC 4513 происходит в сторону, противоположную вращению их основных (звёздных) дисков, такое пониженное значение поверхностных плотностей темпов звездообразования можно связать именно с иным характером движения газа. А, значит, полученные для IC 560 и NGC 4513 результаты подтверждают и дополняют идею, озвученную в работе Сильченко и др. [54], о влиянии геометрии аккреции газа на протекание процессов звездообразования: да, в случае противоположного вращения газа по отношению к вращению звёзд, происходящего в одной плоскости, звездообразование всё же протекает (как и в галактике NGC 2551 из работы Сильченко и др. [54]), но, как показывают представленные в этой диссертационной работе более детальные исследования, в целом эффективность звездообразования в режиме противовращения ниже, чем в случае со-направленного вращения.

Рассмотрим возможные эволюционные сценарии для NGC 4513. Так, данные SDSS позволяют оценить интегральные звёздные величины кольца в g - и r -полосах (в той же апертуре эллиптического кольца, что и были измерены УФ-потoki): $m_g^{\text{кольцо}} = 15.16^{\text{m}}$ и $m_r^{\text{кольцо}} = 14.61^{\text{m}}$. С учётом расстояния до NGC 4513, равном 33 Мпк, получим абсолютную звёздную величину

кольца: $M_g^{\text{кольцо}} = -17.4^m$. Используя из работы Белла и др. [137] калибровку отношения массы к светимости по показателю цвета, при $(g - r) = 0.55^m$, получаем $M/L_g = 2.14$, и, следовательно, полная звёздная масса кольца составляет $2.26 \times 10^9 M_\odot$. А полученная оценка SFR по потоку в NUV для кольца NGC 4513 составляет $0.026 M_\odot/\text{год}$. Если предположить найденный темп звездообразования постоянным, то для накопления звёздной массы $2.26 \times 10^9 M_\odot$ потребуется времени больше возраста Вселенной. В таком случае, извне был аккрецирован не только газ, но и значительное количество звёзд, т. е. имело место приливное разрушение богатого газом спутника. Если же предположить, что звездообразование падало экспоненциально с временной шкалой 0.6 млрд лет, типичной для звездообразования во внешних кольцах S0-галактик, как было показано в Главе 2 и в работе Прошиной и др. [87], и начиналось примерно 3 млрд лет назад, то к настоящему времени получили бы именно такую звёздную массу кольца. При таком сценарии галактика могла аккрецировать только холодный газ (без звёзд) массой примерно $2.5 \times 10^9 M_\odot$, а, значит, предполагаемый (невидимый) источник встречно вращающегося газа должен быть чрезвычайно обильным. Хотя это могла бы быть и аккреция первичного газа из космологического филамента, поскольку нынешнее отношение массы звёзд к массе газа в кольце, равное примерно 8:1, соответствует продвижению химической эволюции кольца NGC4513 до уровня насыщения, при котором металличность ионизованного газа приближается к солнечному значению, согласно работе Кудрички и др. [128]. Этот (второй) сценарий подразумевает, что звёздное кольцо NGC 4513 может быть следствием длительного процесса звездообразования. Однако на изображении WISE в полосе W4 (22 мкм), представленном на рисунке 3.13 (*внизу справа*), нет никаких признаков пылевого кольца, а пыль является одним из индикаторов звездообразования. К тому же, наличие длиннощелевых спектральных данных, диагностирующее текущее звездообразование только в южной оконечности кольца, позволяет по результатам, представленным в таблице 3.4, восстановить историю звездообразования в этой области кольца на временном промежутке 0 — 200 млн лет назад, как показано на рисунке 3.15, из которого следует, что звездообразование началось менее 10 млн лет назад (конкретно в той области южной части кольца, на которую легла щель во время наблюдений).

Таким образом, наиболее вероятным сценарием приобретения кольца галактикой NGC4513 является приливное разрушение богатого газом спутника. Отношение $\lg M_{\text{HI}}/M_* \geq -0.9$, найденное для внешнего кольца NGC 4513, типично для галактик-спутников в богатых газом разреженных группах, согласно Джуджар и др. [138]. Окружение NGC 4513 соответствует этому сценарию: как указано в таблице 3.1, галактика относительно изолирована, ближайший в настоящее время сосед — карлик PGC2683704 в 30 раз меньший по массе — на расстоянии 270 кпк. Возможно подобный, но более близкий спутник был недавно разрушен галактикой NGC4513 и образовал кольцо радиусом, соответствующим его орбитальному моменту.

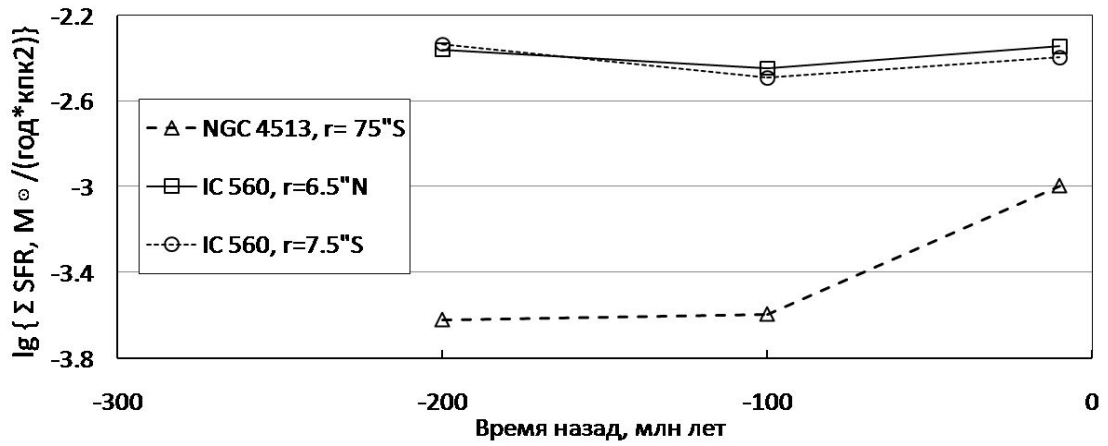


Рисунок 3.15 — Истории недавнего звездообразования в областях текущего звездообразования в галактиках IC 560 и NGC 4513

Стоит отметить, что восстановленная подобным образом история современного звездообразования в южной и северной оконечностях околядерной области в IC 560, показанная на том же рисунке 3.15, демонстрирует почти постоянный темп звездообразования на протяжении прошедших 200 млн лет на обоих оконечностях кольца, которые пересекла щель во время наблюдений.

Таким образом, полученные результаты согласуются с тем, что было подмечено ещё Поджем и Эскриджем в их работе 1993 года [44]: внутренние кольца располагаются вблизи или внутри балджей (как в случае IC 560) и плотно заполнены областями звездообразования (в нашем случае такие области диагностируются в обеих областях пересечения кольца щелью), а внешние кольца, располагающиеся в дисках галактик, клочковаты, т.е. области звездообразования расположены в них разреженно (в NGC 4513 при нашем положении щели только в южной оконечности кольца диагностируется текущее звездообразование).

Кстати, Сарзи и др. в работе [132], посвящённой исследованию звёздного населения в околядерных кольцах посредством различных моделей звёздного населения, предполагают, что звёздное население в околядерных кольцах формируется в течение длительного периода времени, характеризующегося эпизодическими всплесками активности звездообразования.

Для галактики IC 560 нет сведений о содержании ни нейтрального, ни молекулярного газа. IC 560 не является взаимодействующей, находится в разреженной группе NGC 2967 [90] из шести галактик, включая три галактики поздних типов с активным звездообразованием, что указывает на наличие внешних (по отношению к этим галактикам), но пока не обнаруженных источников холодного газа, подпитывающих звездообразование в членах этой группы, включая IC 560.

Глава 4. Молодые звездообразующие комплексы в галактиках раннего типа

Как показал анализ длиннощелевых спектров пяти исследуемых галактик (Глава 2), звездообразование в их кольцевых структурах протекает неоднородно. Для полноты представлений о локализации очагов звездообразования и диагностики газа в них необходимо получение карт (изображений) галактик в узких эмиссионных линиях, что стало доступным с появлением в арсенале российской астрономической наблюдательной науки нового прибора MaNGaL (картировщика в узких эмиссионных линиях) [59], созданного специалистами САО РАН. На данный момент получен и обработан наблюдательный материал для одной галактики из пяти, описанных в Главе 2, — для NGC 4324, и ещё для одной галактики — NGC 5173, которая привлекла моё внимание яркими очагами в УФ-диапазоне, хотя формально эта галактика относится к эллиптическим. При написании данной Главы диссертации использованы следующие публикации, выполненные соискателем Прошиной И.С. в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении учёных степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования: [139] и [140].

4.1 Наблюдения и обработка данных

Наблюдения галактик NGC 5173 и NGC 4324 проводились на 2.5-метровом телескопе Кавказской Горной Обсерватории ГАИШ МГУ с помощью прибора MaNGaL (фотометра с перестраиваемым фильтром) [59], который обеспечивает картирование протяжённых объектов в определённой эмиссионной линии путём настраивания на длину волны этой линии, учитывая красное смещение галактики и поправку за движение Земли. Ширина полосы пропускания фильтра составляет $13 \text{ \AA}$, что позволяет получать отдельные изображения в каждой эмиссионной линии, и, сравнивая потоки в разных эмиссионных линиях, определять механизмы возбуждения газа с помощью различных диагностических диаграмм. Той же ночью снимались фотометрические стандарты для калибровки потоков и изображение галактики в близлежащем континууме (путем перестройки интерферометра, выполняющего роль фильтра, на $30 — 50 \text{ \AA}$ в сторону от длины волны эмиссионной линии) для выделения «чистого» потока в эмиссии путём вычитания континуума из изображения, полученного на длине волны эмиссионной линии. Поле зрения картировщика в фокусе Нэсмита 2.5-метрового телескопа КГО ГАИШ МГУ составляет $\sim 5.6'$. Параметры наблюдений и полученных изображений приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 — Журнал наблюдений галактик с фотометром MaNGaL

Галактика	Эмиссионная линия, на которую центрировался узко- полосный фильтр	Дата наблюдений	Суммарная экспозиция, сек	Биннинг	Масштаб, "/px	Качество изобра- жения (FWHM), уг. сек.
NGC 5173	H α	11 апреля 2018	2100	2 $\times$ 2	0.66	1.3
	[OIII] λ 5007	12 апреля 2018	2100	2 $\times$ 2	0.66	1.2
	континуум	12 апреля 2018	1800	2 $\times$ 2	0.66	1.2
	H α	8 апреля 2021	1500	1 $\times$ 1	0.33	1.9
	[NII] λ 6583	8 апреля 2021	4500	1 $\times$ 1	0.33	1.8
	континуум	8 апреля 2021	600	1 $\times$ 1	0.33	1.9
NGC 4324	H α	17 апреля 2018	1500	2 $\times$ 2	0.66	1.5
	[NII] λ 6583	17 апреля 2018	3000	2 $\times$ 2	0.66	1.5
	континуум	17 апреля 2018	1500	2 $\times$ 2	0.66	1.5

Первичная обработка изображений (вычитание континуума, перевод в энергетические единицы наблюдаемых потоков и т. п.) выполнялись А.В. Моисеевым по методике, изложенной в статье Моисеева и др. [59]. В итоге на полученных картах интенсивности эмиссионных линий (H α , [NII] λ 6583, [OIII] λ 5007) с вычтенным континуумом отчетливо видны компактные области излучения, как будет показано далее (на рисунке 4.1 (*нижний ряд*) и рисунке 4.6 (*верхний ряд*)).

4.2 Молодые звёздные комплексы в эллиптической (?) галактике NGC 5173

Галактика NGC 5173 располагается на расстоянии 38.4 Мпк от нас (согласно Каппеллари и др. [88]), составляет пару вместе со спиральной галактикой позднего типа NGC 5169, расстояние между ними в проекции на небо — около 55 кпк. Обе галактики не выглядят взаимодействующими и входят в состав небольшой разреженной группы, состоящей в основном из дюжины карликовых галактик (по данным базы NED), но ярчайшей галактикой группы является эллиптическая галактика NGC 5198, наблюдаемая в 200 кпк в проекции от NGC 5173.

Сама галактика NGC 5173 в разных каталогах и базах данных, в том числе в NED и LEDA, классифицирована как эллиптическая (E0) и была исследована фотометрически много раз. Так, в рамках обзора S⁴G (Шет и др. [81]), содержащего анализ данных в полосах 3.6 мкм и 4.5 мкм, полученных космическим телескопом *Spitzer*, она была аппроксимирована балджем (по закону Вокулёра) и классифицирована как однокомпонентная эллиптическая (Сало и др. [141]).

Значительно раньше — в 1991 году — Вадер и Вигро [142] сообщили об открытии голубых конденсаций в *эллиптической* галактике NGC 5173, необычно богатой газом. На их взгляд, обнаруженные ими голубые конденсации располагались вдоль двух туго закрученных спиралей, расположенных в диске, смещённом относительно центра галактики.

О наличии в NGC 5173 нейтрального водорода массой $1.25 \times 10^9 M_{\odot}$, собранного в большой регулярно вращающийся диск, сообщалось в 1984 году в работе Кнаппа и Раймонда [143], и, как отметили авторы, NGC 5173 стала десятой крупной эллиптической галактикой, содержащей нейтральный водород. По данным Серра и др. [21] в ней содержится $2.1 \times 10^9 M_{\odot}$ HI. Однако, как показали дальнейшие исследования, этот газ вращается в сторону, противоположную звёздам, что несомненно указывает на внешнее происхождение газа в NGC 5173. Так, Каннаппан и Фабрикант [66] в результате спектроскопии с длинной щелью выявили противоположное по отношению к звёздам вращение ионизованного газа в NGC 5173. Дэвис и др. [52] по результатам панорамной спектроскопии, выполненной в рамках обзора ATLAS^{3D}, уточнили, что разница кинематических позиционных углов составляет $174^{\circ} \pm 18^{\circ}$. Алатало и др. [36] оценили содержание молекулярного водорода $\sim 2.3 \times 10^8 M_{\odot}$ и обнаружили совпадение кинематических больших осей (линий узлов) дисков молекулярного газа и нейтрального водорода, $PA = 100^{\circ}$, а это значит, что наблюдаемый холодный газ в NGC 5173 имеет общее происхождение. Причём линия узлов газового диска совпадает с направлением большой оси изофот, $PA = 100^{\circ} \pm 5^{\circ}$ (согласно Вадер и Вигро [142]), что возможно при расположении и вращении газа в экваториальной плоскости звёздного диска галактики. Отсюда возникает вопрос: является ли NGC 5173 эллиптической галактикой, или же имеет крупномасштабный звёздный диск и потому является линзовидной?

Здесь стоит отметить, что недавно Бута [144] в результате инспекции глубокого многоцветного изображения этой галактики из выборки EFIGI, полученного в обзоре SDSS, классифицировал NGC 5173 как дисковую галактику раннего типа — SA(rs)0/a (pec), опираясь, видимо, на тем самые голубые клочковатые структуры, впервые замеченные ещё Вадером и Вигро [142], и различимые на изображении, взятом из архива SDSS и представленном на рисунке 4.1 (*вверху слева*).

На рисунке 4.2 показаны карты лучевых скоростей ионизованного газа по линии [OIII] λ 5007 (*слева*), звёзд (*посередине*) и дисперсии скоростей звёзд (*справа*), построенные О.К. Сильченко по данным SAURON [43]. На них хорошо видно различие в направлении вращения газа и звёзд; заметно, что газ вращается быстрее, чем звёзды, что согласуется с результатами длиннощелевой спектроскопии, выполненной Каннаппан и Фабрикант [66]; и, следовательно, вращение газа происходит в плоскости, расположенной под некоторым углом к плоскости вращения звёзд, хотя линии узлов газового и звёздного дисков совпадают, как отмечалось выше.

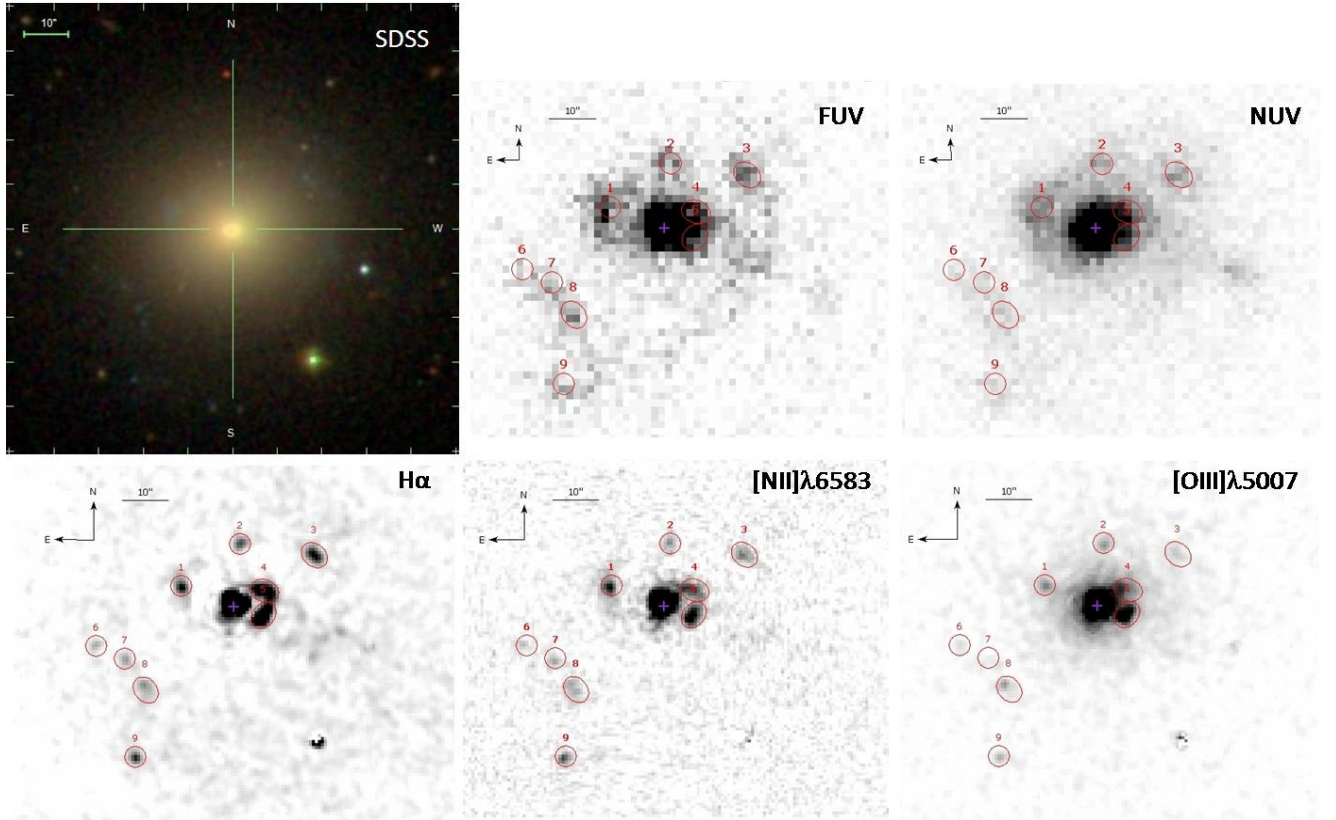


Рисунок 4.1 — Изображения галактики NGC 5173: в комбинированных цветах из архива SDSS (слева *вверху*), в ультрафиолетовых полосах FUV (*вверху посередине*) и NUV (*вверху справа*), в узкополосных фильтрах, центрированных на эмиссионные линии $H\alpha$ (*внизу слева*), $[NII]\lambda 6583$ (*внизу посередине*) и $[OIII]\lambda 5007$ (*внизу справа*)

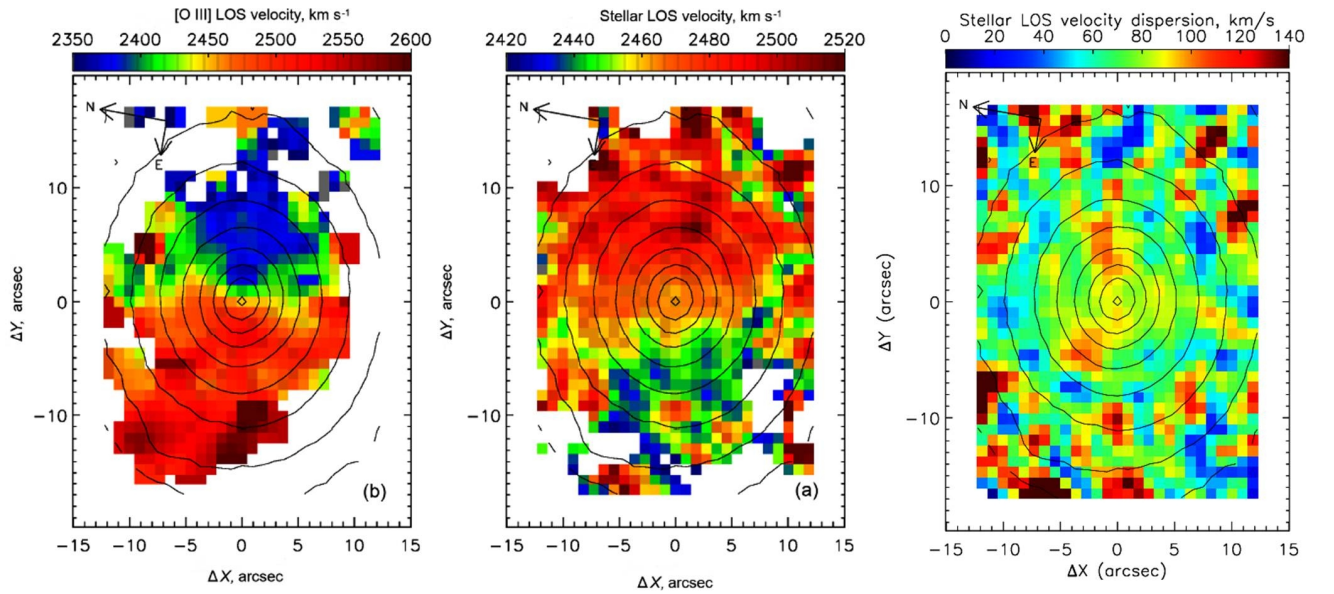


Рисунок 4.2 — Карты лучевых скоростей ионизованного газа по эмиссионной линии $[OIII]\lambda 5007$ (слева), звёзд (посередине) и дисперсии скоростей звёзд (справа) по данным SAURON

Для прояснения вопроса о существовании звёздного диска в галактике NGC 5173 О.К. Сильченко был проведён изофотный анализ двух изображений: изображения из архива SDSS DR9 [56] в r -полосе и изображения в фильтре F702W, полученном космическим телескопом им. Хаббла (HST) в 1998 году в рамках программы Уолтера Яффе по исследованию морфологии центральных областей эллиптических галактик (Рест и др. [145]). Результаты изофотного анализа представлены на рисунке 4.3: *сверху-вниз* показаны радиальные изменения позиционного угла большой оси изофот, их эллиптичности и профиль поверхностной яркости в r -полосе, полученный путём азимутального усреднения в эллипсах с формой, зафиксированной по характеристикам внешних изофот.

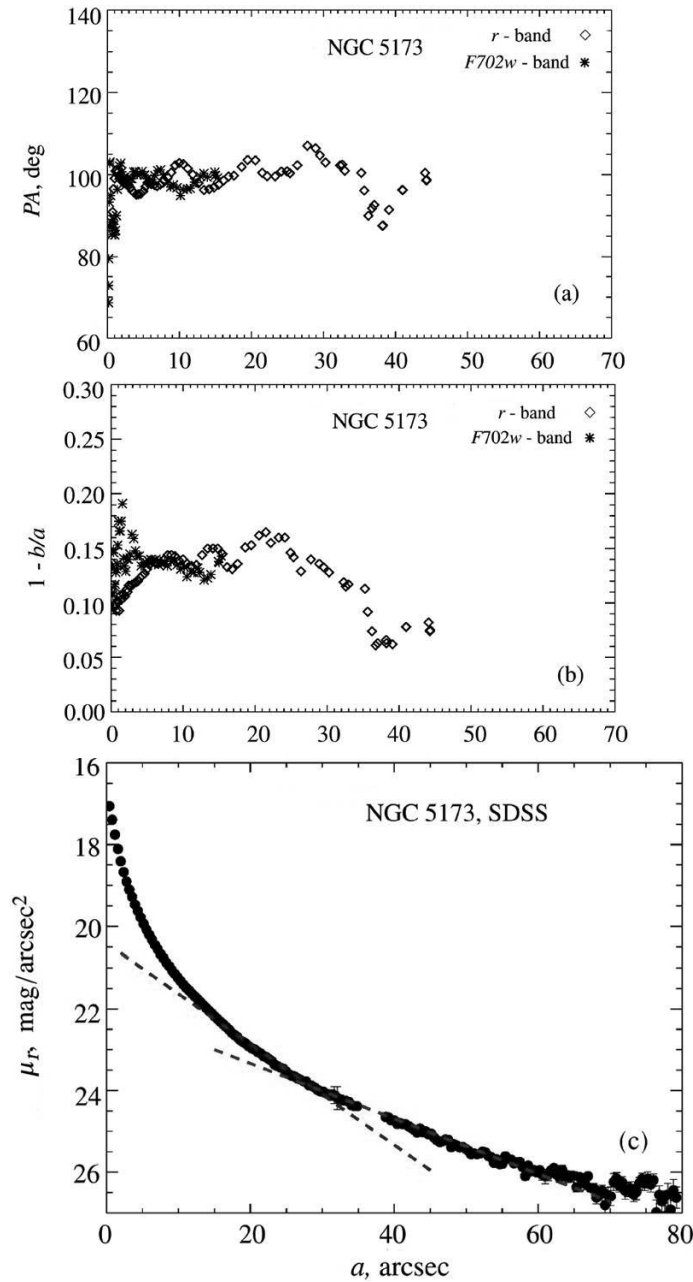


Рисунок 4.3 — Результаты изофотного анализа: радиальные изменения позиционного угла изофот (a), их эллиптичности (b) и поверхностной яркости в r -полосе по данным SDSS (c)

Видно, что наиболее вытянутые изофоты располагаются в центре галактики NGC 5173. Эллиптичность держится примерно постоянной около значения 0.15 до расстояния $|r| = 35''$ (что делает возможным уверенно измерить и позиционный угол большой оси, который примерно постоянен по радиусу и равен $PA = 101^\circ$, что согласуется с данными Вадер и Вигро [142]), а далее эллиптичность падает до 0.05. С расстояния $|r| > 30''$, по мере округления изофот, в поверхностной яркости начинает доминировать экспоненциальный диск с радиальной шкалой $16''$ до расстояния $65''$ от центра. Во внутреннюю часть профиля, в интервале $17'' < |r| < 33''$, тоже можно вписать экспоненту с радиальной шкалой $9''$, но она описывает профиль только на протяжении полутора экспоненциальных масштабов, что считается недостаточным согласно определению Фримана [146]. Таким образом, имеются явные признаки существования протяжённого внешнего звёздного диска, а, значит, NGC 5173 — *линзовидная* галактика.

На рисунке 4.1 (*нижний ряд*) показаны карты интенсивности эмиссионных линий H_α , $[NII]\lambda 6583$, $[OIII]\lambda 5007$ с вычтенным континуумом, на которых отчётливо видимые компактные области пронумерованы. Эти же области выделяются и на ультрафиолетовых картах (показаны на рисунке 4.1, *вверху посередине и справа*), но пространственное разрешение изображений GALEX составляет $\sim 6''$, а разрешение наших узкополосных карт лучше: $\sim 2''$.

В указанных на рисунке 4.1 апертурах были измерены потоки, причём наблюдаемый поток в H_α был поправлен за частичный вклад эмиссии от соседних линий азота по методике, изложенной в работе Моисеева и др. [59]. Затем для каждой области были рассчитаны эквивалентные ширины эмиссионной линии H_α путём деления изображения в «чистой» эмиссии на изображение в соседнем континууме, учитывая вклад подлежащего звёздного компонента галактики, не относящегося к исследуемым областям звездообразования, но попадающего на луч зрения в этих направлениях. Для этого вычислялся азимутально усреднённый профиль поверхностной яркости галактики в континууме: расчёт осуществлялся в две итерации с исключением отскакивающих более чем на 3σ точек для минимизации вклада компактных областей. По полученному профилю строилось двумерное модельное изображение галактики, по нему оценивался вклад подлежащей галактики в апертурах размером $5''$, центрированных на положения исследуемых компактных областей, определённые по карте эмиссии H_α . К тому же, для каждой области были посчитаны поверхностные плотности потока H_α (Σ_{H_α}). Кроме того, по отношению потоков в эмиссионных линиях $[NII]\lambda 6583/H_\alpha$ (поправленное за перекрытие крыльев линий согласно калибровке Моисеева и др. [59]) и $[OIII]\lambda 5007/H_\beta$ (поток в эмиссии H_β был рассчитан путём деления потока в H_α на 2.87, что согласуется как с моделью В возбуждения газа молодыми звёздами [100], так и с моделями Аллена и др. [105] для ударного возбуждения газа) вычислены логарифмы этих отношений. Полученные значения характеристик выделенных на рисунке 4.1 эмиссионных областей приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 — Характеристики эмиссионных областей в галактике NGC 5173

Номер области	Поток в H_α , эрг/(см ² с)	$\Sigma(H_\alpha)$, эрг/(кпк ² с)	EW (H_α), Å	$\lg \{[NII]6583/H_\alpha\}$	$\lg \{[OIII]5007/H_\beta\}$	M_B , mag
1	2.02E-15	7.87E+38	23.6 ± 0.8	-0.17 ± 0.03	0.37 ± 0.02	-12.7
2	1.36E-15	5.92E+38	34.0 ± 1.3	-0.25 ± 0.03	0.42 ± 0.02	-
3	2.87E-15	7.49E+38	37.2 ± 1.3	-0.55 ± 0.03	-0.03 ± 0.01	-11.5
4	5.94E-15	1.58E+39	21.8 ± 0.4	-0.21 ± 0.03	0.33 ± 0.01	-
5	7.85E-15	1.97E+39	49.6 ± 0.8	-0.66 ± 0.02	0.40 ± 0.01	-
6	5.79E-16	2.14E+38	348 ± 36	0.15 ± 0.04	0.21 ± 0.02	-9.6
7	8.02E-16	2.93E+38	33.1 ± 2.2	0 ± 0.02	-0.03 ± 0.02	-10.5
8	1.45E-15	3.61E+38	30.8 ± 1.6	0.17 ± 0.02	0.34 ± 0.01	-10.9
9	1.48E-15	4.87E+38	44.1 ± 3.6	0.03 ± 0.04	0.09 ± 0.02	-

Для определения механизма возбуждения газа существует несколько критериев. Один из них предложен в статье Жанг и др. [147] и связан с поверхностной плотностью эмиссионного потока H_α , при которой излучение газа считается обусловленным излучением молодых звёзд: $\Sigma(H_\alpha) > 10^{39}$ эрг/(кпк² с). Как видно из таблицы 4.2, этому критерию удовлетворяют области с номерами 4 и 5. Другим критерием, который позволяет отделять «чистые» (NII) области звездообразования, где газ ионизован молодыми массивными звёздами, от областей диффузного ионизованного газа (так называемые DIG-области), не связанного локально со звездообразованием, и в возбуждении которого могут доминировать звёзды на поздних стадиях эволюции, является эквивалентная ширина (EW) эмиссии H_α . Причём различными исследователями предлагаются разные пороговые значения. Так, Бинетт и др. [106] и Сид Фернандес и др. [148] предлагают $EW(H_\alpha) \geq 3$ Å для NII-областей; а Ласерда и др. [149] предлагают более жёсткий критерий: $EW(H_\alpha) \geq 14$ Å. Из таблицы 4.2 видно, что все исследуемые области имеют эквивалентные ширины эмиссии H_α более 14 Å, и, следовательно, соответствуют предположению о возбуждении газа светом молодых звёзд.

Кроме того, проверить механизм возбуждения ионизованного газа можно с помощью хорошо известных ВРТ-диаграмм, предложенных Болдуином и др. [99], путём сопоставления отношений потоков $[NII]\lambda 6583/H_\alpha$ и $[OIII]\lambda 5007/H_\beta$, как показано на рисунке 4.4, где штриховой линией обозначена модельная (предельная) кривая для ионизованного газа NII-областей (согласно Кьюли и др. [101]), пунктирной линией обозначена эмпирическая последовательность для ядер галактик, в которых идет активное звездообразование (согласно работе Кауффманн и др. [102]), а ломаными штрих-пунктирными линиями обозначены модели ионизованного газа с плотностью 1 см^{-3} и солнечным химическим составом, возбуждённого ударной волной,

распространяющейся со скоростью в интервале от 200 до 900 км/с (по расчётам Аллена и др. [105]): *справа* — для случая чисто ударного возбуждения, *слева* — для ударного возбуждения с прекурсором.

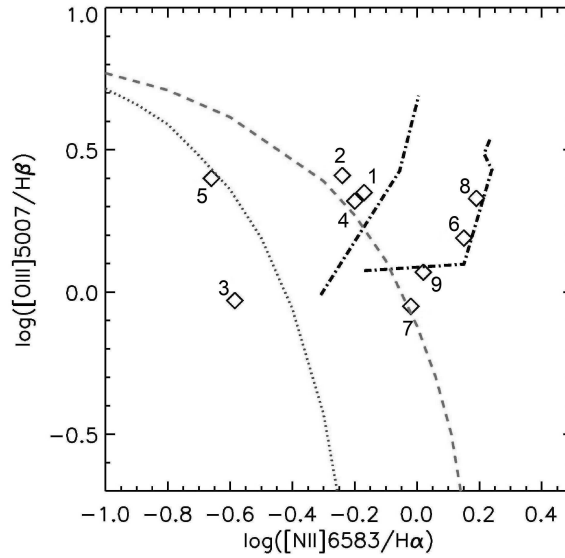


Рисунок 4.4 — BPT-диаграмма для отношений интенсивностей эмиссионных линий в исследуемых областях галактики NGC 5173

Из рисунка 4.4 следует, что, несмотря на большие значения эквивалентных ширин эмиссионных линий $H\alpha$, классическими HII-областями являются только области номер 3 и 5. Остальные эмиссионные области расположились вдоль последовательностей Аллена и др. [105], а, значит, основной вклад в возбуждение газа там вносят ударные волны. При уменьшении металличности последовательности на BPT-диаграмме для газа, возбуждённого ударной волной, сдвинутся влево и совпадут с измерениями для остальных эмиссионных областей в NGC 5173.

Металличность газа можно оценить для HII-областей. Для области № 3 по методу O3N2 в калибровке Марино и др. [112] получается $12 + \lg(O/H) = 8.42 \pm 0.02$, а по калибровке Петтини и Пэйджела [131] $12 + \lg(O/H) = 8.56 \pm 0.02$; для области № 5 по методу N2 в калибровке Марино и др. [112] получается $12 + \lg(O/H) = 8.44 \pm 0.05$, а по калибровке Петтини и Пэйджела [131] $12 + \lg(O/H) = 8.52 \pm 0.01$, т. е. немного ниже солнечного значения (как в очагах звездообразования колец, рассмотренных в Главе 2, таблица 2.3). Такое понижение металличности приведёт к сдвигу расчётных последовательностей ударного возбуждения газа влево на BPT-диаграмме.

Любопытно, что области с газом, возбуждённым ударными волнами без прекурсора, расположились на востоке от центра галактики; на севере и северо-востоке находятся области, в которых газ имеет ударное возбуждение с прекурсором; а в областях на западе от центра наблюдается звездообразование в диффузных областях без возмущения ударной волной.

На изображениях галактики NGC 5173, представленных на рисунке 4.1, заметно различие морфологии эмиссионных областей: некоторые из них компактны (они описывались круглыми апертурами с радиусом $r = 2.3''$), а некоторые — диффузные (для их исследования применялись эллиптические апертуры с полуосями $a = 3.2''$ и $b = 2.4''$, т.е. размер областей равен 1.2×0.9 кпк). А на снимках, полученных космическим телескопом им. Хаббла (HST) с камерой WFPC2 в широком фильтре F702W, взятых из архива HLA¹⁴ и показанных на рисунке 4.5, при масштабе $0.045''/\text{пиксель}$ есть вероятность разрешить эти области звездообразования. Так, области номер 4 и 5 очень протяжённые и распадаются на отдельные яркие звёздные объекты и диффузный газ между ними. В области номер 1 звёздное скопление имеет диаметр ~ 80 пк, а размер звёздной конденсации в области номер 2 менее 40 пк.

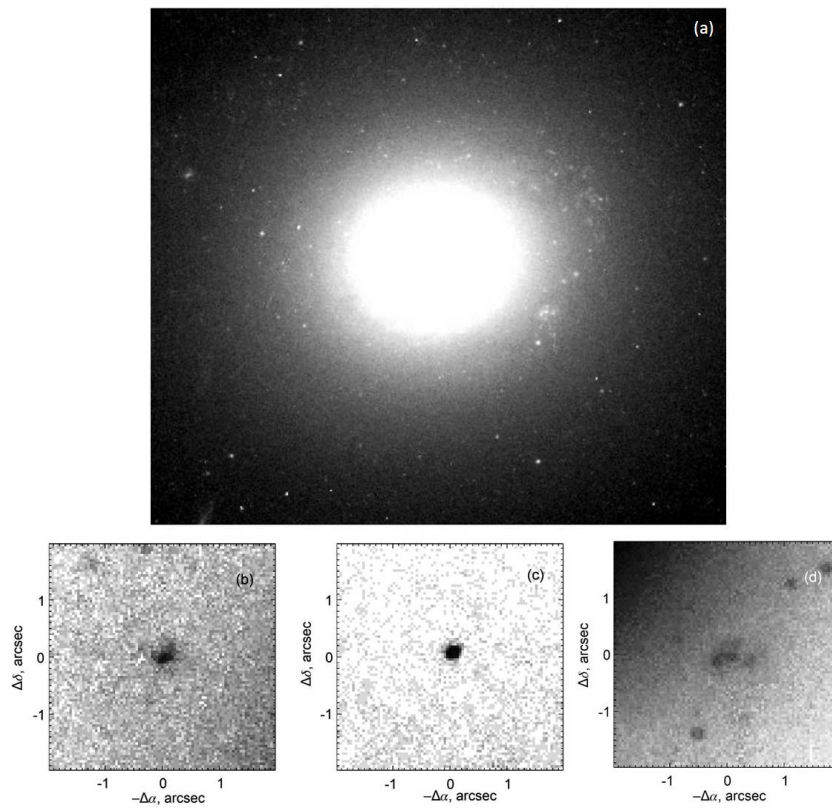


Рисунок 4.5 — Изображение NGC 5173, полученное космическим телескопом им. Хаббла: *вверху* — изображение с полем зрения $20'' \times 18''$; *внизу слева направо* приведены отдельные площадки размером $4'' \times 4''$ вокруг эмиссионных областей номер 1, 2 и 5

В последнем столбце таблицы 4.2 для некоторых эмиссионных областей приведены абсолютные звёздные величины, рассчитанные по данным из работы Вадера и Вигро [142]. Как видно, они находятся в диапазоне от $M_V = -9.6^m$ до $M_V = -12.7^m$, что соответствует массам от $10^4 M_\odot$ до $5 \times 10^5 M_\odot$. С учётом компактных размеров большинства областей это, скорее, молодые шаровые скопления, которые встречаются при слиянии галактик (например, у «Антенн» [150]).

¹⁴ <https://hla.stsci.edu/>

4.3 Регулярно расположенные звездообразующие комплексы в кольце S0-галактики NGC4324

В Главе 2 по результатам спектрофотометрических исследований с длинной щелью отмечалось, что звездообразование в кольцах протекает неоднородно. В частности, в кольце NGC 4324 темпы текущего звездообразования в северо-восточной оконечности в 2 раза выше, чем в юго-западной оконечности кольца. Поэтому для более детального изучения процесса звездообразования в этой галактике с помощью прибора MaNGaL были получены изображения в узких фотометрических полосах, центрированных на эмиссионные линии H_α и $[NII]\lambda 6583$ (подробная информация приведена выше в таблице 4.1). Обработка данных производилась так, как было описано в подразделе 4.1. Полученные карты интенсивности эмиссионных линий H_α и $[NII]\lambda 6583$ с вычтенным континуумом показаны на рисунке 4.6 (*верхний ряд*), на них в области кольца хорошо различимы компактные области излучения. Для удобства исследования эти области были пронумерованы, по карте в линии H_α они были выделены круглыми апертурами (обозначены красным цветом). Внешне эти области достаточно похожи, поэтому использовался один и тот же размер апертур, который был подобран так, чтобы охватить бóльшую часть потока в каждой из них. Это позволило определить *характерный* размер компактных областей излучения, который составил $\sim 4''$ (0.5 кпк).

Эти же апертуры были нанесены и на УФ-изображения в FUV и NUV полосах, также показанных на рисунке 4.6 (*второй ряд сверху*). Но поскольку пространственное разрешение УФ-изображений, полученных космическим телескопом GALEX, составляет $\sim 6''$, т.е. превышает угловые размеры сгустков, то структура кольца осталась неразрешённой на этих снимках. В указанных апертурах измерялись потоки, а затем проводился анализ по методике, описанной выше в подразделе 4.2, а именно: при расчёте эквивалентных ширин учитывался вклад излучения от подстилающего звёздного населения (поскольку кольцо располагается недалеко от балджа галактики), а при расчёте отношения $[NII]\lambda 6583/H_\alpha$ учитывалось перекрытие крыльев линий согласно калибровочному графику из статьи Моисеева и др. [59]. Полученные результаты приведены в таблице 4.3. Для уверенного выявления областей с текущим звездообразованием применялись три критерия, описанные выше в подразделе 4.2. Из-за отсутствия карты потоков в линии $[OIII]\lambda 5007$ использовалось значение $\lg([OIII]\lambda 5007/H_\beta) = 0.10$, полученное для области кольца по результатам анализа длиннощелевого спектра (изложено в Главе 2), и, опираясь на модели Кьюли и др. [103], в качестве порогового принято значение $\lg([NII]\lambda 6583/H_\alpha) = -0.41$, ниже которого можно считать, что газ возбуждён светом молодых звёзд. Из таблицы 4.3 видно, что всем трём критериям удовлетворяют области номер 7, 9, 11, 13, 14, 15, 16 — это NII-области с текущим звездообразованием, и именно для них была вычислена металличность газа по методу N2 (для сравнения в двух калибровках Марино и др. [112] и Петтини и Пейджела [131]).

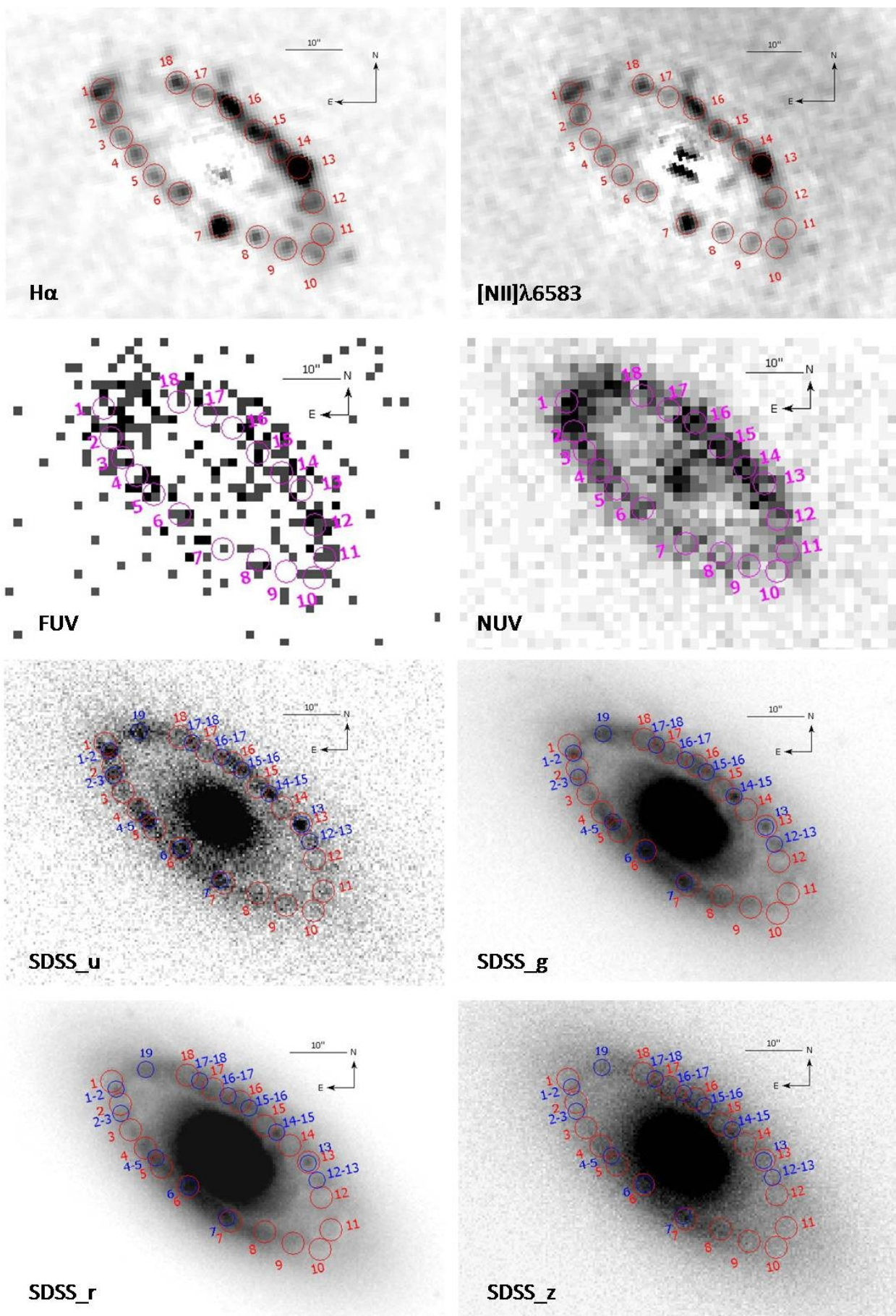


Рисунок 4.6 — Изображение кольца NGC 4324: в эмиссионных линиях H α и [NII] λ 6583 (верхний ряд); в УФ-полосах (второй сверху ряд) и в широких u, g, r, z-полосах SDSS (два нижних ряда)

Таблица 4.3 — Характеристики эмиссионных областей в галактике NGC 4324

Номер области	Поток в H_{α} , эрг/(см ² с)	$\Sigma(H_{\alpha})$, эрг/(кпк ² с)	EW (H_{α}), Å	$\lg \{[NII]6583/H_{\alpha}\}$	Металличность газа 12+lg(O/H)	
					по Петтини и Пейджел [131]	по Марино и др. [112]
1	3.60E-15	1.69E+39	7.87 ± 0.20	-0.30 ± 0.01	-	-
2	2.74E-15	1.32E+39	5.23 ± 0.20	-0.32 ± 0.01	-	-
3	1.94E-15	1.05E+39	2.62 ± 0.20	-0.35 ± 0.01	-	-
4	2.17E-15	1.16E+39	2.08 ± 0.14	-0.31 ± 0.01	-	-
5	1.99E-15	1.09E+39	1.62 ± 0.10	-0.31 ± 0.01	-	-
6	2.66E-15	1.36E+39	1.85 ± 0.11	-0.54 ± 0.01	-	-
7	5.34E-15	2.41E+39	5.13 ± 0.10	-0.49 ± 0.01	8.62 ± 0.06	8.51 ± 0.04
8	1.87E-15	1.00E+39	2.60 ± 0.10	-0.49 ± 0.01	-	-
9	2.20E-15	1.10E+39	5.63 ± 0.15	-0.42 ± 0.01	8.66 ± 0.05	8.55 ± 0.04
10	2.05E-15	0.96E+39	8.82 ± 0.20	-0.32 ± 0.01	-	-
11	2.18E-15	1.04E+39	8.63 ± 0.20	-0.41 ± 0.01	8.67 ± 0.05	8.55 ± 0.04
12	2.99E-15	1.43E+39	7.69 ± 0.20	-0.40 ± 0.01	-	-
13	1.44E-14	5.97E+39	30.6 ± 0.20	-0.54 ± 0.005	8.59 ± 0.05	8.49 ± 0.04
14	4.07E-15	1.91E+39	6.59 ± 0.16	-0.41 ± 0.01	8.67 ± 0.05	8.55 ± 0.04
15	3.94E-15	1.91E+39	4.58 ± 0.10	-0.42 ± 0.01	8.66 ± 0.05	8.55 ± 0.04
16	4.66E-15	2.14E+39	5.93 ± 0.20	-0.43 ± 0.01	8.65 ± 0.05	8.54 ± 0.04
17	1.89E-15	1.05E+39	2.57 ± 0.10	-0.32 ± 0.01	-	-
18	2.58E-15	1.30E+39	3.69 ± 0.15	-0.22 ± 0.01	-	-

На рисунке 4.6 (два ряда снизу) представлены изображения области кольца галактики NGC4324 в u -, g -, r - и z - полосах, взятые из архива SDSS DR9 [56], с нанесёнными на них для сравнения локализациями компактных областей излучения, выделенными по изображению в u -полосе (обозначены синими апертурами) и выделенными по изображению в линии H_{α} (обозначены красными апертурами). Области, видимые в u -полосе, являются, по сути, уже сформировавшимися комплексами звёздных скоплений. Как видно, на изображениях в линии H_{α} и в u -полосе совпали только области номер 6, 7 и 13. Многие звёздные комплексы, чётко выделяющиеся в континууме, расположены в промежутках между яркими H_{α} -областями: например, 1–2, 4–5, 12–13, 14–15, 15–16, 16–17, 17–18; или же на некотором смещении от них, например, звёздный комплекс 2–3. А звёздный комплекс 19, чётко различимый на изображениях

в двух голубых широких полосах u и g , не имеет аналога на узкополосных изображениях в линиях H_α и $[NII]\lambda 6583$.

С целью оценки *характерных* расстояний между компактными областями излучения в линии H_α (красные апертуры) и между молодыми звёздными комплексами, видимыми в u -полосе (синие апертуры), оба этих изображения (полученное с MaNGA-ом и SDSS-изображение в u -полосе) были депроецированы. Сначала исходные изображения были повернуты на угол $90^\circ - PA = 90^\circ - 53^\circ = 37^\circ$, чтобы расположить линию узлов горизонтально, а затем они были растянуты в вертикальном направлении с учётом угла наклона диска ионизованного газа $i = 65^\circ$, полученного в ходе тщательного анализа А.В. Моисеевым двумерного поля скоростей ионизованного газа, наблюденного с интерферометром Фабри-Перо в рамках работы Сильченко и др. [54]. Анализ на радиальном интервале $10'' - 35''$ показал, что газ участвует в круговом вращении в плоскости, наклонённой к лучу зрения под углом $65^\circ \pm 3^\circ$, с линией узлов, ориентированной в проекции на небо под углом $PA = 235^\circ \pm 3^\circ$. Результаты этого анализа — карта наблюдаемых лучевых скоростей ионизованного газа (по линии H_α), карта остаточных скоростей (после вычитания модели кругового вращения газа) и полученная кривая вращения ионизованного газа — показаны на рисунке 4.7. Найденное значение кинематического угла наклона диска ионизованного газа соответствует углу наклона для внутреннего диска галактики $i = 63^\circ$, полученному в процессе изофотного анализа изображения в r -полосе (см. рисунок 2.7; Прошина и др. [87]), что и следовало ожидать при круговом вращении газа в основной плоскости звёздного диска. Поскольку ионизованный газ располагается в той же плоскости, что и звёзды (что подтверждает и согласованная кинематика газа и звёзд, полученная в результате спектроскопических наблюдений с длинной щелью, как показано на рисунке 2.1 и в работе Прошиной и др. [87]), то к обоим депроецируемым изображениям были применены одни и те же углы. На рисунке 4.8 показаны депроецированные изображения галактики NGC 4324 в эмиссионной линии H_α (*вверху слева*) и в u -полосе (*вверху справа*) и измеренные расстояния между центрами соседних компактных областей излучения, выделенных по этим изображениям (*два нижних ряда*). Видно, что исследуемое кольцо ионизованного газа является эллиптическим, что характерно для резонансных колец, часто вытянутых перпендикулярно бару (так называемый тип R1), как замечено в статье Бута [78].

Важно отметить, что на депроецированном H_α -изображении 12 из 18 конденсаций: 1 — 11, 3 — 12, 5 — 13, 6 — 14, 7 — 16, 8 — 18 являются взаимно противоположными — угловое расстояние между ними составляет $180^\circ \pm 2^\circ$ (на рисунке 4.8 они соединены отрезками прямой). Возможно, эта симметрия в локализации областей звездообразования в кольце — попарно через пологорота галактики — выявляет присутствие невидимой бароподобной структуры, которая динамически воздействует на газ в кольце, стимулируя его сжатие и звездообразование в нём.

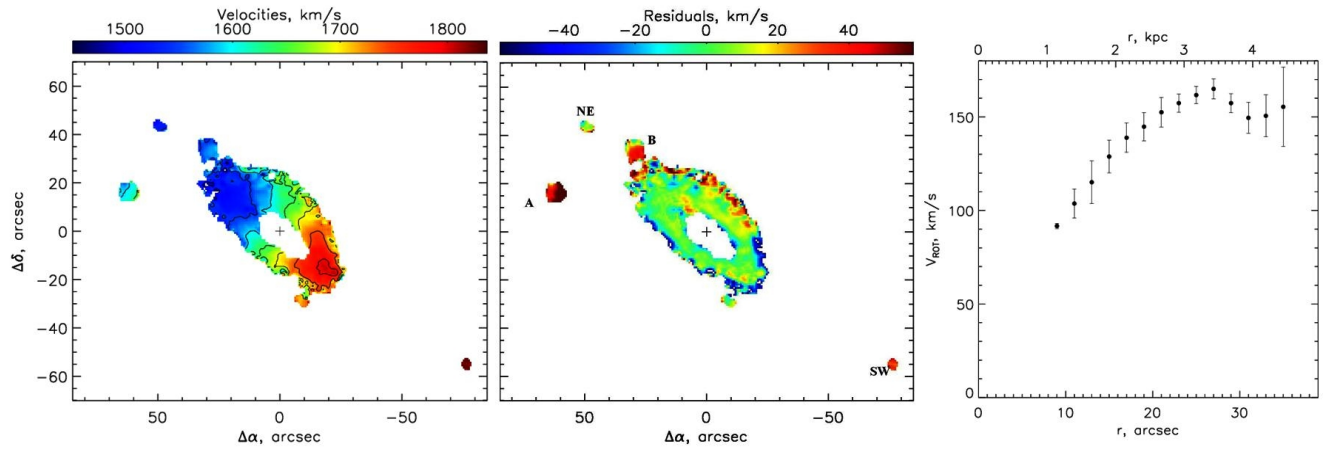


Рисунок 4.7 — Кинематика ионизованного газа по данным панорамной спектроскопии в эмиссионной линии H_{α} : карта наблюдаемых лучевых скоростей (слева), карта остаточных скоростей (посередине) и кривая вращения (справа)

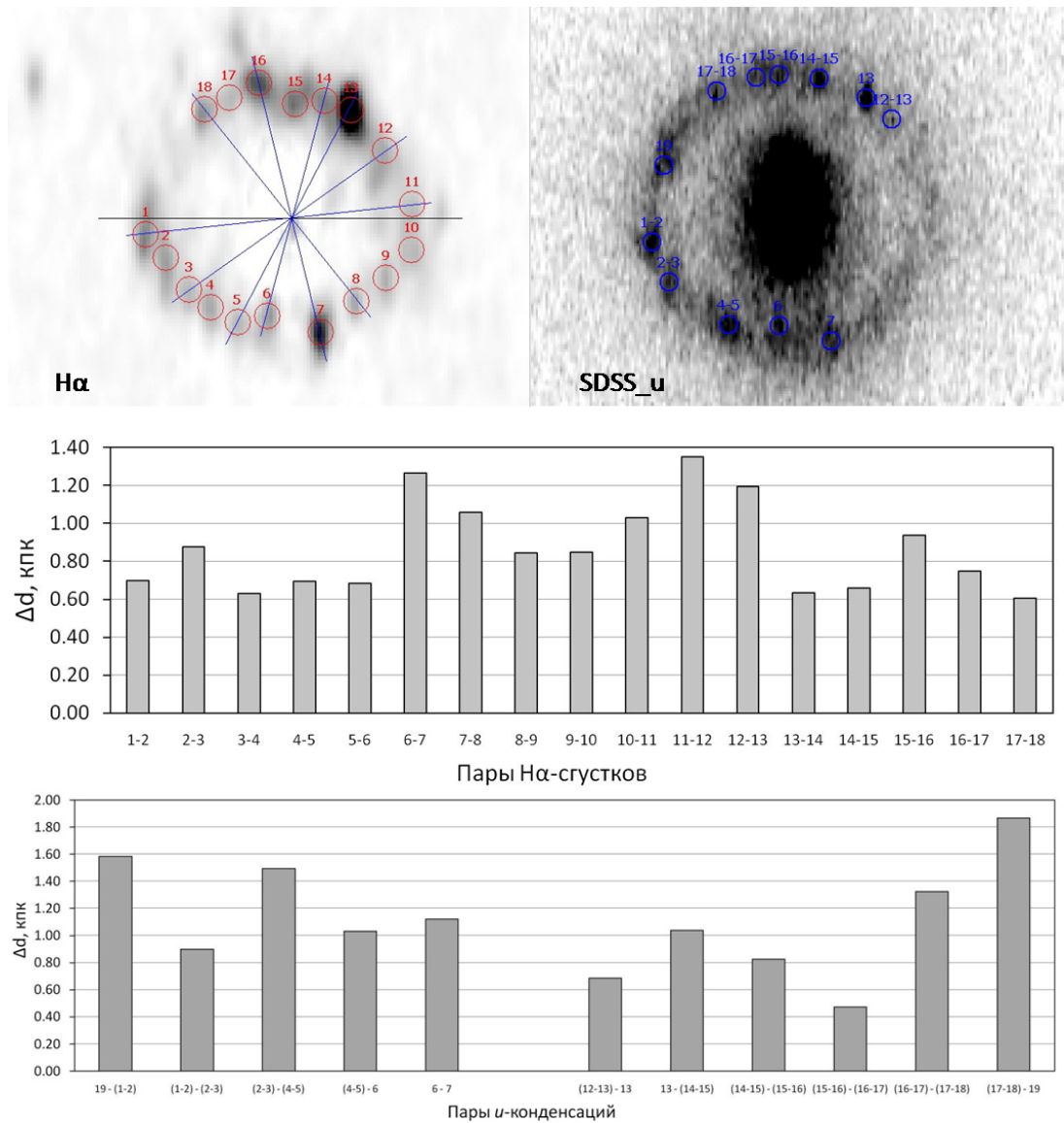


Рисунок 4.8 — Депроецированные изображения кольца (вверху): в эмиссии H_{α} (слева) и в полосе u (справа); расстояния между соседними H_{α} -областями (по центру) и u -конденсациями (внизу)

Из рисунка 4.9, на котором показаны гистограммы распределения числа компактных областей излучения по расстояниям между ними, как для изображения в эмиссионной линии H_α (слева), так и для изображения в u -полосе (справа), видно, что расстояния между H_α -областями группируются к значению 0.65 — 0.7 кпк, а второй намечающийся максимум этой гистограммы возле 1.3 кпк, видимо, соответствует удвоенному характерному расстоянию, или «пропущенной» области; а характерные расстояния между звёздными комплексами, наблюдаемыми в u -полосе, равняются 1.05 и 1.5 кпк, т. е. наблюдается изменение регулярности в расположении «старых» областей звездообразования.

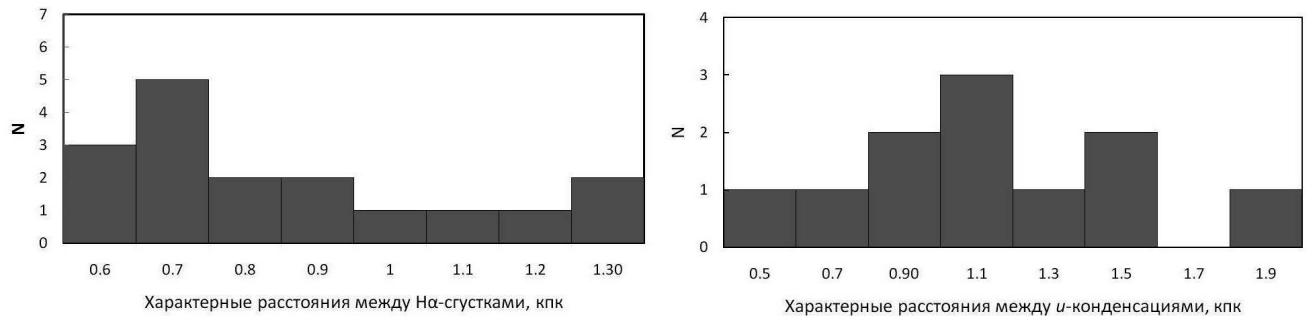


Рисунок 4.9 — Гистограммы распределения расстояний между соседними H_α -областями (слева) и яркими компактными областями, выделенными в u -полосе (справа)

Поскольку характерное расстояние между компактными областями излучения различается для разных длин волн (а «видимость» связана с возрастом этих областей: самые молодые видны в эмиссии H_α , области звёздных комплексов возрастом ~ 200 млн лет — в ультрафиолете, а в u - и g -полосах видны звёздные комплексы возрастом 1 — 2 млрд лет), следовательно, мы наблюдаем распространение звездообразования вдоль кольца, сопровождающееся изменением со временем характерных расстояний между комплексами звездообразования. Всё это указывает на индуцированное звездообразование, возникающее при столкновении стенок гигантских HI-оболочек вокруг молодых звёздных комплексов, которое исследовалось в работах Ефремова и Эльмегрин [151] и Егорова и др. [152].

Регулярное расположение областей звездообразования в галактиках уже отмечалось ранее. Сотникова и Решетников [153] обнаружили его в приливном хвосте взаимодействующих галактик системы NGC 4676. Достаточно часто оно встречается в ветвях спиральных галактик. Так, Ефремов [154] обнаружил цепочку звёздных комплексов размером 0.6 кпк, расположенных вдоль северо-западного рукава Туманности Андромеды с характерным разделением 1.1 кпк, что, по мнению автора, обусловлено кратной регулярностью расположения силовых линий магнитного поля. Гусев и Ефремов [155], исследуя регулярные цепочки звездообразующих комплексов в спиральной галактике NGC 628, выявили характерные расстояния между комплексами, кратные минимальному расстоянию 0.4 кпк. Эльмегрин и др. [156] обнаружили в

запылённой спиральной галактике M100 регулярное расположение инфракрасных сгустков вдоль филаментов с характерным расстоянием 0.41 кпк. Гусев и Шимановская [157] недавно сообщили о подобной регулярности расположения областей звездообразования в резонансном кольце спиральной галактики с баром NGC 6217 с характерным расстоянием между звёздными комплексами 0.7 кпк и отметили, что в кольцевых структурах регулярность расположения областей звездообразования наблюдается впервые. Но результаты нашего исследования структуры внутреннего кольца в галактике NGC 4324 показывают, что тот случай не уникален.

Кольцо в NGC4324 тоже может быть резонансным, хотя на оптических и ультрафиолетовых изображениях галактики крупномасштабного бара не видно. Однако результаты изофотного анализа, представленные в Главе 2 (рисунок 2.7), а именно: резкий разворот позиционного угла большой оси и скачок эллиптичности изофот на радиусе 13" — 15", указывают на присутствие в центре галактики триаксиальной структуры, вытянутой примерно по малой оси изофот. А Комерон и др. [80] в атласе резонансных колец ARRAKIS приводят изображение, оставшееся после вычитания модели галактики, построенной по параметрам, полученным в результате декомпозиции изображения из обзора S⁴G [81], на котором прорисовывается бар, хотя в самом каталоге из выделенных особенностей указано только кольцо. К тому же, в базе данных HyperLEDA также отмечается наличие бара в этой галактике.

Поскольку проведённое выше изучение компактных эмиссионных областей (рисунок 4.6), расположенных во внутреннем кольце NGC 4324, определённо диагностирует текущее или недавно прошедшее звездообразование в них (таблица 4.3), и характерное расстояние между центрами очагов звездообразования составляет ~ 0.67 кпк, то это расстояние можно отождествить с масштабом неоднородностей, возникающих при развитии гравитационной неустойчивости, ведущей к звездообразованию. И тогда можно оценить значение критической поверхностной плотности газа и сопоставить её с наблюдаемой величиной.

Согласно теоретическим расчётам [158], неустойчивыми являются возмущения с длинами волн

$$\lambda_{\text{крит}} = \frac{2\pi^2 G \Sigma_{\text{газ}}}{\kappa^2}, \quad (4.1)$$

где κ — эциклическая частота. Из графика кривой вращения ионизованного газа (рисунок 4.7, *справа*) следует, что вращение происходит почти твердотельно до внешнего края кольца, до 27". Тогда в предположении о твердотельном вращении в области кольца ($r = 23''$ или 2.9 кпк) получаем $\kappa \approx V_{\text{rot}}/r \approx 1.7 \times 10^{-15} \text{ с}^{-1}$. Из формулы (4.1), принимая $\lambda_{\text{крит}} = 0.67$ кпк, получаем $\Sigma_{\text{газ}}^{\text{крит}} \approx 22 \text{ М}_\odot/\text{пк}^2$.

Для вычисления наблюдаемой поверхностной плотности газа в кольце используем имеющуюся в литературе информацию о содержании газа в исследуемой галактике NGC 4324,

тем более что эта галактика изучалась в рамках проекта ATLAS^{3D}[88]. Так, в работе Янг и др. [34] дана оценка массы молекулярного водорода: $\lg M_{H_2} = 7.69 \pm 0.05$. В работе Алатало и др. [36] приведены карты распределения СО-эмиссии и кинематики, согласно которым молекулярный водород сосредоточен в кольце, совпадающем по морфологии и кинематике с кольцом, видимым в оптическом диапазоне, и кольцом ионизованного газа. Масса молекулярного водорода, по оценке Алатало и др. [36], составляет $\lg M_{H_2} = 7.97 \pm 0.02$. В работах Дэвиса и др. [52, 159] и Крайновича и др. [160] приводятся оценённые подгонкой наклонных колец к кубу данных, полученных интерферометрией, значения угла наклона $i = 62^\circ \pm 1^\circ$ и значения кинематических позиционных углов линии узлов звёздного диска $\varphi_{\text{star}} = 238^\circ \pm 1^\circ$, молекулярного $\varphi_{\text{mol}} = 232.0^\circ \pm 1.8^\circ$ и ионизованного газа $\varphi_{\text{ion}} = 239.0^\circ \pm 6.8^\circ$, почти совпадающие значения которых говорят о совпадении в окрестностях кольца морфологии и кинематики молекулярного и ионизованного газа и звёздного диска. А в статье Дэвиса и др. [35] приведён нормализованный профиль поверхностной яркости СО-эмиссии в кольце молекулярного газа, демонстрирующий максимум на радиусе $20''$, т. е. почти на радиусе звёздного кольца (с учётом низкого пространственного разрешения СО-наблюдений).

Что касается массы нейтрального водорода, то наиболее ранние оценки, приведённые в работах Крама и Солпитера [6] и Джованарди и др. [161], равны $6 \times 10^8 M_\odot$ и $5.1 \times 10^8 M_\odot$, соответственно. По данным Кортеше и Хьюис [89], содержание нейтрального водорода в галактике NGC 4324 составляет $6.76 \times 10^8 M_\odot$. О распределении нейтрального водорода в галактике информации мало. Так, Дюпри и Шнайдер [18] сообщают о детектировании нейтрального водорода на расстояниях до двух оптических радиусов, следовательно, он распределён по диску, а не сосредоточен в кольце, что находится в согласии с картой «положение — скорость» из работы Хофмана и др. [162].

Принимая, согласно Алатало и др. [36], что радиальная протяжённость кольца составляет $\sim 10''$ и $\lg M_{H_2} = 7.97 \pm 0.02$, вычисляем поверхностную плотность молекулярного газа в кольце:

$$\Sigma_{\text{газ}}^{\text{набл}} = \frac{M_{H_2}}{\pi(R^2 - r^2)} \approx 4.3 \frac{M_\odot}{\text{пк}^2}$$

Так как вычисленное значение наблюдаемой поверхностной плотности газа меньше, чем рассчитанное выше критическое значение, а звездообразование в кольце мы всё же наблюдаем, то, значит, во-первых, в кольце помимо молекулярного газа есть нейтральный водород, который не был учтён при расчёте из-за отсутствия информации о его количественном содержании именно в кольце, и, во-вторых, действуют дополнительные факторы, ведущие к гравитационной неустойчивости и инициированию звездообразования. Об определяющей роли локальных эффектов (возможно, кинематических) над крупномасштабной стабильностью в протекании звездообразования в S0-галактиках писали Подж и Эскридж в своей работе 1993 года [44].

Одним из таких дополнительных факторов может быть так называемая *обратная связь* (feedback), когда расширяющиеся от областей звездообразования гигантские газовые оболочки поджимают окружающий газ [152]. Ещё одним возможным фактором, стимулирующим создание очагов звездообразования в кольце, является та самая предполагаемая бароподобная (триаксиальная) структура, невидимая на изображениях, но проявляющая себя в симметричном (взаимно противоположном) расположении эмиссионных областей, о которой уже говорилось выше. На графике, демонстрирующем распределение отношения потоков в эмиссионных линиях $[\text{NII}]\lambda 6583$ и H_α в компактных областях, расположенных по азимуту вдоль кольца, показанном на рисунке 4.10, есть любопытная особенность: эмиссионные области, в которых газ возбуждён светом молодых звёзд (нижняя часть графика, отделённая горизонтальной штриховой линией), по своей азимутальной позиции в кольце близки к концам предполагаемой триаксиальной структуры (обозначенным вертикальными штриховыми линиями).

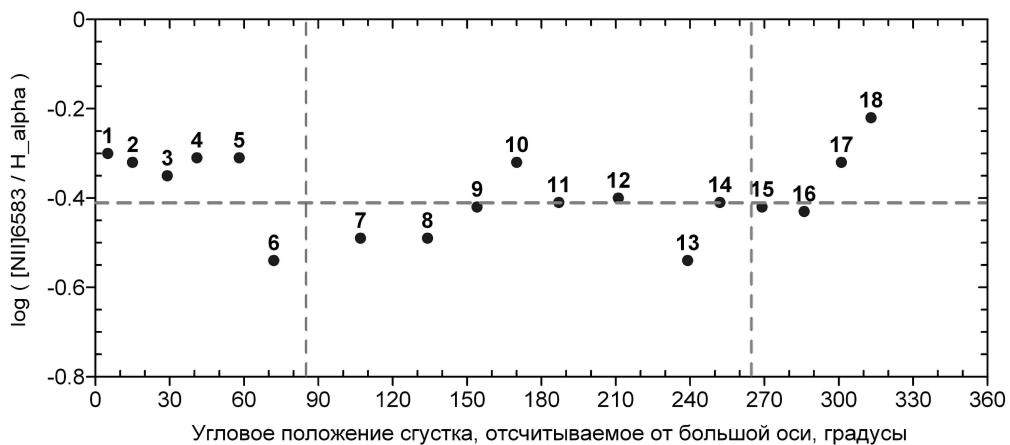


Рисунок 4.10 — Распределение отношения потоков $[\text{NII}]\lambda 6583/\text{H}_\alpha$ по азимуту вдоль кольца

Такая конфигурация может быть ассоциирована с так называемыми *анзаэ* (ansae) — областями повышенной яркости на концах бара. Мартинес-Вальпуэста и др. [163] отмечают, что в анзаэ редко детектируется текущее звездообразование, но в рассмотренной ими галактике NGC 4151, в которой нет бара (как и у NGC 4324), но есть овальная структура в центре, анзаэ демонстрируют голубой цвет и H_α -эмиссию.

Здесь стоит упомянуть, что ещё Марино и др. [47] сообщали о том, что в исследуемых ими галактиках голубые звёздообразующие кольца располагаются на концах баров. О «невидимых» барах писали Салим и Рич в своём исследовании [48], заключая, что если все кольцевые структуры в галактиках их выборки являются резонансными, то бары, которые, как считается, их вызывают, должны быть более распространены, чем это наблюдается в S0-галактиках. Гроучи и др. [45] пришли к выводу, что свойства звездообразования во внутренних кольцах, за исключением распределения HII-областей, не зависят от формы колец и силы бара, причём в случае отсутствия бара ими рассматривался не-осесимметричный гравитационный потенциал.

Уиклинд и Хенкель в своей работе [26] отмечали, что молекулярные кольца располагаются на галактоцентрическом расстоянии, соответствующем точке поворота кривой вращения (это наблюдается и в галактике NGC 4324 — см. рисунок 4.7, *справа*). Теоретическое обоснование этого явления дано в работе Леша и др. [164]; по их расчётам во всех галактиках раннего типа за 10 оборотов галактики (~ 3 млрд лет) в кольцевой области возле точки поворота кривой вращения аккумулируется $\sim 10^8 M_{\odot}$ молекулярного газа только за счёт вязкого переноса (без учёта волн плотности и активности ядер галактик). А Сильченко и Липунов [165] рассчитали несколько моделей для формирования молекулярного кольца в диске Галактики, рассматривая его состоящим из молекулярных облаков, учитывая вязкость и динамическое трение и варьируя дисперсию скоростей, кривую вращения и начальное распределение плотности облаков в диске.

По SDSS-изображениям в u - и g -полосах была произведена оценка массы молодых звёздных комплексов, выделенных синим цветом на рисунке 4.6, используя калибровочное уравнение и коэффициенты к нему из работы Белла и др. [137]. Для этого в синих апертурах были измерены потоки в u - и g -полосах, затем они были переведены в звёздные величины, скорректированы за поглощение в нашей Галактике, используя величины поглощений, указанные в базе данных NED для фотометрических полос системы SDSS: $A_u = 0.102$, $A_g = 0.08$. При апертурной фотометрии областей звездообразования учитывался вклад подстилающего звёздного диска, поскольку кольцо является внутренним. Например, для области номер 13, являющейся наиболее молодой, компактной и яркой, показатель цвета ($u - g$) = 0.19^m. Затем по таблице 7 из статьи Белла и др. [137] определяются коэффициенты для уравнения, из которого следует, что отношение $M/L_g = 0.75$, и масса этого молодого звёздного комплекса равна $7 \times 10^6 M_{\odot}$. Звёздная масса других ярких компактных областей — номер 7, 1–2, 14–15 — также $\sim 10^7 M_{\odot}$. Полученное значение массы звёздных комплексов согласуется с их размером (~ 0.5 кпк) в рамках рассмотрения гравитационной неустойчивости газа, согласно Кови [166].

4.4 Выводы по Главе 4: сравнение темпов звездообразования и размеров газо-звёздных комплексов

Наличие карт интенсивности в эмиссионной линии H_{α} и ультрафиолетовых изображений в FUV и NUV диапазонах позволило оценить темпы звездообразования по трём индикаторам на разных временных шкалах — от 1 до 200 млн лет — по методике, изложенной в подразделе 2.5 Главы 2, для каждой отдельно взятой области звездообразования, исследованной выше. Перечень доступных в открытом архиве Б.А. Микульски для космических телескопов (MAST) УФ-изображений GALEX для NGC 4324 был приведён выше в таблице 2.4, а для галактики NGC 5173 приводится ниже в таблице 4.4. Также использовались изображения галактик в

инфракрасной полосе WISE W4 (22 мкм) для учёта пыли в каждой исследуемой эмиссионной области, и учитывалось поглощение в нашей Галактике: $A_{\text{В}}^{\text{Г}} = 0.087^{\text{м}}$ (в направлении NGC 4324), $A_{\text{В}}^{\text{Г}} = 0.099^{\text{м}}$ — в направлении NGC 5173 (по данным базы NED).

Таблица 4.4 — Перечень УФ-наблюдений галактики NGC 5173 телескопом *GALEX*

Полоса	Идентификатор программы	Дата наблюдений	Экспозиция, сек
FUV	AIS 104 0001 sg88	26 марта 2004	94.35
NUV	AIS 104 0001 sg88	26 марта 2004	94.35
FUV	NGA M51	19 июня 2003	2511.3
NUV	NGA M51	19 июня 2003	2511.3
FUV	GI1 109007 NGC5198	28 февраля 2006	1677.05
NUV	GI1 109007 NGC5198	28 февраля 2006	1677.05

На указанные изображения накладывались апертуры (как показано на рисунках 4.1 и 4.6), в них измерялись потоки и вычислялись темпы звездообразования. Поскольку для обеих галактик имеется по 2 — 3 изображения в FUV и NUV-диапазонах, как видно из таблиц 2.4 и 4.4, то это позволило вычислить средние значения и оценить погрешности полученных величин темпов звездообразования. Полученные поверхностные плотности темпов звездообразования в эмиссионных областях галактики NGC 5173 даны в таблице 4.5, а в очагах звездообразования, расположенных в кольце галактики NGC 4324, — в таблице 4.6. Относительные погрешности поверхностных плотностей (Σ_{SFR}) темпов звездообразования для галактики NGC 5173 находятся в диапазоне 2.3% — 12.5%; а для галактики NGC 4324 — в диапазоне 1% — 33%.

Таблица 4.5 — Поверхностные плотности темпов звездообразования в эмиссионных областях галактики NGC 5173

Номер области	$\Sigma(\text{SFR}_{\text{H}\alpha})$, $\text{М}_{\odot}/(\text{год} \times \text{кпк}^2)$	$\Sigma(\text{SFR}_{\text{FUV}})$, $\text{М}_{\odot}/(\text{год} \times \text{кпк}^2)$	$\Sigma(\text{SFR}_{\text{NUV}})$, $\text{М}_{\odot}/(\text{год} \times \text{кпк}^2)$
1	0.0042	0.0043	0.0044
2	0.0031	0.0029	0.0032
3	0.0030	0.0027	0.0026
4	0.0064	0.0058	0.0068
5	0.0080	0.0057	0.0074
6	0.0011	0.0008	0.0008
7	0.0016	0.0012	0.0012
8	0.0015	0.0014	0.0013
9	0.0026	0.0011	0.0010

Таблица 4.6 — Поверхностные плотности темпов звездообразования в очагах звездообразования, расположенных вдоль кольца галактики NGC 4324

Номер области	$\Sigma(\text{SFR}_{\text{H}\alpha}),$ $\text{M}_{\odot}/(\text{год} \times \text{кпк}^2)$	$\Sigma(\text{SFR}_{\text{FUV}}),$ $\text{M}_{\odot}/(\text{год} \times \text{кпк}^2)$	$\Sigma(\text{SFR}_{\text{NUV}}),$ $\text{M}_{\odot}/(\text{год} \times \text{кпк}^2)$
1	0.0091	0.0044	0.0093
2	0.0071	0.0070	0.0090
3	0.0057	0.0067	0.0077
4	0.0062	0.0067	0.0077
5	0.0058	0.0075	0.0070
6	0.0073	0.0067	0.0070
7	0.0129	0.0034	0.0057
8	0.0054	0.0055	0.0053
9	0.0059	0.0043	0.0043
10	0.0052	0.0041	0.0037
11	0.0056	0.0049	0.0050
12	0.0077	0.0074	0.0067
13	0.0321	0.0044	0.0083
14	0.0103	0.0070	0.0093
15	0.0103	0.0080	0.0093
16	0.0115	0.0044	0.0090
17	0.0056	0.0044	0.0073
18	0.0070	0.0040	0.0070

На рисунке 4.11 приведены два графика, демонстрирующие изменение металличности газа от одной области звездообразования в кольце NGC 4324 к другой в зависимости от темпов звездообразования, рассчитанных по потоку в эмиссии $\text{H}\alpha$ (*слева*) и по потоку в NUV (*справа*). Видно, что зависимость носит обратный характер для темпов *текущего* звездообразования выше $10^{-2} \text{ M}_{\odot}/(\text{год} \times \text{кпк}^2)$ (рисунок 4.11, *слева*). При осреднении темпов звездообразования на интервале сотен млн лет, используя ультрафиолетовый индикатор NUV, для тех же областей звездообразования никакой зависимости нет. Это можно объяснить короткой длительностью локальных вспышек звездообразования: по мере продвижения химической эволюции в очаге звездообразования газ локально исчерпывается, а металличность газа выходит на насыщение вблизи солнечного значения, когда локально плотность молодого звёздного населения начинает

превышать плотность газа, как показано в работе Аскасибара и др. [167]. Однако, как видно на рисунке 4.11 (*слева*), области с низким темпом звездообразования не ложатся на продолжение обратной зависимости. Вероятно, по той причине, что эти области были отнесены к звездообразующим формально, так как значение поверхностной плотности H_α -потока в них лишь немногим превышает критическое значение 10^{39} эрг/(кпк² с), предложенное Жангом и др. [147], и, значит, в этих областях преобладает диффузный ионизованный газ.

На рисунке 4.12 показаны графики изменения логарифмов плотностей темпов звездообразования, рассчитанных по трём индикаторам, для эмиссионных областей в NGC5173 (*вверху*), и для очагов звездообразования, расположенных вдоль кольца NGC 4324 (*внизу*).

Как видно из таблицы 4.5 и из рисунка 4.12 (*вверху*), для большинства эмиссионных областей в NGC 5173 оценки темпов звездообразования по индикатору «короткой временной шкалы» (по потоку в H_α) и «длинной временной шкалы» (по потоку в ультрафиолете) совпадают, что говорит о длительном процессе формирования молодых звёздных скоплений в течение сотни млн лет. Однако есть и очень молодая область звездообразования — область 9, где звездообразование, вероятно, началось менее 10 млн лет назад. Кальцетти [168] рекомендует использовать множители для УФ-индикаторов звездообразования в случае, если вспышки звездообразования начались недавно: множитель 1.42 для вспышки возрастом 10 млн лет и множитель 3.45 для вспышки возрастом 2 млн лет. В области номер 9 оценки темпов звездообразования по H_α и ультрафиолету различаются в 2.5 раза, значит, звездообразование началось примерно 6 млн лет назад.

На графике для NGC 4324 (рисунок 4.12, *внизу*) заметна особенность: там, где сейчас по потоку в эмиссионной линии H_α диагностируется интенсивное звездообразование (области 7 и 13), наблюдается пониженное значение поверхностной плотности темпа звездообразования, вычисленное по потоку в FUV-диапазоне. Согласно Кальцетти [168], такое поведение характерно для более короткой временной шкалы, когда звездообразование длится на данный момент не более 2 млн лет. Значит, вспышки в этих очагах начались недавно (менее 10 млн лет); а звёзды, которые могли сформироваться в процессе предыдущей вспышки (около 200 млн лет назад) либо уже взорвались, либо их максимум светимости сместился в NUV, что привело к наблюдаемому провалу в FUV (области 7, 13, 16, 18, 1). Причём кривая, соответствующая изменению темпов звездообразования, вычисленных по потоку в NUV, почти горизонтальна, а, значит, средний темп звездообразования по кольцу лучше определять именно по данным NUV. Резюмируя, можно предположить, что звездообразование шло сначала в областях 2–3–4; затем 5–6, 14–15, 8–12. Потом в областях 16–17–18–1, далее в областях 7 и 13, где вспышки начались совсем недавно (вероятно, повторно, спустя пару сотен млн лет после предыдущих).

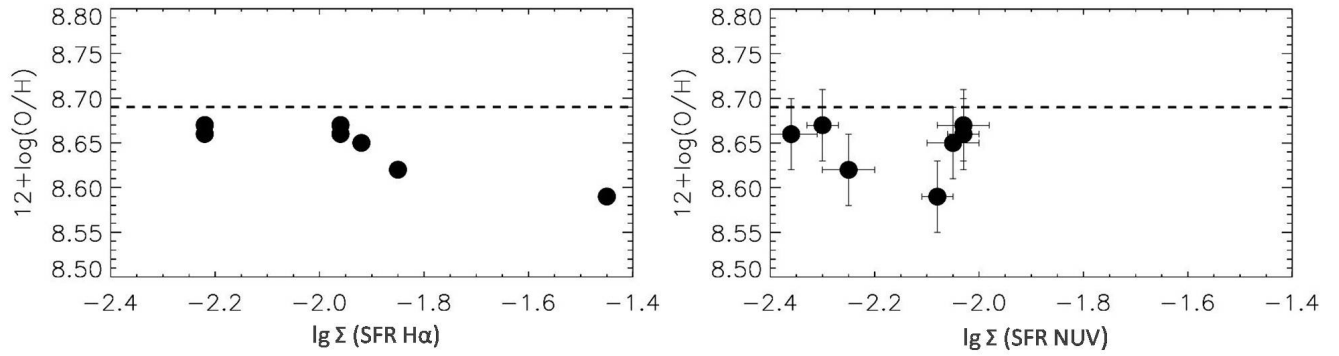


Рисунок 4.11 — Изменение обилия кислорода в газе эмиссионных областей (в кольце NGC4324) с локальными темпами звездообразования, оценёнными по потоку в $H\alpha$ (слева) и по потоку в NUV (справа). Горизонтальной штриховой линией отмечена солнечная металличность.

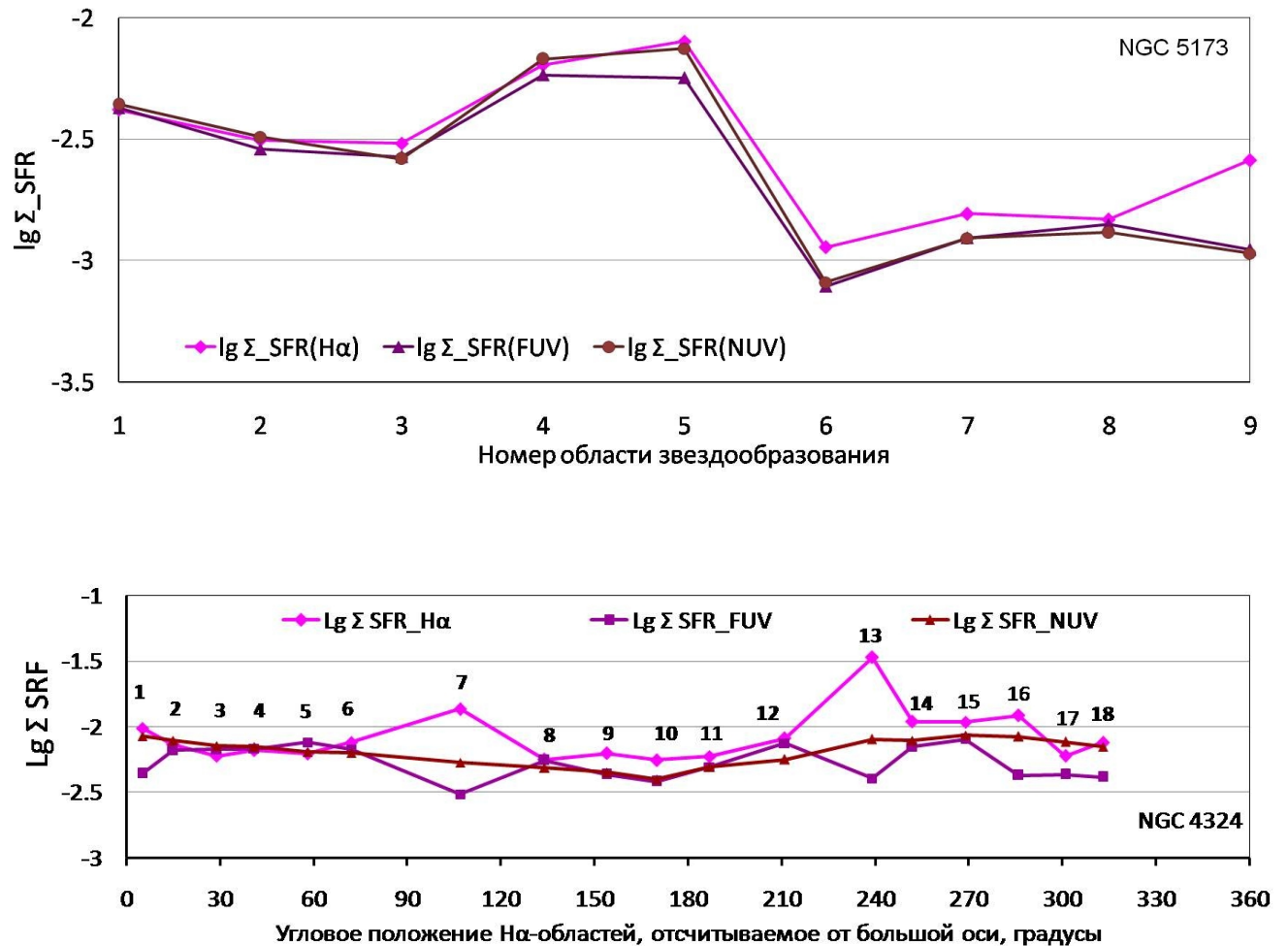


Рисунок 4.12 — Изменение поверхностных плотностей темпов звездообразования в эмиссионных областях в NGC 5173 (вверху) и в очагах звездообразования, расположенных вдоль кольца NGC 4324 (внизу)

Из рисунка 4.12 хорошо видно, что в целом средние поверхностные плотности темпов звездообразования в эмиссионных областях в NGC 5173 (*вверху*) примерно в 3 раза ниже, чем в очагах звездообразования, расположенных вдоль кольца NGC 4324 (*внизу*). Вероятно, это обусловлено тем, что газ в NGC 5173 вращается в направлении, противоположном вращению звёзд, и, предположительно, наклонён к звёздному диску; а в NGC 4324 газ лежит в плоскости звёздного диска и вращается в одном направлении с ним.

Внешнее происхождение газа в NGC 5173 очевидно: кинематика газа и масса нейтрального водорода свидетельствуют в пользу недавнего поглощения очень богатого газом спутника и сочетаются с наблюдаемыми свойствами текущего звездообразования (возбуждение и поджатие газа ударными волнами), что, вероятно, связано именно с наклонным направлением прихода газа в галактику. Хотя на глобальных масштабах развитие ударных волн подавляет звездообразование, но локально они приводят к формированию компактных очагов звездообразования, что и наблюдается в NGC 5173.

Вопрос о происхождении газа в NGC 4324 является более сложным, поскольку, с одной стороны, согласованная кинематика звёздной и газовой компонент не исключает внутреннее происхождение газа, связанное с эволюцией звёзд; к тому же, в работе Моралеса и др. [169], посвященной поиску приливных признаков у близких галактик, отмечается, что у галактики NGC 4324 нет таких признаков. Но, с другой стороны, есть такой вариант внешней аккреции, как *малые слияния*. Причём, если богатые газом спутники NGC 4324 имели со-направленный с её вращением орбитальный момент и их падение происходило в плоскости звёздного диска NGC 4324, то это могло привести к накоплению газа в диске исследуемой галактики и без каких-либо видимых признаков взаимодействия. Аргументом в пользу аккреции карликовых богатых газом спутников либо гигантских облаков газа являются карты лучевых и остаточных скоростей газа в линии H_{α} , полученные методом панорамной спектроскопии в рамках работы Сильченко и др. [54] и представленные выше на рисунке 4.7, на которых видны компактные НII-области (обозначены латинскими буквами), расположенные на удалении от кольца и вращающиеся в той же плоскости и со скоростями, примерно соответствующими вращению галактики на этих радиусах. И в полученном нами спектре с длинной щелью наблюдаются всплески эмиссии в линиях H_{α} и [NII] на больших расстояниях от центра галактики, до 12 кпк, причём скорости газа лежат на «плато» (рисунок 2.1, *в нижнем ряду посередине*), т.е. совпадают со скоростью основного диска галактики. Хотя, как следует из рисунка 4.7 (*посередине*), для трёх из четырёх внешних НII-областей есть отклонения (до 60 км/с) от модели кругового вращения плоского диска, что, вероятно, указывает на некоторый наклон внешних орбит газовых облаков, связанный с захватом вещества из плоскости, не совсем точно компланарной звёздному диску. Вычисленные характеристики газа в этих облаках приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 — Характеристики эмиссионных облаков вокруг галактики NGC 4324

Облако	Диаметр, уг. сек.	Поток в H_{α} , эрг/(см ² с)	$\lg\{[NII]6583/H_{\alpha}\}$	$12+\lg(O/H)$	$\Sigma_{SFR_{H\alpha}}$	$\Sigma_{SFR_{FUV}}$	$\Sigma_{SFR_{NUV}}$
					$M_{\odot}/(\text{год} \times \text{кпк}^2)$		
A	7.76	4.79E+38	-0.74 ± 0.01	8.44 ± 0.04	0.00134	0	0.00021
B	7.76	5.15E+38	-0.30 ± 0.01	8.66 ± 0.06	0.00144	0.00131	0.00090
NE	6.0	1.15E+38	-	-	0.00054	0.00045	0.00040
SW	4.4	9.34E+37	-0.49 ± 0.01	8.56 ± 0.05	0.00082	0	0.00021

Таким образом, наблюдательные данные подтверждают гипотезу о возможной подпитке газом за счёт падения богатых газом спутников и/или гигантских облаков. Причём такой со-направленный с вращением галактики характер падения спутников способствует звездообразованию в аккрецированном газе, как ранее отмечалось в статье Сильченко и др. [54].

Здесь стоит отметить, что о наблюдении десятка облаков газа массой $\sim 10^8 M_{\odot}$ вокруг взаимодействующих галактик сообщалось ранее, например, в работе Эльмегрин и др. [170 и ссылки там]. Как показали их численные расчёты, карликовые галактики и облака газа массой $>10^8 M_{\odot}$ могут формироваться и выбрасываться в межгалактическое пространство при взаимодействии компаньона с галактикой, содержащей протяжённый газовый диск. А Гросси и др. [19] обнаружили, что в разреженном окружении $\sim 25\%$ галактик с проявлением эмиссии в линии H I имеют богатые газом спутники. Исследование содержания нейтрального водорода в галактиках раннего типа, выполненное Серра и др. [21], показало наличие систем облаков, разбросанных возле некоторых галактик.

Хотя у галактики NGC 4324 нет видимых следов взаимодействия, как уже отмечалось выше [169], возможно, именно эти наблюдаемые в эмиссии облака и являются сохранившимся свидетельством давнего события взаимодействия. А теперь эти газовые облака постепенно аккрецируют на диск NGC 4324, накапливаясь в кольце; в нём вследствие гравитационной неустойчивости, спровоцированной триаксиальной структурой в центре галактики (на наличие которой указывают косвенные признаки, перечисленные выше в подразделе 4.3), формируются компактные области газа, в которых начинается звездообразование. В последующем звездообразование в газовом кольце стимулируется ударными волнами от эволюционирующих комплексов массивных ОВ-звёзд, которые сформировались первыми. К тому же, инициатором вспышки звездообразования может служить очередное падение спутника или гигантского облака газа на диск галактики. Таким образом, наблюдаемая в NGC 4324 цепочка «компактных эмиссионных областей газа — звёздных комплексов» является цепочкой распространения звездообразования как в пространстве — в кольце, — так и во времени. Для прояснения

картины необходимо провести детальное картирование NGC 4324 и её окрестностей в линии 21 см нейтрального водорода.

Полученные в этой Главе характерные размеры (~ 0.5 кпк) компактных эмиссионных областей и массы молодых звёздных комплексов (от $10^4 M_\odot$ до $10^7 M_\odot$), наблюдаемых в двух галактиках раннего типа, совпадают со значениями, приведёнными в ранних работах Ефремова [171 и ссылки там; 172] для НII-областей, наблюдаемых в ближайших к нам спиральных и неправильных галактиках (M31, M33, M101, БМО) и в Млечном Пути; и соответствуют параметрам газо-звёздных комплексов, которые, по определению Ю.Н. Ефремова [173], являются начальными элементарными и при этом наиболее крупными ячейками звездообразования, состоящими из нескольких ОВ-ассоциаций и молодых звёздных скоплений, а некоторые соседние комплексы, как отмечают Ефремов и Ситник [174], могут объединяться в суперкомплексы диаметром около 1.5 кпк. Примеры такого расширения наблюдаются в NGC5173: области номер 3, 4, 5, 8 (рисунок 4.1) были аппроксимированы эллипсом с большой осью 6.4", что соответствует 1.2 кпк при принятом расстоянии до галактики 38.4 Мпк.

Таким образом, обнаруженное в ходе выполнения диссертационного исследования соответствие размеров и масс молодых звездообразующих комплексов в двух галактиках раннего типа с размерами и массами хорошо исследованных областей звездообразования в ближайших спиральных и неправильных галактиках, а также выявленное регулярное расположение комплексов звездообразования в кольце *линзовидной* галактики NGC 4324, являющееся характерным для ветвей спиральных галактик, свидетельствуют о том, что **физические механизмы звездообразования на локальных масштабах одинаковы в спиральных, неправильных и линзовидных галактиках**. Различия наблюдаются на глобальных (галактических) масштабах: 1) в спиральных галактиках звездообразование происходит в спиральных структурах и распространено по диску, а в линзовидных галактиках оно протекает в ограниченной — *кольцеобразной* — области; 2) в спиральных галактиках звездообразование длится продолжительное время, а в линзовидных галактиках звездообразование имеет *спорадический* характер.

Заключение

В диссертационной работе приводятся результаты детального исследования восьми галактик раннего типа, включающего в себя: анализ спектральных данных, фотометрический анализ оптических изображений галактик и изображений в узких эмиссионных линиях, полученных для двух из восьми исследуемых галактик впервые с помощью современного прибора MaNGaL по заявке автора, фотометрический анализ УФ-изображений, полученных космическим телескопом GALEX, и изображений в полосе W4 (22 мкм), полученных инфракрасным телескопом WISE, что позволило провести оценку темпов звездообразования на различных временных шкалах (от 10 до 200 млн лет) по алгоритму, составленному автором на основе рекомендаций, приведённых в литературе. По этим результатам сделаны следующие выводы.

1. Наши наблюдения подтверждают обнаруженный ранее для других линзовидных галактик наблюдательный факт, что современное звездообразование в линзовидных галактиках протекает в основном в кольцеобразных областях.

2. Произведённая оценка длительности текущего (и недавнего) звездообразования в исследуемых галактиках раннего типа показала, что затухание звездообразования происходит на временной шкале нескольких сотен миллионов лет.

3. Наиболее правдоподобным источником газа в рассмотренных галактиках является аккреция (поглощение) богатых газом спутников.

4. Полученные в диссертационной работе результаты подтверждают и дополняют обнаруженное в предшествующих исследованиях Сильченко и др. [54] влияние геометрии аккреции газа к плоскости звёздного диска на темпы звездообразования: в случае, если газовый компонент вращается в плоскости звёздного диска в направлении противоположном вращению звёзд, интегральные темпы звездообразования уменьшаются по сравнению со случаем сонаправленного падения газа в плоскости галактики; при аккреции газа под заметным углом к плоскости звёздного диска звездообразование очень слабо либо отсутствует (не детектируется).

5. Оригинальные наблюдения в двух узких эмиссионных линиях (H_α и $[NII]\lambda 6583.4$) впервые выявили и позволили детально изучить структуру кольцевой области линзовидной галактики NGC 4324: текущее звездообразование протекает в компактных областях газа с характерным размером ~ 0.5 кпк, что соответствует характерному размеру звёздных комплексов. Выявлена регулярность расположения очагов звездообразования вдоль кольца с характерным расстоянием между ними ~ 0.7 кпк (и кратно ему). По сравнительному анализу изображения в

эмиссионной линии H_α и SDSS-изображений в u -, g -, r -полосах обнаружено изменение положения (смещение вдоль кольца) компактных эмиссионных областей газа — звёздных комплексов с течением времени, что указывает на действие таких дополнительных факторов, стимулирующих звездообразование, как бароподобная структура (не выраженная явно на оптических изображениях) и расширяющиеся стенки гигантских HI-оболочек вокруг молодых звёздных комплексов.

Как показано в Главе 2 (рисунок 2.10), полученные в результате диссертационного исследования значения темпов звездообразования и их поверхностных плотностей для колец исследуемых галактик сопоставимы со значениями, характерными для спиральных и иррегулярных галактик. Более того, обнаруженные в кольцевой области линзовидной галактики NGC 4324 звездообразующие конденсации подобны (по характерному размеру, характерному расстоянию между ними и регулярности расположения) тем, что видны (и достаточно хорошо изучены разными исследователями [154 — 157]) в ветвях спиральных галактик. Эта схожесть говорит о том, что на локальных масштабах процесс звездообразования идентичен, т. е. не зависит от морфологии галактики, а определяется локальными условиями: величиной поверхностной плотности газа, величинами турбулентного и статического давления в газе (условия молекуляризации газа исследованы в диссертационной работе А.В. Каспаровой [175]).

Различие заключается в том, что в спиральных галактиках звездообразование протекает в спиральных ветвях, занимающих большую часть звёздных дисков галактик, а в галактиках раннего типа звездообразование сосредоточено в кольцеобразных структурах.

Морфология галактики, являющаяся её глобальной характеристикой, по всей видимости, влияет на крупномасштабное распределение газа в галактике, создаёт условия, в которых оказывается газ; эти условия определяют состояние газа, которое редко является пригодным для звездообразования в галактиках раннего типа, но оказывается подходящим для него почти повсеместно в дисках спиральных галактик.

Обнаруженная в ходе исследования связь между структурными и эволюционными параметрами галактик: границы структурных компонентов в целом совпадают с границами локализации звёздного населения определённого возраста и химического состава (Глава 2), признаки динамического воздействия предполагаемой триаксиальной структуры (невидимого бара) на звездообразующее внутреннее кольцо в галактике NGC 4324 (Глава 4), а также выявленное ранее Ильиной и Сильченко [85] пространственное совпадение звёздных и УФ-колец для ещё 12 галактик раннего типа ставит на передний край астрономической науки вопрос: определяет ли структура галактик их эволюция, обусловленная различными внешними факторами, или структура галактик определяет их дальнейшую эволюцию? Или же структура и эволюция галактик взаимосвязаны и определены неким другим, пока скрытым от нас фактором?

Таким образом, выполненное диссертационное исследование проясняет «верхний» пласт вопросов о том, как происходит звездообразование в галактиках раннего типа; но вместе с тем обнажает более глубокий, фундаментальный вопрос: «Почему звездообразование в линзовидных галактиках протекает в кольцах?». По всей видимости, ответ на этот вопрос генетически связан с ответом на вопрос: «Почему у галактик есть структура?». Ответ на этот вопрос станет ответом и на другой весьма старинный дискуссионный вопрос: «Почему галактики отличаются по своей структуре?»

Конечно, восемь галактик — очень маленькая выборка для нахождения точного ответа на этот фундаментальный вопрос. Мы планируем продолжить наши исследования по описанной в Главе 2 методике. Нами уже составлена выборка из трёх десятков линзовидных галактик Южного неба, произведены для них оценки темпов звездообразования на временных шкалах 100 и 200 млн лет (по УФ-потокам), идёт накопление длиннощелевых спектральных данных на телескопе SALT Южно-Африканской обсерватории. Для исследования текущего состояния газа в очагах звездообразования очень полезным является прибор MaNGA — картировщик галактик в узких эмиссионных линиях, разработанный специалистами CAO РАН. Очень хотелось бы, чтобы и на телескопе SALT был инструмент с аналогичными возможностями.

Благодарности

Выражаю огромную благодарность своему научному руководителю — Ольге Касьяновне Сильченко — за мудрое руководство, плодотворные дискуссии и терпение; нашему Учителю — Анатолию Владимировичу Засову — за вдохновенные и вдохновляющие лекции, как учебные, научные, так и научно-популярные, и за школьный учебник, увлёкший меня в мир астрономии; своим коллегам-соавторам, высококлассным наблюдателям — Алексею Юрьевичу Князеву и Алексею Валерьевичу Моисееву — за получение и первичную обработку наблюдательного материала и ценные замечания при написании текстов статей.

Список литературы

1. Hubble E. P. *The Realm of the Nebulae* // Yale University Press, New Haven (1936)
2. Сильченко О. К. *Происхождение и эволюция галактик* // Фрязино: Век 2 (2017)
3. Bottinelli L., Chamaraux P., Gouguenheim L., et al. *Measurements of Neutral Atomic Hydrogen in Relatively Early Type Galaxies* // Astronomy and Astrophysics, Vol. 6, pp. 453 — 459 (1970)
4. Balkowski C., Bottinelli L., Gouguenheim L., et al. *21-cm neutral hydrogen line study of early type galaxies* // Astronomy and Astrophysics, Vol. 21, pp. 303-310 (1972)
5. Knapp G.R., Gallagher J.S., Faber S.M., et al. *HI observations of 40 S0 and elliptical galaxies* // Astronomical Journal, Vol. 82, pp. 106-112 (1977)
6. Krumm N. and Salpeter E.E. *Neutral hydrogen distribution and velocity structure of some early-type galaxies* // Astrophysical Journal, Vol. 228, pp. 64 — 76 (1979)
7. Gionavardi C., Krumm N., Salpeter E.E. *A sensitive HI detection survey for early-type disk galaxies* // Astronomical Journal, Vol. 88, pp. 1719 — 1735 (1983)
8. Chamaraux P., Balkowski C., Fontanelli P. *The HI content of lenticular and early-type galaxies: a comparison between field and Virgo cluster samples* // Astronomy and Astrophysics, Vol. 165, pp. 15 — 30 (1986)
9. Chamaraux P., Balkowski C., Fontanelli P. *HI observation of lenticular and early type galaxies* // Astronomy and Astrophysics Supplement Series, Vol. 69, pp. 263 — 279 (1987)
10. van Woerden H., van Driel W., Schwarz U.J. *Distribution and motions of atomic hydrogen in lenticular galaxies* // in «Internal Kinematics and Dynamics of Galaxies», ed. E. Athanassoulla // IAU Symposium, Vol. 100, pp. 99 — 104 (1983)
11. Knapp G.R., van Driel W., Schwarz U.J., et al. *Distribution and motions of atomic hydrogen in lenticular galaxies. II. NGC 7013* // Astronomy and Astrophysics, Vol. 133, pp. 127 — 136 (1984)
12. Knapp G.R., van Driel W., van Woerden H. *Distribution and motions of atomic hydrogen in lenticular galaxies. III. NGC 3998* // Astronomy and Astrophysics, Vol. 142, pp. 1 — 8 (1985)
13. Krumm N., van Driel W., van Woerden H. *Distribution and motions of atomic hydrogen in lenticular galaxies. IV. A ring of HI around NGC 4262* // Astronomy and Astrophysics, Vol. 144, pp. 202 — 210 (1985)
14. van Driel W., van Woerden H., Gallagher J.S. et al. *Distribution and motions of atomic hydrogen in lenticular galaxies. V. NGC 4203: a gas-rich S0 with an inner and an outer HI ring* // Astronomy and Astrophysics, Vol. 191, pp. 201 — 214 (1988)
15. van Driel W., Rots A.H., van Woerden H. *Distribution and motions of atomic hydrogen in lenticular galaxies. VII. The S0/a-Sa galaxies NGC1291, NGC5101 and IC5267* // Astronomy and Astrophysics, Vol. 204, pp. 39 — 60 (1988)

16. van Driel W., Balkowski C., van Woerden H. *Disrtibution and motions of atomic hydrogen in lenticular galaxies. VIII. The S0/a galaxies NGC 3619, 3626 and 3900* // Astronomy and Astrophysics, Vol. 218, pp. 49 — 66 (1989)
17. van Driel W., van Woerden H. *Disrtibution and motions of atomic hydrogen in lenticular galaxies. XI. A summary of HI observations and evolutionary scenarios* // Astronomy and Astrophysics, Vol. 243, pp. 71 — 92 (1991)
18. DuPrie K., Schneider S.E. *Neutral hydrogen around early-type galaxies* // Astronomical Journal, Vol. 112 (3), pp. 937 — 947 (1996)
19. Grossi M., di Serego Alighieri S., Giovanardi C., et al. *The H I content of early-type galaxies from the ALFALFA survey. II. The case of low density environments* // Astronomy and Astrophysics, Vol. 498, pp. 407 — 417 (2009)
20. Morganti R., de Zeeuw P.T., Oosterloo T. A., et al. *Neutral hydrogen in nearby elliptical and lenticular galaxies: the continuing formation of early-type galaxies* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 371, pp. 157 — 169 (2006)
21. Serra P., Oosterloo T., Morganti R., et al. *The ATLAS^{3D} project – XIII. Mass and morphology of H I in early-type galaxies as a function of environment* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 422, pp. 1835 — 1862 (2012)
22. Sadler E.M. *HI in Early-Type Galaxies: First Results from HIPASS* // in: «Gas and Galaxy Evolution», ed. Hibbard J.E., Rupen M., van Gorkom J.H. // ASP Conference Proceedings, Vol. 240, pp. 445 — 449 (2001)
23. Oosterloo T.A., Morganti R., Sadler E. M. et al. *Extended, regular H I structures around early-type galaxies* // Astronomy and Astrophysics, Vol. 465, pp. 787 — 798 (2007)
24. Wiklind T., Rydbeck G. *Detection of CO (J=1-0) in the dwarf elliptical galaxy NGC 185* // Astronomy and Astrophysics, Vol. 164, pp. L22 — L24 (1986)
25. Wiklind T., Henkel C. *The molecular cloud content of early type galaxies. I. Detections and global properties* // Astronomy and Astrophysics, Vol. 225, pp. 1 — 11 (1989)
26. Wiklind T., Henkel C. *The molecular cloud content of early type galaxies. III. A nuclear molecular ring in NGC 3593* // Astronomy and Astrophysics, Vol. 257, pp. 437 — 454 (1992)
27. Wiklind T., Henkel C. *The molecular cloud content of early type galaxies. II. A molecular ring in NGC404* // Astronomy and Astrophysics, Vol. 227, pp. 394 — 406 (1990)
28. Sage L.J., Wrobel J.M. *Detection of CO emission from S0 galaxies* // Astrophysical Journal, Vol. 344, pp. 204 — 209 (1989)
29. Thronson H.A., Tacconi L., Kenney J., et al. *Molecular gas, the interstellar medium, and star formation in S0 and Sa galaxies* // Astrophysical Journal, Vol. 344, pp. 747 — 762 (1989)
30. Wiklind T., Combes F., Henkel C. *The molecular cloud content of early type galaxies. V. CO in elliptical galaxies* // Astronomy and Astrophysics, Vol. 297, pp. 643 — 659 (1995)

31. Faber S.M., Gallagher J.S. *HI in early-type galaxies. II. Mass loss and galactic winds* // *Astrophysical Journal*, Vol. 204, pp. 365 — 378 (1976)
32. Welch G.A., Sage L.J. *The Cool Interstellar Medium In S0 Galaxies. I. A Survey Of Molecular Gas* // *Astrophysical Journal*, Vol. 584, pp. 260 — 277 (2003)
33. Sage L.J., Welch G.A. *The Cool Interstellar Medium In S0 Galaxies. II. A Survey Of Atomic Gas* // *Astrophysical Journal*, Vol. 644, pp. 850 — 861 (2006)
34. Young L.M., Bureau M., Davis T.A., et al. *The ATLAS^{3D} project – IV. The molecular gas content of early-type galaxies* // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 414, pp. 940—967 (2011)
35. Davis T.A., Alatalo K., Bureau M., et al. *The ATLAS^{3D} Project – XIV. The extent and kinematics of the molecular gas in early-type galaxies* // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 429, pp. 534 — 555 (2013)
36. Alatalo K., Davis T.A., Bureau M., et al. *The ATLAS^{3D} project – XVIII. CARMA CO imaging survey of early-type galaxies* // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 432, 1796 — 1844 (2013)
37. Burbidge E.M., Burbidge G.R. *Rotation and Internal Motions in NGC 5128* // *Astrophysical Journal*, Vol. 129, pp. 271 — 281 (1959)
38. Graham J.A. *The structure and evolution of NGC 5128* // *Astrophysical Journal*, Vol. 232, pp. 60-73 (1979)
39. Caldwell N. *Two early-type galaxies with ionized gas disks* // *Astrophysical Journal*, Vol. 278, pp.96 — 111 (1984)
40. Phillips M.M., Jenkins C.R., Dopita M.A., et al. *Ionized gas in elliptical and S0 galaxies. I. Survey for H α and [NII] emission* // *Astronomical Journal*, Vol. 91 (5), pp. 1062 — 1085 (1986)
41. Buson L.M., Sadler E.M., Zeilinger W.W., et al. *The distribution of ionized gas in early-type galaxies* // *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 280, pp. 409 — 425 (1993)
42. Goudfrooij P., Hansen L., Jørgensen H.E., et al. *Interstellar matter in Shapley-Ames elliptical galaxies. II. The distribution of dust and ionized gas* // *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, Vol. 105, pp. 341 — 383 (1994)
43. Sarzi M., Falcón-Barroso J., Davies R.L., et al. *The SAURON project — V. Integral-field emission-line kinematics of 48 elliptical and lenticular galaxies* // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 366 (4), pp. 1151 — 1200 (2006)
44. Pogge R. W., Eskridge P. B. *Star Formation In The Disks Of HI-Rich S0 Galaxies* // *Astronomical Journal*, Vol. 106 (4), pp. 1405 — 1419 (1993)
45. Grouchy R.D., Buta R. J., Salo H., et al. *Ring star formation rates in barred and nonbarred galaxies* // *Astronomical Journal*, Vol. 139, pp. 2465 — 2493 (2010)
46. Donas J., Deharveng J.-M., Rich R.M., et al. *GALEX UV Color Relations For Nearby Early-Type Galaxies* // *Astrophysical Journal Supplement Series*, Vol. 173, pp. 597 — 606 (2007)

47. Marino A., Bianchi L., Rampazzo R., et al. *Signatures of recent star formation in ring S0 galaxies* // *Astrophysics and Space Science*, Vol. 335 (1), pp. 243 — 248 (2011)
48. Salim S. and Rich R.M. *Star formation signatures in optically quiescent early-type galaxies* // *Astrophysical Journal Letters*, Vol. 714, L290 — L294 (2010)
49. Salim S., Fang J. J., Rich R. M., et al. *Galaxy-scale star formation on the red sequence: the continued growth of S0s and the quiescence of ellipticals* // *Astrophysical Journal*, Vol. 755, pp.105 — 134 (2012)
50. McKee C. F., Ostriker E. C. *Theory of Star Formation* // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Vol. 45, pp. 565 — 687 (2007)
51. Kennicutt R. C. and Evans N. J. *Star Formation in the Milky Way and Nearby Galaxies* // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Vol. 50, pp. 531 — 608 (2012)
52. Davis T.A., Alatalo K., Sarzi M., et al. *The ATLAS^{3D} project – X. On The Origin Of The Molecular And Ionized Gas In Early-Type Galaxies* // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 417, pp. 882 — 899 (2011)
53. Katkov I.Yu., Kniazev A.Yu., Sil'chenko O.K. *Kinematics and Stellar Populations in Isolated Lenticular Galaxies* // *Astronomical Journal*, Vol. 150, Issue 1, article id. 24, 21 pp. (2015)
54. Sil'chenko O.K., Moiseev A.V., Egorov O.V. *The Gas Kinematics, Excitation, and Chemistry, in Connection with Star Formation, in Lenticular Galaxies* // *Astrophysical Journal Supplement Series*, Vol. 244, Issue 1, article id. 6, 32 pp. (2019)
55. Vlasjuk V.V. *Reduction of spectral data obtained on the 1024-channel scanner of the 6m telescope with a personal computer IBM PC AT* // *Bulletin of the Special Astrophysical Observatory*, Vol. 36, pp. 118 – 131 (1993)
56. Ahn C.P., Alexandroff R., Allende Prieto C., et al. *The Ninth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Spectroscopic Data from the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey* // *Astrophysical Journal Supplement Series*, Vol. 203, article id. 21, 13 pp. (2012)
57. Brown T. M., Baliber N., Bianco F.B., et al. *Las Cumbres Observatory Global Telescope Network* // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Vol. 125, p. 1031 (2013)
58. Morrissey P., Conrow T., Barlow T. A., et al. *The Calibration and Data Products of GALEX* // *Astrophysical Journal Supplement Series*, Vol. 173 (2), pp. 682 — 697 (2007)
59. Moiseev A., Perepelitsyn A., Oparin D. *Mapper of Narrow Galaxy Lines (MaNGaL): new tunable filter imager for Caucasian telescopes* // *Experimental Astronomy*, Vol. 50, pp. 199 — 214 (2020)
60. de Vaucouleurs G., de Vaucouleurs A., Corwin H.G.J, et al. *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies* // New York: Springer (1991)
61. Gil de Paz A., Boissier S., Madore B. F., et al. *The GALEX Ultraviolet Atlas of Nearby Galaxies* // *Astrophysical Journal Supplement Series*, Vol. 173, pp. 185 — 255 (2007)

62. Abazajian K.N., Adelman-McCarthy J.K., Agüeros M.A., et al. *The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey* // Astrophysical Journal Supplement Series, Vol. 182 (2), pp.543 — 558 (2009)
63. Bertola F., Bettoni D., Rusconi L., et al. *Stellar versus gaseous kinematics in E and S0 galaxies* // Astronomical Journal, Vol. 89 (3), pp. 356 — 364 (1984)
64. Bertola F., Buson L.M., Zeilinger W.W. *The external origin of the gas in S0 galaxies* // Astrophysical Journal, Vol. 401, L79 — L81 (1992)
65. Zeilinger W.W., Pizzella A., Amico P., et al. *The distribution of ionized gas in early-type galaxies. II. The velocity field of the ionized gas* // Astronomy and Astrophysics Supplement Series, Vol. 120, pp. 257 — 266 (1996)
66. Kannappan S.J. and Fabricant D.G. *A Broad Search for Counterrotating Gas and Stars: Evidence for Mergers and Accretion* // Astronomical Journal, Vol. 121 (1), pp. 140 — 147 (2001)
67. Jin Y., Chen Y.-M., Shi Y., et al. *SDSS-IV MaNGA: properties of galaxies with kinematically decoupled stellar and gaseous components* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 463, 913 — 926 (2016)
68. Bryant J.J., Croom S.M., van de Sande J., et al. *The SAMI Galaxy Survey: stellar and gas misalignments and the origin of gas in nearby galaxies* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 483 (1), pp. 458 — 479 (2019)
69. Katkov I.Yu., Sil'chenko O.K., Afanasiev V.L. *Decoupled gas kinematics in isolated S0 galaxies* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 438, 2798 — 2803 (2014)
70. Kuijken K., Fisher D., Merrifield M. R. *A search for counter-rotating stars in S0 galaxies* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 283, 543 — 550 (1996)
71. Katkov I.Yu., Sil'chenko O.K., Afanasiev V.L. *Lenticular galaxy IC 719: current building of the counterrotating large-scale stellar disk* // Astrophysical Journal, Vol. 769, pp. 105 — 114 (2013)
72. Katkov I.Yu., Sil'chenko O.K., Chilingarian I.V., et al. *Stellar counter-rotation in lenticular galaxy NGC 448* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 461, 2068 — 2076 (2016)
73. Young L.M., Scott N., Serra P., et al. *The ATLAS^{3D} project – XXVII. Cold gas and the colours and ages of early-type galaxies* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 444, pp. 3408 – 3426 (2014)
74. Воронцов-Вельяминов Б.А. *Кольцевые галактики* // Астрономический журнал, том 37 (3), с. 381 — 386 (1960)
75. Воронцов-Вельяминов Б.А. *Многообразие кольцевых галактик и их происхождение* // Письма в Астрономический журнал, том 2, с. 520 — 523 (1976)
76. Костюк И.П. *Список галактик с внешней кольцеобразной структурой* // Сообщения Специальной Астрофизической Обсерватории, том 13, с. 45 – 62 (1975)

77. Few J.M.A., Madore B.F. *Ring galaxies – II. Classification and statistics* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 222, pp. 673 – 682 (1986)
78. Buta R. *The catalog of southern ringed galaxies* // Astrophysical Journal Supplement Series, Vol.96, pp. 39 — 116 (1995)
79. Buta R. *Galactic rings revisited - I. CVRHS classifications of 3962 ringed galaxies from the Galaxy Zoo 2 Database* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 471 (4), pp.4027 – 4046 (2017)
80. Comerón S., Salo H., Laurikainen E., et al. *ARRAKIS: atlas of resonance rings as known in the S⁴G* // Astronomy and Astrophysics, Vol. 562, A121 (2014)
81. Sheth K., Regan M., Hinz J. L., et al. *The Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies (S⁴G)*// Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Vol. 122, Issue 898, pp. 1397 — 1414 (2010)
82. Comerón S. *Inner rings in disc galaxies: dead or alive* // Astronomy and Astrophysics, Vol. 555, L4, 9 pp. (2013)
83. Kostiuk I. P., Sil’chenko O. K. *Outer rings of early-type disk galaxies* // Astrophysical Bulletin, Vol. 70 (3), pp. 280 — 291 (2015)
84. Kostiuk I. P., Sil’chenko O.K. *Current star formation in the outer rings among early-type disk galaxies* // Baltic Astronomy, Vol. 24, pp. 426 — 430 (2015)
85. Ilyina M.A., Sil’chenko O.K. *Lenticular galaxies with UV-rings* // Astronomy Letters, Vol. 37, Issue 9, pp. 589 — 596 (2011)
86. Ilyina M.A., Sil’chenko O.K., Afanasiev V.L. *Nature of star-forming rings in S0 galaxies* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 439, Issue 1, pp. 334 — 341 (2014)
87. Proshina I.S., Kniazev A.Yu., Sil’chenko O.K. *Star-forming Rings in Lenticular Galaxies: Origin of the Gas* // Astronomical Journal, Vol. 158, 5, 13 pp. (2019)
88. Cappellari M., Emsellem E., Krajnović D., et al. *The ATLAS^{3D} project – I. A volume-limited sample of 260 nearby early-type galaxies: science goals and selection criteria* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 413, pp. 813 — 836 (2011)
89. Cortese L. and Hughes T.M. *Evolutionary paths to and from the red sequence: star formation and H I properties of transition galaxies at $z \sim 0$* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 400, pp. 1225 — 1240 (2009)
90. Makarov D. and Karachentsev I. *Galaxy groups and clouds in the local ($z \sim 0.01$) Universe* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 412, Issue 4, pp. 2498 — 2520 (2011)
91. Garcia A.M. *General study of group membership. II. Determination of nearby groups* // Astronomy and Astrophysics Supplement Series, Vol. 100, p. 47 — 90 (1993)
92. Berlind A.A., Frieman J., Weinberg D.H., et al. *Percolation Galaxy Groups and Clusters in the SDSS Redshift Survey: Identification, Catalogs, and the Multiplicity Function* // Astrophysical Journal Supplement Series, Vol. 167, Issue 1, pp. 1 — 25 (2006)

93. Burgh E.B., Nordsieck K.H., Kobulnicky H. A., et al. *Prime Focus Imaging Spectrograph for the Southern African Large Telescope: optical design* // Proceedings of the SPIE, Vol. 4841, pp.1463 — 1471 (2003)
94. Kobulnicky H.A., Nordsieck K.H., Burgh E.B., et al. *Prime focus imaging spectrograph for the Southern African large telescope: operational modes* // Proceedings of the SPIE, Vol. 4841, pp.1634 — 1644 (2003)
95. Buckley D.A.H., Swart G.P., Meiring J.G. *Completion and commissioning of the Southern African Large Telescope* // Proceedings of the SPIE, Vol. 6267, id. 62670Z (2006)
96. O'Donoghue D., Buckley D. A.H., Balona L.A., et al. *First science with the Southern African Large Telescope: peering at the accreting polar caps of the eclipsing polar SDSS J015543.40+002807.2* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 372, Issue 1, pp. 151 — 162 (2006)
97. Crawford S.M., Still M., Schellart P., et al. *PySALT: the SALT science pipeline* // Proceedings of the SPIE, Vol. 7737, id. 773725 (2010)
98. Kniazev A. Y., Zijlstra A.A., Grebel E.K., et al. *The metallicity extremes of the Sagittarius dSph: SALT spectroscopy of Pne* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 388 (4), pp. 1667 — 1678 (2008)
99. Baldwin J. A., Phillips M. M., Terlevich R. *Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects* // Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Vol. 93, pp. 5 — 19 (1981)
100. Osterbrock D. E. and Ferland G. J. *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei* // 2nd ed., Sausalito, CA: University Science Books (2006)
101. Kewley L.J., Dopita M.A., Sutherland R.S., et al. *Theoretical Modeling of Starburst Galaxies* // Astrophysical Journal, Vol. 556, pp. 121 — 140 (2001)
102. Kauffmann G., Heckman T. M., Tremonti C., et al. *The host galaxies of active galactic nuclei* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 346, Issue 4, pp. 1055 — 1077 (2003)
103. Kewley L.J., Groves B., Kauffmann G., et al. *The host galaxies and classification of active galactic nuclei* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 372, Issue 3, pp. 961-976 (2006)
104. Worthey G., Faber S.M., Gonzalez J.J., et al. *Old Stellar Populations. V. Absorption Feature Indices for the Complete Lick/IDS Sample of Stars* // Astrophysical Journal Supplement, Vol. 94, pp. 687 — 722 (1994)
105. Allen M.G., Groves B.A., Dopita M.A., et al. *The MAPPINGS III Library of Fast Radiative Shock Models* // Astrophysical Journal Supplement Series, Vol. 178, Issue 1, pp. 20 — 55 (2008)
106. Binette L., Magris C.G., Stasińska G., et al. *Photoionization in elliptical galaxies by old stars* // Astronomy and Astrophysics, Vol. 292, pp. 13 — 19 (1994)
107. Stasińska G. and Sodr  L.Jr. *Global emission line trends in spiral galaxies: The reddening and metallicity sequences* // Astronomy and Astrophysics, Vol. 374, pp. 919 — 931 (2001)

108. Thomas D., Maraston C., Bender R. *Stellar population models of Lick indices with variable element abundance ratios* // Monthly Notice of the Royal Astronomical Society, Vol. 339, Issue 3, pp. 897 — 911 (2003)
109. Matteucci F. and Greggio L. *Relative roles of type I and II supernovae in the chemical enrichment of the interstellar gas* // Astronomy and Astrophysics, Vol. 154, pp. 279— 287 (1986)
110. Beasley M. A., Brodie J. P., Strader, J., et al. *The Chemical Properties of Milky Way and M31 Globular Clusters. I. A Comparative Study* // Astronomical Journal, Vol. 128, pp. 1623 — 1645 (2004)
111. Dias B., Barbuy B., Saviane I., et al. *FORS2/VLT survey of Milky Way globular clusters. II. Fe and Mg abundances of 51 Milky Way globular clusters on a homogeneous scale* // Astronomy and Astrophysics, Vol. 590, id.A9, 15 pp. (2016)
112. Marino R.A., Rosales-Ortega F.F., Sánchez S.F., et al. *The O3N2 and N2 abundance indicators revisited: improved calibrations based on CALIFA and T_e-based literature data* // Astronomy and Astrophysics, Vol. 559, id. A114, pp. (2013)
113. Asplund M., Grevesse N., Sauval A.J., et al. *The Chemical Composition of the Sun* // Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Vol. 47, pp. 481 — 522 (2009)
114. Sil'chenko O., Kostiuk I., Burenkov A., et al. *Star formation in outer rings of S0 galaxies. I. NGC 6534 and MCG 11-22-015* // Astronomy and Astrophysics, Vol. 620, id.L7, 5 pp. (2018)
115. Pogge R.W. and Eskridge P.B. *Star Formation and Abundances in S0 Galaxies* // in ASP Conference Series 163, Star Formation in Early Type Galaxies, ed. P. Carral and J. Cepa // San Francisco, CA: ASP, p. 174 (1999)
116. Morrissey P., Conrow T., Barlow T. A., et al. *The Calibration and Data Products of GALEX* // Astrophysical Journal Supplement Series, Vol. 173, Issue 2, pp. 682 — 697 (2007)
117. Lee J.C., Gil de Paz A., Tremonti C., et al. *Comparison Of H α and UV Star Formation Rates in the Local Volume: Systematic Discrepancies for Dwarf Galaxies* // Astrophysical Journal, Vol.706, pp. 599 — 613 (2009)
118. Lee J.C., Gil de Paz A., Kennicutt R.C., et al. *A GALEX Ultraviolet Imaging Survey of Galaxies in the Local Volume* // Astrophysical Journal Supplement, Vol. 192, Issue 1, id. 6, 33 pp. (2011)
119. Schlafly E.F. and Finkbeiner D.P. *Measuring Reddening with Sloan Digital Sky Survey Stellar Spectra and Recalibrating SFD* // Astrophysical Journal, Vol. 737, article id. 103, 13 pp. (2011)
120. Hao C.-N., Kennicutt R.C., Johnson B.D., et al. *Dust-corrected Star Formation Rates of Galaxies. II. Combinations of Ultraviolet and Infrared Tracers* // Astrophysical Journal, Vol. 741, Issue 2, article id. 124, 22 pp. (2011)
121. Kostiuk I. P., Sil'chenko O.K. *Outer rings in early-type disk galaxies: star formation rate* // Baltic Astronomy, Vol. 25, pp. 331 — 337 (2016)
122. Chiappini C., Matteucci F., Gratton R. *The Chemical Evolution of the Galaxy: The Two-Infall Model* // Astrophysical Journal, Vol. 477, Issue 2, pp. 765 — 780 (1997)

123. Smith R. J., Lucey J.R., Hudson M.J., et al. *A spectroscopic survey of dwarf galaxies in the Coma cluster: stellar populations, environment and downsizing* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 392, Issue 4, pp. 1265 — 1294 (2009)
124. Sil'chenko, O. K. *Stellar Populations in Nearby Lenticular Galaxies* // Astrophysical Journal, Vol. 641, Issue 1, pp. 229 — 240 (2006)
125. Sil'chenko, O. K. *Stellar Nuclei and Inner Polar Disks in Lenticular Galaxies* // Astronomical Journal, Vol. 152, Issue 3, article id. 73, 14 pp. (2016)
126. Sil'chenko, O. K., Proshina, I. S., Shulga, A. P., et al. *Ages and abundances in large-scale stellar discs of nearby S0 galaxies* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 427, Issue 1, pp. 790 — 805 (2012)
127. Marinacci F., Binney J., Fraternali F., et al. *The mode of gas accretion on to star-forming galaxies* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 404, pp. 1464—1474 (2010)
128. Kudritzki R.-P., Ho I.-T., Schrubba A., et al. *The chemical evolution of local star-forming galaxies: radial profiles of ISM metallicity, gas mass, and stellar mass and constraints on galactic accretion and winds* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 450, pp.342 — 359 (2015)
129. Прошина И.С., Князев А.Ю., Сильченко О.К. *Противовращающийся газовый диск в S0 галактике IC 560* // Письма в Астрономический журнал, том 42, номер 12, с.861-868 (2016)
130. Proshina I., Sil'chenko O., Moiseev A. *Star formation in outer rings of S0 galaxies II. NGC4513—a multi-spin ringed S0 galaxy* // Astronomy and Astrophysics, Vol. 634, A102 (2020)
131. Pettini M. and Pagel B.E.J. *[OIII]/[NII] as an abundance indicator at high redshift* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 348, Issue 3, pp. L59 — L63 (2004)
132. Sarzi M., Allard E.L., Knapen J.H., et al. *Star formation and stellar populations across nuclear rings in galaxies* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 380, pp. 949 — 962 (2007)
133. Костюк И.П., Караченцев И.Д., Копылов А.И. *Лучевые скорости кольцеобразных галактик* // Письма в Астрономический Журнал, том 7, №5, с. 267 — 268 (1981)
134. Tang Y.-W., Kuo Ch.-Y., Lim J., et al. *Prevalence of Tidal Interactions among Local Seyfert Galaxies: The Control Experiment* // Astrophysical Journal, Vol. 679, pp. 1094 — 1127 (2008)
135. Afanasiev V. L. and Moiseev A. V. *SCORPIO on the 6 m Telescope: Current State and Perspectives for Spectroscopy of Galactic and Extragalactic Objects* // Baltic Astronomy, Vol.20, pp. 363 — 370 (2011)
136. Kumari N., Maiolino R., Belfiore F., et al. *Metallicity calibrations for diffuse ionized gas and low-ionization emission regions* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 485, pp.367 — 381 (2019)
137. Bell E. F., McIntosh D. H., Katz N., et al. *The Optical and Near-Infrared Properties of Galaxies. I. Luminosity and Stellar Mass Functions* // Astrophysical Journal Supplement Series, Vol. 149, Issue 2, pp. 289 — 312 (2003)

138. Džudžar R., Kilborn V., Meurer G., et al. *The neutral hydrogen properties of galaxies in gas-rich groups* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 483, pp. 5409 — 5425 (2019)
139. Сильченко О.К., Прошина И.С., Моисеев А.В., Опарин Д.В. *Звездообразование в эллиптической (?) галактике NGC 5173* // Астрофизический Бюллетень, том 77, № 1, с. 43–54 (2022)
140. Прошина И.С., Моисеев А.В., Сильченко О.К. *Молодые звездообразующие комплексы в кольце S0 галактики NGC 4324* // Письма в Астрономический Журнал, том 48, № 3, с. 153–166 (2022)
141. Salo H., Laurikainen E., Laine J., et al. *The Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies (S⁴G): Multi-component Decomposition Strategies and Data Release* // Astrophysical Journal Supplement Series, Vol. 219, Issue 1, article id. 4, 45 pp. (2015)
142. Vader J.P. and Vigroux L. *A star-forming disk in the elliptical galaxy NGC 5173* // Astronomy and Astrophysics, Vol. 246, pp. 32 — 38 (1991)
143. Knapp G.R. and Raimond E. *Detection of HI in the elliptical galaxy NGC 5173* // Astronomy and Astrophysics, Vol. 138, p. 77 — 84 (1984)
144. Buta R.J. *The systematics of galaxy morphology in the comprehensive de Vaucouleurs revised Hubble-Sandage classification system: application to the EFIGI sample* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 488, Issue 1, pp. 590 — 608 (2019)
145. Rest A., van den Bosch F.C., Jaffe W., et al. *WFPC2 Images of the Central Regions of Early-Type Galaxies. I. The Data* // Astronomical Journal, Vol. 121, Issue 5, pp. 2431 — 2482 (2001)
146. Freeman K.C. *On the Disks of Spiral and S0 Galaxies* // Astrophysical Journal, Vol. 160, pp. 811–830 (1970)
147. Zhang K., Yan R., Bundy K., et al. *SDSS-IV MaNGA: The Impact of Diffuse Ionized Gas on Emission-line Ratios, Interpretation of Diagnostic Diagrams, and Gas Metallicity Measurements* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 466, pp. 3217 — 3243 (2017)
148. Cid Fernandes R., Stasińska G., Mateus A., et al. *A comprehensive classification of galaxies in the Sloan Digital Sky Survey: how to tell true from fake AGN?* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 413, pp. 1687 — 1699 (2011)
149. Lacerda E.A.D., Cid Fernandes R., Couto G.S., et al. *Diffuse ionized gas in galaxies across the Hubble sequence at the CALIFA resolution* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 474, pp. 3727 — 3739 (2018)
150. Anders P., Bissantz N., Boysen L., et al. *The young star cluster system in the Antennae: evidence for a turnover in the luminosity function* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 377, Issue 1, pp. 91 — 106 (2007)
151. Efremov Yu.N. and Elmegreen B.G. *Triggered star formation in the LMC4/Constellation III region of the Large Magellanic Cloud* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 299, Issue 3, pp. 643 — 652 (1998)

152. Egorov O.V., Lozinskaya T.A., Moiseev A.V. *Triggered star formation in giant HI supershells: ionized gas* // *Astronomical and Astrophysical Transactions*, Vol. 29, pp. 17 — 24 (2015)
153. Сотникова Н.Я., Решетников В.П. *Звездообразование в системе NGC 4676 (Мышки)* // *Письма в Астрономический Журнал*, том 24, № 2, с. 97 — 108 (1998)
154. Efremov Yu.N. *On the chains of star complexes and superclouds in spiral arms* // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 405, Issue 3, pp. 1531 — 1543 (2010)
155. Gusev A.S. and Efremov Yu.N. *Regular chains of star formation complexes in spiral arms of NGC 628* // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 434, Issue 1, pp. 313—324 (2013)
156. Elmegreen B.G., Elmegreen D.M., Efremov Yu.N. *Regularly Spaced Infrared Peaks in the Dusty Spirals of Messier 100* // *Astrophysical Journal*, Vol. 863, Issue 1, article id. 59, 12 pp. (2018)
157. Gusev A.S. and Shimanovskaya E.V. *Spatial regularity of the young stellar population in the ring of NGC 6217* // *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 640, L7, 5 pp. (2020)
158. Засов А.В., Постнов К.А. *Общая астрофизика* // *Фрязино: Век 2*, 496 с. (2006)
159. Davis T.A., Bureau M., Young L.M., et al. *The ATLAS^{3D} project — V. The CO Tully-Fisher relation of early-type galaxies* // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 414, Issue 2, pp. 968 — 984 (2011)
160. Krajnović D., Emsellem E., Cappellari M., et al. *The ATLAS^{3D} project — II. Morphologies, kinematic features and alignment between photometric and kinematic axes of early-type galaxies* // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 414, Issue 4, pp. 2923 — 2949 (2011)
161. Giovanardi C., Helou G., Salpeter E.E., et al. *Effects of environment on neutral hydrogen distribution for disk galaxies in the Virgo cluster area* // *Astrophysical Journal*, Vol. 267, pp.35—51 (1983)
162. Hoffman G.L., Williams B.M., Lewis B.M., et al. *HI Observations in the Virgo Cluster Area. III. All "Member" Spirals* // *Astrophysical Journal Supplement*, Vol. 69, pp. 65 — 98 (1989)
163. Martinez-Valpuesta I., Knapen J.H., Buta R. *A Morphological and Statistical Analysis of Ansaes in Barred Galaxies* // *Astronomical Journal*, Vol. 134, Issue 5, pp. 1863 — 1869 (2007)
164. Lesch H., Biermann P.L., Reuter H.P., et al. *Formation of Molecular Gas Rings in Galaxies* // in «Dynamics of Galaxies and Their Molecular Cloud Distributions», ed. F. Combes and F. Casoli// *IAU Symposium*, Vol. 146, pp. 269 — 271 (1991)
165. Сильченко О.К., Липунов В.М. *Аккреция газовых дисков галактик. II. Учёт вязкости в диске, состоящем из гигантских молекулярных облаков* // *Астрофизика*, том 26, выпуск 3, с. 443 — 456 (1987)
166. Cowie L.L. *Cloud fluid compression and softening in spiral arms and the formation of giant molecular cloud complexes* // *Astrophysical Journal*, Part 1, Vol. 245, Apr. 1, pp. 66 — 71 (1981)

167. Ascasibar Y., Gavilán M., Pinto M., et al. *Understanding chemical evolution in resolved galaxies I. The local star fraction–metallicity relation* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 448, pp. 2126 — 2134 (2015)
168. Calzetti D. *Star formation rate indicators* // in «Secular evolution of galaxies», ed. J. Falcon-Barroso, J.H. Knapen // Cambridge University Press, p. 419 (2013)
169. Morales G., Martinez-Delgado D., Grebel E.K., et al. *Systematic search for tidal features around nearby galaxies. I. Enhanced SDSS imaging of the Local Volume* // Astronomy and Astrophysics, Vol. 614, id. A143, 16 pp. (2018)
170. Elmegreen B.G., Kaufman M., Thomasson M. *An Interaction Model for the Formation of Dwarf Galaxies and $10^8 M_{\odot}$ Clouds in Spiral Disks* // Astrophysical Journal, Vol. 412, pp. 90 — 98 (1993)
171. Ефремов Ю.Н. *О природе звёздных комплексов* // Письма в Астрономический Журнал, №5, с. 21 — 27 (1979)
172. Ефремов Ю.Н. *Возраст и размеры звёздных комплексов* // Письма в Астрономический Журнал, т. 8, № 11, с. 663 — 670 (1982)
173. Efremov Yu.N. *Star Complexes and Associations: Fundamental and Elementary Cells of Star Formation* // Astronomical Journal, Vol. 110, pp. 2757 — 2773 (1995)
174. Ефремов Ю.Н., Ситник Т.Г. *Молодые звёздно-газовые комплексы Галактики* // Письма в Астрономический Журнал, №14, с. 817 — 834 (1988)
175. Каспарова А.В. *Содержание молекулярного газа в дисковых галактиках: дисс. канд. физ.-мат. наук* // Москва: ГАИШ МГУ, 150 стр. (2014)