

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

УДК 520.8; 524.7

Катков Иван Юрьевич

**Свойства и происхождение изолированных
линзовидных галактик**

01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель

д. ф.-м. н.

Сильченко Ольга Касьяновна

Москва – 2014

Содержание

Введение	6
Газ в линзовидных галактиках	8
Актуальность	9
Цель диссертационной работы	10
Научная новизна	11
Практическая значимость	11
Положения, выносимые на защиту	12
Публикации	13
Апробация работы	14
Личный вклад	15
Структура и объем диссертации	16
Глава 1. Наблюдения и методика анализа спектральных данных	22
1.1. Спектральные наблюдения	22
1.1.1. Наблюдения на 6 метровом телескопе БТА	22
1.1.2. Наблюдения на SALT	24
1.2. Первичная редукция данных SCORPIO/SCORPIO-2	25
1.3. Вариации инструментального контура спектрографа	27
1.4. Вычитание вклада ночного неба	29
1.4.1. Методика деконволюции	30
Сравнение с интерполяцией	33
1.4.2. Методика интерполяции в частотном домене	35
1.5. Анализ редуцированных данных	36
1.6. Непараметрическое восстановление LOSVD	39
1.7. Двух-компонентный анализ спектров	43
1.8. Выводы	48

Глава 2. Выборка изолированных линзовидных галактик	50
2.1. Методический аппарат	50
2.1.1. Алгоритм кластеризации	50
2.1.2. Свойства изолированности галактик	52
2.2. Построение выборки изолированных линзовидных галактик . . .	54
2.3. Сравнение свойств изолированных линзовидных галактик с дру- гими типами галактик	56
2.4. Результаты спектральных наблюдений	65
IC 875	67
IC 1502	67
IC 1608	68
IC 3152	69
IC 4653	69
NGC 16	70
NGC 1211	70
NGC 2350	71
NGC 2917	72
NGC 3098	74
NGC 3248	74
NGC 3375	75
NGC 4240	75
NGC 6010	75
NGC 6615	76
NGC 6654	76
NGC 6798	77
NGC 7351	78
NGC 7693	78
UGC 4551	78

UGC 9519	79
UGC 9980	79
2.5. Выводы	80

Глава 3. Свойства звездных населений изолированных линзовидных галактик	81
3.1. Осреднение значений параметров звездных населений	81
3.2. Обсуждение результатов	82
3.2.1. Сравнение свойств звездных населений различных структурных компонентов галактик	82
Балджи vs. диски	87
Дисковые подструктуры: линзы и кольца	89
3.2.2. Эпоха формирования звездного компонента и ее длительность	92
3.2.3. Сценарий формирования	94
3.3. Выводы	96
Глава 4. Ионизованный газ в изолированных линзовидных галактиках	97
4.1. Статистика обособленных газовых структур	97
4.2. Дихотомия механизмов ионизации газа	98
4.3. Металличность газа	103
4.4. Происхождение газа	106
4.4.1. Соотношение “светимость-металличность”	110
4.5. Выводы	111
Глава 5. Следы внешней аккреции газа в галактиках IC 719 и NGC 4124	113

5.1.	Формирование противовращающегося звездного диска в галактике IC 719	113
5.1.1.	Введение	113
5.1.2.	Наблюдения	115
5.1.3.	Внутренняя кинематика и звездное население	116
	Однокомпонентная модель спектра	116
	Непараметрическое восстановление кинематики звезд	117
	Двухкомпонентная модель	117
5.1.4.	Ионизованный газ	124
5.1.5.	Обсуждение	127
5.2.	Кинематика и звездное население линзовидной галактики NGC 4124130	130
5.2.1.	Введение	130
5.2.2.	Наблюдения и обработка данных	133
	Спектральные наблюдения	133
	Фотометрия	135
5.2.3.	Результаты анализа	137
5.2.4.	Обсуждение	140
5.3.	Выводы	143
	Заключение	144
	Литература	148

Введение

Проблема сценариев формирования и эволюции галактик является ключевым вопросом современной внегалактической астрономии и наблюдательной космологии. Галактики формируются под воздействием огромного количества физических факторов, зачастую недостаточно детально известных теоретикам, и основной проблемой здесь является выделение наиболее важных из них, которые для данного морфологического типа галактик являются определяющими в ходе формирования и эволюции.

Тип линзовидных (S0) галактик был предложен Эдвином Хабблом как гипотетический в 1936 году, чтобы заполнить промежуточную позицию между эллиптическими и спиральными галактиками. Предполагалось, что объекты этого типа обладают крупномасштабными звездными дисками, как спиральные галактики, но не имеют заметных областей звездообразования и спирального узора в звездных дисках. Их гладкий красноватый вид и, вероятно, старый средний возраст звезд роднит их с эллиптическими галактиками. Промежуточное положение линзовидных галактик между чисто сфероидальными звездными системами и спиральными галактиками, у которых вклад балджа в общую светимость монотонно убывает с переходом от ранних типов к поздним (слева направо вдоль морфологической последовательности Хаббла), дает основание для естественного предположения, что S0-галактики должны обладать большими балджами. Однако детальные фотометрические исследования изображений S0-галактик показали, что балджи в них могут быть как очень большими, так и крошечными [1]. Ввиду этих результатов становится все более популярной старая идея Ван ден Берга [2] о том, что линзовидные галактики на самом деле на схеме Хаббла должны составлять последовательность, параллельную спиральным галактикам, и связь между (близким) положением на схеме S0(a,b,c) и спиральных галактик соответствующих подтипов задается отноше-

нием светимостей “балдж/диск” [3, 4]. Казалось бы, это изменение понимания эволюционного смысла последовательности Хаббла усиливает общепринятую точку зрения о формировании линзовидных галактик путем прекращения звездообразования в спиральных галактиках: эволюционную стадию трансформации галактики–“прародителя” к результирующей S0-галактике намного проще представить, когда у обеих галактик одинаковые соотношения “балдж/диск”. Однако следует заметить, что если вклад балджа в полную светимость у S0 галактики такой же, как у близкой ей на морфологической схеме спиральной галактики, то это оставляет возможность обратного преобразования, превращения S0-галактики в спиральную, что было бы совсем невозможно при наличии у S0-галактики бóльшего балджа.

В литературе обсуждается большое количество физических процессов, которые могли бы прекратить звездообразование в диске спиральной галактики. Перечислим некоторые из них: 1) прямые столкновения галактик [5, 6]; 2) приливные эффекты от темного гало скопления/группы [7]; 3) “насилие (harassment)” – гравитационное приливное воздействие галактик друг на друга при достаточно быстром пролете [8]; 4) лобовое давление горячей межгалактической среды (ram pressure) [9, 10]; 5) “голодание (starvation)” – прекращение звездообразования в результате исчезновения внешних резервуаров с газом, до того обеспечивавших аккрецию газа на диск галактики и питание процессов звездообразования [11]. Все эти процессы тесно связаны с плотным окружением галактик, потому что только скопления и богатые группы галактик с их массивными темными гало могут обеспечить необходимую плотность горячей межгалактической среды для лобового давления и близкое взаимное расположение галактик для возникновения приливных эффектов.

Известно, что линзовидные галактики являются доминирующим населением близких скоплений галактик, где их доля достигает 60% [12]. Однако и среди галактик поля число S0-галактик весьма заметно: по оценкам обзора APM [13],

в ближней Вселенной доля линзовидных галактик составляет около 15%, и они находятся на втором месте по частоте встречаемости после спиральных. Более того, существуют примеры совершенно изолированных линзовидных галактик [14]. Возникает (до сих пор не поднимавшийся) вопрос о происхождении таких галактик. Под действием каких физических механизмов они были сформированы, и насколько эти механизмы отличаются от тех, что работают в плотном окружении?

Несмотря на видимый дефицит механизмов морфологической трансформации изолированных галактик по сравнению с членами скоплений и групп, неправильно считать, что изолированные галактики эволюционируют абсолютно обособленно, как в сценарии “замкнутой системы (closed box)”; на это указывают некоторые недавние исследования. В недавней работе [15] было показано, что совершенно изолированная спиральная галактика раннего типа NGC 7217 за последние 5 млрд. лет испытала по меньшей мере два события падения спутников. В локально изолированной S0-галактике NGC 4124 мы также обнаружили следы малого мерджинга, который по всей видимости произошел 2–3 млрд. лет назад и спровоцировал центральную вспышку звездообразования (см. [16] и Главу 5).

Газ в линзовидных галактиках

До недавнего времени считалось, что линзовидные галактики по сравнению со спиральными имеют существенно меньшее количество холодного газа, однако в последних работах было показано, что атомарный и/или молекулярных газ по-видимому присутствует в большинстве линзовидных галактик ([17–19]), при этом менее чем в половине случаев протяженный диск холодного газа испытывает текущее звездообразование [20]. Бертола, Бузон и Зейлингер [21] показали, что в линзовидных галактиках кинематика газа достаточно часто обособлена

от звезд (decoupled) и что по крайней мере в 40% случаев газ в S0 имеет внешнее происхождение. Те же авторы в работе [22] основываясь на большей выборке S0 галактик обнаружили, что половина всех близких S0 галактик с протяженными структурами ионизованного газа имеют обособленную кинематику газа. В недавней работе Дэвиса и др. [23] на основе данных панорамного спектрографа SAURON было показано, что в S0 галактиках скопления Девы, всегда наблюдается совпадение кинематики газовой и звездной подсистем, в то время как линзовидные галактики в группах и в поле проявляют рассогласованную кинематику газа в 50% случаев. Такая статистика свойств газовой подсистемы в линзовидных галактиках свидетельствует о сильном влиянии окружения галактик. Для галактик, расположенных в разреженных областях космического пространства, ожидается высокая доля случаев рассогласования кинематики газа.

Таким образом, исследования свойств изолированных линзовидных галактик позволит сконцентрироваться на эволюционных механизмах, связанных либо с внутренними неустойчивостями дисков, либо только с внешней аккрецией газа и/или спутников. Следует заметить, что аккреция газа и/или события малого мерджинга могут не только остановить звездообразование в диске, но и наоборот, спровоцировать его [24, 25].

Актуальность

Одной из важнейших задач современной астрофизики является изучение вопросов формирования и эволюции галактик. Решение этой задачи сопряжено с выявлением наиболее значимых физических факторов и процессов, определяющих эволюционный путь галактик. Как описательные методы, так и детальные численные расчеты дают предсказания для свойств рассматриваемых галактик, поэтому сравнение их с наблюдениями является решающим факто-

ром при выборе сценария эволюции. Все общепринятые предлагаемые механизмы формирования линзовидных галактик заключаются в морфологической перестройке спиральных галактик в линзовидные в результате динамического влияния со стороны окружения [5–11]. Однако около 15% близких галактик поля составляют линзовидные галактики [13], также известны примеры сильно изолированных S0 галактик [14]. Для таких галактик эффекты окружения малоэффективны. Актуальность представленных в диссертационной работе исследований определяется недостатком глубоких наблюдений *изолированных* линзовидных галактик и отсутствием для этих объектов “ниши” в общепринятых сценариях формирования S0 галактик. Стоит отметить важность наблюдений методами глубокой спектроскопии на крупных телескопах, которые позволяют получить информацию не только о центральных частях галактик, но и уйти в область дисков – основных структурных компонентов любой дисковой галактики. Построение детального сценария формирования и эволюции галактики без учета соотношения свойств структурных компонентов невозможно.

Цель диссертационной работы

Исследование линзовидных галактик в сильно разреженном окружении, где динамическое влияние со стороны других галактик минимально и стандартные механизмы формирования линзовидной галактики, обсуждаемые в литературе, малоэффективны. Поставленная цель подразумевает решение следующих задач:

1. Выделение из близких галактик, которые являются наиболее подходящими для проведения детальных исследований, объектов, удовлетворяющих необходимым критериям изолированности. Составление выборки исследуемых галактик.

2. Проведение спектральных наблюдений на крупных оптических телескопах и анализ полученного материала современными методами, в том числе разработанными соискателем.

Научная новизна

- В настоящей работе впервые строго изолированные линзовидные галактики выделяются в обособленную группу для детального исследования методами глубокой оптической спектроскопии. Впервые выполнены такие исследования с использованием крупных оптических телескопов.
- Впервые проведены детальные исследования двух линзовидных галактик NGC 4124 и IC 719 со следами недавнего падения газа на их диски.
- Разработаны усовершенствованные алгоритмы вычитания вклада спектра ночного неба для данных длиннощелевой спектроскопии, которые эффективно учитывают вариации инструментального контура вдоль щели.
- Впервые разработаны методики анализа оптических спектров галактик с использованием эволюционных моделей звездных населений для случаев: а) непараметрического восстановления распределения звезд по скоростям на луче зрения и б) одновременного определения параметров кинематики и свойств звездных населений при двухкомпонентной декомпозиции спектра.

Практическая значимость

- Разработанная методика вычитания спектра ночного неба с учетом вариаций инструментального контура вдоль щели может быть применена для спектральных данных с любого спектрографа; кроме того, методику

можно адаптировать к данным многощелевой спектроскопии и к данным панорамной спектроскопии.

- Методика непараметрического восстановления распределения звезд по скоростям на луче зрения и методика одновременного определения параметров кинематики и свойств звездных населения при двухкомпонентной декомпозиции спектра могут быть использованы для исследования галактик с заподозренным противовращением звездных дисков, а также для определения свойств звезд балджа и диска в областях, где их вклад в интегральный спектр сопоставим.
- Построенная выборка изолированных линзовидных галактик может быть использована другими исследователями для изучения эффектов окружения.
- Полученные свойства и параметры изолированных галактик могут и должны быть использованы при построении космогонических сценариев формирования и эволюции внегалактических объектов.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика вычитания спектра ночного неба при длиннощелевых наблюдениях в случае вариаций инструментального контура спектрографа вдоль щели. Методика непараметрического восстановления функции распределения звезд по скоростям вдоль луча зрения и методика определения параметров кинематики и свойств звездных населений неразрешенных систем путем попиксельной аппроксимации спектров для сложного двухкомпонентного звездного населения.
2. Выборка из 281 линзовидной галактики местного Сверхскопления и его окрестностей, удовлетворяющих сильным критериям изолированности.

3. Измерения среднего возраста и металличности звездных населений структурных компонентов изолированных линзовидных галактик, свидетельствующие об отсутствии у изолированных линзовидных галактик выделенной эпохи формирования балджей и дисков.
4. Оценка доли изолированных линзовидных галактик с наличием масштабной подсистемы ионизованного газа и частоты встречаемости случаев кинематического рассогласования газа и звезд. Вывод о том, что наиболее вероятным источником газовой аккреции на изолированные линзовидные галактики является подсистема богатых газом карликовых спутников.
5. Детальные спектральные и фотометрические исследования двух линзовидных галактик — NGC 4124 и IC 719,— демонстрирующие свидетельства недавнего приобретения их дисками газа извне.

Публикации

Статьи в рецензируемых изданиях:

1. Katkov I. Yu., Sil'chenko O. K., Afanasiev V. L., **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Vol. 438, issue 4, p. 2798 (2014); *Decoupled gas kinematics in isolated S0 galaxies*;
2. Katkov I. Yu., Sil'chenko O. K., Afanasiev V. L., **The Astrophysical Journal**, Vol. 769, issue 2, article id. 105, 10 pp (2013); *Lenticular Galaxy IC 719: Current Building of the Counterrotating Large-scale Stellar Disk*;
3. Katkov I., Chilingarian I., Sil'chenko O., Zasov A., Afanasiev V., **Baltic Astronomy**, Vol. 20, p. 453 (2011); *A Complex Stellar Line-of-Sight Velocity Distribution in the Lenticular Galaxy NGC 524*;

4. Катков И. Ю., Сильченко О. К., Афанасьев В. Л., **Астрофизический Бюллетень**, том 69, номер 2, стр. 129 (2014); *Свойства звездных населенных изолированных линзовидных галактик*;
5. Засов А. В., Сильченко О. К., Катков И. Ю., Додонов С. Н., **Письма в Астрономический журнал**, том 39, номер 1, стр. 1 (2013); *Кинематика и звездное население линзовидной галактики NGC 4124*.

В сборниках трудов конференций и препринтах:

1. Katkov I. Yu., [arXiv:1403.4006](https://arxiv.org/abs/1403.4006), *Isolated lenticular galaxies: properties and evolution*;
2. Katkov I. Yu., Chilingarian I. V., ASPC 442, 143 (2010); *A new sky subtraction technique for low surface brightness data*;
3. Katkov I. Yu., Chilingarian I. V., IAUS 284, 69 (2012); *Multi-component parametric inversion of galaxy kinematics and stellar populations using full spectral fitting*.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на семинарах и конференциях:

1. Конференция Astronomical Data Analysis Software and Systems (ADASS-XX) (Boston, MA, USA), постер: “*A New Sky Subtraction Technique for Low Surface Brightness Data*”, ноябрь 2010
2. Конференция 8th Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics (Divchibare, Serbia), доклад: “*A Complex Stellar Line-of-Sight Velocity Distribution in the Lenticular Galaxy NGC 524*”, июнь 2011

3. 284-й симпозиум Международного Астрономического Союза “The Spectral energy distribution of galaxies” (Preston, UK), 2 постера: “*Multi-component parametric inversion of galaxy kinematics and stellar populations using full spectral fitting*”; “*NBursts+phot: parametric recovery of galaxy star formation histories from the simultaneous fitting of spectra and broad-band spectral energy distributions*”, сентябрь 2011
4. Конференция EWASS, SpS4 Structure of galaxy disks shaped by secular evolution and environmental processes (Rome, Italy), постер: “*Lenticular Galaxy IC 719: Current Building of the Counterrotating Large-scale Stellar Disk*”, июль 2012
5. Конференция Multi-Spin Galaxies (Naples, Italy), доклад: “*Decoupled gas kinematics in isolated early-type disc galaxies*”, сентябрь 2013
6. Семинар ESO Lunch Talks Seminar (Garching, Germany), доклад: “*Full spectral fitting techniques: shedding light on unresolved stellar populations*”, декабрь 2013

Личный вклад

Соискатель самостоятельно разработал методики вычитания вклада ночного неба в спектр при длиннощелевых наблюдениях с учетом вариаций контура вдоль щели, методику непараметрического восстановления кинематики звезд по абсорбционным спектрам. Разработка метода двухкомпонентной декомпозиции спектра велась на основе алгоритма попиксельной аппроксимации наблюдаемых спектров NBURSTS при совместном участии автора этого алгоритма – И. В. Чилингаряна (CfA, ГАИШ МГУ). Соискателем была выполнена первичная редукция спектральных данных SCORPIO/SCORPIO-2 и анализ всех спектральных данных методом попиксельной аппроксимации спектров. Получение

фотометрических оценок и Ликских индексов проводились О. К. Сильченко (ГАИШ МГУ); первичная редукция данных с телескопа SALT – А. Ю. Князевым (SAAO, ГАИШ МГУ). Анализ свойств окружения близких галактик и составление выборки изолированных линзовидных галактик проводились диссертантом при тесном взаимодействии с Д. И. Макаровым (САО РАН). Обсуждение, интерпретация полученных результатов и написание текстов публикаций – в равных долях с другими соавторами.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 172 страницы, включая 38 рисунков, 6 таблиц и 2 приложения. Библиография включает 174 наименования на 12 страницах.

Во **введении** приведен обзор литературы по рассматриваемой проблеме, обсуждается актуальность работы, цели и задачи исследования, научная новизна, научная и практическая ценность полученных результатов. Также формулируются основные результаты и положения, выносимые на защиту, и приводится список работ, в которых опубликованы основные результаты диссертации.

Глава 1 посвящена описанию наблюдений и методов обработки полученных данных для выборки исследуемых изолированных линзовидных галактик. В начале главы приводится описание режимов наблюдений на 6 метровом телескопе БТА Специальной Астрофизической Обсерватории РАН и на Большом Южно-Африканском телескопе (SALT, Southern African Large Telescope), действующем в Южно-Африканской Астрономической обсерватории (SAAO, Southern African Astronomical Observatory). Далее излагаются основные этапы первичной редукции наблюдательных данных, полученных на обоих телескопах в режиме длиннощелевых спектральных наблюдений. Описывается используемая нами методика попиксельной аппроксимации наблюдаемых спектров мо-

делями звездных населений NBURSTS для определения радиальных профилей лучевых скоростей звезд, дисперсии скоростей, возраста и металличности звездного населения и для выделения чисто эмиссионного спектра.

При обработке длиннощелевых спектров протяженных объектов очень низкой поверхностной яркости достаточно остро стоит проблема вычитания вклада в спектр ночного неба. Стандартные методы вычитания спектра ночного неба не всегда справляются со своей задачей в случае сильных вариаций инструментального контура вдоль щели, что приводит к появлению артефактов в спектре галактики, которые как мы показали, могут внести систематические ошибки в оценки металличности звездного населения и дисперсии скоростей звезд. Мы предлагаем несколько новых методов построения модели спектра ночного неба с учетом вариаций инструментального контура.

Также в главе излагаются разработанные нами методы непараметрического восстановления распределения звезд по скоростям на луче зрения (line-of-sight velocity distribution, LOSVD) и метод одновременного определения параметров кинематики и свойств звездных населений при двухкомпонентной декомпозиции спектра. Описывается пример использования обоих методик для исследования линзовидной галактики NGC 524, где удалось по спектру, полученному на БТА, выделить динамически горячий, медленно вращающийся компонент (балдж) на фоне быстро вращающегося динамически холодного диска и оценить их параметры звездных населений.

В **главе 2** излагается методический аппарат, разработанный в Лаборатории внегалактической астрофизики и космологии САО РАН и используемый нами для исследования статистических свойств окружения галактик Местного Сверхскопления и его окрестностей. Показано, что распределение галактик по индексу изолированности, характеризующему динамическое влияние одной галактики на другую, в плотном окружении качественно отличается от распределения галактик в разреженном окружении.

Была построена представительная выборка из 281 изолированной линзовидной галактики, объекты которой сравнивались по интегральным параметрам с галактиками других морфологических классов и окружений. Оказалось, что распределения изолированных галактик и S0 галактик в более плотном окружении по показателю цвета $B - J$ в целом очень похожи и существенных расхождений между ними не наблюдается. Из полученного списка изолированных S0 галактик были отобраны объекты для дальнейших детальных исследований с использованием крупных оптических телескопов БТА и SALT. Также в главе приводится краткое описание полученных результатов анализа длиннощелевых спектров для 22 детально исследуемых галактик.

В главе 3 мы представили результаты исследований звездных населений изолированных линзовидных галактик на основе спектральных наблюдений на 6 метровом телескопе БТА и на телескопе SALT Южно-Африканской обсерватории. Мы обнаружили, что средние возраста звездного населения в нашей выборке изолированных линзовидных галактик заполняют полный диапазон значений от 1.5 до > 15 млрд. лет, и, в отличие от S0-галактик в более плотных окружениях, изолированные галактики как правило имеют одинаковый возраст звезд в балджах и в дисках. Последнее утверждение позволяет сделать вывод о том, что для галактик в разреженном окружении механизмы омоложения балджа малоэффективны. Широкий диапазон возрастов звездных населений различных структурных компонентов изолированных S0 галактик, а также анализ обилия α -элементов в них, позволяет утверждать, что события звездообразования в изолированных линзовидных галактиках могли случаться в разное время и иметь различную длительность. Линзы и кольца повышенной звездной яркости, обнаруженные в 11 из 18 галактик (61%), имеют дисперсию скоростей звезд и химические свойства звездных населений, как правило, неотличимые от звездных населений дисков. При этом эпоха формирования колец (от 2 до 5 млрд. лет назад, $z = 0.2 - 0.5$) не зависит от возрастов дисков. Сделан

вывод, что вероятно оформление морфологического типа линзовидной галактики в полной изоляции критически зависит от возможных режимов аккреции внешнего холодного газа.

В **главе 4** рассматриваются свойства ионизованного газа в изолированных S0 галактиках. В 13 галактиках из 18 ($72 \pm 11\%$) обнаружено наличие протяженных эмиссионных линий, свидетельствующих о крупномасштабной структуре ионизованного газа, при этом в $46 \pm 14\%$ (6/13) случаев ионизованный газ оказался кинематически обособлен по отношению к звездам. Доля галактик с протяженными газовыми структурами вполне согласуется с оценками, приводимыми другими авторами. При этом наша оценка доли сильно изолированных галактик с рассогласованной кинематикой ионизованного газа подтвердила ранние подозрения о влиянии окружения на статистику ионизованных структур. Мы показали, что в случае изотропной аккреции газа такое процентное соотношение согласуется с предположением о внешнем происхождении газа во всех изолированных галактиках. Анализ диагностических диаграмм выявил, что ионизованный газ в исследуемых галактиках может быть возбужден как ударным механизмом или излучением пост-AGB звезд, так и фотоионизацией молодыми звездами. Вероятно возбуждение газа зависит от геометрии падения вещества на галактику, что проявляется в видимой дихотомии механизмов возбуждения. Для 10 галактик удалось получить оценки обилия кислорода в областях звездообразования, которые оказались близкими к солнечному значению и согласующимися со сценарием приобретения газа из карликовых спутников путем приливной аккреции, исключая механизм аккреции первичного газа из космологических филаментов. Отсутствие корреляции “светимость галактики—металличность газа” подтверждает сделанный вывод о происхождении газа.

Глава 5 посвящена детальному исследованию двух линзовидных галактик, IC 719 и NGC 4124, у которых мы обнаружили следы недавней аккреции газа.

Галактика IC 719 является уникальным объектом, потому что наряду с противовращающимся диском ионизованного газа, известным ранее, мы достоверно обнаружили и исследовали противовращающийся вторичный звездный диск. Исследование этой галактики было сделано не только на основе длиннощелевых данных, но также с привлечением данных панорамной спектроскопии со спектрографом SAURON. Противовращение газа к основному диску прослеживается до оптических границ галактики. Распределение интенсивностей эмиссионных линий показывает кольцевую структуру, а в соответствии с диагностическими диаграммами газ в кольце возбужден в основном излучением молодых звезд. Исследуя историю звездообразования методом двухкомпонентной декомпозиции спектров, который излагается в методической главе 1, мы также показали, что история аккреции газа на IC 719 заключалась в двух событиях, каждое из которых впоследствии инициировало вспышку звездообразования в диске галактики.

Вторую часть главы составляют результаты спектрального и фотометрического изучения локально изолированной линзовидной галактики NGC 4124, у которой обнаружен в центральной килопарсековой зоне наклоненный к основной плоскости диск ионизованного газа. По всей видимости, формирование этого диска связано с поглощением небольшого спутника, породившим также и позднюю вспышку звездообразования в центральной области, что подтверждается более низким средним возрастом (≈ 2 млрд. лет) звездного населения в центральной области по сравнению с возрастом звездного населения диска ($\approx 5 - 7$ млрд. лет).

В **заключении** обсуждаются основные результаты диссертации в контексте недавно предложенной О.К. Сильченко концепции формирования линзовидных галактик [26] и дальнейшие перспективы исследования.

В **приложении А** приводится таблица свойств окружения галактик из выборки 281 объектов. **Приложение В** состоит из иллюстративного материала

для каждой галактики из списка 22 объектов, которые наблюдались на БГА и SALT. Приводятся радиальные профили скорости звезд и газа, дисперсии скоростей звезд и газа, возраста и металличности звездного населения.

Глава 1

Наблюдения и методика анализа спектральных данных

В этой Главе описываются режимы наблюдений, процедура первичной редукции данных и применяемые методы извлечения физической информации об исследуемых галактиках из наблюдаемых оптических спектров.

1.1. Спектральные наблюдения

Наблюдения выборки исследуемых галактик проводились на 6 метровом телескопе БТА Специальной Астрофизической Обсерватории РАН (пос. Н. Архыз) и на 11 метровом Большом Южно-Африканском телескопе SALT (Southern African Large Telescope) Южно-Африканской Астрономической Обсерватории (г. Сазерленд, ЮАР) в период 2011–2013 гг в рамках наблюдательных программ, посвященных исследованию изолированных S0 галактик (рук. О. К. Сильченко (ГАИШ МГУ), соавторы: А. Ю. Князев (ЮААО, ГАИШ МГУ), И. Ю. Катков (ГАИШ и ФФ МГУ)). Журнал наблюдений приведен в Таблице 1.1, где указаны даты наблюдений, суммарные экспозиции, среднее качество атмосферы в течение экспозиции каждой галактики и позиционный угол щели.

1.1.1. Наблюдения на 6 метровом телескопе БТА

При наблюдениях на БТА спектральные данные для большинства галактик, за исключением NGC 6615 и NGC 6654, были получены с помощью нового фокального редуктора SCORPIO-2 [27], установленного в прямом фокусе телескопа, в длиннощелевом режиме с щелью размером $6' \times 1''$. При наблюдениях использовалась гризма VPHG1200@540, обеспечивающая спектральное

Дата	Название	T_{exp} [сек]	PA [deg]	Качество атмосферы [FWHM, arcsec]
Спектрограф RSS				
07.11.2012	IC 1608	620x3	350	2.0
04.01.2013	IC 1608	620x3	350	2.0
07.01.2013	IC 3152	600x3	223	2.0
14.01.2013	IC 3152	600x3	223	2.0
11.05.2012	IC 4653	1200x3	52	2.0
05.10.2011	NGC 1211	820x3	210	3.0
22.11.2011	NGC 1211	900x3	210	3.0
22.12.2011	NGC 1211	1030x2.73	210	3.0
25.12.2011	NGC 1211	1000x3	210	3.0
17.12.2012	NGC 2917	900x2	169	3.0
06.01.2013	NGC 2917	900x3	169	3.0
15.01.2013	NGC 2917	900x3	169	3.0
15.02.2013	NGC 2917	900x2.70	169	3.0
17.02.2012	NGC 3375	850x2.47	130	2.0
23.02.2012	NGC 3375	800x3	130	2.0
28.02.2012	NGC 3375	800x3	130	2.0
14.01.2013	NGC 4240	600x3	283	2.0
19.03.2013	NGC 4240	600x3	283	2.0
05.04.2013	NGC 6010	750x3	105	2.0
10.07.2012	NGC 7693	650x3	210	2.0
04.09.2012	NGC 7693	650x3	30	2.0
22.09.2012	NGC 7693	650x3	30	2.0
10.06.2012	UGC 9980	700x3	175	2.0
10.07.2012	UGC 9980	650	175	2.0
Спектрограф SCORPIO/SCORPIO-2				
23.04.2012	IC 875	900x3	-30	2.5
19.11.2011	IC 1502	900x3	52	2.5
20.11.2011	NGC 16	900x2	16	2.0
13.12.2012	NGC 2350	1200x5	-73	1.6
18.04.2012	NGC 3098	900x6	-90	1.2
22.04.2012	NGC 3248	900x3	-45	3.0
19.09.2012	NGC 6615	1200x6	-15	1.0
20.09.2012	NGC 6654	1200x5.5	0	1.3
20.11.2011	NGC 6798	1200x4.5	-30	2.5
19.11.2011	NGC 7351	1200x3	0	2.0
12.12.2012	UGC 4551	1200x7	-67	2.0
24.04.2012	UGC 9519	900x5	-105	2.0

Таблица 1.1. Журнал наблюдений галактик.

разрешение $\text{FWHM} \approx 4 \text{ \AA}$ в рабочем диапазоне 3800-7300 \AA . В этот спектральный диапазон попадают как сильные абсорбционные линии, такие как Mg, Fe, G-полоса, так и ряд эмиссионных линий ($\text{H}\alpha$, $\text{H}\beta$, $[\text{O III}]$, $[\text{N II}]$ и др.), что позволяет исследовать одновременно кинематику, возраст и химический состав звездного компонента и кинематику ионизованного газа, а вместе с тем проводить диагностику механизмов возбуждения ионизованного газа. В качестве приемника использовалась ПЗС матрица E2V CCD42-90 с размером чипа 2k x 4k, что при считывании в режиме биннинга 1x2 обеспечивает пространственный масштаб вдоль щели $0''.357$ на пиксель и обратную дисперсию 0.86 \AA на пиксель. В отличие от остальных галактик, NGC 6615 и NGC 6654 наблюдались в другой инструментальной конфигурации, а именно, с прибором SCORPIO [28] и с гризмой VPHG2300G, что обеспечило спектральное разрешение 2.2 \AA в диапазоне 4800–5600 \AA , а использование приемника EEV CCD42-40 с размером матрицы 2k x 2k дало тот же масштаб вдоль щели при дисперсии 0.37 \AA на пиксель. При наблюдениях щель была ориентирована вдоль больших осей галактик.

1.1.2. Наблюдения на SALT

Наблюдения на телескопе SALT проводились со спектрографом имени Роберта Стоби (RSS, Robert Stobie Spectrograph) [29]. В длиннощелевом режиме для большинства галактик использовалась щель шириной $1''.25$. Особенность телескопа SALT заключается в неподвижности его сегментированного сферического зеркала. Слежение за объектом в течении ночи происходит благодаря подвижной следящей системе-трекеру. С помощью этой системы объекты видны ограниченное время, поэтому полное время одного наблюдательного блока ограничены примерно одним часом. Большинство галактик снималось несколько раз в разные наблюдательные ночи. Спектральные наблюдения проводились с решеткой GR900, покрывающей диапазон 3760 – 6860 \AA с обратной дисперсией

$\approx 0.97 \text{ \AA}$ на пиксель и спектральным разрешением $FWHM = 4.7 - 4.8 \text{ \AA}$. Характерное качество атмосферы варьировалось от $1''.5$ до $3''.0$. Размер пикселя составляет $0''.129$ при эффективном поле зрения $8'$. Для разных наблюдений использовались различные режимы биннинга 1×2 и 1×4 , что дает пространственный масштаб $0''.258$ и $0''.516$ на пиксель, соответственно. После каждой наблюдательной ночи в качестве стандарта длин волн снимался спектр аргоновой лампы и спектральные калибровки плоского поля для учета попиксельных вариаций чувствительности. Также каждую ночь после наблюдений снимались спектрофотометрические звездные стандарты для относительной калибровки по потокам.

Первичную редукцию данных с телескопа SALT выполнил сотрудник Южно-Африканской Астрономической Обсерватории и ГАИШ МГУ Алексей Князев. Использовалась система первичной обработки наблюдений с телескопа SALT [30], после чего кадры нулевых экспозиций (байесы) и соединенные в мозаику длиннощелевые спектры с трех чипов ПЗС матрицы редуцировались таким же образом, как описано в работе [31]. Точность построения линейаризованного спектра проверялась по линии ночного неба [O I] $\lambda 5577$; характерный разброс вдоль щели составляет около 0.05 \AA .

1.2. Первичная редукция данных SCORPIO/SCORPIO-2

Первичная редукция данных со спектрографа SCORPIO/SCORPIO-2 была проведена с помощью оригинальных программ, написанных в среде IDL, и заключалась в поэтапном выполнении следующих шагов: учет тока смещения путем вычитания усредненных кадров с нулевой экспозицией (байесы); учет неравномерной засветки и неоднородностей чувствительности ПЗС-матрицы по кадрам калибровочной лампы плоского поля (флэт); удаление следов космических частиц с помощью алгоритма L.A.COSMIC [32], реализующего ла-

пласовский фильтр для детектирования частиц, и сложение экспозиций; построение двумерного дисперсионного уравнения по спектру калибровочной лампы с гелий-неон-аргоновым наполнением и дальнейшая линейаризация спектров с характерной точностью $0.02-0.06 \text{ \AA}$ в зависимости от используемой решетки; вычитание спектра ночного неба; перерасчет инструментальных потоков в абсолютные, при использовании кривой спектральной чувствительности, рассчитанной по спектрам спектрофотометрических звезд-стандартов. При наблюдениях в полутемное время вклад ночного неба достаточно велик и сильно меняется со временем. Поэтому в таких случаях вычитание ночного неба проводилось для каждой отдельной экспозиции перед их сложением, чтобы наилучшим образом подобрать параметры процедуры вычитания неба для каждой из них. Для каждой экспозиции спектра объекта были рассчитаны ошибки на основе пуассоновской статистики фотонов и шума считывания, которые далее синхронно преобразовывались в ходе каждого этапа первичной редукции данных.

Помимо спектров объектов и спектрофотометрических стандартов в процессе редукции данных были проанализированы спектры рассветного или сумеречного неба, которые по сути представляют собой солнечный спектр, свернутый с инструментальным контуром. Это позволяет определить поведение инструментального контура спектрографа вдоль щели спектрографа и вдоль направления дисперсии. Первое особо важно для вычитания вклада ночного неба, а второе для корректного определения параметров кинематики галактик. Обработка кадров рассветного неба проводилась таким же образом, как и данных для объектов. Детали о восстановлении контура и его использовании при анализе галактик приведены в параграфе 1.4.

1.3. Вариации инструментального контура спектрографа

Оптические схемы SCORPIO и SCORPIO-2 таковы, что форма инструментального (или аппаратного) контура LSF (Line Spread Function) существенным образом меняется вдоль щели и вдоль дисперсии. Информация о форме инструментального контура и его вариациях важны как для вычитания спектра ночного неба, так и для анализа спектров галактик. Спектр любого объекта (галактики, звезды, ночного или сумеречного неба, аргоновой лампы и т.д.) в данном положении на щели y - $S(\lambda, y)$ является сверткой “истинного” спектра $S_0(\lambda)$ с инструментальным контуром $\mathcal{L}(\lambda, y)$:

$$S(\lambda, y) = S_0(\lambda) * \mathcal{L}(\lambda, y). \quad (1.1)$$

Для определения вида $\mathcal{L}(\lambda, y)$ можно использовать спектр рассветного / сумеречного неба, который по сути представляет собой свертку спектра солнца с инструментальным контуром, или спектры калибровочной лампы для построения дисперсионного уравнения. В первом случае для определения $\mathcal{L}(\lambda, y)$ использовались программы нелинейной минимизации для аппроксимации наблюдаемого спектра солнечным спектром высокого разрешения ($R = 10,000$), взятым из библиотеки звездных спектров ELODIE3.1 [33], с параметризованным функцией Гаусса-Эрмита [34] ядром свертки:

$$y = \frac{v - v_r}{\sigma} \quad (1.2)$$

$$B(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot y^2\right] \cdot \left(1 + \sum_{i=3}^n h_i H_i(y)\right), \quad (1.3)$$

где v – это смещение в пикселях, длинах волн или км/с относительно длинноволнового решения, σ – характерная ширина инструментального контура, $H_i(y)$ – полиномы Эрмита i -го порядка, h_i – коэффициенты Эрмита. Обычно используются коэффициенты h_3, h_4 , очень редко привлекаются члены более высоких порядков. Если рассматривается спектр галактики и он интерполирован в логарифмическом масштабе, то для определения $\mathcal{L}(\lambda, y)$ можно использовать спектр галактики, который по сути представляет собой свертку спектра солнца с инструментальным контуром, или спектры калибровочной лампы для построения дисперсионного уравнения. В первом случае для определения $\mathcal{L}(\lambda, y)$ использовались программы нелинейной минимизации для аппроксимации наблюдаемого спектра солнечным спектром высокого разрешения ($R = 10,000$), взятым из библиотеки звездных спектров ELODIE3.1 [33], с параметризованным функцией Гаусса-Эрмита [34] ядром свертки:

рифмическую шкалу длин волн, то $\mathcal{L}(y)$ – это распределение звезд по скоростям на луче зрения (line-of-sight velocity distribution, LOSVD), а v и σ – это лучевая скорость и дисперсии скоростей, соответственно. Аппроксимация наблюдаемого спектра рассветного/сумеречного неба выполнялась с помощью алгоритма RPXF [35] реализованного на IDL. Для получения вариаций инструментального контура по полю процедура аппроксимации спектра и восстановления ядра свертки применялась для небольших участков спектра, получаемых разбиением полного спектра на 5 – 7 интервалов по длинам волн и на 30 – 50 интервалов в направлении поперек дисперсии. Если нужно непрерывное распределение параметров инструментального контура, например, при анализе спектров протяженных объектов, измерения в разных точках по полю интерполируются на произвольное положение полиномиальной поверхностью невысокой степени, либо двумерным сплайном. В случае определения инструментального контура по калибровочной лампе, аппроксимируются отдельные линии Гаусс-Эрмитовой функцией. Здесь для анализа очень важным является подбор подходящих линий, которые имеют достаточно высокую интенсивность, а главное являются одиночными линиями, а не блендами. Если ошибочно использовать бленды вместо одиночных линий можно получить смещенные оценки инструментального контура. На Рис. 1.1 показаны вариации формы инструментального контура спектрографа SCORPIO вдоль щели, для разных участков спектра по длинам волн, рассчитанные по спектру рассветного неба; на Рис. 1.2 показаны вариации параметров контура для спектрографа RSS телескопа SALT. В принципе, формы контуров, восстановленные по спектру рассветного неба и калибровочному спектру, могут отличаться из-за телецентризма, т.е. разной засветки в результате небольшого различия между углом сходимости пучка от калибровочной лампы и от телескопа. Однако анализ обоими способами показал согласованные результаты. Наличие возможности определения инструментального контура по калибровочной лампе очень востребовано, потому что при наблюдениях не всегда

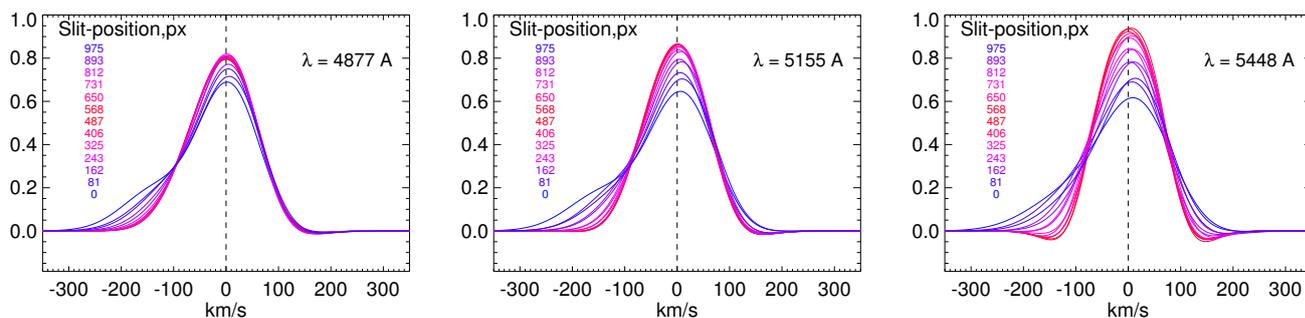


Рис. 1.1. Вариации формы инструментального контура спектрографа SCORPIO. Показаны вариации LSF вдоль щели для 3-х из 7-ми участков по длинам волн. Синие линии соответствуют форме LSF на краю кадра, красные – в центре кадра.

снимаются спектры рассветного/сумеречного неба, например, по причине ухудшившейся погоды.

1.4. Вычитание вклада ночного неба

Внешние области галактик, обладающие низкой поверхностной яркостью, содержат очень важную информацию для понимания свойств галактических дисков и гало из темной материи. Часто при анализе спектров абсорбционных линий областей низкой поверхностной яркости могут возникнуть систематические ошибки из-за вычитания спектра ночного неба, в частности в определении параметров звездного населения исследуемых объектов.

Самый простой способ учета неба заключается в вычитании из объекта спектра, который получается усреднением по внешней области кадра, где с точностью до ошибок нет вклада от галактики в спектр ночного неба. Для SCORPIO такой подход не применим, поскольку спектры ночного неба на краю и в центре кадра разные из-за разной формы инструментального контура (см. параграф 1.3 и Рис. 1.3).

В программных пакетах для обработки спектральных данных SCORPIO, разработанных в CAO РАН (В.Л. Афанасьевым и А.В. Моисеевым) предла-

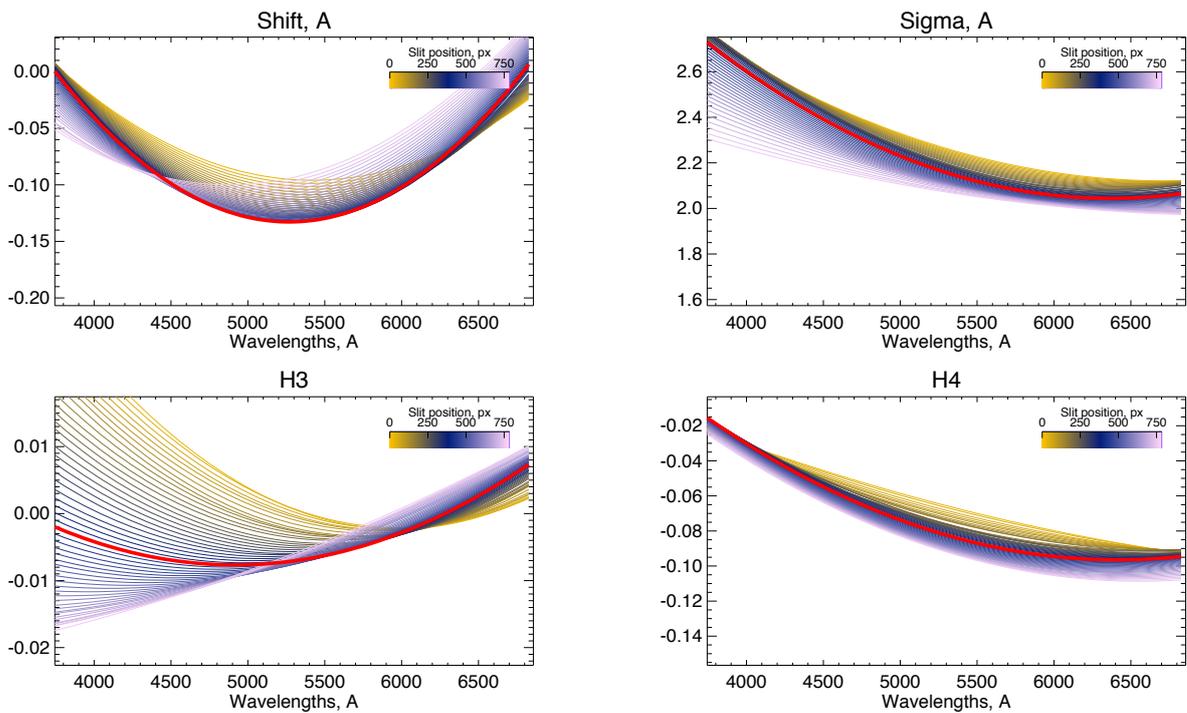


Рис. 1.2. Вариации параметров инструментального контура спектрографа RSS.

гается методика вычитания спектра ночного неба, которая в 0-м приближении учитывает изменение спектра ночного неба вдоль щели из-за вариаций контура. Эта техника заключается в экстраполяции спектра с внешних областей кадра на центр в каждом столбце изображения с помощью полиномов низких степеней (полиномы 2-й - 4-й степени). Далее эта методика будет фигурировать под названием “методика интерполяции”.

1.4.1. Методика деконволюции

В работе [36] кратко упоминается метод деконволюции, который позволяет учесть вариации контура при вычитании спектра неба. Эта техника в том виде, в котором она описана в [36], очень чувствительна к невычищенным следам космических частиц, битым пикселям и прочим артефактам ПЗС матрицы и первичной редукции. Самое главное, что эта методика требует параметризации формы инструментального контура. Использование стандартной параметризации в виде Гаусс-Эрмитовой функции (1.3) в ряде случаев может приводить к

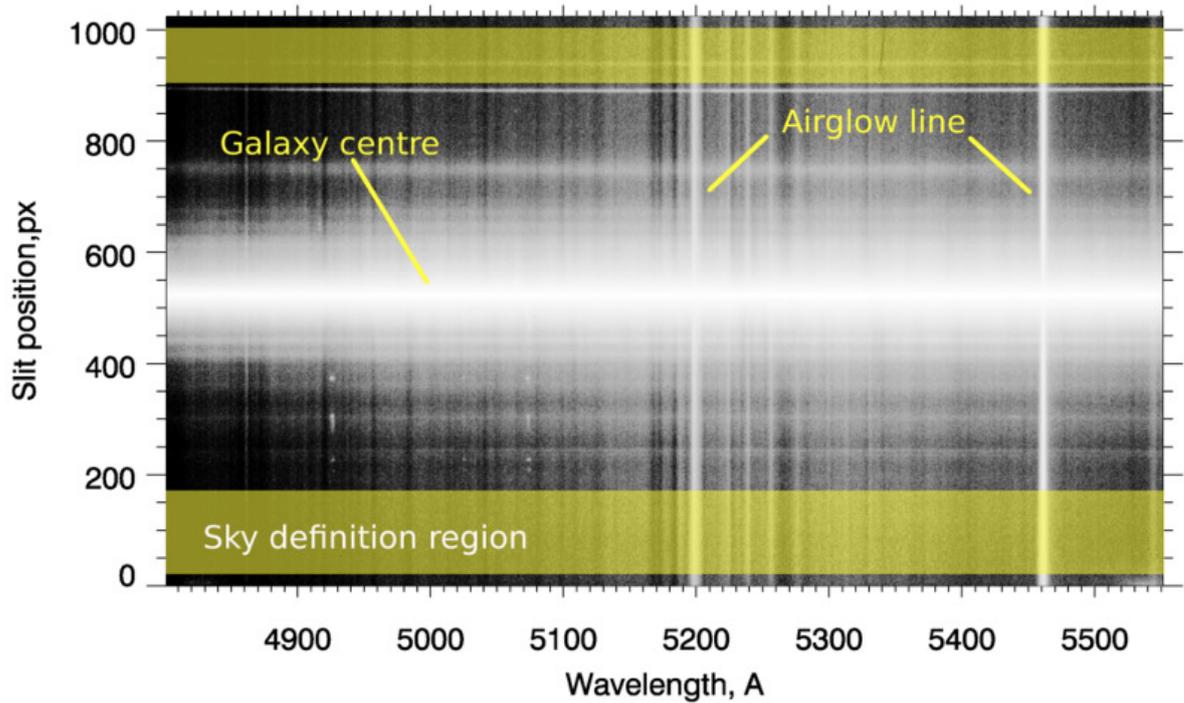


Рис. 1.3. Редуцированный спектр NGC 5440 до этапа вычитания спектра ночного неба (снят на БТА по программе А.В. Засова “Исследование динамического состояния дисков S0 галактик”). Видны сильные эмиссионные линии ночного неба и видно как вдоль щели меняется толщина этих линий за счет изменения формы аппаратного контура вдоль щели. Желтыми полупрозрачными полосами обозначены области, спектр в которых используется для построения спектра ночного неба.

нестабильной работе алгоритма. Для негауссовых контуров, в некоторых случаях Гаусс-Эрмитова параметризация может иметь отрицательные “крылья” (см. Рис. 1.1 (*справа*)), что при работе с преобразованием Фурье, на котором основан метод, приводит к неустойчивой работе и возникновению артефактов в виде биений и синусоидальных помех в построенном спектре неба.

Нами была существенно доработана методика построения спектра неба на основе деконволюции и представлена в работе [37]. В доработанном виде методика не требует явного задания формы аппаратного контура, достигнута стабильность и устойчивость алгоритма по отношению к невычищенным следам космических частиц и артефактов матрицы. Алгоритм состоит из двух принципиальных шагов:

1. **Би-сплайн представление.** Используя дисперсионное уравнение, можно отобразить в координатах “длина волны–отсчеты” двумерный нелинеаризованный спектр в малой области по щели (10–50 пикселей) в виде передискретизованного (*oversampled*) одномерного спектра. Далее этот спектр непараметрически аппроксимируется с помощью би-сплайнов. Детальное описание этой техники можно найти в работе [38]. Для корректного описания областей с сильным градиентом интенсивности, например, в области эмиссионных линий необходимо использовать неравномерную сетку узлов для би-сплайн представления. Таким образом, спектр, отягощенный шумами, не вычищенными следами космических частиц и другими артефактами, представляется в виде гладкой функции, которая может быть пересчитана на любую сетку по длинам волн. Построение передискретизованного спектра возможно, если длина волны хотя бы слабо меняется вдоль столбца изображения, другими словами, линии равных длин волн наклонены к вертикали. Поэтому би-сплайн представление имеет смысл использовать только для нелинеаризованных спектров. Именно использо-

вание этой техники делает работу предлагаемого алгоритма стабильной.

2. **Деконволюция** основана на использовании опорного двумерного спектра, в роли которого может выступать спектр калибровочной лампы или спектр рассветного неба, которые являются “носителями” информации об инструментальном контуре. Для спектра ночного неба $S(\lambda, y)$ и опорного спектра $R(\lambda, y)$ можно записать соотношение 1.1:

$$R(\lambda, y) = R_0(\lambda) * \mathcal{L}(\lambda, y); \quad S(\lambda, y) = S_0(\lambda) * \mathcal{L}(\lambda, y). \quad (1.4)$$

Используя теорему о свертке, отношение фурье-образов спектра неба и опорного спектра будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{FFT(S(\lambda, y))}{FFT(R(\lambda, y))} = \frac{FFT(S_0(\lambda))}{FFT(R_0(\lambda))}, \quad (1.5)$$

где FFT – обозначает Фурье преобразование. Это соотношение будет постоянным как в области, свободной от вклада объекта, где мы анализируем спектр неба (желтая полоса на Рис. 1.3), так и на объекте. Таким образом, используя это соотношение и опорный спектр в области на щели, где находится объект, мы можем получить спектр неба:

$$S(y, \lambda) = FFT^{-1} \left(\frac{FFT(S_0(\lambda))}{FFT(R_0(\lambda))} \cdot FFT(R(y, \lambda)) \right). \quad (1.6)$$

Сравнение с интерполяцией

На примере галактики NGC 5440 было произведено сравнение методики вычитания неба на основе интерполяции и деконволюции. На Рис. 1.4 представлен один и тот же участок двумерного спектра NGC 5440 после вычитания спектра ночного неба методикой интерполяции (*слева*) и деконволюцией (*справа*). Спектр неба был построен по одной и той же области (желтые полосы на Рис. 1.3). Видно, что после вычитания традиционной методикой остаются

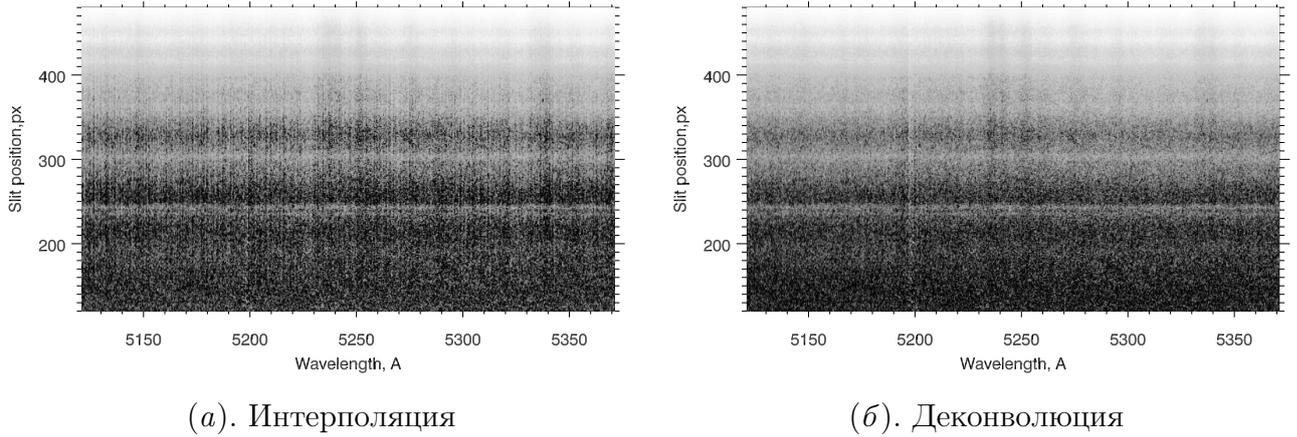


Рис. 1.4. Сравнение результатов вычитания спектра ночного неба разными методами. На обоих рисунках приведен один и тот же фрагмент двумерного спектра галактики NGC 5440 после вычитания спектра ночного неба методикой интерполяции (*слева*) и деконволюцией (*справа*). Для лучшей визуализации деталей на малых и больших интенсивностях к изображению применен фильтр гистограммного выравнивания интенсивности (histogram equalization).

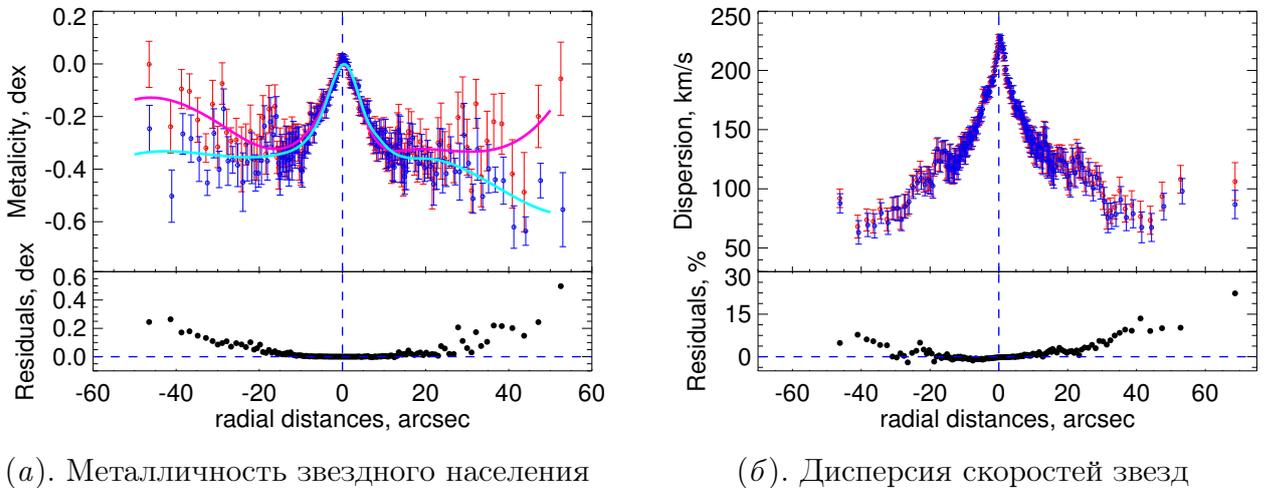


Рис. 1.5. Сравнение параметров звездного населения, полученных по одному и тому же спектру NGC 5440, но с разным вычитанием вклада ночного неба. Слева показаны радиальные профили металличности и разности между оценками, полученными по спектру, к которому применялись различные методики вычитания ночного неба: красные точки и линия – использовалась методика интерполяции, синие – деконволюция. Справа показан радиальный профиль дисперсии скоростей и разность оценок для разных методик вычитания неба. Разность в оценках выражена в процентах, по отношению к самой величине.

артефакты – вертикальные полосы, которые, как оказывается, могут систематически влиять на анализ параметров звездного населения и кинематики звезд.

После этапа вычитания вклада неба звездный спектр NGC 5440 был проанализирован с помощью техники аппроксимации спектров моделями звездных населений NBURSTS (см. параграф 1.5). На Рис. 1.5 показано сравнение профилей металличности и дисперсии скоростей звезд полученных по спектрам при разном вычитании неба. Видно, что во внешних, слабых областях галактики систематические отклонения в профиле металличности могут достигать до 0.3-0.4 dex (2-3 раза) и порядка 10-15 % в дисперсии скоростей звезд, что несильно отличается от точности оценок.

При анализе звездного населения слабых объектов ($\mu_B \gtrsim 23$ mag/arcsec) и/или внешних частей галактик необходимо очень внимательно подходить к вопросу вычитания спектра ночного неба. Присутствие в спектре артефактов от вычитания неба могут приводить к систематическому завышению, в первую очередь, оценок металличности, а так же оценок дисперсии скоростей звезд.

1.4.2. Методика интерполяции в частотном домене

Не всегда имеется возможность использовать опорные спектры для построения модельного спектра ночного неба. Спектры рассветного/сумеречного неба не всегда наблюдаются из-за меняющихся погодных условий. При использовании в качестве опорного спектра калибровочных экспозиций с эмиссиями (He-Ne-Ar, Ar лампы), надо иметь в виду, что инструментальный контур может отличаться от контура при наблюдениях объекта, например, из-за эффекта телецентризма или из-за вариаций контура в течении наблюдений. Поэтому мы предложили еще один способ построения спектра ночного неба, который основан на процедуре экстраполяции в частотном домене.

Как показал анализ спектров рассветного/сумеречного неба, форма инстру-

ментального контура спектрографов SCORPIO/SCORPIO-2 меняется достаточно сильно, но при этом монотонно вдоль щели. Если сделать Фурье-преобразование изображения вдоль дисперсии, то в области доминирования ночного неба фурье-образ так же будет меняться монотонно. Пользуясь этим фактом мы предлагаем использовать стандартную методику интерполяции полиномами для спектров в частотном домене. После построения модели фурье-образа в области объекта не составит труда перейти к обычному спектру обратным Фурье преобразованием. Фурье-образ изображения спектра является комплексной величиной, поэтому экстраполяцию нужно проводить отдельно для действительного и мнимого изображения. В таком варианте построения модели ночного неба не требуется опорный спектр рассветного/сумеречного неба, в то же время качество модели не уступает с методики деконволюции [37].

1.5. Анализ редуцированных данных

Дальнейший анализ заключался в аппроксимации наблюдаемых абсорбционных спектров галактик моделями звездного населения высокого разрешения. Для этого мы использовали программный пакет NBURSTS [39, 40], который является расширением методики попиксельной аппроксимации спектров PRXF [35]. Используемый подход позволяет извлекать информацию о звездном компоненте одновременно из всех доступных участков спектра, а не только из отдельных абсорбционных линий, как, например, происходит при определении Ликских индексов отдельных линий [41, 42] – индикаторов свойств звездных населений. Еще одно очень важное преимущество алгоритма попиксельной аппроксимации перед подходом Ликских индексов заключается в возможности анализировать галактики с сильными эмиссиями: можно легко исключать участки спектра с наиболее сильными эмиссионными линиями, оставляя участки, где светит исключительно звездное население. Кроме того, в работах [39, 40] пока-

зано, что метод попиксельной аппроксимации спектров дает в 1.5-2 раза более высокую точность определения параметров звездных населений по сравнению с подходом Ликских индексов.

Процедура определения параметров звездного населения заключается в нелинейной минимизации квадратичной разницы (χ^2) между наблюдаемым спектром и моделью. Модель представляет собой спектр синтетического звездного населения для данной истории звездообразования (SFH), свернутый с параметризованным распределением скоростей звезд по лучу зрения (LOSVD). Мы использовали синтетические спектры звездного населения, рассчитанные эволюционным кодом PEGASE.HR [43] на основе звездной библиотеки высокого разрешения ELODIE3.1 [33] для простой истории звездообразования в виде одной короткой вспышки (SSP – Simple Stellar Population). Параметрами звездного населения в SSP модели являются возраст вспышки звездообразования T (Гyr) и металличность $[Z/H]$ (dex), при этом начальная функция масс Солпитера является фиксированной в модели. Распределение скоростей по лучу зрения (LOSVD) задается в виде Гаусс-Эрмитового ряда [34], чтобы учесть возможные отклонения LOSVD от чистой гауссианы. Кроме того, в модель входит мультипликативный континуум, который позволяет учесть ошибки абсолютной калибровки потоков как в наблюдательных данных, так и в звездной библиотеке, на основе которой считались модели звездных населений, а кроме того учесть поглощение пылью. Для учета инструментального контура спектрографа перед минимизацией мы сворачивали сетку моделей звездных населений с определенным ранее инструментальным контуром. Наличие даже слабых эмиссионных линий и/или остатки от вычитания наиболее сильных линий ночного неба может смещать оценки параметров звездного населения, поэтому чтобы исключить этот эффект, мы маскировали области размером 10-15 Å вокруг них. В результате χ^2 -минимизации определяются следующие параметры: лучевая скорость v (км/с), дисперсия скоростей звезд на луче зрения σ (км/с), коэф-

фициенты, характеризующие негауссовость LOSVD, h_3 , h_4 , SSP-эквивалентные оценки возраста T (млрд. лет) и металличности $[Z/H]$ (dex) звездного населения.

Спектральные наблюдения проводились с длинной щелью, которая была ориентирована вдоль большой оси исследуемых галактик. Поскольку поверхностная яркость галактик очень сильно падает с расстоянием от центра, то спектры внешних областей галактики имеют низкий “сигнал-шум”. Для его увеличения мы использовали процедуру адаптивного биннинга, которая заключается в формировании бинов разного размера для накопления в каждом бине отношения “сигнал-шум” больше наперед заданного значения (обычно больше 20-30).

После построения модели звездного населения, т.е. абсорбционного спектра во всем диапазоне длин волн, мы вычитали ее из наблюдаемого спектра и получали чистые эмиссионные линии ионизованного газа, которые далее аппроксимировали гауссианами, и так мы анализировали кинематику и отношения потоков в линиях.

Используемые нами модели звездного населения PEGASE.HR рассчитаны на основе библиотеки звезд солнечной окрестности, обладающих солнечным обилием α -элементов, поэтому модели рассчитаны только для солнечного обилия $[\alpha/Fe]$. В настоящее время развиваются методы для построения моделей звездного населения с учетом несолнечного $[\alpha/Fe]$ (см. например работы [44] и [45]), однако получаемые модели рассчитываются на достаточно редкую и ограниченную сетку параметров и поэтому пока уступают по качеству моделям с солнечным обилием $[\alpha/Fe]$. Еще одной проблемой построения моделей с несолнечным обилием α -элементов состоит в неизвестном влиянии величины $[\alpha/Fe]$ на эволюционные треки звезд, которые лежат в основе построения эволюционных моделей. Однако, обилие α -элементов несет в себе важную информацию о длительности вспышке звездообразования, которая породила основную массу

звезд. Если вспышка была очень короткой, короче 1 млрд. лет, тогда в звездном населении будет наблюдаться избыток α -элементов по отношению к железу в сравнении с солнечным химическим составом; при длительной истории звездообразования отношение обилий железа и α -элементов, в частности магния, становится солнечным [46, 47]. Чтобы не упустить возможность оценить столь важный параметр – обилие α -элементов, в звездном населении исследуемых галактик, мы применили к спектрам помимо метода попиксельной аппроксимации более классический подход Ликских индексов, который позволяет оценить величину обилия магния Mg/Fe (элемента α -процесса). Мы определили для наших наблюдаемых спектров Ликские индексы $H\beta$, Mgb , $Fe5270$, $Fe5335$, определения которых брались из работ [41, 42], и сравнивая их с модельными значениями, рассчитанными в рамках детальных расчетов моделей синтеза звездных населений [48], получили оценку величины $[Mg/Fe]$.

1.6. Непараметрическое восстановление LOSVD

Основными структурными компонентами спиральных и линзовидных галактик являются вращающийся плоский диск и медленно вращающийся сфероидальный балдж. Звезды, принадлежащие этим подсистемам, имеют сильно отличающиеся кинематические характеристики. Результирующее распределение звезд по скоростям на луче зрения (LOSVD, далее обозначено как $L(v)$) в области, где вклад от диска и балджа сопоставим может сильно отличаться от чисто гауссового распределения. Еще одним примером где можно встретить очень сложный вид звездного LOSVD – это галактики с противовращением звездных дисков, исследование такой галактики IC 719 представлено в Главе 5 (см. также [49]).

В первом приближении негауссовость LOSVD можно учесть используя представление в виде Гаусс-Эрмитовой функции [34] (формула 1.3). Однако в неко-

торых случаях Гаусс-Эрмитова функция дает нефизичное представление звездного LOSVD. Во-первых, можно подобрать такие коэффициенты Эрмита h_3 , h_4 , которые будут соответствовать LOSVD с отрицательными “крыльями”. Кроме того, в случае, когда LOSVD имеет сложное распределение в виде двух максимумов, которое встречается у галактик с противовращением, Гаусс-Эрмитово представление также дает очень грубое приближение (см. Рис. 5.3 (справа)). Поэтому возникает необходимость для таких сложных, тем не менее встречающихся, случаев корректно восстанавливать распределения звезд по скоростям на луче зрения без привлечения Гаусс-Эрмитовой параметризации. Для этого мы разработали алгоритм непараметрического восстановления звездного LOSVD на основе метода попиксельной аппроксимации спектров, не требующий априорной информации об LOSVD.

Наблюдаемый спектр, приведенных к логарифмической шкале длин волн, является сверткой опорного спектра звездного населения со звездным LOSVD. Наш алгоритм заключается в непараметрическом восстановлении ядра свертки. В качестве опорного спектра мы предлагаем использовать модельный спектр звездного населения, параметры которого (возраст T и металличность $[Z/H]$) определяются аппроксимацией наблюдаемого спектра с помощью NBURSTS (см. параграф 1.5). Для учета влияния на спектр инструментального контура перед процедурой восстановления LOSVD происходит свертка опорного спектра с заранее определенным инструментальным контуром. Операцию свертки можно представить в виде матричного линейного уравнения $Ax = b$, где x - искомое распределение по скоростям (столбец), b - наблюдаемый приведенный к логарифмической шкале длин волн спектр (столбец), а A - это матрица, в каждой строке которой смещенный на один пиксель (бин по скорости) один и тот же опорный спектр. Количество пикселей спектра существенно превышает число пикселей (бинов) в искомом векторе x , таким образом записанное матричное соотношение является переопределенным. Существует много методов решений

и соответствующих программных средств для подобных уравнений. Мы использовали IDL реализацию¹ линейного алгоритма наименьших квадратов с ограничением параметров BVLS (The Bounded-Variables Least-Squares), предложенный в книге [50]. Использование именно этой программы позволяет корректно ограничить LOSVD только положительными значениями. Как известно, решение обратной задачи, в частности задача о поиске ядра свертки, очень чувствительна к шумам в наблюдениях, в нашем случае в спектре (вектор b). Когда уровень шумов в спектре высокий ($S/N > 100$), LOSVD восстанавливается очень уверенно, но на шумных данных решение получается нефизичным. Для стабилизации работы алгоритма со спектрами с шумами мы накладываем требование на гладкость искомого решения введением сглаживающего регуляризирующего члена $\mathcal{P}(L) = L^T \cdot \mathcal{D}_i^T \cdot \mathcal{D}_i \cdot L$, где \mathcal{D} дифференциальный оператор i -го порядка. В книге [51] (Гл. 19) приводится подробное описание как можно исходное матричное уравнение преобразовать для поиска решения, на котором будет выполняться минимум величины $\Omega(L) = \chi^2 + \lambda \mathcal{P}(L)$. Разностный оператор \mathcal{D} , по сути дает производную вектора L , а регуляризирующий член $\mathcal{P}(L)$ – это скалярная величина, которая тем больше, чем больше i -я производная от L . Таким образом, минимальное значение $\Omega(L)$ реализуется на таком решении задачи x , при котором удовлетворяется исходная задача и достигается необходимое условие гладкости (производную i -го порядка стремятся к нулю). Выбор оптимального значения параметра λ подробно обсуждается в [51]. Похожие методы уже использовались ранее для восстановления LOSVD (см. например [52]), но отличие и преимущества предлагаемого нами метода в том, что в качестве опорного спектра используется не спектры отдельных звезд какого-то конкретного типа, а модельный спектр звездного населения, которое лучшим образом описывает звездный состав галактики.

Реальные наблюдаемые спектры галактик отягощены поглощением пылью

¹ <http://www-astro.physics.ox.ac.uk/~mxc/software/bvls.pro>

и/или неучтенной спектральной чувствительностью матрицы и пропусканьем оптики и атмосферы. Все эти эффекты ведут к расхождению реально наблюдаемых спектров с модельными спектрами звездных населений. Чтобы учесть это расхождение мы реализовали итерационную процедуру, на каждом шаге которой происходит подгонка мультипликативного полиномиального континуума и восстановление LOSVD. После 3-4 итераций процедура сходится и дальнейшее изменение формы континуума и/или LOSVD прекращается. Также мы реализовали возможность маскировать некоторые участки в спектре, включение в анализ которых может привести к смещенным оценкам параметров. Это опция используется для исключения из подгонки областей сильных эмиссий, сильной абсорбционной линии-дублета натрия $\text{NaD}\lambda 5895$, которая не воспроизводится моделями звездных населений, потому что обусловлена межзвездным поглощением.

На Рис. 1.6 приведен результат Монте-Карло симуляций процедуры восстановления звездной LOSVD. Мы построили модельный спектр звездного населения с возрастом около 10 млрд. лет и металличностью -0.1 dex, свернули со сложным распределением звезд по скоростям (оранжевая линия на Рис. 1.6) и сгенерировали набор 200 спектров со случайными шумами на уровне “сигнал-шум” $S/N = 40$ и применили нашу методику восстановления LOSVD к каждой реализации спектра с параметра $\lambda = 0.01\lambda_e$ (при $\lambda = \lambda_e$ – вклад в функционал $\Omega(L)$ от χ^2 и регуляризирующего члена $\mathcal{P}(L)$ равны) и дифференциальным оператором 3-го порядка. Серое облако на Рис. 1.6 обозначает найденные распределения звезд по скоростям для каждой реализации спектра. Видно, что методика с выбранными параметрами, несмотря на небольшое смещение и разброс относительно истинного решения, в целом очень хорошо воспроизводит LOSVD даже на достаточно шумных данных.

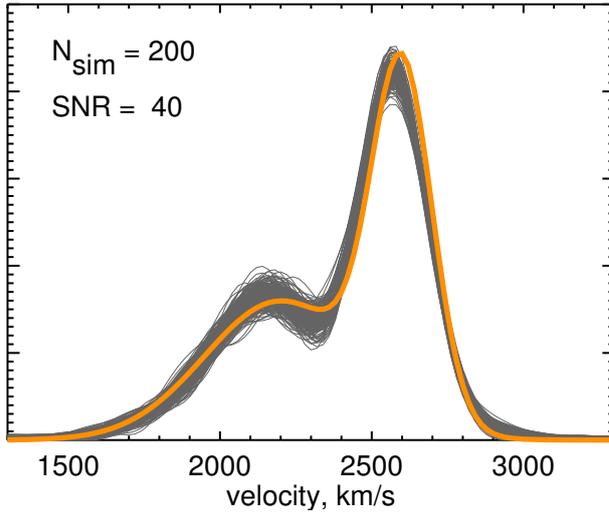


Рис. 1.6. Результат восстановления LOSVD для набора 200 синтетических спектров со случайной реализацией шума на уровне $S/N = 40$. Оранжевой линией показана модельное LOSVD, которое заложено в синтетические спектры; серыми линиями показаны восстановленные LOSVD для каждой реализации.

Впервые эту методику мы применили для анализа спектра яркой линзовидной галактики NGC 524 (см. работу Катков и др.[53]), которая обладает практически круглыми изофотами, но в то же время имеет очень высокую амплитуду лучевой скорости. В результате непараметрического восстановления звездного LOSVD, мы обнаружили у этой галактики две подсистемы звезд, одна соответствует горячему быстро вращающемуся диску, а вторая балджу (см. Рис. 1.7). Еще одно применение нашей методики было найдено при исследовании противовращающихся звездных дисков в линзовидной галактике IC 719 (подробности смотри Главу 5 и работу [49]).

1.7. Двух-компонентный анализ спектров

Предложенная выше (параграф 1.6) методика непараметрического восстановления распределения звезд по скоростям на луче зрения (LOSVD) позволяет обнаружить вклад в интегральный спектр динамически различных звездных подсистем, обладающие различающимися кинематическими свойствами. Однако разные звездные подсистемы вероятно обладают своей историей формирования, а следовательно и разными свойствами звездных населений, что неминуемо будет отражаться в разных спектральных особенностях. Поэтому

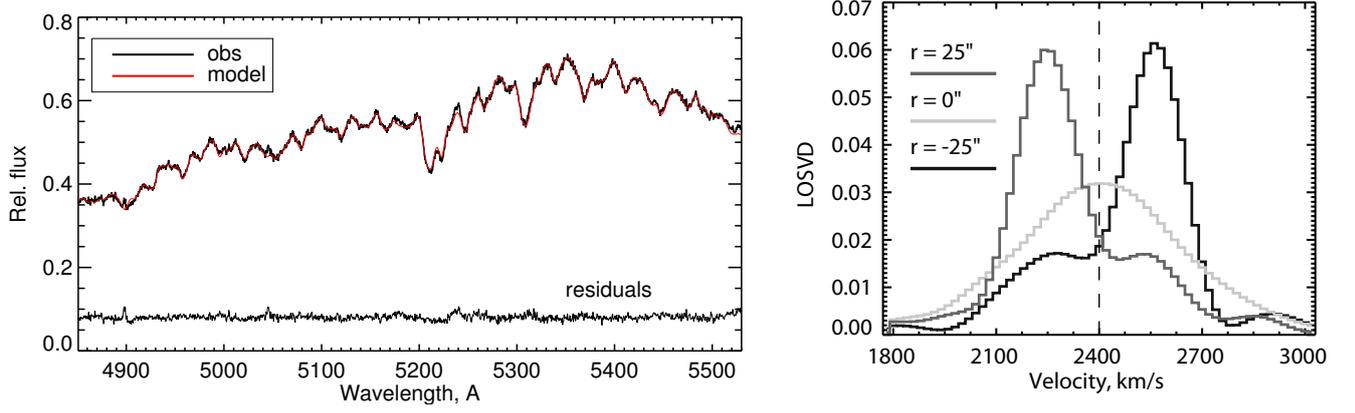


Рис. 1.7. Слева: сопоставление наблюдаемого спектра (черная линия) галактики NGC 524 на радиусе $R = 5''$ от центра и модельного спектра (красная линия), также приводится их разность; справа показан результат восстановления из спектра распределения звезд по скоростям на луче зрения (LOSVD) для галактики NGC 524. Разные линии соответствуют спектрам на разных расстояниях от центра галактики.

возникает желание для галактических систем, у которых удастся выделить по кинематике (по LOSVD) различные подсистемы, иметь возможность определить их свойства звездных населений. Первые попытки определения многокомпонентной динамики, связанной с многокомпонентным звездным населением, предпринимались в работе Де Брайн и др. [54], где авторы, используя звездные спектры, моделировали разные звездные населения.

Мы предлагаем более совершенное приближение, основанное на методике попиксельной аппроксимации спектров NBURSTS, где динамически отличающиеся звездные компоненты представляются составным звездным населением (в SSP моделями). В нашем подходе наблюдаемый спектр аппроксимируется моделью, состоящей из суммы спектров простого звездного населения (SSP) двух компонентов, каждый из которых свернут со своей LOSVD, параметризованной простой гауссианой. В этом случае поиск оптимальных параметров модели заключается в минимизации квадратичной невязки в следующем виде:

$$\chi^2 = \sum_{\lambda_i} \frac{[F_i - P_p \cdot \sum_j w_j \cdot S(T_j, Z_j) * L(v_j, \sigma_j)]^2}{\delta F_i^2}, \quad (1.7)$$

где F_i , δF_i – это наблюдаемый спектр в каждом i -м пикселе и его пуассоновский шум, преобразованный через всю систему редукции данных; $L(v_j, \sigma_j)$ – распределение звезд по скоростям на луче зрения (LOSVD) в виде гауссианы; $S(T_j, Z_j)$ – спектр (SSP) звездного населения для j -го компонента, для данного возраста T_j и металличности Z_j ; P_p мультипликативный континуум в виде суммы ряда из p полиномов Лежандра до $p - 1$ порядка, который корректирует разницу в континууме модельного и наблюдаемого спектров и коэффициенты которого определяется линейным методом наименьших квадратов на каждом шаге нелинейного минимизирующего цикла; w_j – вес каждого компонента. Мы рассматриваем вариант только двух компонентов, поэтому $j = 1, 2$. Поскольку общий уровень континуума регулируется мультипликативным континуумом P_p , то на деле вместо двух параметров w_1 и w_2 используется относительный вклад одного из спектров w .

Изначально в стандартном варианте пакета программ NBURSTS была заложена возможность построения модели спектра, состоящей из набора нескольких звездных населений, отсюда берет свое начало название NBURSTS – “N вспышек”. Добавление опции отдельной кинематики для каждого звездного населения с программной точки зрения было нами сделано достаточно просто, но возникли проблемы с устойчивостью поиска оптимального набора параметров модели. Процедура стала устойчивой только после включения параметра w в число параметров нелинейной минимизации, изначально w определялся в ходе линейной минимизации. Это было связано с предысторией развития пакета NBURSTS. NBURSTS был создан на основе алгоритма PPXF [35], который был разработан для определения звездной кинематики галактик и заключался в поиске LOSVD при аппроксимации наблюдаемого спектра линейной комбинацией спектров звезд. NBURSTS был идеологическим продолжением, где вместо набора спектров звезд был предложен набор модельных спектров звездных населений, параметры которых были включены в нелинейную минимизацию.

Определение вклада в интегральный спектр каждого компонента в случае аппроксимации спектра несколькими звездными населенными было использовано как в PRXF, где коэффициенты линейного разложения определялись внутри нелинейного цикла, минимизирующего χ^2 варьированием параметров кинематики и континуума. Дополнительными преимуществами включения w в набор параметров основного цикла является легкость контролирования этого параметра (допустимый диапазон варьирования, шаг варьирования, возможность зафиксировать параметр), а также возможность простого введения в минимизацию регуляризующего члена, зависящего от w , чтобы ограничить область искомых решений. Можно привести в пример два случая, которые были реализованы введением регуляризации: 1) Подавление до нуля одного из компонентов в случае если его вклад в интегральный спектр на уровне шума. Это можно достичь добавлением к χ^2 члена, который отличен от нуля при малых значениях w (к примеру меньше 0.05) и растет линейно с уменьшением w ; 2) Поиск решений близких к какому-то наперед заданному значению w . Если, например, из фотометрических данных известен примерный вклад каждого компонента, что не дает основания для строгой фиксации параметра, можно ввести регуляризацию, которая будет увеличивать добавку к χ^2 в виде $\sim |w - w_{phot}|$, где w_{phot} – примерная оценка относительного вклада одного из компонентов. Вторая опция была использована при декомпозиции спектров галактики NGC 524.

Впервые методика декомпозиции спектра галактики на два компонента с независимой отдельной кинематикой была нами применена для анализа спектра галактики NGC 524. По результатам этого анализа, мы обнаружили, что в центральной части этой галактики присутствуют быстро вращающаяся динамически холодная подсистема звезд, относящаяся по-видимому к диску, и динамически горячая медленно вращающаяся подсистема звезд с очень высокой дисперсией звезд ≈ 300 км/с. Параметры звездных населений также отличаются – компонент, соответствующий балджу, имеет очень старое звездное

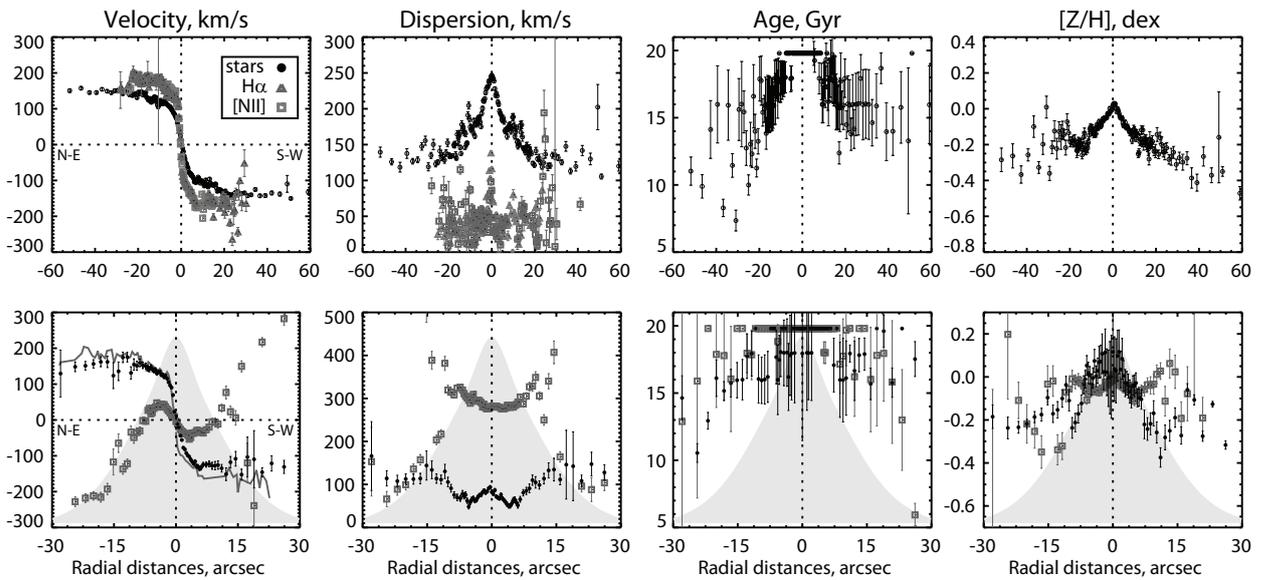


Рис. 1.8. *Верхний* ряд – результат анализа длиннощелевого спектра SCORPIO для NGC 524 в рамках однокомпонентного анализа спектра; *нижний* ряд – результат декомпозиции спектра на два компонента с разной кинематикой. Панели *слева направо*: радиальные профили лучевой скорости, дисперсии скорости, возраста и металличности.

население, оценки упираются в верхний предел диапазона сетки используемых моделей, а население диска чуть моложе около 16 – 17 млрд. лет. В центре, металличность диска немного выше балджа и падает с радиусом, где диск быстро становится более бедным металлами по отношению к балджу. В самых внешних частях галактики, возможно присутствует противовращающийся звездный компонент с быстрым вращением и дисперсией близкой к дисперсии основного диска.

Методику двух-компонентного анализа спектра была применена для изучения противовращающихся звездных дисков в линзовидной галактике IC 719, которой посвящена Глава 5 и работа [49]. Независимо от нас схожие методики анализа были представлены двумя научными группам. В работе Коккато и др [55] авторы применили методику декомпозиции на основе программы PRXF для исследования кинематики и свойств звездных населений противовращающихся звездных дисков в галактике NGC 5719, а позже эти авторы изучила звездные

населения еще двух хорошо известных примеров галактик с противовращением – NGC 3593 и NGC 4550 [56]. Вторая группа ученых тоже исследовала галактику NGC 4550 очень схожей методикой, основанной на PPXF (см. работу Джохнстон и др. [57]). Одним из авторов работы [57] является Мишель Каппеллари, один из двух авторов программного кода PPXF, который опосредованно через NBURSTS лег в основу и наших программ. Поскольку обе группы модифицировали программы PPXF то их анализ заключался в аппроксимации наблюдаемого спектра суммой двух компонентов с разной кинематикой, каждый из которых является линейной комбинацией набора звезд. Параметры звездных населений получают из анализа Ликских индексов отдельных абсорбционных линий в модельных спектрах отдельных компонентов. Если используемым набором звезд не удастся полностью воспроизвести спектры отдельных компонентов (mismatch problem), то анализ звездных населений в таком подходе даст смещенные оценки. В этом заключается методическое отличие нашей методики и ее преимущество – параметры населений определяются самосогласованно.

1.8. Выводы

В этой Главе были описаны режимы наблюдений на телескопах БТА и SALT и процесс первичной редукции наблюдательных данных. Особое внимание было уделено разработанным нами методам вычитания вклада спектра ночного неба в спектры объектов, показано к каким систематически эффектам может привести некачественное вычитание вклада неба. Описан метод анализа редуцированных спектров, который позволяет получить параметры кинематики и свойств звездных населений, которые обсуждаются в последующих главах. Разработан и протестирован метод непараметрического восстановления распределения звезд по скоростям на луче зрения и метод одновременного определения параметров кинематики и свойств звездных населений при двух-компонентной

декомпозиции спектра.

Глава 2

Выборка изолированных линзовидных галактик

В этой Главе описан методический аппарат, который позволил провести анализ свойств изолированности галактик в Местном Сверхскоплении и его окрестностях, представлены критерии выделения выборки изолированных линзовидных галактик, не имеющих в своем окружении сопоставимых по яркости влиятельных “соседей”, и представлена выборка из 22-х изолированных галактик, объекты которой были детально исследованы на 6-м телескопе БТА и телескопе SALT.

2.1. Методический аппарат

2.1.1. Алгоритм кластеризации

Для поиска подходящих объектов для дальнейших детальных исследований мы опирались на подход, который был разработан в Лаборатории внегалактической астрофизики и космологии САО РАН группой И.Д. Караченцева. Их подход был предложен в серии работ и заключался в проведении кластерного анализа к галактикам Местного Сверхскопления и его окраинам для выделения групп галактик [58], триплетов [59], пар [60] и изолированных галактик [61]. Приведем здесь краткое описание некоторых деталей их подхода.

Необходимые данные о видимых звездных величинах, морфологических типах галактик и лучевых скоростях были взяты из обновленной базы данных HyperLEDA¹ и базы данных NED² и дополнены измерениями лучевых скоростей из обзоров SDSS [62], 6dF [63], HIPASS [64], ALFALFA [65]. Кластеризация

¹ <http://leda.univ-lyon1.fr/>

² <http://ned.ipac.caltech.edu/>

проводилась для ≈ 13 тыс. галактик с лучевой скоростью относительно Местной группы $V_{LG} < 4000$ км/с и галактической широтой $|b| > 10^\circ$. Особенностью предлагаемого авторами алгоритма кластеризации является учет индивидуальных характеристик галактик, в частности, индикатора массы галактики – светимости в фильтре K ближнего инфракрасного диапазона. В случае отсутствия звездных величин в K фильтре использовались доступные оптические величины B, V, R, I и величины ближнего инфракрасного диапазона J, H для пересчета в K величины. На первой итерации алгоритма кластеризации объединение галактик в пару происходит в том случае, если виртуальная пара “ ik ” удовлетворяет условиям отрицательной полной энергии: $V_{ik}^2 R_{ik} / 2GM_{ik} < 1$ и нахождения ее компонентов внутри “сферы нулевой скорости”, т.е. галактики пары не удаляются друг от друга в Хаббловском расширении: $\pi H_0^2 R_{ik}^2 / 8GM_{ik} < 1$. Здесь V_{ik} и R_{ik} – разности лучевых скоростей и взаимные проекционные расстояния, M_{ik} – суммарная масса, выраженная через светимость в фильтре K . На последующих итерациях пары и структуры более высокой кратности (триплеты, группы) рассматриваются как единые объекты с массой равной суммарной массе всех компонентов и со скоростями и положениями равными средним значениям для всех компонентов. Итерации продолжаются до тех пор, пока не останется объектов, удовлетворяющих принятым критериям. Свободным параметром процедуры, предложенной авторами, является безразмерная величина κ с помощью которой происходит перерасчет K светимости галактики в ее массу: $M/L_K = \kappa M_\odot / L_\odot$. Этот свободный параметр был принят значению $\kappa = 6$, при котором в ходе кластеризации наилучшим образом воспроизводятся структура и вириальные массы близких хорошо изученных групп. Одним из промежуточных продуктов работы алгоритма является список попарных индексов изолированности между двумя любыми галактиками выборки. Индекс изолированности (II) между двумя галактиками – это положительная величина, характеризующая взаимное динамическое влияние обоих компонентов друг на друга. В случае несвязанной

пары II индекс больше нуля и равен числу раз, в которое нужно увеличить массу одного из компонентов, чтобы пара стала удовлетворять принятым критериям объединения. И наоборот, в случае связанной пары II меньше нуля и равен числу раз, в которое нужно уменьшить массу, чтобы пара стала несвязанной. В ходе кластеризации при $II \leq 1$ происходит объединение в физическую пару. Одно и то же значение индекса изолированности может реализоваться для широкой пары галактик сопоставимых светимостей и тесной пары, состоящей из гигантской галактики и близкого, но слабого спутника.

Авторы рассматриваемого подхода любезно предоставили нам всю промежуточную информацию, возникающую в ходе работы алгоритма кластеризации. Этот объемный массив данных содержит как параметры галактик, так и параметры характеризующие иерархическую структуру групп и окружение галактик поля, в том числе взаимные индексы изолированности для любой пары галактик. Предоставленные данные организованы в виде объектно-реляционной базы данных PostgreSQL.

2.1.2. Свойства изолированности галактик

Чтобы описать интегральные свойства изолированности галактик Местного Сверхскопления и его окрестностей мы, располагая предоставленной базой данных, для каждой галактики определили минимальное значение индекса II , т.е. величины, характеризующие наиболее влиятельного “соседа”. Для галактик, не входящих в состав групп или скоплений, II находился поиском наиболее тесной пары из таблицы попарных индексов. В случае галактик членов групп или скоплений под минимальным II понимается индекс изолированности на итерации, в которой рассматриваемая галактика объединяется с другим объектом или с уже образованным конгломератом галактик (пара/триплет/группа). Возможность посчитать минимальный индекс изолированности имеется благодаря

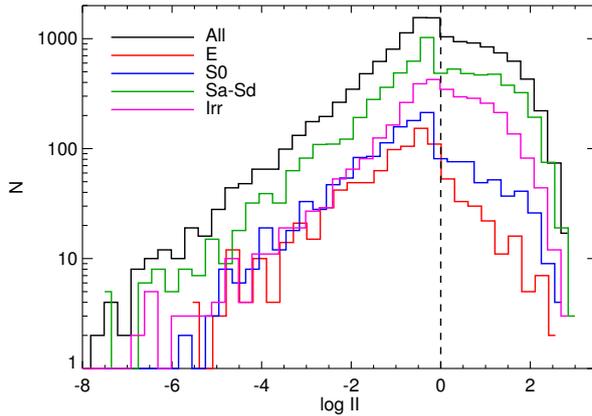


Рис. 2.1. Распределения галактик выборки по индексу изолированности II для разных морфологических типов.

наличию в базе данных детальной информации об объединениях на каждой итерации.

После того, как для каждой галактики была соотнесена минимальная величина индекса изолированности мы построили распределения галактик по II для различных морфологических типов (Рис. 2.1). Видно, что характер распределений качественно отличается в плотном окружении групп/скоплений ($II < 1$) и в поле ($II > 1$), но для различных морфологических типов очень похож. В случае плотного окружения распределение в логарифмических осях имеет линейный спад в область малых II , во втором случае наблюдается стремительный завал в сторону разреженного окружения. Такое поведение распределения II на больших значениях ожидается в виду отсутствия абсолютно изолированных галактик – всегда на каком-то расстоянии найдется “сосед”, поэтому сложно представить галактику с очень большим значением индекса II . В тоже время, легко представить очень тесную пару, например взаимодействующих, галактик, для которых индекс изолированности будет экстремально низким, что объясняет очень протяженный хвост распределения в область низких значений II .

На Рис. 2.2 представлены распределения галактик по морфологическим типам для подвыборок с разной степенью изолированности. Видны давно из-

вестные наблюдательные свидетельства (см. например [12, 66, 67]), что доминирующей популяцией в плотном окружении являются галактики ранних морфологических типов (E/S0), а в разреженном окружении доминируют поздние спиральные и иррегулярные галактики.

2.2. Построение выборки изолированных линзовидных галактик

В работе [61] И.Д. Караченцев и др. приводят каталог 520 наиболее изолированных близких галактик LOG (“Local Orphan Galaxies”). Для составления списка изолированных линзовидных галактик мы могли бы взять за основу LOG каталог, однако он содержит всего лишь 17 галактик ранних типов ($T < 0$), что не может претендовать на репрезентативную выборку. Поэтому на основе предоставленной информации мы отобрали из всех галактик Местного Сверхскопления выборку, объекты которой удовлетворяют следующим критериям:

- морфологический тип $-3 < T < 0$ (от E/S0 до S0a);
- все галактики в иерархии сверху (более яркие галактики), к которым рассматриваемая галактика может присоединиться в случае увеличения параметра кластеризации κ в II раз, имеют индекс изолированности $II > 2.5$;
- все галактики в иерархии снизу, которые потенциально могут присоединяться к рассматриваемой, имеют индекс изолированности $II > 2.5$ или $1 < II < 2.5$, но при этом разность в K фильтре должна быть более 3 звездных величин.

В результирующем списке оказалась 281 галактика. В Таблице 2 в Приложении А для каждой галактики приведены название, координаты, морфологический тип по базе NUGCLEDА, лучевая скорость относительно Местной группы

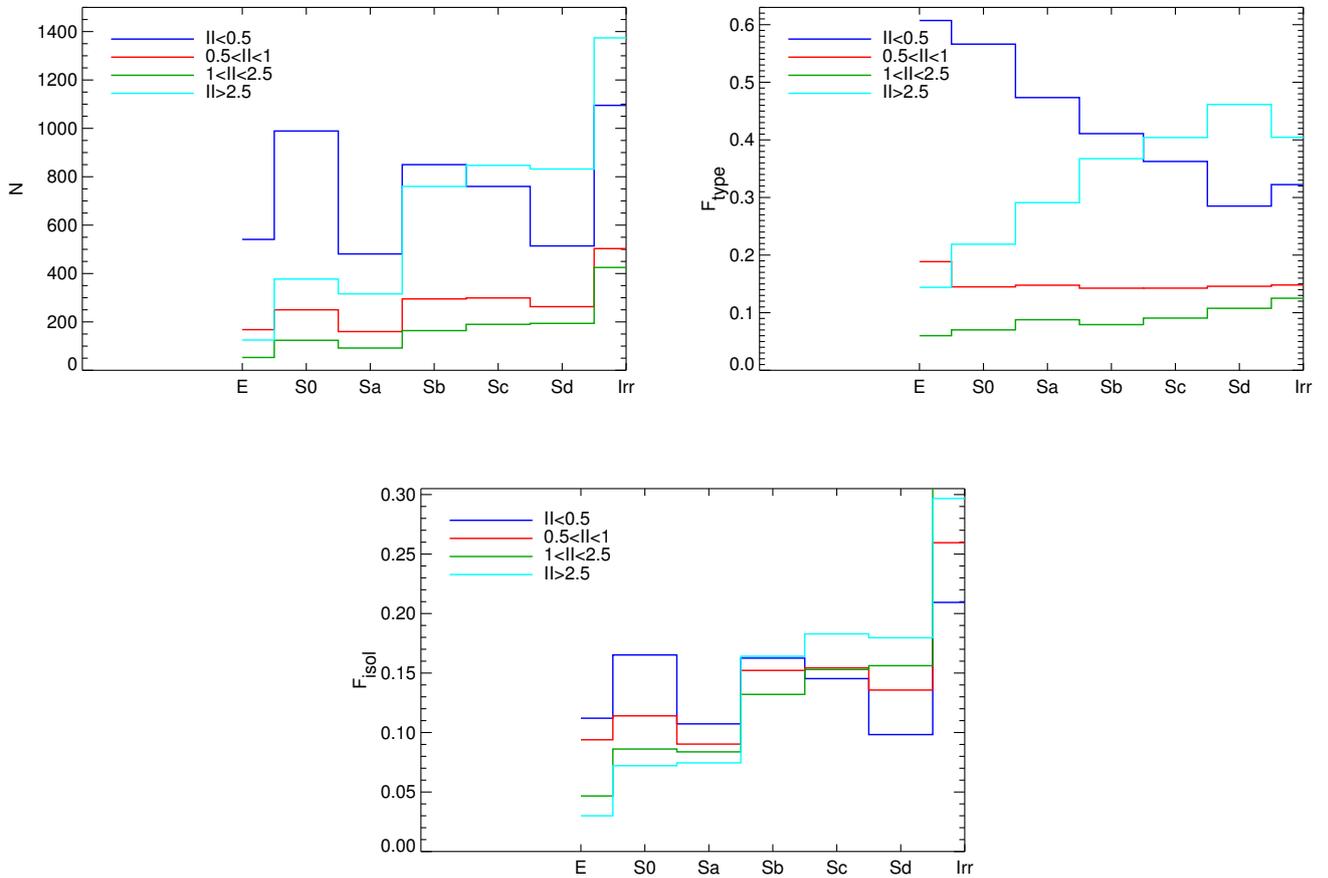


Рис. 2.2. Распределения галактик по морфологическим типам для разной степени изолированности. *Сверху слева* распределения без нормирования, на оси абсцисс отложено число галактик для разных морфологических типов. Цвет линий соответствует степени изолированности. *Сверху справа* – нормированные распределения на число галактик в каждом бине по морфологическому типу, т.е. по оси абсцисс приводится доля галактик в данном окружении. Демонстрируется населенность различных окружений для каждого морфологического типа. *Снизу* нормированные распределения на полное число галактик в бине по индексу изолированности II , что показывает разнообразие морфологических типов в различных окружениях.

V_{LG} , видимая звездная величина в K фильтре m_K , абсолютная звездная величина M_K , минимальное значение индекса изолированности II_{min} , кроме того данные о самых ближайших галактиках в иерархии сверху и снизу: название, разность лучевых скоростей с рассматриваемой галактикой δv , разность звездных величин δm_K , проекционное расстояние δr и индекс изолированности II .

2.3. Сравнение свойств изолированных линзовидных галактик с другими типами галактик

Чтобы охарактеризовать выборку изолированных линзовидных галактик мы сравниваем ее с дисковыми галактиками более поздних морфологических типов, $1 < T < 7$ (Sa-Sd), удовлетворяющими принятым критериям изолированности для линзовидных галактик. Кроме того, мы проводим сравнение с линзовидными галактиками, которые не попали в наш список изолированных объектов, в число которых входят как галактики поля, так и галактики групп и скоплений. Для сравнения выборок были построены гистограммы распределений галактик по абсолютным звездным величинам в фильтрах B и K , по цвету $B - J$, по потоку в линии 21 см атомарного водорода HI (Рис. 2.3). Необходимые параметры брались из предоставленной базы данных, однако не для всех объектов в базе имелись соответствующие величины. В Таблице 2.1 для каждой выборки приводятся полное число объектов, полнота выборок по рассматриваемым параметрам и средние значения параметров. Несмотря на разные условия окружения подкласс линзовидных галактик достаточно однороден по интегральным параметрам. Видно, что распределения изолированных линзовидных галактик и линзовидных галактик в более плотном окружении отличаются лишь незначительно. В недавней работе [68], где рассматривались изолированные галактики выборки AMIGA, также было отмечено, что на удивление изолированные и неизолированные галактики ранних типов (E/S0) име-

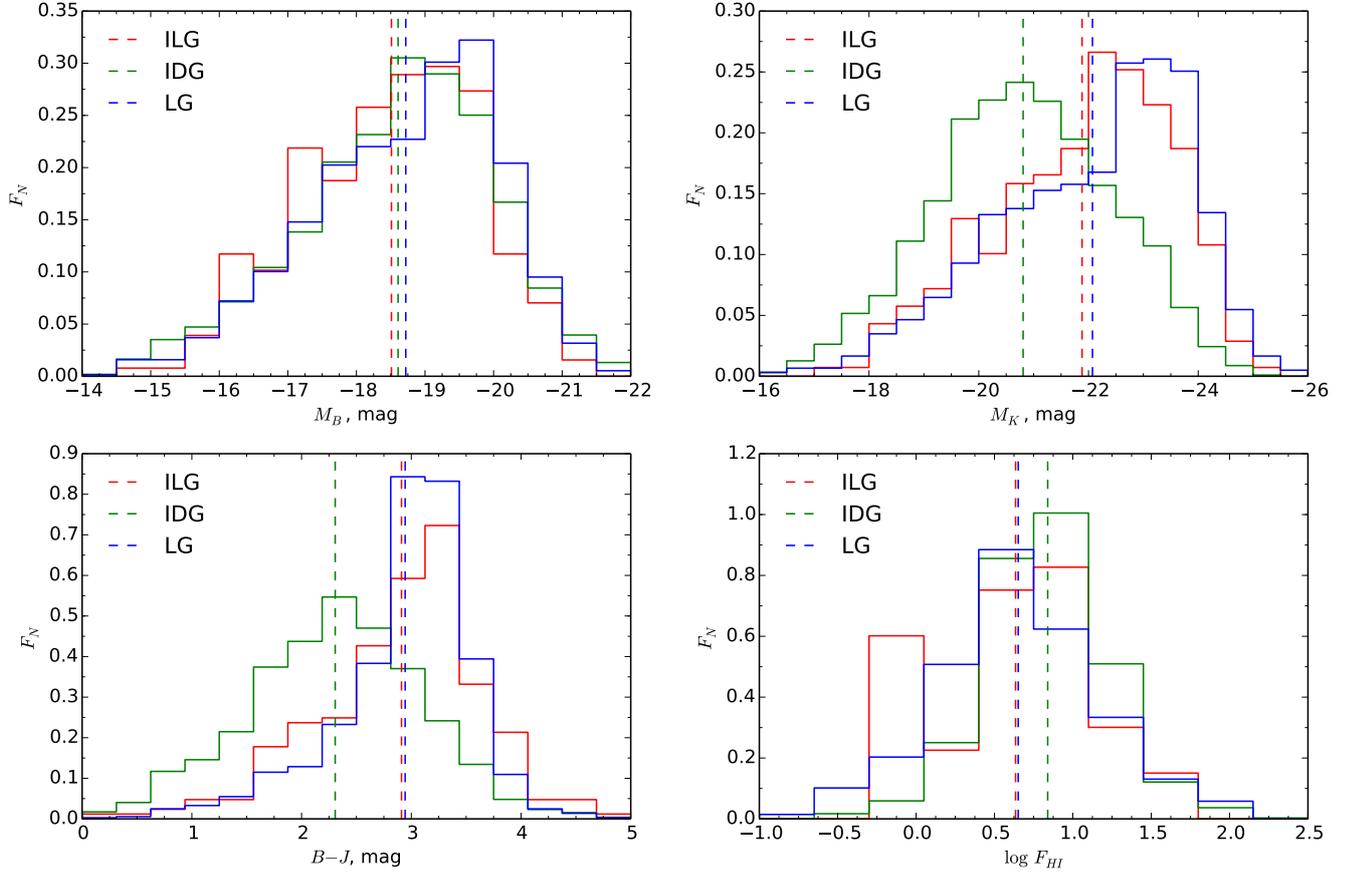


Рис. 2.3. В *верхнем* ряду показаны нормализованные гистограммы распределения галактик по абсолютным величинам в фильтрах B и K соответственно. В *нижнем* ряду представлены гистограммы распределений по цвету $B - J$ и по логарифму потока F_{HI} (Ян км с^{-1}) в радиолнии 21 см. атомарного водорода H I . На всех графиках красной линией обозначены изолированные линзовидные галактики (ILG), зеленой линией показаны изолированные дисковые галактики поздних типов (IDG) и синей линией обозначены линзовидные галактики в более плотном окружении (LG). Пунктирными линиями обозначены средние значения величин, приводимые в Таблице 2.1.

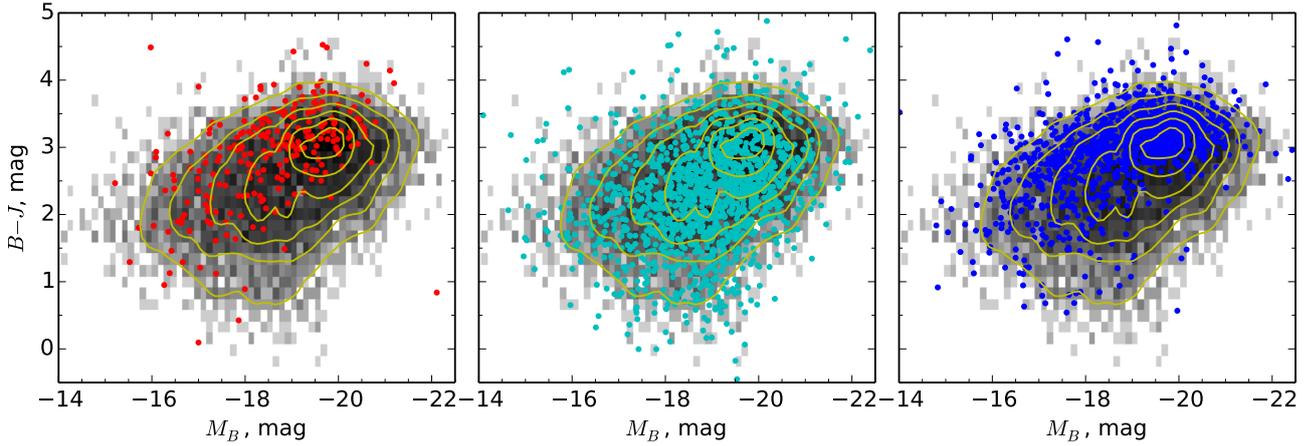


Рис. 2.4. Диаграмма “цвет-величина”. Серым цветом показана гистограмма, построенная для всех галактик базы с доступными соответствующими звездными величинами. Красные точки соответствуют изолированным линзовидным галактикам, голубые точки - это изолированные дисковые галактики поздних типов, синие точки - линзовидные галактики в более плотном поле.

ют схожие показатели цвета $g - r$. Кроме того, в работе [68] отмечалось, что изолированные галактики имеют более узкое распределение показателя цвета $g - r$, чем галактики в тесных и широких парах. Сильного различия по ширине распределений галактик по показателю цвета $B - J$ для изолированных линзовидных галактик и S0 галактик плотного окружения мы не отмечаем, однако распределение изолированных дисковых галактик выглядит заметно более широким, чем другие два распределения. Изолированные спиральные галактики обладают в среднем более голубым показателем цвета $B - J$ и немного более слабой звездной величиной в K фильтре.

Распределение галактик на плоскости показателей цвета, например для SDSS фильтров $(g - r) - (u - g)$ [69], имеют четкую бимодальность и распадаются на красную и голубую последовательности, последняя иногда называется “голубым облаком”. Эти последовательности также четко выделяются на диаграмме “цвет-величина” для галактик (см. например [70]). Красная последовательность в основном населена галактиками ранних морфологических типов

(E, S0, Sa), в то время как в “голубом облаке” находятся в основном галактики поздних типов (Sb, Sc, Sd) и иррегулярные галактики (Irr). На диаграмме показатель цвета ($B - J$) - абсолютная величина M_B (Рис. 2.4) изолированные линзовидные галактики (красные точки) по-большой части расположены на красной последовательности, которая примерно находится в области $B - J > 2.5$, и их положение заметно не отличается от линзовидных галактик в более плотном окружении (синие точки). На диаграмме “цвет-величина” изолированные спиральные галактики покрывают более широкий диапазон и составляют основное население “голубого облака”.

За исключением дисковых галактик поздних типов, для большинства линзовидных галактик в базе отсутствуют данные об излучении в линии 21 см атомарного водорода HI, поэтому малая статистика данных делает затруднительным сравнение распределений. Однако заметно, что распределение изолированных спиральных галактик немного смещено в сторону больших потоков, что проявляется в большем среднем значении величины $\log F_{21}$ (см. Таблицу 2.1).

	Изолированные линзовидные (ILG)	Изолированные дисковые (IDG)	Линзовидные в плотном окружении (LG)
Объем выборки	281	2073	1219
Параметр	Абсолютная зв. величина в B		
Число галактик с параметром	277 (98.6%)	2054 (99.1%)	1205 (98.9%)
Среднее значение параметра	-18.51	-18.61	-18.72
Параметр	Абсолютная зв. величина в K		
Число галактик с параметром	278 (98.9%)	2057 (99.2%)	1205 (98.9%)
Среднее значение	-21.88	-20.81	-22.07
Параметр	Показатель цвета $B - J$		
Число галактик с параметром	272 (96.8%)	1679 (90.0%)	1170 (96.0%)
Среднее значение	2.91	2.31	2.94
Параметр	Поток в линии 21 см $\log F_{21}$ ^a		
Число галактик с параметром	38 (13.5%)	1017 (49.1%)	197 (16.2%)
Среднее значение	0.63	0.84	0.65

Таблица 2.1. Сравнение выборок галактик.

^a Величина F_{21} измеряется в единицах Ян км с⁻¹.

Таблица 2.2. Таблица

Назв.	Морф. тип		V_{sys} [км/с]	M_K [mag]	M_B [mag]	Соседи "сверху"			Соседи "снизу"						
	HyperLEDA	NED				Назв.	δM_K [mag]	δV [км/с]	d [Мпк]	II	Назв.	δM_K [mag]	δV [км/с]	d [Мпк]	II
IC0875	S0	S0	2913	-22.71	-19.47	NGC4814	1.03	278	2.0	31.0	PGC046033	-3.95	-48	0.8	4.2
						NGC5218	1.18	-121	3.9	107.9	SDSSJ13.+58..	-3.58	-126	1.0	10.3
						NGC5322	2.24	993	2.9	126.9	NGC4964	-0.85	268	1.3	57.3
						NGC5430	1.49	-224	4.3	150.4	NGC5109	-1.56	660	0.3	78.6
						UGC08237	0.32	-86	3.4	179.2	SDSSJ12.+59..	-4.27	-83	2.1	84.0
IC1502	S0-a	S0 ⁺	2237	-23.70	-19.61	IC0356	1.79	1131	8.3	158.6	UGC12247	-4.96	298	1.3	46.2
						NGC3031	-0.39	2135	9.8	280.1	UGC12504	-4.32	-461	1.2	64.6
						NGC1184	0.93	-264	6.6	311.8	UGC12921	-2.43	-477	1.3	73.5
						IC0342	-0.36	1997	5.9	376.8	UGC12160	-1.13	404	1.7	74.2
						NGC6951	1.07	517	7.9	473.3	UGC12069	-2.05	-405	2.3	106.8
IC1608	S0-a	(R)SA0 ⁺ (r) pec?	3446	-23.80	-19.81	IC1657	0.16	-99	2.9	43.5	ESO351-028	-3.10	-14	1.5	12.8
						NGC0424	0.44	-8	3.7	59.9	ESO352-015	-2.37	-79	2.2	35.4
						NGC0491	0.40	-400	3.9	88.5	PGC073809	-3.76	145	2.6	64.6
						NGC0253	0.61	3169	4.3	184.8	ESO352-019	-3.24	-108	2.7	69.3
						NGC1399	1.33	2133	17.9	325.2	ESO352-006	-1.47	-484	2.6	130.5
IC3152	E-S0	SA0 ⁻	3025	-24.04	-20.28	NGC4087	0.20	-49	2.3	16.8	IC3289	-0.56	-64	0.9	1.3
						ESO507-025	0.77	18	5.2	39.8	PGC784557	-3.33	152	0.9	4.4
						ESO506-004	0.46	-763	1.6	73.2	ESO506-002	-0.84	-685	0.1	8.0
						NGC4105	0.51	1416	2.7	96.3	ESO506-011	-1.77	-35	1.8	15.2
						NGC4696	1.82	291	11.2	104.7	PGC788397	-4.78	-128	1.8	17.3
IC4653	S0-a	SB0/a(r) pec?	1748	-21.84	-19.13	NGC6300	1.74	806	0.7	78.6	None	-4.84	335	0.3	73.2
						NGC6305	1.97	-771	1.0	153.1	ESO138-014	-0.90	409	1.0	215.9
						NGC6744	2.30	1043	3.5	191.6	ESO138-024	0.62	-968	0.8	473.4
						ESO101-014	2.04	-544	2.3	201.9	PGC165962	0.07	-1594	0.4	569.5
						NGC5128	2.32	1453	9.3	219.0	ESO140-006	-1.35	-487	2.8	887.4
NGC0016	E-S0	SAB0 ⁻ - edge-on	3300	-24.51	-20.56	NGC7817	-0.19	745	5.0	214.2	PGC000446	-5.44	-140	0.6	1.9
						NGC0253	-0.10	3024	22.4	1029.7	UGC12873	-5.04	-212	2.3	22.8
						NGC3031	-1.20	3198	30.6	1212.8	PGC087206	-5.74	-513	4.2	191.4
						NGC7619	1.07	-689	19.0	1296.4	PGC001153	-6.73	-636	4.8	312.1

Таблица 2.2. Таблица

Назв.	Морф. тип		V_{sys} [км/с]	M_K [mag]	M_B [mag]	Соседи "сверху"				Соседи "снизу"					
	HyperLEDA	NED				Назв.	δM_K [mag]	δV [км/с]	d [Мпк]	II	Назв.	δM_K [mag]	δV [км/с]	d [Мпк]	II
						NGC7331	0.41	2179	10.9	1339.5	UGC00285	-3.50	872	3.1	459.0
						NGC1153	-0.69	58	3.6	56.3	SDSSJ03.+00..	-6.10	195	1.1	12.6
NGC1211	S0-a	(R)SB0a(r)	3238	-24.03	-20.46	NGC1032	0.49	525	5.0	141.2	UGC02535	-4.88	231	1.8	30.9
						NGC1090	-0.32	429	3.7	141.8	PGC011756	-1.93	-352	1.4	32.5
						NGC1320	-0.52	519	3.6	142.8	PGC011609	-3.84	531	0.5	39.5
						NGC1068	1.20	2055	3.2	214.9	UGC02479	-4.07	346	1.3	41.4
						NGC2339	1.17	-396	3.1	135.1	UGC03775	-4.64	-244	0.3	12.1
NGC2350	S0-a	S0/a	1774	-22.73	-19.02	NGC2365	0.68	-429	4.8	400.0	UGC03691	-0.71	-327	1.5	81.7
						NGC3031	0.58	1672	13.9	402.6	PGC097214	-2.60	-298	1.7	102.4
						NGC4472	2.55	901	23.7	635.7	PGC2807004	-5.45	40	2.6	172.1
						IC0342	0.62	1534	14.9	1054.5	None	-5.37	-154	3.7	470.6
						NGC2974	2.21	1758	1.5	106.7	PGC027331	-1.94	-210	1.7	33.5
NGC2917	S0-a	S0 ⁺	3452	-23.34	-20.34	NGC3042	0.73	-121	4.8	213.6	PGC027281	-0.31	-277	1.9	46.3
						NGC4472	1.94	2579	24.0	275.0	UGC05083	-1.44	-88	2.4	61.6
						NGC2858	0.23	5	5.2	355.8	UGC04996	-2.97	168	2.7	106.5
						NGC2713	1.84	-266	9.0	405.9	PGC028175	-2.15	-173	3.1	145.3
						NGC3190	1.46	117	1.4	4.1	PGC2806869	-4.98	58	0.4	1.9
NGC3098	S0-a	S0 edge-on	1305	-22.17	-18.90	NGC3245	1.22	29	2.2	27.1	IC2520	-1.54	151	0.8	24.1
						NGC3227	0.95	271	1.9	40.4	UGC05588	-2.09	95	1.3	33.0
						NGC2964	1.03	44	2.8	49.0	PGC029347	-2.53	10	1.3	37.5
						NGC3379	1.62	544	4.0	53.3	NGC3026	-1.43	-109	1.5	38.5
						NGC3190	1.81	168	0.8	2.5	PGC166105	-5.03	252	0.1	13.2
NGC3248	S0	S0	1356	-21.82	-18.06	NGC3301	0.78	116	0.7	6.3	PGC2806870	-5.42	-115	0.7	16.0
						NGC3245	1.57	80	1.9	15.9	PGC030270	-3.60	-78	1.0	24.1
						NGC3227	1.31	321	0.9	21.4	UGC05588	-1.74	145	0.9	35.6
						NGC3379	1.97	594	2.9	38.5	PGC031387	-2.52	47	1.2	36.9
						IC0630	0.81	236	1.7	40.3	PGC032548	-2.86	-76	0.6	2.0
NGC3375	S0	(R)SA0 ⁰ ?(rs)	2167	-22.60	-19.49	NGC4472	2.67	1294	12.7	74.2	PGC984392	-3.64	-51	0.9	7.9
						NGC3311	2.60	-1268	11.8	201.2	NGC3321	-0.63	-70	1.4	19.1

Таблица 2.2. Таблица

Назв.	Морф. тип		V_{sys} [км/с]	M_K [mag]	M_B [mag]	Соседи "сверху"				Соседи "снизу"					
	HyperLEDA	NED				Назв.	δM_K [mag]	δV [км/с]	d [Мпк]	II	Назв.	δM_K [mag]	δV [км/с]	d [Мпк]	II
						NGC3672	0.72	536	3.9	229.0	PGC032681	-1.26	-67	1.5	31.3
						NGC2974	2.95	473	7.8	253.1	PGC031979	-2.64	329	0.4	38.3
NGC4240	E	cD?	1767	-22.58	-18.29	NGC4472	2.70	894	7.3	22.7	PGC157619	-3.88	-26	0.6	2.0
						NGC4699	1.97	549	3.1	32.2	PGC039096	-5.39	22	1.0	13.2
						NGC4039	1.37	363	3.8	35.7	PGC970571	-3.16	173	0.9	24.6
						NGC4594	2.83	878	1.9	38.2	PGC037625	-1.03	223	1.9	82.4
						NGC3962	1.35	180	2.7	49.7	PGC1031692	-4.01	212	1.9	108.0
						NGC6070	0.20	-2	1.9	18.5	IC1158	-1.38	77	1.0	5.0
NGC6010	S0-a	S0/a? edge-on	2030	-23.32	-20.14	NGC5846	1.71	337	5.6	62.9	SDSSJ15..+02..	-6.64	-9	1.2	9.1
						NGC6118	-0.27	429	3.2	188.0	UGC09977	-1.76	111	1.4	13.5
						NGC5746	1.62	352	7.9	209.6	UGC10009	-5.17	-71	2.1	51.0
						NGC4472	1.95	1157	18.0	230.5	UGC10288	-0.38	-44	2.5	51.8
						NGC6574	0.52	396	1.4	21.7	UGC11214	-1.69	34	0.9	2.5
NGC6615	S0-a	SB0 ⁺ ?	2868	-23.78	-19.64	UGC11057	-0.30	-161	3.8	92.4	PGC061685	-2.90	-198	0.3	2.9
						NGC6548	0.24	498	3.7	110.9	PGC061658	-1.80	-319	0.6	13.5
						NGC6501	0.43	-224	5.6	123.7	UGC11168	-0.98	381	0.7	22.4
						NGC6587	0.39	-429	4.2	138.0	PGC061621	-0.78	-274	1.8	29.4
						NGC6643	-0.20	459	0.7	21.1	PGC062387	-3.54	101	1.7	18.4
NGC6654	S0-a	(R)SB0/a(s)	2204	-23.83	-19.96	NGC6340	-0.65	757	2.4	189.7	NGC6654A	-3.76	380	0.6	25.6
						NGC6951	0.95	484	6.2	225.3	UGC10892	-4.57	26	2.1	33.3
						NGC3031	-0.52	2102	9.6	273.3	PGC062173	-3.93	534	0.5	51.3
						NGC6911	0.52	-576	6.9	470.4	UGC11295	-4.63	-427	1.3	57.8
						NGC6764	-0.00	41	2.4	31.1	UGC11457	-4.74	-10	1.1	6.1
NGC6798	S0	S0	2741	-23.52	-19.22	NGC6824	1.93	-1091	3.0	232.1	NGC6757	-0.81	75	2.2	36.9
						NGC6703	1.05	90	6.4	344.4	UGC11502	0.05	-335	3.5	112.3
						NGC6829	0.38	-853	5.3	505.2	PGC063313	0.60	-1241	0.9	193.8
						NGC6946	0.08	2389	4.4	577.0	NGC6796	-0.42	263	4.7	303.2
						NGC0253	3.49	801	6.0	137.0	PGC069415	-1.83	61	0.2	2.2
NGC7351	S0	SAB0 ⁺ ?	1077	-20.92	-17.21	NGC7727	3.64	-881	6.1	899.2	PGC069224	-1.78	-7	0.4	3.4

Таблица 2.2. Таблица

Назв.	Морф. тип		V_{sys} [км/с]	M_K [mag]	M_B [mag]	Соседи "сверху"				Соседи "снизу"					
	HyperLEDA	NED				Назв.	δM_K [mag]	δV [км/с]	d [Мпк]	II	Назв.	δM_K [mag]	δV [км/с]	d [Мпк]	II
						NGC3031	2.39	975	14.6	1006.1	PGC1028063	-3.40	23	0.6	11.9
						IC1459	4.21	-599	10.7	1042.6	PGC982181	-5.03	-37	1.5	169.8
						NGC7507	3.52	-558	8.0	1163.6	PGC069293	0.58	-809	0.7	626.0
						NGC7716	1.90	-1	1.2	6.1	None	-4.55	80	0.8	11.2
						NGC7710	0.47	33	1.1	14.2	PGC1127711	-3.91	-13	0.8	14.4
						NGC7714	1.59	-239	2.4	67.5	PGC1140348	-4.87	114	0.7	18.3
						NGC7694	0.12	299	0.9	76.1	UGC12648	-1.20	159	0.6	22.0
						NGC7606	3.23	371	4.9	128.8	PGC071646	-0.55	275	0.7	63.0
						NGC2712	0.33	-50	2.5	66.2	UGC04659	-2.96	17	1.4	26.7
						NGC2768	1.83	328	4.2	69.3	PGC023834	-3.12	-10	1.4	27.5
						NGC2639	2.26	-1458	0.3	71.1	UGC04543	-1.79	-189	1.8	58.5
						NGC3031	0.68	1691	4.9	127.7	UGC04648	-3.85	-138	2.1	93.2
						NGC2681	0.01	1048	0.6	159.4	UGC04922	-1.65	-228	2.7	168.9
						NGC4472	3.57	909	12.3	88.7	NGC5727	-2.42	206	0.5	42.1
						NGC5353	3.47	-457	6.5	131.0	PGC2080256	-3.64	-196	1.0	69.1
						NGC5611	0.80	-243	2.2	152.5	PGC052694	-2.62	132	1.2	72.0
						NGC5582	0.99	247	2.9	159.8	UGC09597	-3.89	-30	1.7	123.5
						NGC5194	2.28	1221	5.3	194.7	NGC5798	-0.60	-88	2.1	127.6
						NGC5990	1.81	-267	0.9	7.3	PGC1178867	-3.40	56	1.0	9.3
						IC1128	0.06	177	3.3	104.2	PGC1257834	-3.96	-1	1.5	28.1
						NGC5846	2.14	1883	6.0	280.6	UGC10000	-1.94	12	1.7	37.9
						NGC4472	2.38	2703	25.6	307.0	UGC10005	-0.50	-273	1.3	40.9
						NGC5937	1.03	797	4.3	496.5	SDSSJ15..+03..	-3.30	-289	1.6	81.0

2.4. Результаты спектральных наблюдений

Мы провели спектральные наблюдения 22-х галактик, которые были выбраны из полученного списка (Таблица 2) и дополнены галактиками IC 3152, NGC 3248, NGC 3375, NGC 4240, NGC 6010, NGC 6615, NGC 7351. Для каждой исследуемой галактики в Таблице 2.2 приведены 5 наиболее влиятельных “соседей” в иерархии “сверху” и “снизу”, а также информация о морфологии, лучевых скоростях и абсолютных величинах. 12 объектов были отнаблюдены на 6 метровом телескопе БТА (САО РАН) с помощью многорежимного спектрографа SCORPIO и 10 объектов на телескопе SALT (SAAO, ЮАР) со спектрографом RSS. Подробному описанию процедуры первичной редукции данных и методике обработки спектров посвящена Глава 1. Распределение галактик по абсолютной величине в B и K фильтрах приведено на Рис. 2.5.

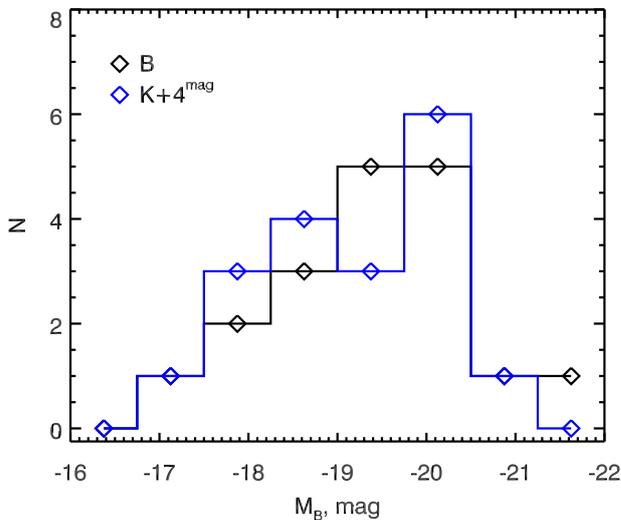


Рис. 2.5. Распределение по абсолютным величинам в фильтре B (черная линия) и K (синяя линия). Для удобства отображения к K величинам было добавлено значение 4^m .

В результате анализа длиннощелевых спектров мы получили для каждой изучаемой галактики профили лучевой скорости звезд v , дисперсии скоростей звезд σ_* , свойств звездных населений: возраста T и металличности $[Z/H]$ и кине-

матические профили ионизованного газа по эмиссионным линиям. Радиальные профили представлены на рисунках в Приложении В.

В параграфе 3.1 Главы 3 разъясняется как из полученных радиальных профилей с привлечением фотометрической информации были посчитаны средние значения параметров для различных подструктур галактик (балджей, дисков и линз). На основе этих параметров была построена диаграмма Корменди – отношения скорости вращения к дисперсии V/σ от эллиптичности изофот ϵ (см. Рис. 2.6). На этой диаграмме видно, что несколько галактик лежат ниже линии изотропно вращающихся сфероидов, которую можно интерпретировать как линию разделения между дисковыми галактиками и эллиптическими. Из дальнейшего статистического рассмотрения изолированных линзовидных галактик мы исключаем галактики IC 875, IC 4653, NGC 3375 и NGC 7693, считая их эллиптическими галактиками. Галактики NGC 1211 и NGC 6010, несмотря на расположение чуть ниже линии демаркации на диаграмме Корменди, мы все равно оставляем в общей выборке изолированных дисковых галактик, потому что они действительно являются представителями дисковых галактик. На изображении галактики NGC 1211 хороши видны чисто дисковые структурные особенности, а именно *три* кольца и достаточно сильный бар (Рис. 2.7). Галактика NGC 6010 имеет очень большой угол наклона, практически видна с ребра, что не оставляет никаких сомнений, что эта галактика тоже относится к дисковым системам.

Далее приводятся краткое описание 22-х галактик, для которых были проведены спектральные наблюдения на 6 метровом телескопе БТА и телескопе SALT, хотя в последующих главах будут обсуждаться только 18 из них.

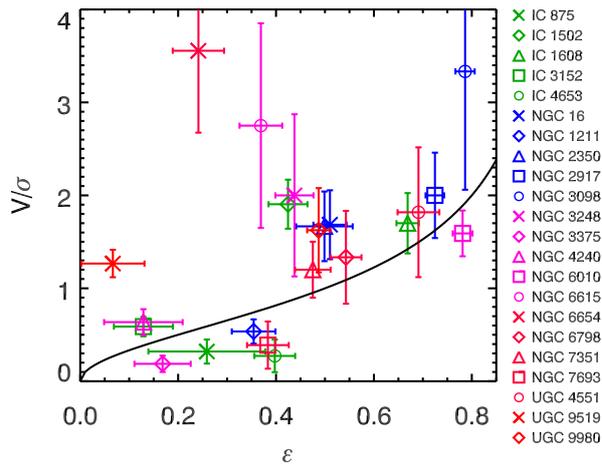


Рис. 2.6. Диаграмма Корменди: отношение скорости вращения к дисперсии скоростей V/σ от эллиптичности изофот ϵ для дисков галактик. Сплошной линией показано местоположение изотропно вращающихся сфероидов.

IC 875

Эта галактика в базах данных HyperLEDA и NED классифицируется как линзовидная, S0, поэтому она попала в поле нашего рассмотрения. Однако, как оказалось, она обладает достаточно низкой амплитудой скорости вращения и на диаграмме Корменди (Рис. 2.6) лежит ниже линии изотропных сфероидов, поддерживаемых вращением, на которую также ложатся эллиптические галактики малой светимости [71]. По всей видимости, IC 875 является эллиптической галактикой, поэтому мы исключаем ее из рассмотрения, и в построении диаграмм и распределений по параметрам для изолированных S0 она не принимает участия.

IC 1502

По NED эта галактика классифицируется как $S0^+$. Она имеет достаточно большое наклонение — $i = 64^\circ$ согласно HyperLEDA. Кривая лучевых скоростей свидетельствует о регулярном вращении. Основной особенностью этой галактики является то, что при солнечной металличности звезд, средний возраст звезд составляет около 15—17 млрд. лет на всем измеренном протяжении галактики. То, что этот возраст больше космологического возраста Вселенной, не долж-

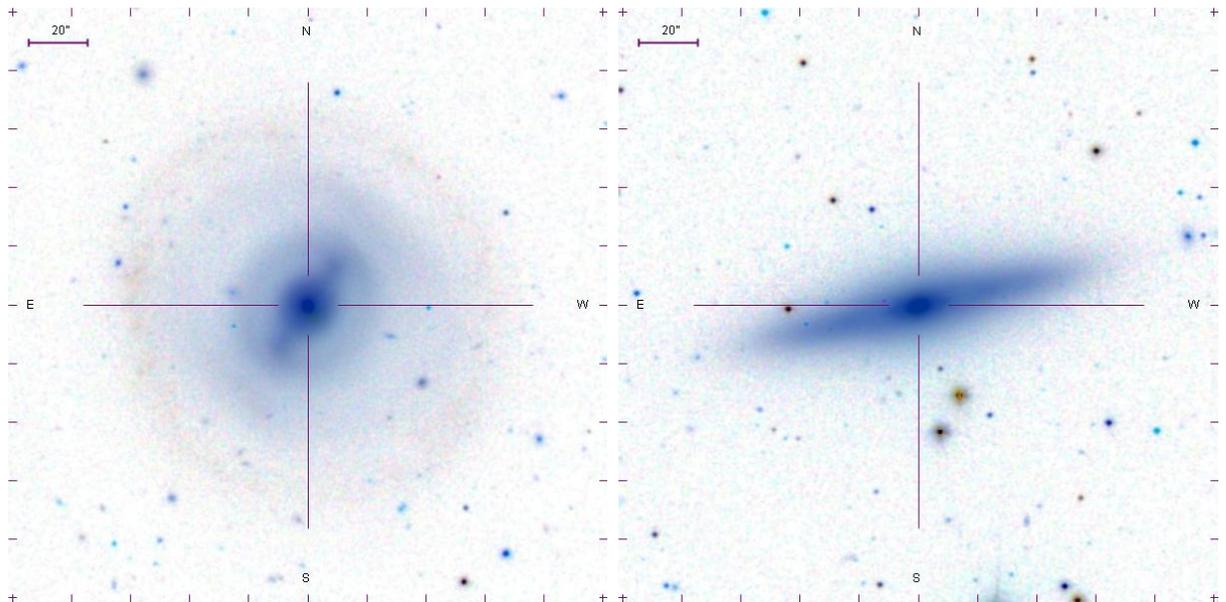


Рис. 2.7. Композитное инвертированное изображение NGC 1211 *слева* и NGC 6010 *справа* по данным Слоановского обзора неба (SDSS).

но смущать. Основными ингредиентами используемых при анализе спектров моделей эволюционного синтеза являются изохроны звезд, которые являются результатом теории звездной эволюции, и эмпирическая библиотека спектров звезд. Надо иметь в виду, что используемые модели звездных населений не содержат в себе информации о космологии Вселенной и дают совершенно независимый канал информации о возрасте доминирующего звездного населения в галактиках. На радиальных профилях параметров видна центральная кинематически обособленная область, которая проявляется как слабое укрупнение градиента скорости и небольшое понижение дисперсии скорости звезд. На профиле металличности заметен небольшой провал. Вероятно, это свидетельства эволюционной обособленности ядерного звездного скопления, хотя по возрасту звездного населения оно не выделяется в пределах ошибок измерений.

IC 1608

Эта галактика обладает достаточно сложной морфологией. Классификация по NED – (R)SA0⁺(r) pec?. На изображении достаточно четко выделяется

кольцо. Галактика обладает регулярным вращением как звезд, так и газа, изменения которого простираются чуть ли не дальше, чем звезды. В целом звездное население этой галактики имеет промежуточный возраст 4 – 7 млрд. лет, однако в области перехода от диска к линзе измерения возраста дают более старые оценки, около 10 млрд. лет, однако при усреднении эта разница замывается. В IC 1608 одна из немногих линз, которая достаточно сильно отличается по металличности от диска. Усредненная металличность в линзе -0.8 dex против -0.4 в диске. При этом обилие кислорода во внешнем кольце звездообразования чуть выше солнечного (0.1 dex).

IC 3152

По NED отмечена как галактика морфологического типа $SA0^-$, хотя основываясь на диаграмму Корменди, можно скорее сказать, что эта галактика близка к промежуточному между $S0$ и эллиптическими. Галактика обладает ионизованным газом, причем кинематический профиль в области $5'' - 15''$ от центра слегка рассогласован со звездами, причем асимметричным дрейфом едва ли можно объяснить это расхождение. Диск выглядит слегка моложе (возраст около 4 млрд. лет) по сравнению с балджем (5 млрд. лет). В области между диском и балджем присутствует более старое население возрастом около 10 млрд. лет. У этой галактики наблюдается сильный градиент металличности от солнечного значения в центре до -1.0 dex в диске. Оценки металличности газа дают солнечное значение.

IC 4653

Эта галактика имеет достаточно peculiarным внешним видом с несколькими яркими областями и вытянутым кольцом, более того при наклонении $i = 60^\circ$ (HyperLEDA) амплитуда лучевых скоростей не превышает 30 км/с при весьма

высокой дисперсии скоростей звезд ≥ 100 км/с. Эта галактика обладает очень сильным эмиссионным спектром, что позволяет оценить обилие кислорода в нем на субсолнечном уровне (-0.12 dex), в то время как на всем протяжении галактики металличность звезд $-1.0 \div -0.7$ dex при возрасте в несколько млрд. лет. Мы исключаем из рассмотрения этот объект, как неявляющейся линзовидной, хотя разобраться в природе этой галактики, особенно принимая во внимание имеющийся задел – спектральные наблюдения и необработанные очень глубокие ИК изображения, полученные на 6.5 телескопе Magellan (Лас Кампанас, Чили), является важной и посильной задачей.

NGC 16

У этой галактики имеется небольшой бар, ориентированный перпендикулярно большой оси галактики, и слабый, $\Delta m_B = 4^m$, позднего типа компаньон [72] в 500 кпк от нее. Индекс изолированности между ним и галактикой $II = 1.9$, но поскольку разница в массе около двух порядков, мы рассматриваем NGC 16 как изолированную от внешних приливных влияний. У галактики наблюдается очень примечательный твердотельный рост кривой вращения вплоть до $10''$ от центра, где скорость вращения выходит на плато, и достаточно горячий динамически диск, $\sigma_* > 100$ км/с. Звездный компонент обладает промежуточным возрастом, при этом балдж и диск в среднем не сильно отличаются друг от друга, хотя индивидуальные оценки возраста в бинах имеют достаточно большой разброс.

NGC 1211

Несмотря на то, что эта галактика попала в область ниже линии изотропных сфероидов, поддерживаемых вращением, на диаграмме Корменди (Рис. 2.6), мы не исключаем ее из списка исследуемых галактик, потому что эта галактика

имеет однозначные наблюдательные проявления структур, присущих дисковой подсистеме – множественные кольца и бар (см. Рис. 2.7). Нам удалось измерить свойства звездных населений в кольце, которое начинается на конце бара. Это пример второго кольца, которое заметно выделяется от диска по свойствам звездного населения. Хотя в область диска попадают всего лишь несколько измерений, однако они свидетельствуют об экстремально низком содержании металлов (-1.5 dex), в то время как в линзе -0.8 dex. По возрастам, несмотря на несколько отскакивающих измерений, линза выглядит умеренно старой ≈ 5 млрд. лет, а диск заметно старше. В области доминирования балджа имеются несколько очень молодых оценок возраста звездного населения, что при том же возрасте ≈ 5 млрд. лет для оставшихся измерений смещает среднее значение в сторону молодого значения. Ионизованный газ детектируется на протяжении всей галактики. В центральной части наблюдается рассогласование лучевых скоростей газа и звезд, что возможно обуславливается динамическим влиянием бара. Металличность удастся измерить во внешних областях галактики и она соответствует солнечной металличности.

NGC 2350

Это очень мало изученная галактика, не попавшая, к сожалению, в поле обзора SDSS. Согласно HyperLEDA и NED, классифицируется как S0/a. На прямом изображении SCORPIO-2, снятом при наведении щели спектрографа на объект, видно сложное распределение звездной яркости в виде ярких пятен на краях бара, так называемое явление “ansae”. Кроме того, как мы выяснили, анализируя эмиссионный компонент спектра, эта галактика обладает протяженным диском ионизованного газа, который, согласно расположению отношений эмиссионных линий на диагностических диаграммах, возбужден в основном излучением молодых звезд [73]; то есть в этой линзовидной галактике в настоящее

время идет звездообразование по всему диску. Соответственно, средний возраст звезд в пределах области, ограниченной “*ansae*”, довольно молодой: индивидуальные оценки в бинах колеблются между 1 и 2 млрд. лет. Центральная часть галактики демонстрирует очень низкую металличностью звезд; возможно, это связано с прошлым падением на галактику низкометаллического спутника. К тому же эта область немного выделяется на кривой вращения и распределении дисперсии скоростей, но, к нашему удивлению, не выделяется на профиле возраста. По нашим оценкам, металличность газа слабо субсолнечная, даже в области очень низкой звездной металличности. Поэтому газ в этой галактике своим происхождением вероятнее всего не связан с потенциально возможным мерджингом, следы которого запечатлены в ядерном звездном компоненте.

NGC 2917

Галактика выглядит сильно наклоненной к картинной плоскости. Измерения дают регулярную кривую вращения как по газу, так и по звездам. Удивительно, но наблюдается очень малое расхождение во вращении газа и звезд, что ожидается при наблюдаемой заметной разнице в дисперсиях скоростей. Ионизованный газ простирается до больших радиусов нежели измерения звездного компонента. Для этой галактики мы не смогли протянуть наши измерения в область диска, только лишь в область линзы, которая оказалась немного моложе балджа – 2.5 млрд. лет против 6 млрд. лет, и слегка отличной по обилию металлов (-0.34 dex против -0.2 dex) и с тем же обилием α -элементов. В кольце звездообразования в газе, удалось измерить обилие кислорода, которое оказалось в 1.5 – 2 раза выше солнечного. Ионизованный газ уверенно проявляет падение амплитуды лучевых скоростей к южному краю галактики при росте дисперсии скорости.

Наши измерения систематической скорости этой галактики дают оценку

$V_{sys} = 5377$ км/с, при этом систематическая скорость приведенная в базе данных сильно отличается от нее, $V_{sys}^{DB} = 3452$ км/с. Скорость V_{sys}^{DB} пришла из база данных HyperLEDA, в которую попала из работы [74], где эта галактика наблюдалась в радио диапазоне в рамках HI обзора галактик между Местного сверхскопления и сверхскопления Гидры/Центавра. На радио спектре, приведенным в работе [74], видно, что полезный сигнал еле угадывается на уровне шумов, что указывает на явную ошибку измерений систематической скорости. В HyperLEDA кроме оценки скорости по линии HI приводятся оптические оценки скорости, которые согласуются в пределах ошибки с нашими измерениями. Поскольку для кластерного анализа принималась ошибочная скорость, это приводит к некорректному определению приливных индексов и других параметров, в частности приведенных в Таблице 2.2. После принятия правильной систематической скорости абсолютные звездные величины получились следующими: $M_K = -24.30$, $M_B = -21.30$.

По нашей просьбе Дмитрий Макаров из Лаборатории Внегалактических исследований САО РАН провел дополнительный кластерный анализ, с целью определения свойства окружения NGC 2917. Для этого из базы данных HyperLEDA, в которой радио данные о скорости были помечены как ненадежные и основная оценка скорости соответствует оптическим измерениям в рамках обзора 6dF [75], был выбран объем пространства вокруг NGC 2917, где накладываются ограничения на скорость $|\delta V_{sys}| < 73 * 20 = 1460$ км/с и на проекционное расстояние $|\delta R| < 20$ Мпк. К галактикам этой области был применен кластерный анализ (см. подробнее параграф 2.1.1) и оказалось, что NGC 2917 вполне удовлетворяет принятым критериям изолированности для отбора галактик. Самая ближайшая галактика к NGC 2917 в иерархии “сверху” – NGC 3090 имеет индекс изолированности $II = 58.9$, разницей величин $\delta M_B = 1^m.12$, разницу скоростей $\delta V = 933$ км/с на проекционном расстоянии $\delta R = 8.6$ Мпк; самый ближайший “сосед” в иерархии снизу – это SDSS J093148.29-002429.9 с $II = 70.1$,

$$\delta M_B = -3^m.24, \delta V = 372.2 \text{ км/с и } \delta R = 2.8 \text{ Мпк.}$$

NGC 3098

Весьма известная изолированная линзовидная галактика, ориентированная ребром диска к наблюдателю. Ее фотометрическая структура исследовалась в [76]; было отмечено, что балдж в галактике небольшой и компактный, а между балджем и диском, примерно на радиусе $15''$, наблюдается кольцо повышенной звездной яркости. Наши результаты (Рис. в Приложении В) подтверждают небольшую массу балджа – скорость вращения растет в центре галактики весьма полого, – демонстрируют однородный возраст звездного населения 5–8 млрд. лет по всей галактике, а также падение металличности звезд при переходе от центральной части галактики в область доминирования крупномасштабного звездного диска. Диск при этом выглядит динамически холодным, $\sigma_* < 60 \text{ км/с}$.

NGC 3248

Начиная с расстояния 100 кпк от центра, галактика окружена десятком слабых спутников, самый яркий из которых всего на 3 звездных величины слабее хозяйской галактики. Центральная область галактики, $R < 15''$, подробно исследована методом панорамной спектроскопии на спектрографе SAURON в рамках обзора ATLAS-3D [4, 23]. В галактике оказалось много газа, как ионизованного, так и молекулярного, и газ этот противовращается по отношению к звездному компоненту. Мы протянули кинематические профили до расстояния от центра $30''$ и подтвердили противовращение газа, сосредоточенного в центральной области галактики; возбуждение газа – ударное, не видно никаких признаков текущего звездообразования. Возраст звездного населения как в центре, так и в диске галактики – средний, но зато центральные области заметно

богаче металлами, чем диск.

NGC 3375

Эта еще одна галактика, которая после наших наблюдений и анализа кинематических профилей была переклассифицирована в эллиптические и исключена из дальнейшего анализа. Галактика обладает постоянной с радиусом дисперсией скоростей и достаточно однородными оценками возраста с радиусом 4 – 7 млрд. лет, за исключением более старого 10 млрд. лет центра заметным градиентом металличности, что вполне присуще эллиптическим галактикам [77].

NGC 4240

По-видимому эта линзовидная галактика близка к промежуточному типу $E/S0$. HyperLEDA дает значение угла наклона $i = 36^\circ$. В пределах разброса возраста звездных населений балджа и диска сопоставимы (около 5 млрд. лет) при этом разница в металличностях очень существенна – в диске $[Z/H] = -1.0$ dex в балдже $[Z/H] = -0.32$. Измерения эмиссионных линий показывают, что газ в этой галактике движется сильно обособленно от звезд; наблюдается видимое противовращение газа и звезд. Причем лучевая скорость газа после монотонного роста и достижения максимума начинает спадать до нуля. Вероятно, газовый диск подвержен изгибу и движения происходят не в одной плоскости. Измерения обилия кислорода в кольце показывают немного завышенную металличность газа по отношению к солнечной.

NGC 6010

Эта галактика с ребра, имеет очень регулярный вид кривой вращения, дисперсия скоростей звезд достаточно монотонно спадает со 170 км/с в центре до 100 км/с в диске. Возраста имеют достаточно большой разброс, однако диск

выглядит слегка более молодым, чем балдж – 5 млрд. лет против 8 млрд. лет. По металличностям и отношению Mg/Fe диск и балдж различаются слабо. Буквально в самом центре галактики, удалось измерить эмиссионные линии, которые имеют градиент скорости в противоположенную сторону по сравнению со звездами. Однако уверенно измерить возможное противовращение газа в виду слабости эмиссионных линий не получается. Полученные измерения отношений линий свидетельствуют об отсутствии звездообразования в самом центре галактики.

NGC 6615

В базах данных галактика классифицируется как имеющая бар; визуальный анализ картинки из SDSS подтверждает, что компактный бар присутствует и ориентирован почти перпендикулярно большой оси галактики. Профиль поверхностной яркости демонстрирует весьма протяженную линзу с плоским распределением яркости; собственно экспоненциальный диск начинается на радиусах больше $40''$. Глубины нашей спектроскопии с гризмой высокого разрешения VPHG2300 не хватило, чтобы дотянуться до диска; мы определили характеристики звездного населения только в балдже и в линзе. Возраст звездного населения – однородно старый на всем протяжении измеренной части галактики; возможно, между балджем/баром и линзой присутствует относительно более молодое узкое кольцо. Металличность везде ниже солнечной, а в линзе – значительно ниже солнечной, по крайней мере в 3 – 4 раза. Газа в галактике не обнаружено; но линза относительно холодна динамически.

NGC 6654

Довольно большая галактика с крупномасштабным баром и диском невысокой поверхностной яркости; база данных NED классифицирует ее как $(R')SB(s)0/a$.

Анализ фотометрической структуры галактики мы позаимствовали из [1]. На внешнем краю диска наблюдается эмиссионное газовое кольцо звездообразования. Кроме этого внешнего кольца, газ есть еще только в центральной области галактики, где он демонстрирует ударное возбуждение и вращается слишком быстро для плоскости симметрии галактики, наклоненной под углом 45° к лучу зрения (база HyperLEDA). В нашей работе [73] мы предположили, что центральный газ вращается в плоскости, наклоненной к основной плоскости симметрии галактики. Характеристики звездного населения (см. Приложение В) демонстрируют, что диск моложе и богаче металлами, чем балдж; имея в виду остаточное звездообразование на периферии диска, мы можем констатировать, что NGC 6654 представляет тот редкий тип линзовидных галактик, у которых омоложение (вторичное звездообразование) прошло в диске, а не в центральной области. Причем учитывая заметное переобогащение магнием по отношению к железу именно в диске (Таблице 3.1), это омоложение носило характер очень краткой вспышки в проходящей волне звездообразования.

NGC 6798

Еще одна галактика, вслед за NGC 3248, которая была исследована в рамках обзора ATLAS-3D [4, 23] и обладает крупномасштабным противовращающимся газовым диском; причем нейтральный водород в этой галактике продолжает противовращаться далеко за пределами звездного диска. Анализируя фотометрическую структуру галактики по изображению в белом цвете, снятом на SCORPIO-2 при наведении щели спектрографа на объект, мы отмечаем присутствие кольца на радиусе $15'' - 20''$. Кольцо как и диск обладают весьма неоднородным распределением возрастов на всем протяжении, имеются области как с очень старым звездным населением, так и с молодым. При этом металличность звезд также имеет достаточно большой разброс и в целом в $1.5 - 2$

раза меньше солнечной.

NGC 7351

Карликовая линзовидная галактика с низкой дисперсией скоростей звезд как в центре, так и в диске, и с низкой скоростью вращения; ее кинематика ранее исследовалась в [78]. В соответствии с низкой светимостью галактики, металличность ее звезд ниже солнечной; но если в центре она ниже солнечной в 2.5 раза, то в диске – в 4 раза. Возраст звездного населения монотонно растет от центра к краю галактики, от 1.5 млрд. лет в ядре до 5–8 млрд. лет в диске. Это надо сопоставить с особенностями газовой компоненты галактики, исследованной нами в [73] (так же см. Главу 4): если в центре газ вращается вместе со звездами и демонстрирует возбуждение текущим звездообразованием, то за пределами центральной области газ выходит из плоскости диска галактики, и его кинематика резко рассогласуется со звездной кинематикой. Очевидно в данном случае аккреция внешнего газа происходила с сильно наклоненной орбиты, и стационарные условия для звездообразования (омоложения) возникли только в центре галактики, где газ срелаксировал, скопился и уплотнился.

NGC 7693

Последняя галактика, исключенная из списка рассматриваемых после анализа диаграммы Корменди. Отличительной особенностью этой галактики является наличие к северу-востоку от центра галактики филамента ионизованного газа, который явно кинематически не связан с движениями звезд.

UGC 4551

Еще одна галактика с противовращающимся газовым компонентом, который возможно вращается навстречу звездам прямо в плоскости диска галакти-

ки [73]. Тем не менее, и центр галактики, и ее внешний диск содержат старое, $T > 10$ млрд. лет, звездное население. Между балджем и диском наблюдается линза с плоским профилем яркости; вот здесь, в линзе, звездное население значительно моложе, чем в диске и балдже. С динамической точки зрения, и линза, и диск выглядят достаточно “горячими”, $\sigma_* > 100$ км/с.

UGC 9519

Галактика, хотя и ориентирована к лучу зрения почти плашмя ($i = 23^\circ$, HyperLEDA), очень быстро вращается. Мы [73] отметили видимое рассогласование кинематики газа и звезд при наблюдениях с длинной щелью. Данные панорамной спектроскопии обзора ATLAS-3D [4, 23] свидетельствуют скорее в пользу внутреннего полярного газового диска в этой галактике. Как и в NGC 7351, средний возраст звезд монотонно возрастает вдоль радиуса галактики, от 1.5 млрд. лет в ядре до примерно 5 млрд. лет в диске. Диск, будучи самым старым компонентом галактики, является также и наиболее динамически горячим, $\sigma_* \approx 100$ км/с. Он же наиболее беден металлами – примерно в 2 раза беднее солнечного химического состава; в центре галактики, на фоне недавнего дополнительного звездообразования, наблюдается металличность слегка выше солнечной.

UGC 9980

Эта галактика обладает баром, на краях которого проявляется избыток яркости, так называемое “ansae”, и слабо контрастное кольцо. Однако на азимутально усредненном профиле яркости область кольца достаточно четко выделяется. До внешнего кольца не удастся протянуть профили параметров из спектров. Несмотря на заметный разброс точек диск выглядит немного более старым, чем балдж, что демонстрируют усредненные значения возраста ($T_{disk} = 10$

млрд. лет, $T_{bulge} = 7$ млрд. лет). Кольцо у этой галактики также отличается по возрасту звездного населения от звезд диска и составляет $T_{ring} = 5$ Gyr. А вот по металличностям структурные компоненты отличаются куда заметнее: $[Z/H] = -0.34$ dex для балджа, тогда как для диска $[Z/H] = -1.0$, а для кольца $[Z/H] = -0.4$. На всем протяжении галактики детектируется ионизованный газ, движения которого вполне согласуются со звездами.

2.5. Выводы

В настоящей Главе был изложен методический аппарат, который использовался для исследования статистических свойств окружения галактик Местного Сверхскопления и его окрестностей. Показано, что распределение галактик по индексу изолированности II в плотном окружении качественно отличается от распределения галактик в разреженном окружении. Кроме того, была построена выборка 281 изолированной линзовидной галактики и произведено сравнение интегральных параметров этого класса галактик с другими. Оказалось, что распределения изолированных галактик и S0 галактик в плотном окружении по показателю цвета $B - J$ в целом очень похожи и существенных расхождений между ними не наблюдается. Из полученного списка изолированных S0 галактик были отобраны объекты для дальнейших детальных исследований с использованием крупных оптических телескопов БТА и SALT. Также в Главе приводятся краткое пообъектное описание полученных результатов анализа длиннощелевых спектров для каждой исследованной галактики.

Глава 3

Свойства звездных населений изолированных линзовидных галактик

В настоящей Главе рассматриваются параметры звездных населений – возраст, металличность и обилие α -элементов для галактик, которые исследовались нами на 6 метровом телескопе и телескопе SALT.

3.1. Осреднение значений параметров звездных населений

В результате анализа наблюдаемых оптических спектров при использовании моделей эволюционного синтеза для исследуемой выборки галактик были получены радиальные профили параметров звездных населений – среднего возраста, металличности и обилия α -элементов (см. Приложения В).

Мы провели анализ доступных фотометрических данных для рассматриваемых галактик и определили области, где начинает доминировать диск, где присутствуют более сложные морфологические структуры, такие как кольца и линзы, и где в центре галактики находится область доминирования балджа (с исключенной областью ядра). Для большинства галактик мы использовали фотометрические данные Слоановского обзора неба SDSS¹ (9-й релиз данных, DR9) в фильтре r . В случае, когда галактики не наблюдались в обзоре SDSS, использовались данные обзора 2MASS², фильтры $J + H + K$ (IC 1502, IC 3152, NGC 2350, NGC 4240, NGC 6798), снимки в белом свете, полученные на SCORPIO-2 в режиме прямых изображений перед началом спектральных экспозиций (NGC 6798, IC 1502) и изображения в фильтре r с 1-метрового теле-

¹ <http://www.sdss.org/>

² <http://www.ipac.caltech.edu/2mass/>

скопа LCOGT (Южно-Африканская обсерватория). Как пример, для галактик NGC 6798 и IC 1502 результаты анализа изображений в ближнем инфракрасном диапазоне и в белом свете совпали. Для каждой галактики мы проводили изофотный анализ и далее рассматривали полученные профили азимутально усредненной яркости. Внешние области, хорошо приближаемые экспоненциальным законом спадающей поверхностной яркости и демонстрирующие постоянную эллиптичность изофот, считались областями доминирования диска. В них иногда были заметны локальные избытки яркости, которые мы диагностировали как кольца или линзы. Для оценки параметров балджей использовался фиксированный диапазон радиусов, $4'' - 7''$. По выделенным таким образом областям мы провели усреднение параметров звездных населений с весами, обратно пропорциональными квадратам ошибок индивидуальных оценок $w_i = 1/\delta p_i^2$. Усредненные значения параметров для балджей, дисков и колец/линз приведены в Таблице 3.1. Графическому сопоставлению полученных параметров и их распределений посвящены Рис. 3.1, 3.3, 3.2 и 3.5.

3.2. Обсуждение результатов

3.2.1. Сравнение свойств звездных населений различных структурных компонентов галактик

Далее необходимо сравнить параметры звездного населения различных компонентов галактик – соотношение средних возрастов звездных населений поможет выстроить последовательность основных эволюционных этапов в жизни галактики, а отношение обилия магния к обилию железа позволит ограничить длительность основных событий звездообразования.

Галатика	N	T , млрд. лет	$[Z/H]$, dex	$[Mg/Fe]$, dex,	σ , км/с
Балдж					
IC 1502	11	17.7 ± 1.0	-0.04 ± 0.06	0.32 ± 0.10	165 ± 12
IC 1608	3	4.6 ± 0.2	-0.24 ± 0.05	0.12 ± 0.09	147 ± 5
IC 3152	6	5.1 ± 0.3	-0.28 ± 0.07	0.12 ± 0.09	186 ± 12
NGC 16	10	5.4 ± 0.8	-0.04 ± 0.05	0.19 ± 0.04	172 ± 6
NGC 1211	4	2.5 ± 1.0	-0.16 ± 0.07	0.11 ± 0.07	163 ± 16
NGC 2350	8	1.5 ± 0.4	-0.13 ± 0.10	–	107 ± 12
NGC 2917	4	5.9 ± 1.2	-0.20 ± 0.06	0.27 ± 0.08	192 ± 9
NGC 3098	10	5.4 ± 0.3	-0.10 ± 0.02	0.00 ± 0.02	74 ± 6
NGC 3248	10	4.8 ± 0.6	-0.11 ± 0.05	0.00 ± 0.05	77 ± 5
NGC 4240	6	4.6 ± 0.5	-0.32 ± 0.10	0.18 ± 0.09	109 ± 3
NGC 6010	3	8.3 ± 0.4	-0.23 ± 0.04	0.19 ± 0.06	152 ± 5
NGC 6615	8	10.8 ± 1.6	-0.26 ± 0.05	0.24 ± 0.03	129 ± 5
NGC 6654	9	12.2 ± 1.4	-0.19 ± 0.07	0.23 ± 0.04	158 ± 5
NGC 6798	8	8.3 ± 0.9	-0.20 ± 0.07	0.13 ± 0.04	115 ± 7
NGC 7351	8	2.0 ± 0.1	-0.27 ± 0.03	-0.03 ± 0.06	53 ± 6
UGC 4551	8	9.9 ± 1.8	-0.28 ± 0.08	0.15 ± 0.03	158 ± 10
UGC 9519	8	2.4 ± 0.2	-0.11 ± 0.07	0.04 ± 0.03	76 ± 3
UGC 9980	4	7.7 ± 0.3	-0.27 ± 0.04	0.18 ± 0.11	142 ± 6
Диск					
IC 1502	11	16.7 ± 1.7	-0.13 ± 0.10	0.42 ± 0.01	130 ± 25
IC 1608	8	3.2 ± 0.7	-0.43 ± 0.14	0.18 ± 0.15	141 ± 16
IC 3152	8	3.6 ± 2.3	-1.19 ± 0.42	0.20 ± 0.13	161 ± 28
NGC 16	18	1.6 ± 1.2	-0.19 ± 0.16	0.16 ± 0.02	127 ± 18
NGC 1211	2	10.0 ± 2.5	-1.48 ± 0.13	–	145 ± 58
NGC 2350	14	1.2 ± 0.2	-0.00 ± 0.07	0.06 ± 0.07	89 ± 14
NGC 2917	0	–	–	–	–
NGC 3098	19	5.2 ± 1.5	-0.22 ± 0.06	0.08 ± 0.02	56 ± 26
NGC 3248	31	3.9 ± 1.4	-0.21 ± 0.09	-0.04 ± 0.03	65 ± 17
NGC 4240	5	4.8 ± 1.6	-1.03 ± 0.11	0.33 ± 0.13	112 ± 30
NGC 6010	11	4.6 ± 1.4	-0.34 ± 0.16	0.18 ± 0.04	115 ± 13
NGC 6615	0	–	–	–	–
NGC 6654	3	5.8 ± 0.6	-0.06 ± 0.14	0.40 ± 0.20	44 ± 5
NGC 6798	22	3.4 ± 2.4	-0.30 ± 0.21	0.11 ± 0.12	122 ± 20
NGC 7351	7	5.4 ± 3.5	-0.62 ± 0.20	-0.02 ± 0.15	80 ± 33
UGC 4551	1	12.0 ± 0.0	-0.61 ± 0.00	0.25 ± 0.25	103 ± 0
UGC 9519	4	3.0 ± 1.4	-0.38 ± 0.12	0.15 ± 0.20	94 ± 14
UGC 9980	6	9.7 ± 3.0	-0.97 ± 0.10	0.21 ± 0.20	100 ± 33
Линза/Кольцо					
IC 1502	0	–	–	–	–
IC 1608	10	3.2 ± 1.7	-0.79 ± 0.20	0.24 ± 0.08	100 ± 17
IC 3152	0	–	–	–	–
NGC 16	16	3.3 ± 2.9	-0.25 ± 0.16	–	104 ± 16
NGC 1211	12	4.9 ± 1.8	-0.79 ± 0.24	0.20 ± 0.18	152 ± 17
NGC 2350	1	4.9 ± 0.0	-0.33 ± 0.00	–	97 ± 0
NGC 2917	10	2.5 ± 0.3	-0.34 ± 0.07	0.24 ± 0.07	131 ± 14
NGC 3098	13	4.7 ± 1.2	-0.12 ± 0.04	0.05 ± 0.01	58 ± 12
NGC 3248	0	–	–	–	–
NGC 4240	0	–	–	–	–
NGC 6010	0	–	–	–	–
NGC 6615	3	12.8 ± 2.4	-0.52 ± 0.16	0.21 ± 0.06	56 ± 5
NGC 6654	0	–	–	–	–
NGC 6798	20	1.9 ± 1.5	-0.33 ± 0.17	0.13 ± 0.04	96 ± 20
NGC 7351	0	–	–	–	–
UGC 4551	11	3.2 ± 2.1	-0.44 ± 0.17	0.23 ± 0.03	118 ± 24
UGC 9519	23	2.6 ± 0.5	-0.22 ± 0.07	0.05 ± 0.02	78 ± 9
UGC 9980	6	5.1 ± 1.4	-0.37 ± 0.09	–	126 ± 9

Таблица 3.1. Усредненные значения параметров звездных населений. N – число измерений, которые попадают в область доминирования данного структурного компонента, далее усредненные по области параметры звездного населения: T – возраст, $[Z/H]$ – металличность, $[Mg/Fe]$ – обилие магния по отношению к железу, σ – дисперсия скоростей звезд.

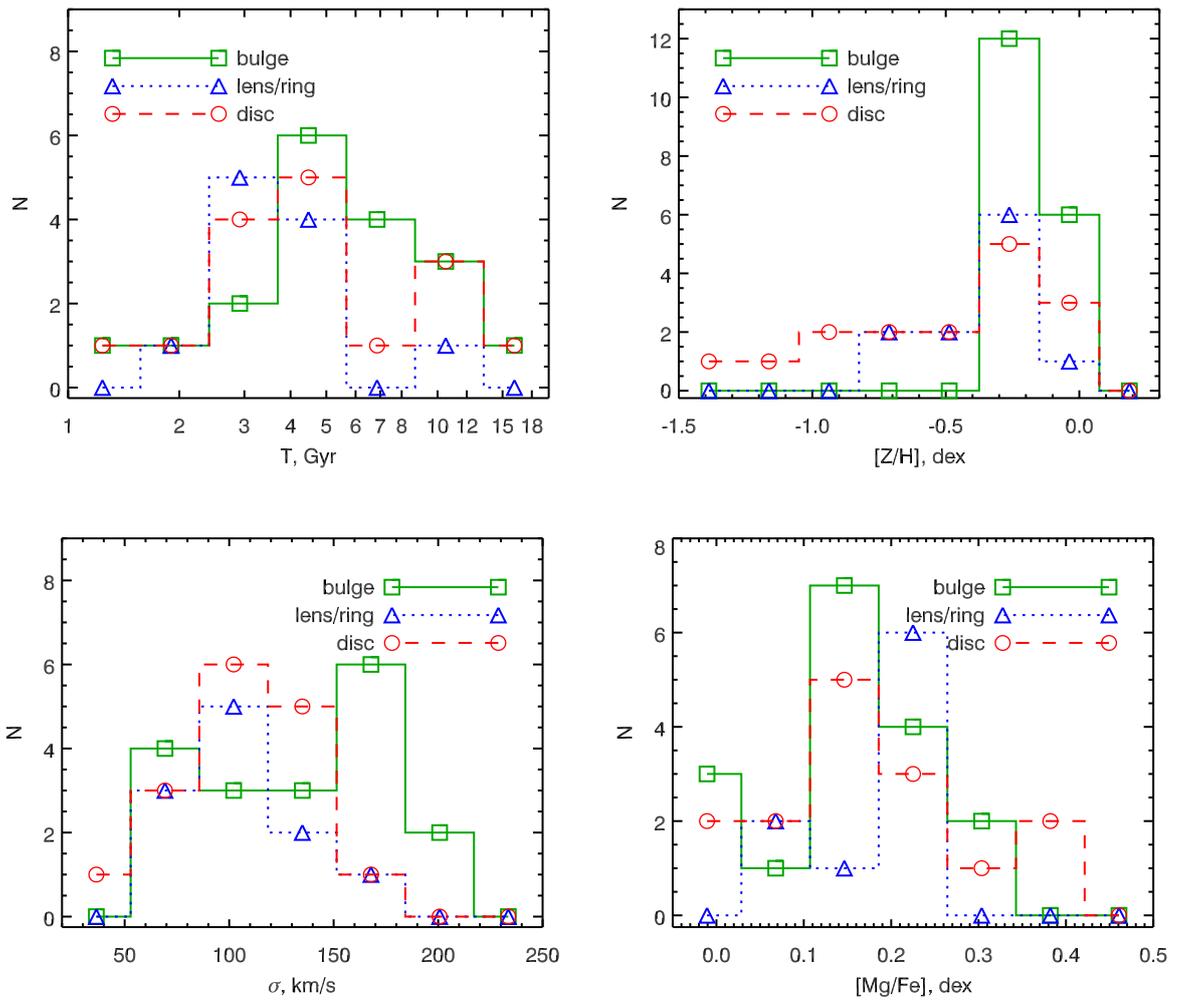


Рис. 3.1. Гистограммы распределения возрастов, металличностей, дисперсии скоростей и $[Mg/Fe]$ для разных структурных компонентов галактик.

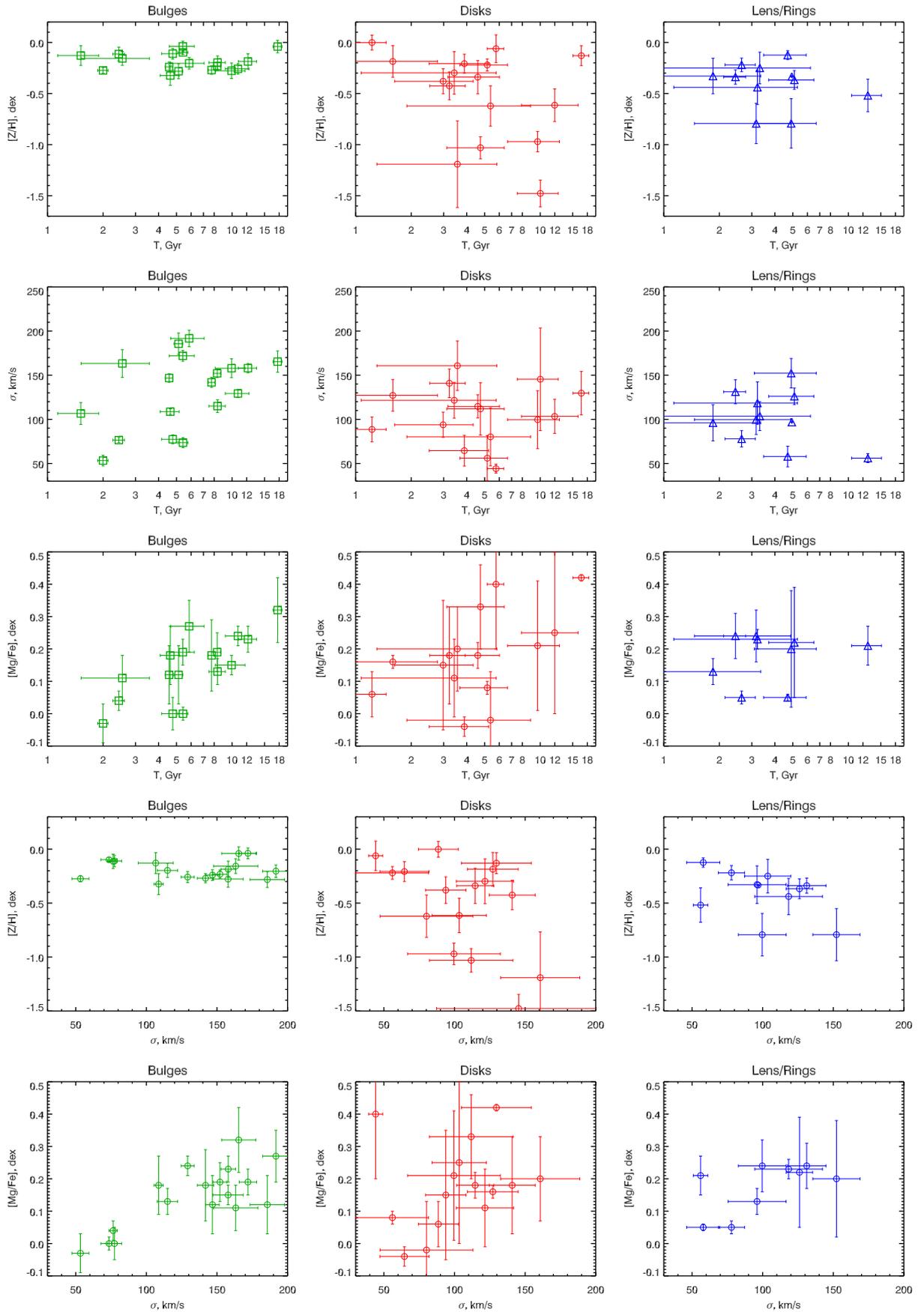


Рис. 3.2. Зависимости параметров звездных населений для различных компонентов галактик.

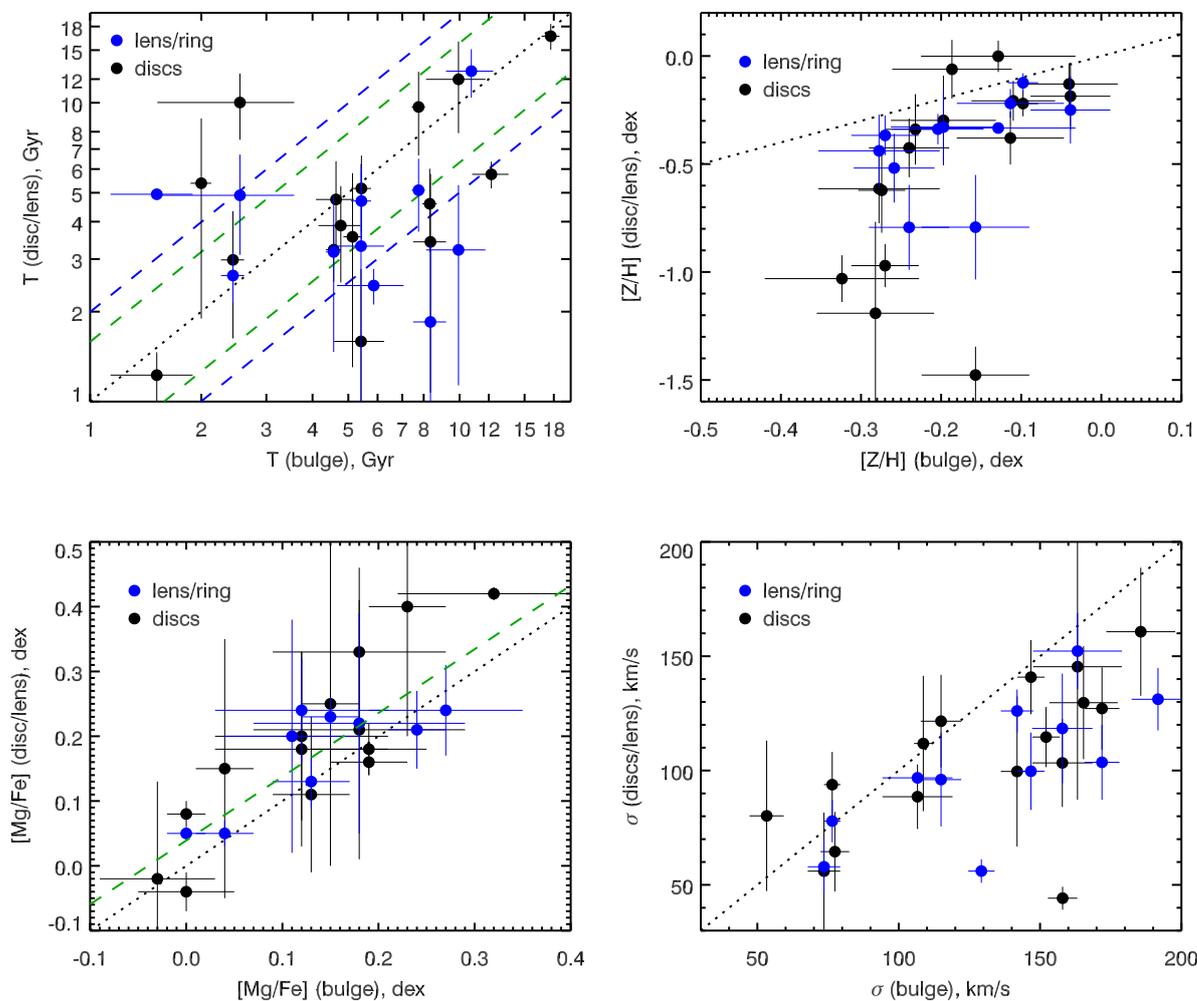


Рис. 3.3. Сравнение свойств звездных населений в балджах со свойствами в дисках и обособленных дисковых компонентах - кольцах/линзах. Точечная линия показывает линию равных значений. Зеленая пунктирная линия соответствует линейной аппроксимации с учетом ошибок измерений по обоим осям. На *левом верхнем* графике зеленая и синяя пунктирные линии соответствуют отклонению от биссектрисы на ± 0.2 dex (в ≈ 1.5 раза) и на ± 0.3 dex (в 2 раза).

Балджи vs. диски

Главная на сегодняшний день теоретическая парадигма – Λ CDM-модель эволюции Вселенной [79] – предсказывает, что “классические” балджи дисковых галактик ранних типов должны формироваться первыми, в событиях большого мерджинга, а уже потом вокруг них плавной аккрецией холодного газа должны собираться крупномасштабные диски [80, 81]. Однако есть наблюдательные факты, противоречащие этим предсказаниям: из обзора в обзор работы по поверхностной фотометрии галактик стабильно демонстрируют корреляцию между характерными масштабами балджей и дисков, причем наличие этой корреляции не зависит от того, “классические” или “псевдо”-балджи доминируют в конкретных выборках галактик [1, 82, 83]. Таким образом, формирование структуры балджей и дисков, похоже, синхронизовано в галактиках.

Именно это можно наблюдать на Рис. 3.3. На первый взгляд зависимость возрастов дисков против балджей (*черные точки*) выглядит достаточно “размазанной”, однако коэффициент корреляции (Пирсона) составляет 0.66. На указанном графике кроме биссектрисы (*черная точечная линия*) нарисованы области отклонения от биссектрисы на ± 0.2 dex (в ≈ 1.5 раза, *зеленая пунктирная линия*) и ± 0.3 dex (в 2 раза, *синяя пунктирная линия*). В первую область попадает 63% (10/16) измерений, во вторую – 75% (12/16). Таким образом сравнение средних возрастов звездных населений балджей и плоских компонентов – дисков и линз – показывает, что наши объекты группируются к биссектрисе, то есть в среднем возраста звездного населения в балджах и дисках одинаковые.

Однако есть два объекта (NGC 16, NGC 6798), в которых возраст диска оказывается уверенно моложе возраста балджа. В этом – существенное отличие свойств эволюции наших *изолированных* линзовидных галактик: на аналогичном графике для галактик из более плотного окружения, построенном в работе [26], объекты группируются в левом верхнем углу, над биссектрисой, то есть

возраста дисков оказываются либо равными, либо более старыми по отношению к возрастам балджей. Этого физического различия между галактиками в группах и изолированными галактиками вполне естественно было ожидать: все механизмы внешнего воздействия на галактику, связанные с плотным окружением, как гравитационные, так и газодинамические, приводят к “стеканию” газа в центр галактики и таким образом провоцируют вторичные вспышки звездообразования именно в центральных областях, в районе доминирования балджа [84, 85].

Интересно, что одинаковыми у балджей и дисков оказываются и отношения магния к железу (см. Рис. 3.3, *справа*). Для этой зависимости мы посчитали линейную аппроксимацию ($[Mg/Fe]_{disc} = a + b[Mg/Fe]_{bulge}$) с учетом ошибок измерений по обоим осям, используя процедуру FITEXU из библиотеки астрономических IDL процедур Astrolib³, и получили, что в пределах ошибок смещения нуль-пункта и наклона зависимости относительно биссектрисы нет: $a = 0.04 \pm 0.05$, $b = 0.9 \pm 0.3$. Сильная скоррелированность $R_P = 0.88$ свидетельствует о том, что звездообразование заканчивается быстро в обоих структурах, или уж продолжается в течение миллиардов лет и там, и там. Этот результат – равенство и средних возрастов, и отношения Mg/Fe – позволяет нам усилить тезис о синхронном формировании балджей и дисков: звездообразование и там, и там и начинается, и заканчивается квазиодновременно. При этом средняя металличность звезд в дисках ниже, чем в балджах (см. Рис. 3.3, *по центру*). Что вероятно означает, что аккреция низкометаллического газа происходит в основном в области диска, а “топливо” для звездообразования в балдже попадает туда уже после его обогащения тяжелыми элементами в диске.

Как видно на диаграмме Корменди для балджей, зависимости отношения

³ <http://idlastro.gsfc.nasa.gov/>

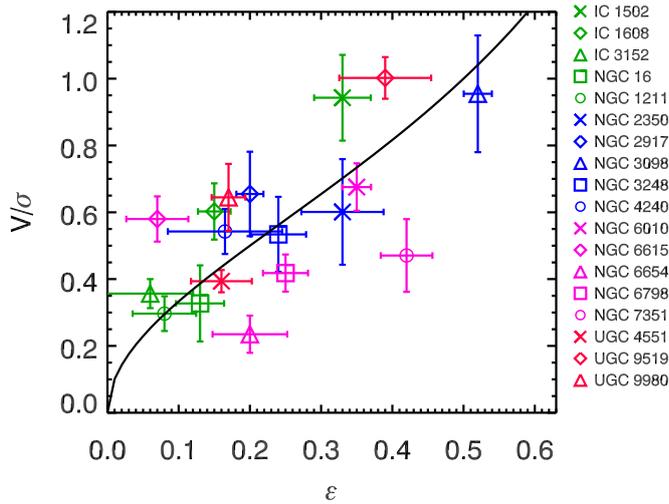


Рис. 3.4. Диаграмма Корменди для балджей: отношение скорости вращения к дисперсии скоростей V/σ от эллиптичности изофот ϵ . Сплошной линией показано местоположение изотропно вращающихся сфероидов.

скорости вращения и дисперсии скорости от эллиптичности изофот (Рис. 3.4), и на графике сопоставления дисперсии скоростей в балджах и дисках Рис. 3.3 (справа внизу) в нашей небольшой выборке изолированных линзовидных галактик оказалось практически поровну “псевдобалджей” (область выше линии изотропных сфероидов на диаграмме “ $V/\sigma - \epsilon$ ”), с дисперсией скоростей звезд как у дисков, и классических балджей, горячих динамически. Это лишний раз подтверждает, что балджи в линзовидных галактиках бывают очень разные — как по светимости и вкладу в общую массу галактики, так и по происхождению и эволюции. И этот тезис справедлив, даже если мы рассматриваем выборку *изолированных* линзовидных галактик, у которых влияние окружения на эволюцию вроде бы сведено к минимуму.

Дисковые подструктуры: линзы и кольца

Несколько слов о линзах в S0-галактиках, которые считаются генетически связанными с прошлыми кольцами звездообразования. До сих пор преобладало мнение, что звездное население в линзах старое, и динамически они горячи [86, 87]; впрочем, эта точка зрения основана на изучении единичных объектов. В нашей небольшой выборке мы смогли определить свойства звездного населе-

ния в 10 линзах/кольцах. Мы можем решительно констатировать, что исследованные нами линзы – это структуры диска. В среднем они демонстрируют ту же дисперсию скоростей, что и диски (Рис. 3.5 *справа внизу*). При детальном рассмотрении профилей дисперсии скоростей можно найти локальные пики в областях доминирования линзы в фотометрическом профиле, например в NGC 3098, NGC 6798 и UGC 4551, однако при усреднении по всей области линзы пики не дают существенного вклада в результирующую усредненную дисперсию скоростей, а по величине пики не отличаются более чем на 20 – 30 км/с от дисперсии скоростей в диске, что сопоставимо с характерной ошибкой измерения дисперсии скоростей.

За исключением NGC 6615 ($T_{lens} = 13$ млрд. лет) все измеренные линзы/кольца имеют отнюдь не старые звездные населения, а промежуточного возраста в очень узком диапазоне 3 – 5 млрд. лет, что соответствует красным смещениям $z = 0.3 - 0.5$, при этом возраста дисков простираются в существенно более широком диапазоне. Это говорит о том, что эпоха формирования колец не связана с формированием самих дисков. По химическим индикаторам – обилию металлов и α -элементов, линзы заметно не отличаются от дисков, только NGC 1211 имеет сильно бедный металлами диск, по сравнению с линзой.

Чем еще примечательная эпоха около $z \approx 0.4$? Детальные наблюдения морфологии галактик в далеких скоплениях выявляют на красном смещении $z = 0.4 - 0.5$ смену морфологического состава скоплений (эффект Батчера-Эмлера [88]). Предлагаемая интерпретация весьма естественная: вероятно, на $z = 0.4$ спиральные галактики массово аккрецируют на “собирающиеся” в эту эпоху скопления галактик, и там, в плотном окружении, под действием лобового давления горячего газа и/или гравитационным приливным воздействием соседних галактик и общего потенциала скоплений газ удаляется из внешних звездных дисков галактик, звездообразование, лишенное топлива, прекращается, и спиральная галактика превращается в линзовидную [66, 89]. Однако мы

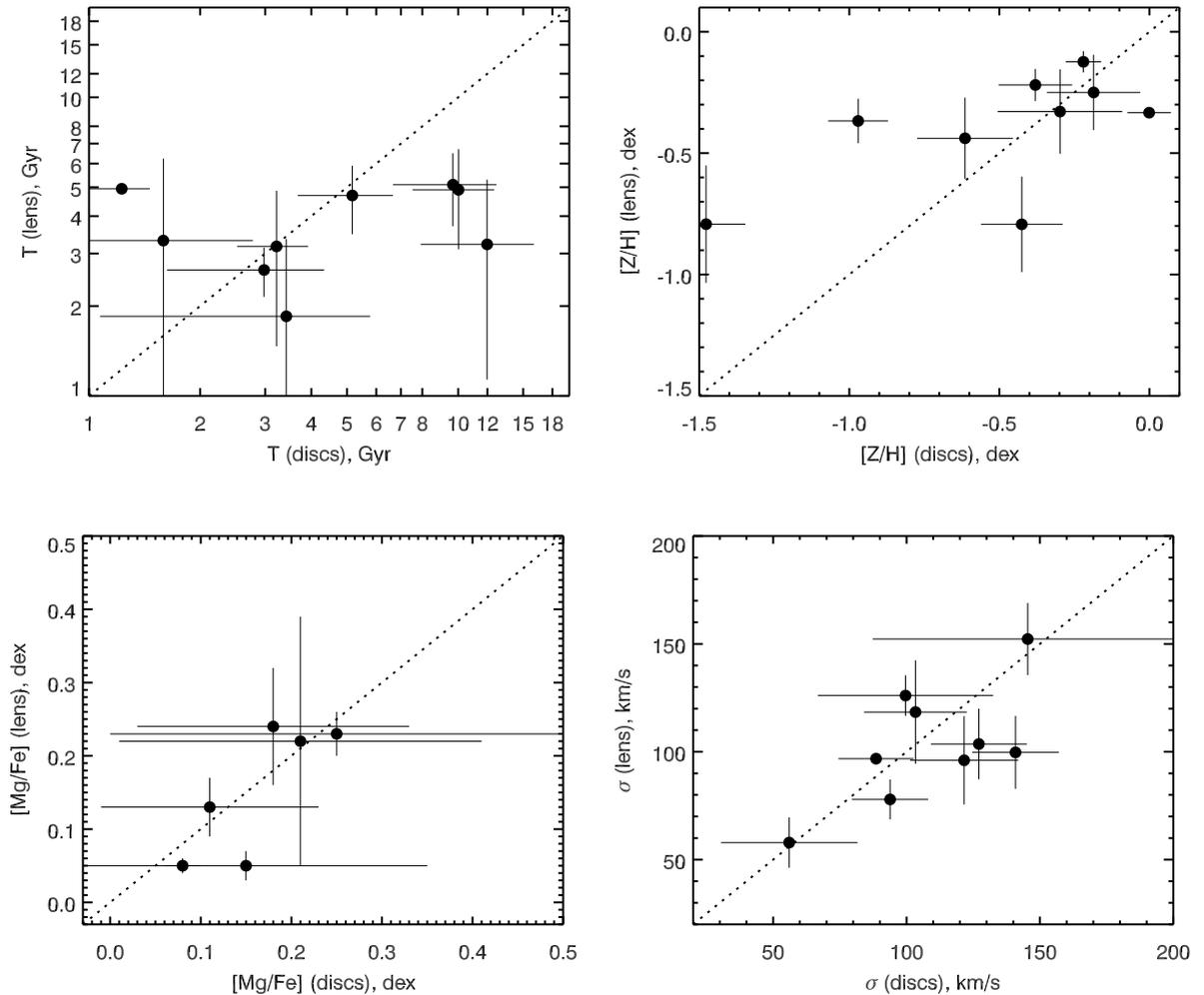


Рис. 3.5. Сравнение свойств звездных населений в дисках и обособленных структурах – линзах/кольцах.

рассматриваем изолированные галактики, которые не только не входят в состав скоплений, но не имеют поблизости массивных “соседей”. Возникает вопрос, является ли совпадение эпох формирования колец в изолированных дисковых галактиках и оформления современного морфологического состава скоплений галактик случайным или нет?

В последние годы численное моделирование в космологическом контексте достигло значительных успехов в воспроизведении дисковых галактик (см. например [81, 90, 91] и ссылки в них). Наиболее важным достижением является воспроизведение галактик без балджей (bulgeless) [91], которые бывают как спи-

ральными, таки линзовидными [1]. В указанных численных моделях после периода бурного звездообразования на больших красных смещениях $z \geq 2$ [92, 93] основной дисковый компонент оформляется к эпохе $z \approx 0.5$ в результате малого мерджинга и аккреции из филаментов и в нем развиваются дисковые неустойчивости, приводящие к образованию спиральной структуры и баров. Разумно ожидать, что в результате динамической эволюции баров будут образовываться кольца резонансной природы [94]. Возможно полученные нами оценки возраста звездного населения в кольцах – 3 – 5 млрд. лет ($z = 0.3 - 0.5$), как раз соответствует эпохе, когда в дисках галактик впервые возникли динамические условия благоприятные для возникновения кольцевых структур.

3.2.2. Эпоха формирования звездного компонента и ее длительность

На Рис. 3.6 сопоставляется отношение Mg/Fe , характеризующее длительность последнего события звездообразования, с другими характеристиками звездного населения для всех трех типов структурных компонент. И снова мы видим впечатляющую синхронность эволюции балджей и дисков: на всех зависимостях точки для разных структурных компонент равномерно перемешаны на графиках. Корреляция отношения магния к железу с дисперсией скоростей звезд, характеризующей локальную плотность гравитирующей массы, давно известна для эллиптических галактик и балджей [95] и считается доказательством связи эффективности звездообразования с глубиной потенциальной ямы. Однако на Рис. 3.6 (*вверху слева*) или на Рис. 3.2 (*нижний ряд*), мы впервые видим, что эта корреляция есть не только для балджей, но и для дисков. По аналогии можно предположить, что темпы аккреции внешнего газа тем выше, чем глубже локальная потенциальная яма в плоскости галактики, а более высокий темп аккреции обеспечивает более эффективное звездообразование. На Рис. 3.6 (*снизу слева*), сопоставляющем отношение Mg/Fe с возрастом звездной системы мы

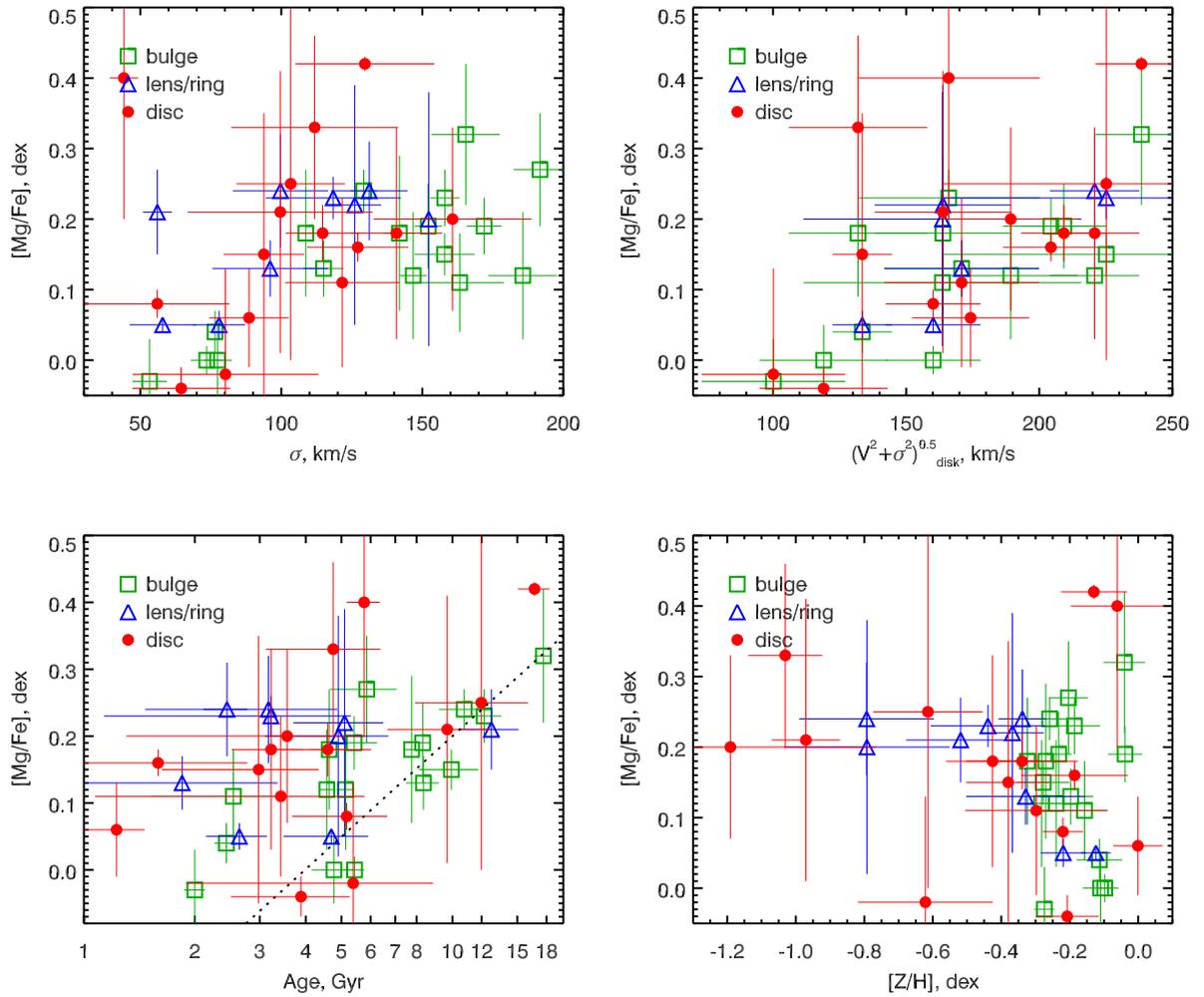


Рис. 3.6. Сопоставление дисперсии скоростей, динамического параметра $(V^2 + \sigma^2)^{0.5}$, возраста и металличности звезд с обилием α -элементов ($[Mg/Fe]$) для разных структурных компонентов галактики.

видим линейную огибающую справа (точечная линия), куда концентрируется значимая доля наших измерений; вероятно, это звездные системы, начавшие свое формирование одновременно в ранней Вселенной, на $z = 2 - 3$, и закончившие его “по-разному”: те, что закончили его быстро, имеют высокий средний возраст звездного населения и высокое отношение Mg/Fe , а те, где звездообразование продолжалось много миллиардов лет, проэволюционировали до солнечного отношения Mg/Fe . Однако на распределении (Рис. 3.6) *снизу слева*, есть и широкий диффузный “хвост” налево от точечной линии основной последовательности; причем в этом “хвосте” присутствуют как диски, так и балджи. Это звездные системы, в которых последнее событие звездообразования состоялось *позже*, чем у основного населения галактик. Действительно, чтобы одновременно иметь и $[Mg/Fe] = +0.2$, и средний возраст звездного населения $1.5 - 3$ млрд. лет, нужно “пережить” свои $1.0 - 1.5$ млрд. лет активного звездообразования существенно позже красного смещения $z = 0.5$. Таким образом, получается, что события звездообразования в изолированных линзовидных галактиках могут случаться с ними в разное время и иметь разную длительность.

3.2.3. Сценарий формирования

Представленные в данной Главе результаты, полученные для звездных компонентов выборки изолированных линзовидных галактик, подтвердили наши давние подозрения относительно влияния плотности окружения на эволюцию галактик: для изолированных линзовидных галактик, в отличие от членов групп и скоплений, не существует выделенной эпохи формирования структурных компонент, они могут сформировать их на красном смещении $z > 2$, а могут – всего миллиард лет назад. Разброс средних возрастов звезд дисков S0-галактик действительно возрастает с убыванием плотности окружения галактик [26] и достигает максимума среди изолированных галактик.

От чего может зависеть морфологическая “судьба” дисковой галактики, пребывающей в разреженном окружении, почему она может оказаться в нашу эпоху линзовидной или спиральной? Все сходится на режиме аккреции внешнего холодного газа, которая обычно подпитывает звездообразование в дисках спиральных галактик на протяжении многих миллиардов лет; а режим этот, вполне вероятно, вещь стохастическая. Недавняя работа по поиску слабых спутников у изолированных галактик [96] выявила любопытную статистическую черту: у изолированных линзовидных галактик спутники имеют с хозяйской галактикой систематически бóльшую разницу лучевых скоростей, чем у изолированных спиральных галактик, и у изолированных линзовидных галактик вообще нет спутников с разницей лучевых скоростей меньше 50 км/с. Возможно эта динамическая особенность говорит о том, что спутники линзовидных галактик *не могут* упасть на своих хозяев в ближайшее время, тогда как динамического трения для спутников спиральных галактик вполне достаточно, чтобы обеспечить своевременную их аккрецию? Перевернем тезис: возможно, орбитальный состав группировки слабых спутников – вещь стохастическая, и те дисковые галактики, у которых система спутников динамически холодна, смогут обеспечить себя топливом для звездообразования в диске и станут спиральными, а те, кому досталась динамически горячая система спутников (или они к настоящему моменту уже давно “уронили” на себя все спутники, какие было возможно уронить), те останутся линзовидными. Аналогичный намек содержит в себе и исследование вращения газовых систем в дисковых галактиках. В большом количестве изолированных линзовидных галактиках, где содержится газ, его вращение рассогласовано с вращением звезд (см. [73] и Главу 4), то есть этот газ был аккрецирован с орбит, наклоненных к плоскости основного звездного диска; тогда как в спиральных галактиках газ с “внешней” кинематикой куда более редок. Возможно это означает, что спокойный режим аккреции в плоскости диска обеспечивает стабильное накопление холодного газа с возможностью

непрерывного звездообразования, тогда как при наклонном режиме падения газа могут возникать динамические эффекты, приводящие к его турбулизации и предотвращению звездообразования, например, генерация ударных волн при прохождении потенциальной ямы галактического диска (см. [97]) или при столкновении внешнего газа с уже имеющимся в диске первичным газом галактики. Этот эффект, связанный с геометрией аккреции внешнего газа, тоже может отделить судьбу спиральных галактик от судьбы линзовидных галактик.

3.3. Выводы

В данной Главе мы представили результаты исследований звездных населений изолированных линзовидных галактик на основе спектральных наблюдений на спектрографах SCORPIO 6-метрового телескопа САО РАН и RSS телескопа SALT Южно-Африканской обсерватории в режиме длинной щели. Средние возраста звездного населения в нашей выборке изолированных линзовидных галактик заполняют полный диапазон значений от 1.5 до 15 млрд. лет, и, в отличие от S0-галактик в более плотных окружениях, изолированные галактики как правило имеют одинаковый возраст звезд в балджах и в дисках, то есть возможности отдельного омоложения балджа у них отсутствуют. Линзы и кольца повышенной звездной яркости, обнаруженные в 11 из 18 (61%) галактик, имеют дисперсию скоростей звезд и химические свойства звездных населений, как правило, неотличимые от звездных населений дисков. При этом эпоха формирования колец (от 2 до 5 млрд. лет назад, $z = 0.2 - 0.5$) не зависит от свойств дисков. Сделан вывод, что вероятно оформление морфологического типа линзовидной галактики в полной изоляции критически зависит от возможных режимов аккреции внешнего холодного газа.

Глава 4

Ионизованный газ в изолированных линзовидных галактиках

Настоящая Глава посвящена рассмотрению ионизованного газа в исследуемой выборке галактик. Основные рассуждения, приводимые в этой главе, опубликованы в работах [73, 98].

4.1. Статистика обособленных газовых структур

В результате анализа длиннощелевых спектров, полученных на 6-метровом телескопе БТА и телескопе SALT, мы обнаружили в 13 галактиках из 18 ($72 \pm 11\%$) наличие протяженных эмиссионных линий, свидетельствующих о протяженной структуре ионизованного газа. В $46 \pm 14\%$ (6/13) случаев ионизованный газ кинематически обособлен по отношению к звездам.

Сравнивая наши результаты по частоте встречаемости протяженных дисков ионизованного газа в S0 галактиках с более ранними работами, мы видим полное согласие. Так, например, Кьюкен и соавторы [99] обнаружили ионизованный газ в 17 из 29 исследованных ими S0 галактик, что составляет около $58 \pm 9\%$ от их выборки. Однако при рассмотрении доли галактик с видимым противовращением газового диска среди галактик с протяженным газом наблюдается заметное отличие. Когда S0 галактики отбирались среди всех типов окружений, доля противовращающихся газовых дисков составила $20\% - 24\%$ ([21, 99]), а если выборки из обоих работ объединить, то более точно получается $24 \pm 8\%$. В нашей же выборке сильно изолированных галактик получается значение $46 \pm 14\%$. Такое поведение ожидается и находится в согласии с работой Дэвиса с соавторами [23], в которой по выборке галактик ранних типов

(в выборке ATLAS-3D доминируют S0 галактики) продемонстрирована зависимость кинематики газа от окружения: плотное окружение обеспечивает более тесное совпадение кинематики звезд и газа, в то время как в более разреженном окружении доля галактик с обособленной кинематикой растет.

Следуя рассуждениям, предложенным в работе Бертолы и др. [21], при случайной внешней аккреции газа угловой момент вещества должен быть распределен равномерно, что при длиннощелевых наблюдениях должно обеспечить равные доли галактик с совращающейся и противовращающейся газовой кинематикой. Если принять во внимание, что какая-то часть галактик может обладать газом внутреннего происхождения, который связан со сбросом внешних оболочек на поздних стадиях эволюции звезд, то доля галактик с противовращением должна быть меньше 50%. Поскольку в нашей выборке доля галактик с противовращением составляет в пределах ошибки 50%. Это свидетельствует о внешнем источнике газа для всех галактик в предположении аккреции газа с равновероятным распределением момента. В случае сильно изолированных галактик “донорами” не могут служить галактики сопоставимых масс/светимостей. В то же время источниками газа могут служить подсистема карликовых богатых газом спутников, сливающихся с основной галактикой [100, 101], или первичные космологические филаменты холодного газа [102, 103]. Вопрос об изотропности пространственного распределения обоих источников газа остается открытым.

4.2. Дихотомия механизмов ионизации газа

На Рис. 4.1 показаны диаграммы отношений эмиссионных линий $[N II]/H\alpha$ против $[O III]/H\beta$ для всех галактик, где были одновременно измерены потоки в этих линиях. Построенные диаграммы используются для диагностики механизмов возбуждения ионизованного газа и впервые были предложены в работе Балдвина, Филлипса и Терлевича [106], иногда называются ВРТ-диаграммами.

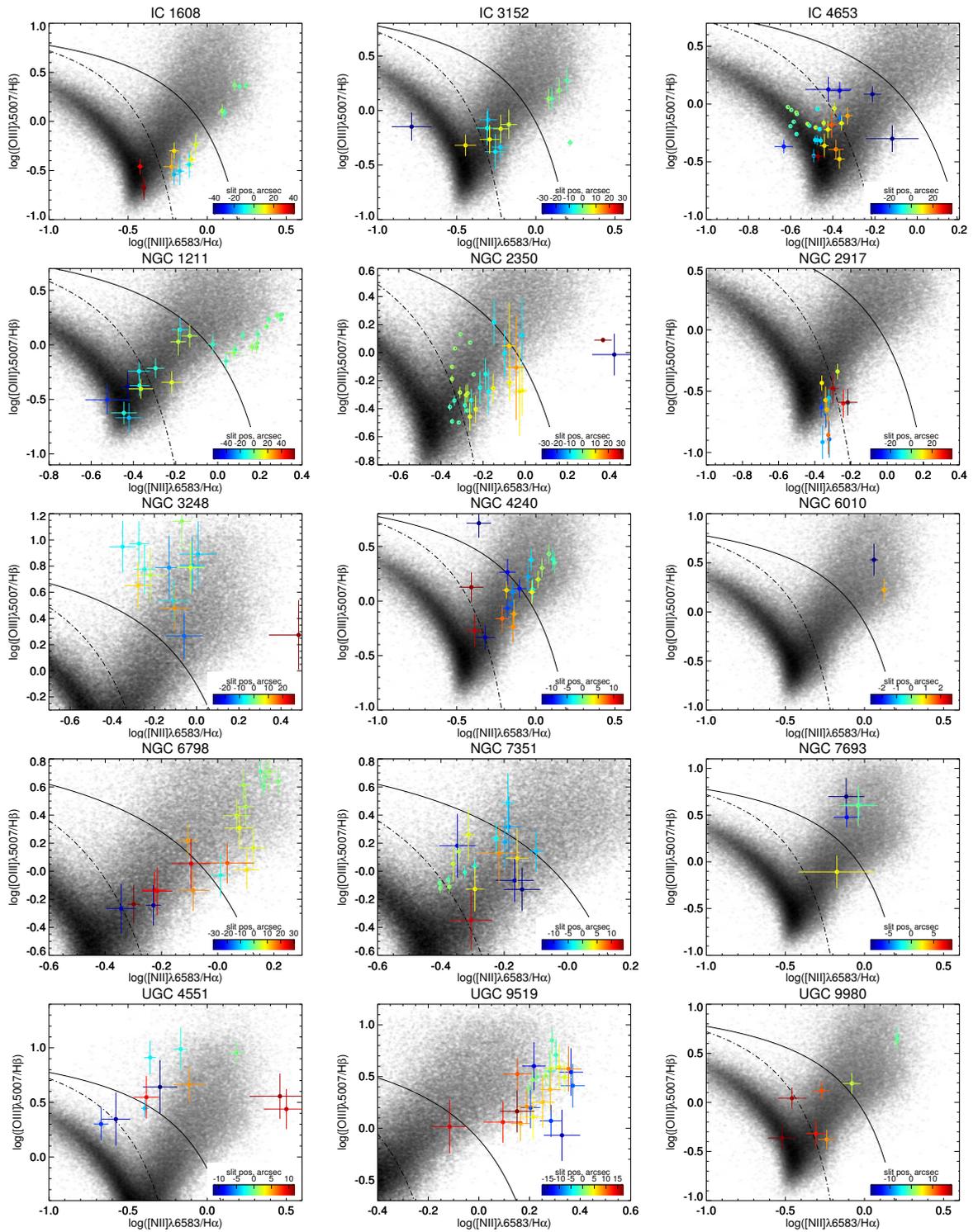


Рис. 4.1. Диаграммы отношений линий $[N II]/H\alpha$ против $[O III]/H\beta$ для диагностики механизмов ионизации газа. Цвет точек обозначает расстояние от центра галактики. Для сравнения серым облаком показаны измерения отношений линий в спектрах SDSS для нескольких тысяч галактик, для которых “сигнал-шум” $S/N > 3$ в каждой линии. Пунктирная линия разделяет область, где доминирующим механизмом ионизации газа являются излучения от молодых звезд (снизу от линии), от области, где главную роль в ионизации могут играть нетепловое излучение ядра галактики (AGN/LINER), ударные волны или излучение пост-AGB звезд, взята из работы Кауффманн и др. [104], а сплошная линия из работы Кьюли и др. [105].

С помощью этих диаграмм можно разделить, в каких областях доминирует механизм фотоионизации излучением молодых звезд, а в каких доминирует механизм нетеплового излучения от слабого активного ядра (LINER), ударных волн (см. Рис. 5.8) или излучение горячих звезд, прошедших стадию асимптотической ветви гигантов (пост-AGB).

Очевидно, что газовые диски в S0 галактиках могут быть не компланарны основному звездному диску. Только из длиннощелевых наблюдений вдоль больших осей галактик нельзя однозначно определить компланарен газ или нет. В предыдущем абзаце упоминаются галактики с “противовращением” газа и звезд, для большинства из которых имеются только длиннощелевые наблюдения. В данном случае под “противовращением” понимается лишь видимый эффект, в действительности газовые диски могут располагаться вне плоскости основного звездного диска и обеспечивать видимое “противовращение” за счет эффектов проекции.

Вакаматцу в работе [97] показал, что в газе, который движется на полярных орбитах, т.е. ортогональных основному диску, и пересекает потенциальную яму в плоскости звездного диска, могут возбуждаться ударные волны. Это явление подобно возбуждению ударных волн при прохождении газа через спиральные волны плотности или через бары в диске галактики, где волны возникают благодаря повышенной звездной плотности. В этом отношении наклонные газовые диски подобны полярным структурам и в них также ожидается возбуждение газа ударными волнами. Как показывают теоретические расчеты (см. например [107]), при ионизации ударными волнами измерения потоков в эмиссионных линиях попадают на диагностической диаграмме в область низкоэнергетичной ионизации активным ядром (область LINER). Иным механизмом возбуждения ионизованного газа, допускающим попадание измерений эмиссионных линий в LINER область, но не связанным с активностью ядра, является фотоионизация излучением горячих звезд, находящихся на стадии после прохождения

асимптотической ветви гигантов (пост-AGB звезды) [108]. В недавних работах ([109–111]) было показано, что механизм возбуждения газа пост-AGB звездами особенно важен для галактик ранних морфологических типов. Оба механизма ионизации газа действуют без участия молодых массивных звезд. Ожидается, что оба механизма будут наиболее эффективно работать в области пересечения газом звездного диска, где самый высокий градиент потенциала и/или наибольшая плотность поля излучения пост-AGB звезд. Короткое время высвечивания газа по сравнению с динамическим временем может привести к неоднородному распределению доминирующего механизма ионизации, что возможно зафиксировать по данным панорамной спектроскопии. В случае спокойной аккреции газа в плоскости звездного диска галактики, газ вероятнее останется в холодном состоянии, что способствует последующему возникновению процесса звездообразования. Измерения отношений эмиссионных линий в области звездообразования диагностической диаграммы будут соответствовать доминирующему механизму ионизации газа излучением молодых горячих звезд.

Таким образом, можно ожидать, что доминирующий механизм ионизации газа зависит от геометрии движений газа: в случае движения газа в полярных и наклонных дисках следует ожидать повышенную долю галактик с наблюдаемым ударным возбуждением, а в случае движений газа в плоскости диска устанавливаются более подходящие условия для инициализации звездообразования. Однако в недавно опубликованном каталоге галактик с полярными кольцами по данным Слоановского обзора неба (SDSS) (Моисеев и др. [112]) можно найти много примеров внешних полярных структур, которые выглядят голубыми и имеют избытки ультрафиолетового излучения по данным GALEX, что свидетельствует о вероятном текущем звездообразовании в полярных структурах. Так, фотометрические исследования галактик с полярными кольцами [113] показывают, что действительно в некоторых кольцах наблюдаются очень голубые цвета, что, без сомнения, свидетельствует о недавнем звездообразовании. Так-

же недавние исследования известных галактик с полярными кольцами – NGC 4650A и NGC 2685 [114, 115] на основе фотометрических данных с Космического телескопа им. Хаббла показали, что в обоих полярных кольцах присутствует молодая фракция звезд возрастом в несколько млн. лет. Кроме того, есть примеры и внутренних полярных структур со следами недавнего звездообразования (см. например Главу 5). В этой связи, по-видимому, ключевым для ионизации газа является не только геометрия прохождения газа через плоскость галактики, но также и величина градиента потенциала. Во внешних областях галактики доминирующий вклад в потенциал дает (квази-) сферически-симметричное темное гало, а в центральной части галактики – это обеспечивает балдж. В обоих случаях предполагается, что потенциал будет достаточно гладким. В то же время на промежуточных расстояниях, где заметный вклад в потенциал дает тонкий звездный диск, возникают подходящие условия для работы механизма, предложенного Вакаматцу в работе [97], который разогревает газовую среду, что препятствует возникновению звездообразования.

В полученных нами наблюдательных результатах видно (см. Рис 4.1), что в галактиках, в которых газ вероятнее находится в плоскости звездного диска, – IC 1608, IC 3152, NGC 1211, NGC 2350, NGC 2917, NGC 7351, UGC 9980, внешние области NGC 6654 и в галактиках NGC 4240, NGC 6798, у которых наблюдается противовращающийся, но симметричные кинематические профили газа с равными амплитудами вращения по разные стороны от центров галактик, излучение молодыми звездами является преобладающим механизмом ионизации. Ударные волны и/или излучение пост-AGB звезд являются доминирующими механизмами ионизации газа в галактиках NGC 3248, UGC 4551, UGC 9519 и NGC 7693 (исключена из рассмотрения как дисковая галактика), чьи кинематические профили имеют особенности и асимметричный характер, что, возможно, является следствием движений газа вне плоскости основного диска. В более ранней работе Сильченко, Моисеева и Афанасьева [116], посвя-

щенной исследованию обособленной кинематике газа в S0 галактиках NGC 2551 и NGC 5631, также имеются наблюдательные указания на существование дихотомии механизмов ионизации газа. В NGC 2551 обнаружен компланарный противовращающийся газовый диск, который по данным GALEX имеет высокую светимость, что, вероятно, указывает на звездообразование на протяжении всего диска. А в галактике NGC 5631 наблюдается наклонный газовый диск при видимом отсутствии заметного звездообразования, что подтверждается измерением отношений потоков эмиссионных линий, которые соответствуют возбуждению ударными волнами или пост-AGB звездами. Очень похожий наклонный газовый диск с доминированием ударного возбуждения был обнаружен нами в S0 галактике NCG 7743 (см. [117]). Исследования галактики NGC 5966 по данным обзора CALIFA¹ так же показали отсутствие звездообразования в кинематически обособленном ионизованном газе этой галактики [118]. Еще одним примером противовращающегося газа в плоскости диска с доминированием звездообразования является галактика IC 719, исследованию которой посвящена часть Главы 5. Таким образом, действительно существует достаточно много наблюдательных данных, которые можно интерпретировать в поддержку существования дихотомии механизмов ионизации в зависимости от геометрии движений газа.

4.3. Металличность газа

По диагностическим диаграммам (Рис. 4.1) мы выделили области доминирования механизма фотоионизации молодыми звездами и просуммировали чисто эмиссионный спектры галактик по этим областям для накопления большего отношения “сигнал-шум”. Аппроксимировав гауссианами линии, мы получили значения потоков в эмиссионных линиях, которые далее пересчитали в оценки

¹ <http://califa.caha.es/>

обилий кислорода по известным калибровочным соотношениям. Потоки в линиях были исправлены за поглощение на основе сравнения наблюдаемого бальмеровского декремента с теоретическим $F(H\alpha/H\beta) = 2.87$ для электронной температуры $T_e = 10,000$ К [119] с использованием параметризации спектральной кривой поглощения, предложенной в работе [120].

Наиболее прямой метод измерения металличности газа заключается в измерении отношения чувствительных к электронной температуре линий [O III] λ 5007 и [O III] λ 4363. Эти линии дают ограничения на электронную температуру, которая с учетом ненаблюдаемых стадий ионизации преобразуется в содержание химических элементов, в частности кислорода в газовой среде. Этот метод называется прямым методом электронной температуры или T_e метод. Основной проблемой массового измерения металличностей газа прямым T_e методом является невозможность повсеместного детектирования линии [O III] λ 4363 ввиду ее относительно низкой интенсивности в наблюдаемых спектрах H II областей. Кроме того, для учета вклада в полное обилие кислорода иона O^+ требуется использование линий [O II] λ 3727 + λ 3729. Формально эти линии попадают в спектральный диапазон наших наблюдений как на 6-метровом телескопе, так и на телескопе SALT, однако ввиду низкой чувствительности используемых ПЗС матриц в голубой части спектра эти линии невозможно детектировать практически ни в каких спектрах галактик. Таким образом, прямой T_e метод невозможно применить для областей звездообразования, которые были выделены на основе анализа диагностических диаграмм.

Кроме прямого T_e -метода, было предложено несколько калибровочных методов определения металличности газа (см. например [121–127]), в том числе не требующие измерения ни линии [O II], ни чувствительной к температуре [O III] λ 4363. Основная идея всех калибровочных методов заключается в построении зависимостей между отношениями наиболее сильных эмиссионных линий в наблюдаемых или теоретически построенных спектрах H II областей и содер-

жанием тяжелых элементов, которое было определено прямым T_e методом для этих ярких H II областей. Главная проблема различных методов заключается в том, что они часто дают существенно различающиеся оценки металличностей. Это обстоятельство постоянно обсуждается как в литературе [128, 129], так и на конференциях.

Для оценки обилия кислорода в областях звездообразования мы использовали калибровочные соотношения, предложенные в работе Петтини и Паджел [124] и основанные на анализе 137 внегалактических H II областей с измеренной электронной температурой и содержанием кислорода прямым T_e методом. В указанной работе приводятся два соотношения между обилием кислорода $12 + \log O/H$ и индексом $O3N2 = \log_{10} ([O III]\lambda 5007/H\beta)/([N II]\lambda 6583/H\alpha)$ и индексом $N2 = \log_{10} ([N II]\lambda 6583/H\alpha)$ с характерными величинами разброса $\sigma_{O3N2} = 0.25$ dex и $\sigma_{N2} = 0.41$ dex, соответственно. Ошибки металличностей оценивались на основе σ_{O3N2} и σ_{N2} и ошибок в определении параметров наблюдаемых эмиссионных линий. Для ряда областей линии $[O III]\lambda 5007$ и $H\beta$, несмотря на биннинг, имеют очень низкое отношение “сигнал-шум” $S/N \approx 1-3$, что приводит к нефизичным отрицательным значениями избытка цвета $E(B-V)$ и может вносить дополнительные систематические ошибки в определения металличностей. Для таких областей мы использовали $N2$ -калибровку, которая задействует только отношение $[N II]\lambda 6583$ и $H\alpha$ и не подвержена влиянию поглощения в виду близости используемых линий.

На Рис. 4.2 приводится сравнение оценок обилия кислорода $12 + \log O/H$, посчитанных с использованием обеих калибровок. Видно, что в целом в пределах ошибок оценки согласуются, но на более высоких металличностях $N2$ -калибровка дает немного заниженные оценки по отношению к $O3N2$ -калибровке - в 1.25-1.5 раза меньшие значения (0.1-0.2 dex). При этом расхождения в оценках металличности не влияют на дальнейшие рассуждения и выводы. В Таблице 4.1 приводятся полученные значения обилий кислорода в исследуемых областях.

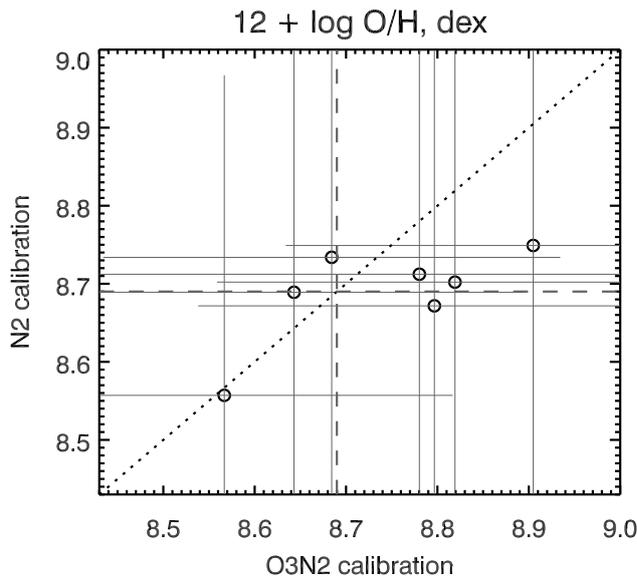


Рис. 4.2. Сравнение обилий кислорода, рассчитанных с использованием $O3N2$ -калибровки и $N2$ -калибровки из работы Петтини & Пэджел [124]. Точечной линией обозначена линия равных значений, а вертикальная и горизонтальная разрывная линия соответствуют солнечной металличности $12 + \log O/H = 8.69$ [130].

4.4. Происхождение газа

Существует большое разнообразие среди галактических подсистем, обладающих отличным угловым моментом по отношению к звездному диску. К таким системам можно отнести внутренние полярные диски/кольца, крупномасштабные внешние полярные диски/кольца, противовращающиеся звездные/газовые диски, полярные балджи и внутренние ядерные диски. Основываясь на динамических соображениях, не возникает сомнений, что эти структуры образовались из внешнего вещества, которое ранее не принадлежало самой галактике и было приобретено в процессе взаимодействия, слияний с другими галактиками и/или в процессе внешней аккреции вещества, которые могут происходить на протяжении всей жизни галактики. В зависимости от условий приобретения внешнего вещества – в зависимости от геометрии, продолжительности, углового момента падающего вещества – будут различаться проявляемые морфология и свойства результирующих подсистем с выделенным угловым моментом.

В литературе рассматриваются три основные сценария образования галак-

Галактика	Область биннинга	$12+\log O/H ([Z/H]_O)$ dex
IC 1608	(-51.4; -31.1)	8.78 (0.09) ± 0.47
	(29.7; 43.4)	8.80 (0.11) ± 0.26
IC 3152 ^{N2}	(-12.6; -8.1)	8.73 (0.04) ± 0.42
	(4.1; 10.2)	8.78 (0.09) ± 0.42
IC 4653	(-5.6; 4.6)	8.57 (-0.12) ± 0.25
NGC 1211 ^{N2}	(9.4; 15.8)	8.72 (0.03) ± 0.41
	(32.3; 37.3)	8.73 (0.04) ± 0.41
NGC 2917	(-15.7; -5.6)	8.90 (0.21) ± 0.27
	(9.6; 19.8)	8.82 (0.13) ± 0.26
NGC 4240 ^{N2}	(-11.6; -6.6)	8.80 (0.11) ± 0.41
	(4.1; 12.2)	8.78 (0.09) ± 0.41
NGC 9980 ^{N2}	(-13.1; -4.3)	8.82 (0.13) ± 0.42
	(8.4; 20.8)	8.71 (0.02) ± 0.42
NGC 2350	(-1.6; 2.0)	8.68 (-0.01) ± 0.25
NGC 6798 ^{N2}	(-34.1; -27.7)	8.71 (0.02) ± 0.41
	(29.1; 36.6)	8.73 (0.04) ± 0.41
NGC 7351	(-2.7; 3.8)	8.64 (-0.05) ± 0.25

Таблица 4.1. Оценки обилий кислорода в областях звездообразования.

тик с подсистемами, обладающими обособленным угловым моментом:

1. Большие диссипативные слияния галактик (major dissipative merger). В этом сценарии рассматриваются слияния галактик неравных масс под большими углами, чтобы большая часть вещества попала на близкие к полярным орбитам [131, 132].
2. Аккреция газа в результате приливного взаимодействия (tidal accretion). В этом сценарии предполагается, что газ падает на основную галактику в результате разрушения карликового спутника, вращающегося вокруг “хозяйской” галактики, или в результате приливного обдирания газа с внешних частей дисковой галактики в течение близкого пролета [133, 134].
3. Аккреция холодного газа из первичных космологических филаментов (cold gas accretion). Недавние теоретические работы (см. например [92, 102, 103]), которые основаны на численном моделировании, подчеркивают очень важную роль холодной аккреции газа из филаментов при формировании дисковых галактик. В работах [135–137] показано, что аккреция газа из нескольких филаментов, находящихся в разных плоскостях, будет приводить к образованию подструктур с обособленной кинематикой. Приобретенный из филаментов газ, должен обладать экстремально низким содержанием металлов, а с учетом возможного перемешивания с газом, “содранным” со спутников “хозяйской” галактики, металличность не должна превышать $1/10$ солнечного обилия металлов [138].

При рассмотрении вопроса образования кинематически обособленных газовых структур в изолированных галактиках следует сразу исключить сценарий больших слияний ввиду того, что изолированные галактики не имеют в своем окружении больших “соседей”. Сценарий приливной аккреции можно рассматривать в варианте взаимодействия с карликовыми спутниками, исключая при-

ливную аккрецию газа с внешних областей гигантских дисковых галактик (в виду их отсутствия).

Ключевым параметром, с помощью которого можно сделать выбор между приливной аккрецией и аккрецией из филаментов как основного механизма приобретения ионизованного газа в изолированных галактиках, является содержание металлов в газе. Наши оценки обилия кислорода в ионизованном газе изолированных S0 галактик говорят о том, что газ имеет солнечную металличность (см. Таблицу 4.1), что исключает происхождение газа в результате аккреции их космологических филаментов и согласуется со сценарием приливной аккреции из карликовых спутников.

В серии работ итальянских коллег Спавоне, Йодиче и др. [139–141], которые посвящены исследованию химии газа в полярных дисках/кольцах в галактиках NGC 4550A, UGC 7576, UGC 9796 и VGS31b, были получены достаточно низкие оценки обилий металлов в газе, на чем авторы делают вывод о происхождении полярных колец в результате аккреции из филаментов. Исследованные ими галактики обладают ярко выраженными классическими полярными образованиями, в то время как кинематически обособленные газовые структуры в рассматриваемых нами галактиках на прямых изображениях практически не проявляют себя, за исключением, быть может, UGC 9519, у которой имеется пылевая полоса, перпендикулярная большой оси галактики. По всей видимости, различные эволюционные пути образования газовой подсистемы приводят к разным морфологическим проявлениям этих структур. Кроме работ итальянских коллег, была работа Фрейтас-Лемас и др. [142], в которой были получены оценки обилия кислорода $12 + \log O/H = 8.53 \pm 1.1$ dex для полярного кольца в галактике AM2020-504, что исключает его происхождение путем аккреции из филаментов.

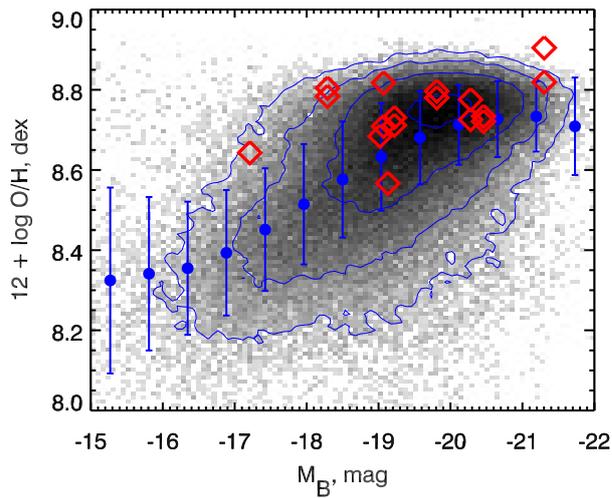


Рис. 4.3. Зависимость металличности газа от абсолютной величины в B . Серое распределение построено по данным обзора SDSS. Синие точки с барами ошибок - это медианное значение обилий кислорода в разных бинах по светимости. Красными ромбиками показаны измерения в исследуемых галактиках.

4.4.1. Соотношение “светимость-металличность”

Тесная корреляция между светимостью или массой галактик с содержанием металлов в газе является хорошо известным наблюдательным фактом. Эти корреляции впервые были обнаружены для иррегулярных и компактных голубых галактик [143, 144], чуть позже - и для дисковых галактик [145]. Последующие работы по исследованию близких галактик только усиливали выводы о тесной корреляции между светимостью/массой и металличностью (см. например [125] и ссылки в ней). Для объяснения существования соотношения “масса-металличность” предлагались различные физические аргументы: 1) потеря химически обогащенного газа в результате галактического ветра, обусловленного взрывами сверхновых звезд [125, 146]; 2) аккреция первичного небогащенного металлами газа из межгалактической среды [147]; 3) вариация начальной функции масс звезд с массой галактики [148]; 4) низкая эффективность звездообразования в мало-массивных галактиках, определяемая обратным влиянием (feedback) сверхновых звезд [149]. В действительности химическая эволюция содержания металлов в газе, как и эволюция самих галактик, может быть подвержена большому количеству факторов и их комбинациям, что в итоге приводит к тесной корреляции “масса-металличность”.

На Рис. 4.3 показана взаимосвязь между абсолютной звездной величиной в фильтре B и обилием кислорода, посчитанная по данным обзора SDSS DR9 для ≈ 90 тыс. галактик, у которых отношения линий соответствуют фотоионизационному возбуждению молодыми звездами и “сигнал-шум” в линии $H\beta$ $S/N_{H\beta} > 5$. Данные о потоках в линиях и фотометрии были извлечены из системы CasJobs² (таблицы `galSpecLine` и `PhotoObjAll`). Обилия кислорода считались с использованием $O3N2$ -калибровки [124], а абсолютные B величины вычислялись с помощью переводных соотношений на основе величины g и цвета $g - r$ (см. <http://www.sdss3.org/dr9/algorithms/sdssUBVRITransform.php>), с учетом k -поправок [150]. Там же, на Рис. 4.3, нанесены измерения для исследуемых галактик (красные ромбики). Видно, что, несмотря на достаточно широкий диапазон светимостей, очень тесной корреляции с обилием кислорода не наблюдается. Также в большинстве своем наши измерения обилий кислорода не попадают на усредненную в бинах зависимость “светимость-металличность”. Это свидетельствует о том, что химическая эволюция ионизованного газа в этих галактиках тесно не связана с индивидуальными свойствами “хозяйской” галактики, что согласуется и усиливает вывод о внешнем происхождении газа. В то же время, в предположении о происхождении газа из карликовых спутников, видимая однородность оценок химии газа намекают на подобие свойств карликовых галактик, выступивших в роли доноров газа.

4.5. Выводы

В настоящей Главе были рассмотрены свойства ионизованного газа в изолированных S0 галактиках на основе данных, полученных на 6-метровом телескопе БТА и телескопе SALT. В 13 галактиках из 18 ($72 \pm 11\%$) обнаружено

² <http://skyserver.sdss3.org/CasJobs/>

наличие протяженных эмиссионных линий, свидетельствующих о протяженной структуре ионизованного газа, при этом в $46 \pm 14\%$ (6/13) случаев ионизованный газ оказался кинематически обособлен по отношению к звездам. Показано, что в предположении изотропной аккреции газа такое процентное соотношение согласуется с предположением о внешнем происхождении газа во всех изолированных галактиках. Анализ диагностических диаграмм показал, что ионизованный газ в этих галактиках может быть возбужден как ударным механизмом или излучением пост-AGB звезд, так и фотоионизацией молодыми звездами. Вероятно возбуждение газа зависит от геометрии падения вещества на галактику, что проявляется в видимой дихотомии механизмов возбуждения. Оценки обилия кислорода в областях звездообразования удалось получить для 10 галактик, они оказались солнечными и согласуются со сценарием приобретения газа из карликовых спутниковых галактик путем приливной аккреции, исключая механизм аккреции газа из космологических филаментов. Отсутствие сильной корреляции “светимость-металличность” подтверждает сделанный вывод о происхождении газа.

Глава 5

Следы внешней аккреции газа в галактиках IC 719 и NGC 4124

В настоящей Главе излагаются результаты детальных исследований линзовидных галактик NGC 4124 и IC 719, где были обнаружены следы недавней внешней аккреции газа. Материал этой главы составляет содержание работ [16, 49].

5.1. Формирование противовращающегося звездного диска в галактике IC 719

5.1.1. Введение

IC 719 – это галактика умеренной светимости, которая составляет изолированную невзаимодействующую пару с галактикой позднего типа сопоставимой светимости IC 718. Основные характеристики IC 719 приводятся в Таблице 5.1, а прямое изображение приведено на Рис. 5.1. Несмотря на то, что по всем базам данных галактика классифицируется как раннего типа, у нее отсутствует ярко выраженный балдж, а радиальный профиль поверхностной яркости является практически чисто экспоненциальным (см. Рис. 5.1). Галактика достаточно богата газом для морфологического типа S0 – у нее детектируется как атомарный HI, так и молекулярный H₂ водород. Галактика была включена в обзор ATLAS-3D [151] и наблюдалась с панорамным спектрографом SAURON [152]. В результате наблюдений в центральной части галактики, $R < 20''$, было обнаружено противовращение газа и звезд. Галактика имеет протяженный диск нейтрального водорода HI, который простирается за пределы оптического

Галактика	IC 719
Морф. тип (NED ¹)	S0?
R_{25} , кпк(NED+RC3 ²)	5.5
B_T^0 (LEDA ³)	13.66
M_B (LEDA)	-18.6
M_K (ATLAS-3D)	-22.7
V_r (NED)	1860 km · s ⁻¹
Расстояние, Мpc (ATLAS-3D)	29.4
Наклонение (LEDA)	90°
PA_{phot} (LEDA)	52°
$V_{rot} \sin i$, km · s ⁻¹ , (LEDA, HI)	114.4 ± 6.6
σ_* , km · s ⁻¹ , (LEDA)	121
M_{HI} , 10 ⁹ M_\odot^4	0.54
M_{H_2} , 10 ⁸ M_\odot^5	1.8

¹NASA/IPAC Extragalactic Database

²Third Reference Catalogue of Bright Galaxies

³Lyon-Meudon Extragalactic Database

⁴[153, 154]

⁵[155]

Таблица 5.1. Основные параметры галактики IC 719

звездного диска [153], однако крупномасштабное поле скоростей HI неизвестно. Нужно отметить, что исследование вращения газа за пределами поля зрения спектрографа SAURON ($\approx 20''$) вплоть до оптических границ звездного диска – является очень важной задачей, потому что предоставляет возможность оценить пространственные масштабы процесса внешней аккреции газа.

Для галактики IC 719 мы получили и проанализировали данные щелевой спектроскопии с прибором SCORPIO-2 и привлекли к анализу данные панорамной спектроскопии из обзора ATLAS-3D [151]. Благодаря измерениям обилия кислорода в протяженном газовом диске мы смогли ограничить набор возможных эволюционных сценариев приобретения газа. И наконец, мы обнаружили вторичный звездный диск, кинематически ассоциированный с противоращающим газом, восстановили его историю звездообразования, что в свою очередь позволило построить историю аккреции газа на эту галактику.

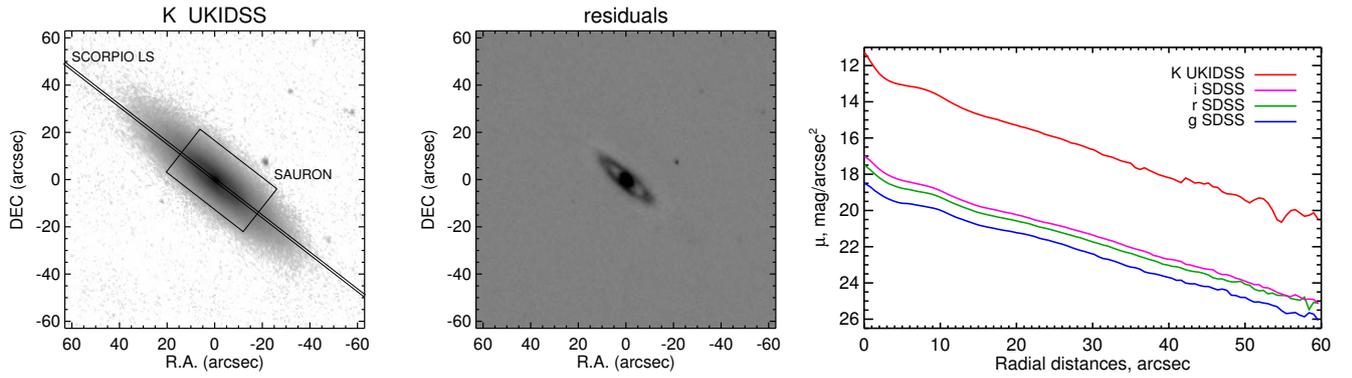


Рис. 5.1. Линзовидная галактика IC 719: *слева* – прямое изображение в K фильтре из обзора UKIDSS (DR8); *по центру* – остатки после вычитания из изображения модели экспоненциального диска; *справа* – азимутально усредненные профили поверхностной яркости посчитанные по изображениям из архива SDSS в g, r, i фильтрах и K фильтре UKIDSS.

5.1.2. Наблюдения

Длиннощелевые наблюдения проводились с новым универсальным спектрографом SCORPIO-2 [27] в прямом фокусе 6 метрового телескопа БТА (САО РАН). IC 719 наблюдалась в ноябре 2011 года с длиной щелью шириной $1''$, ориентированной вдоль большой оси галактики с суммарным накоплением 2ч 20м (7x1200 сек.). Медианное качество атмосферы в ходе наблюдений $\text{FWHM} \approx 1.5''$. Использовалась объемная фазовая голографическая решетка VPHG1200, которая обеспечивает умеренное спектральное разрешение $\text{FWHM} \approx 3.5 \text{ \AA}$ в спектральном диапазоне от 4300 \AA до 7300 \AA . ПЗС-матрица E2V CCD42-90 с размером 2048×4600 в режиме биннинга 1×2 определяет пространственный масштаб вдоль щели $0''.357$ на пиксель и масштаб вдоль дисперсии 0.84 \AA на пиксель. Процедура первичной редукиции данных идентична той, которая использовалась при наблюдениях других галактик и подробно изложена в Главе 1.

Также для исследования IC 719 мы использовали данные, полученные в рамках обзора ATLAS-3D [151] с панорамным спектрографом SAURON [152], установленным на 4.2 метровом телескопе имени Вильяма Гершеля (William Herchel Telescope, WHT) на Ла Пальме, Канарские острова. Необработанные

научные и калибровочные накопления были извлечены из открытого архива Группы Исаака Ньютона (Кембриджский Центр астрономических данных¹). Поле зрения спектрографа составляет 44x38 пространственных элементов с масштабом 0".94. Спектральный диапазон от 4800 Å до 5350 Å с разрешением около 4 Å. Подробное описание процедуры редукции данных представлены в работе [156].

5.1.3. Внутренняя кинематика и звездное население

Однокомпонентная модель спектра

Первым этапом исследования этой галактики было восстановление кинематики звезд и свойств звездных населений по длиннощелевому спектру SCORPIO с помощью алгоритма попиксельной аппроксимации интегральных спектров неразрешенных звездных систем NBURSTS. Мы аппроксимировали наблюдаемый спектр эволюционными моделями звездных населений, в которых заложена история звездообразования в виде мгновенной вспышки (simple stellar population, SSP) и Салпитеровская начальная функция масс звезд, а распределение звезд по скоростям (line-of-sight velocity distribution, LOSVD) задается в Гаусс-Эрмитовом виде. В результате анализа спектра мы получаем для каждого пространственного элемента кинематические параметры – лучевую скорость звезд v , дисперсию скоростей звезд σ_* , коэффициенты Эрмита h_3 , h_4 и параметры звездного населения – SSP-эквивалентные оценки возраста и металличности. Более подробное описание работы алгоритма было приведено в Главе 1.

Мы получили, что галактика имеет очень малую амплитуду вращения, несмотря на сильное наклонение плоскости галактики, профиль дисперсии скоростей имеет два нецентральных максимума, а коэффициент Эрмита h_3 , характеризующий асимметричные отклонения LOSVD от гауссового вида, достигает

¹ <http://casu.ast.cam.ac.uk/casuadc/ingarch/query>

больших значений $h_3 \approx 0.2$ (см. Рис. 5.2). Такой набор кинематических параметров свидетельствует о сильной асимметрии формы LOSVD звезд.

Непараметрическое восстановление кинематики звезд

Для более детального исследования формы LOSVD мы применили методику непараметрического восстановления LOSVD, которая детально описана в Главе 1 и не требует априорного задания формы LOSVD, что происходит при использовании, например, Гаусс-Эрмитовой параметризации. В качестве реперного спектра для непараметрического восстановления LOSVD мы использовали модельный спектр звездного населения, полученный с помощью NBURSTS. Результат непараметрического восстановления формы звездной LOSVD показан на Рис. 5.3 в виде диаграммы “позиция-скорость” (position-velocity, PV) и ее разрезов для нескольких пространственных элементов. Для тех же пространственных элементов приводится сравнение LOSVD, восстановленного непараметрически и в виде Гаусс-Эрмитовой функции (ступенчатая черная линия и тонкая линия на Рис. 5.3, *справа*). Четко видно, что Гаусс-Эрмитова функция не может описать сложную двухкомпонентную структуру распределения звезд по скоростям, которая обнаружена в IC 719. Поэтому кинематические оценки, полученные при аппроксимации наблюдаемого спектра одним звездным населением, следует считать несостоятельными.

Двухкомпонентная модель

На диаграмме “позиция-скорость” (Рис. 5.3, *слева*) четко видно, что распределение звезд по скоростям, имеет сложную структуру, состоящую из двух пиков сопоставимых интенсивностей, которые в центральной части галактики сливаются в один пик. Это означает, что на некотором расстоянии от центра галактики на луче зрения находятся две подсистемы звезд, обладающие различ-

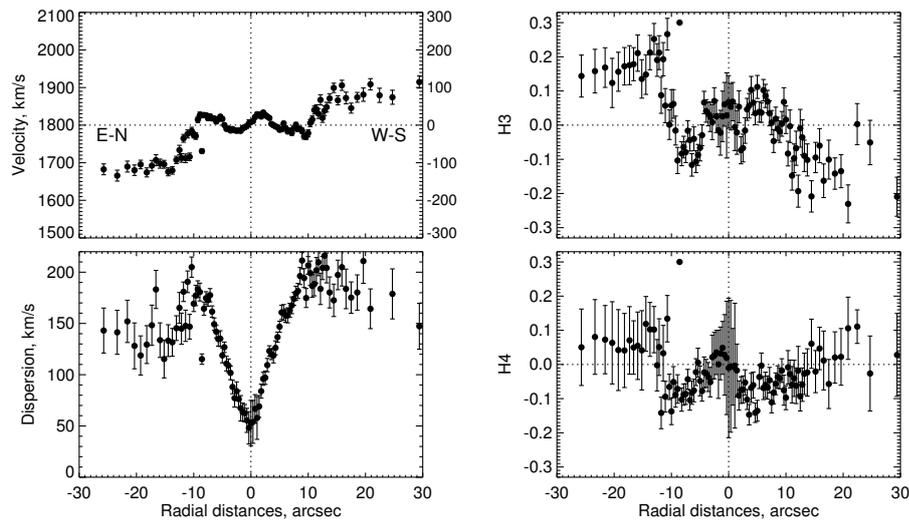


Рис. 5.2. Результат анализа длиннощелевого спектра IC 719: *вверху слева* – радиальный профиль скорости звезд вдоль луча зрения *снизу слева* – профиль дисперсии скоростей звезд, *справа сверху и снизу* – коэффициенты Эрмита h_3 , h_4 . Спектр вдоль щели бинировался для достижения отношения “сигнал-шум” в каждом бине $S/N = 15$ пиксель $^{-1}$.

ными кинематическими характеристиками. Компонент, имеющий бóльшей интенсивностью, будет называться основным или первичным, а компонент с меньшей интенсивностью – вторичным. Мы провели декомпозицию LOSVD звезд, восстановленного непараметрически, на две гауссианы для того, чтобы оценить средние скорости и дисперсии скоростей каждой из подсистем звезд. Центры гауссиан обозначены на Рис. 5.3 в виде кружков, а на выбранных разрезах показано как полученные гауссианы описывают восстановленное LOSVD. Видно, что распределение звезд по скоростям очень хорошо описывается моделью из двух гауссиан.

При непараметрическом восстановлении LOSVD, роль реперного спектра выполняет спектр звездного населения, полученный при однокомпонентной подгонке наблюдаемого спектра. Иными словами, при непараметрическом подходе в модели воспроизводится двухкомпонентная структура распределения по скоростям, но свойства звездных населений обеих подсистем звезд предполагаются одинаковыми, что в действительности может быть не так. Чтобы оценить свой-

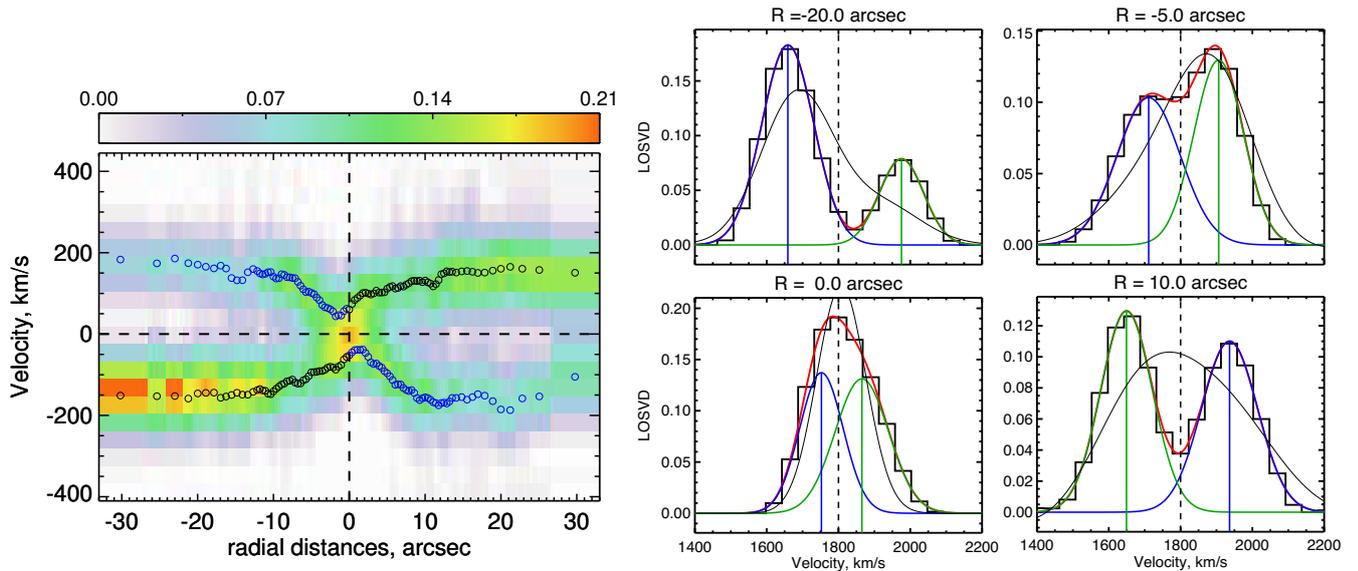


Рис. 5.3. Результат непараметрического восстановления распределения звезд по скоростям вдоль луча зрения. Слева – диаграмма “позиция-скорость” (PV-диаграмма) посчитанная для длинноволнового спектра. Черные и синие кружки обозначают положения центров гауссиан при разложении LOSVD на две гауссианы. Справа – разрезы PV-диаграммы вдоль оси скоростей для разных положений на щели ($R = -20, -5, 0, 10''$). Черная ступенчатая линия соответствует восстановленному LOSVD, красная линия – сумма двух отдельных гауссиан (синяя и зеленая линии). Тонкая черная линия соответствует параметрически восстановленному LOSVD при однокомпонентной аппроксимации спектра в Гаусс-Эрмитовом приближении.

ства населений отдельных компонентов, мы использовали расширение методики NBURSTS, которое позволяет аппроксимировать наблюдаемый спектр двумя различными звездными населением, каждое из которых обладает своей кинематикой. Добавление дополнительных параметров в модель с одной стороны может приводить к улучшению модели и уменьшению отклонений между моделью и наблюдениями, т.е. уменьшению величины χ^2 , но с другой стороны несет опасность привнесения дополнительных вырождений между параметрами и неустойчивости поиска оптимальных решений, сильно зависящих от начальных приближений. Для избежания подобных негативных эффектов за начальные приближения кинематических параметров были взяты значения скоростей и дисперсии скоростей, которые определили при аппроксимации непараметрического LOSVD двумя гауссианами, при этом дисперсии скоростей обоих компонентов фиксировались в процедуре минимизации. Таким образом, свободными параметрами остались: скорость обоих звездных подсистем и параметры звездных населений – возраст и металличность. На Рис. 5.4 показан пример наблюдаемого спектра в одном из пространственных элементов с наложенной на него наилучшей моделью абсорбционного спектра. Полученные радиальные профили параметров приведены на Рис. 5.5.

Такой же анализ спектров – однокомпонентная и двухкомпонентная аппроксимация спектров – проводилась для данных панорамного спектрографа SAURON. Дисперсия скоростей звезд при двухкомпонентном подходе фиксировалась на значении $\sigma_* = 70$ км/с. Результирующие двумерные карты параметров приводятся на Рис. 5.6.

По радиальным профилям и двумерным картам скоростей видно, что обособленные кинематические звездные подструктуры являются противовращающимися звездными дисками, об этом свидетельствует примерно одинаковая амплитуда скоростей $V_{rot} \approx 200/\sin i$ км/с и совпадение кинематических позиционных углов для обоих дисков. Оба компонента выглядят динамически холодными дис-

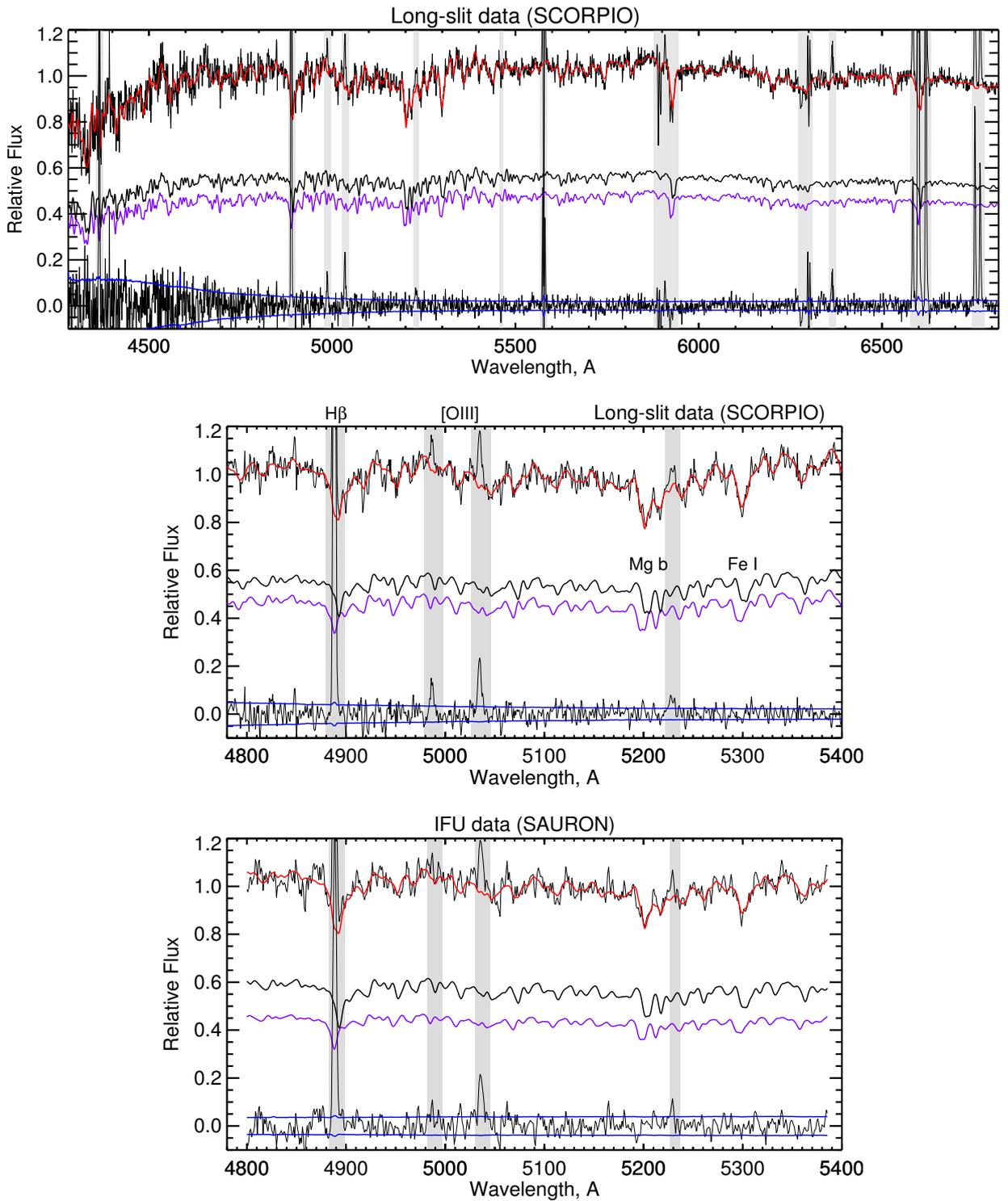


Рис. 5.4. Спектр галактики в пространственном элементе в $7'' - 8''$ к юго-востоку от центра галактики по длиннощелевым данным (верхний и средний график) и по данным панорамной спектроскопии (нижний график). Наблюдаемый спектр показан черной линией, красная линия соответствует наилучшей модели, которая является суммой двух компонентов (малиновая и черная линии). Остатки и уровень шума показаны в нижней части каждого графика. Серые вертикальные полосы соответствуют областям вокруг эмиссионных линий, которые исключаются из процедуры подгонки.

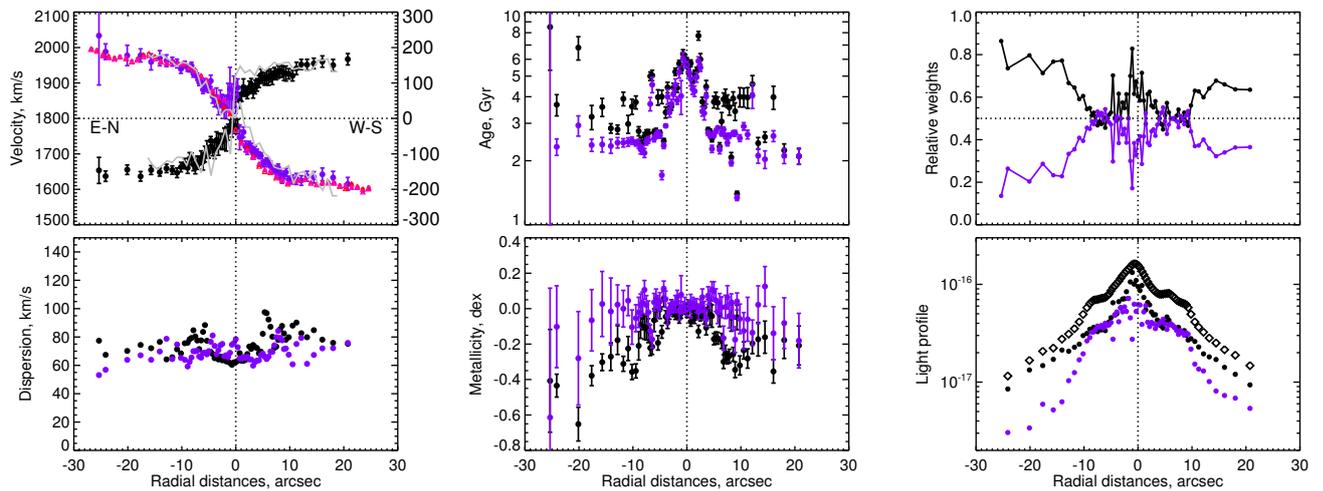


Рис. 5.5. Результат двухкомпонентной аппроксимации длиннощелевого спектра IC 719. Слева сверху – радиальный профиль скорости звезд (черные и синие кружки) и ионизованного газа по эмиссионной линии [N II] (малиновые треугольники) вдоль луча зрения; слева снизу – профиль дисперсии скоростей звезд; посередине – профиль SSP-эквивалентных оценок возраста (сверху) для обоих звездных компонентов и металличности (снизу); справа сверху – относительный вклад звездных компонентов в спектр, снизу – открытые ромбики показывают профиль яркости галактики вдоль щели, закрытые кружки – профили яркости отдельных компонентов. Спектр вдоль щели бинировался для достижения отношения “сигнал-шум” в каждом бине $S/N = 20$ пиксель⁻¹. Серая линия на профиле скоростей соответствует данным SAURON, извлеченным вдоль щели. Дисперсия скоростей звезд в ходе процедуры фиксирована, поэтому бары ошибок на профиле дисперсии отсутствуют.

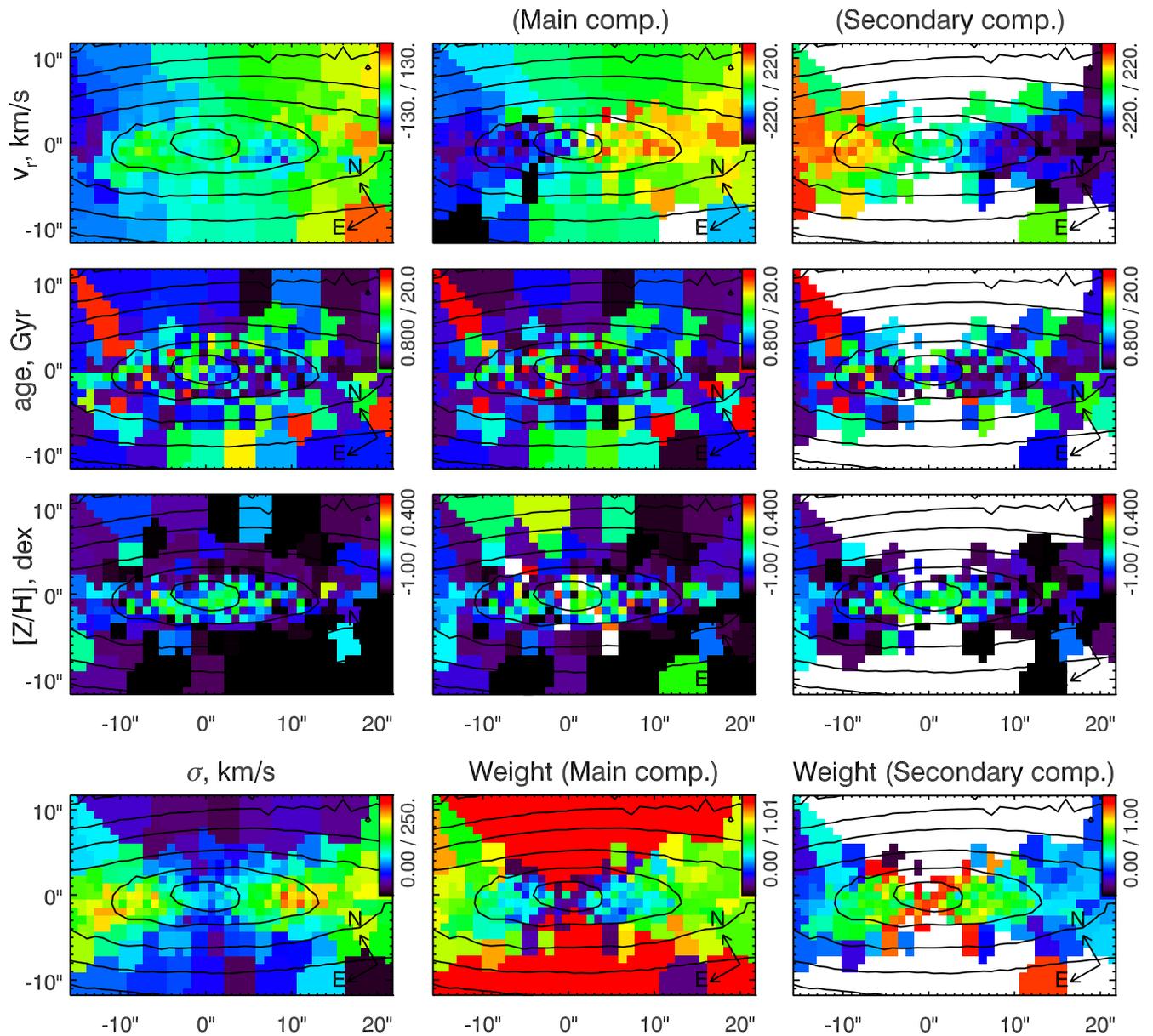


Рис. 5.6. Результат анализа спектров с панорамного спектрографа SAURON. *Левая* колонка содержит результат аппроксимации спектров одним звездным компонентом, *центральная и правая* колонки соответствуют результатам двухкомпонентного анализа спектров. *Сверху вниз* показаны карты скорости, SSP-эквивалентных оценок возраста и металличности. Последний ряд состоит из дисперсии скоростей звезд в однокомпонентном анализе спектра (*слева*) и карты относительных вкладов в интегральный спектр каждого звездного компонента (*центральная и правая* панели). Цветовая шкала имеет разный диапазон для поля скоростей в левой и остальных колонках.

ковыми структурами с отношением максимальной скорости вращения к дисперсии скоростей $V_{rot}/\sigma_* \approx 3$. Вторичный компонент, который дает меньший вклад в поверхностную яркость диска на $R > 20''$, со-вращается с ионизованным газом и выглядит более молодым ($T_{sec} \approx 2.5$ млрд. лет) и более обогащенным металлами ($[Z/H]_{sec} \approx -0.1 \div 0.0$ dex) по отношению к основному диску ($T_{main} \approx 4$ млрд. лет, $[Z/H]_{main} \approx -0.3 \div -0.2$ dex).

Отождествление крупномасштабных звездных структур в IC 719 с холодными дисковыми структурами также поддерживается поверхностной фотометрией. Мы построили азимутально усредненный профиль яркости по изображениям в g, r, i -фильтрах Слоановского обзора неба (SDSS)² и в фильтре K инфракрасного обзора UKIDSS используя модуль ELLIPSE из системы обработки данных IRAF³, реализующий метод анализа изображения в эллиптических изофотах [157] (см. Рис. 5.1) и обнаружили, что профиль выглядит квази-экспоненциальным с компактной концентрацией в центре и не имеет следов массивного балджа. На радиусе $R = 7'' - 10''$ можно заметить избыток яркости, который по-видимому связан с вкладом вторичного компонента. Этот избыток яркости имеет кольцевую форму и хорошо виден на двумерной картине разности прямого изображения галактики в фильтре K и двумерной модели экспоненциального диска, построенной по внешним областям галактики ($R > 20''$) с помощью пакета двумерной декомпозиции изображений GALFIT [158].

5.1.4. Ионизованный газ

Мы проанализировали чисто эмиссионный спектр ионизованного газа, который получился в результате вычитания модели абсорбционной подложки звезд из наблюдаемого спектра, аппроксимируя каждую линию гауссианной, свернутой с инструментальным контуром спектрографа. Кинематические профили и

² <http://www.sdss.org/>

³ <http://iraf.noao.edu/>

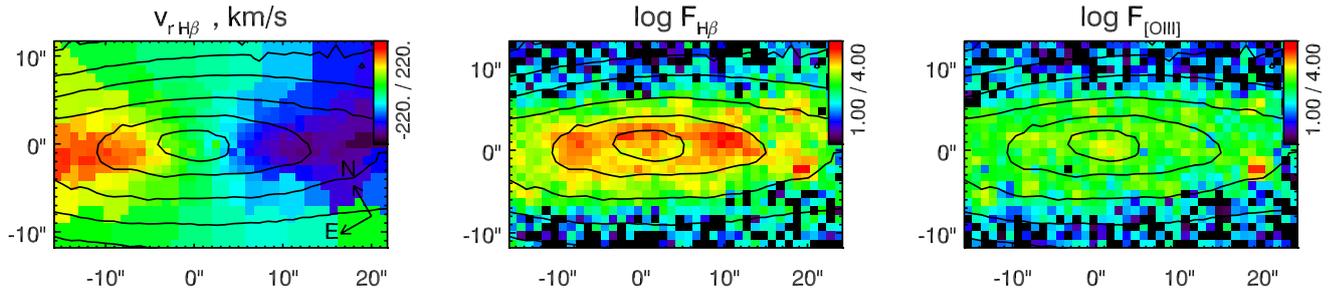


Рис. 5.7. Результат анализа эмиссионных линий по данным SAURON. Слева поле скоростей ионизованного газа, построенное по эмиссионной линии $H\beta$; посередине и справа карты интенсивностей эмиссионных линий $H\beta$ и $[O III] \lambda 5007 \text{\AA}$.

карты скоростей ионизованного газа и карты потоков в эмиссионных линиях показаны на Рис. 5.5, 5.7. Ионизованный газ вращается так же, как и вторичный звездный диск, а распределение потока в линии $H\beta$ демонстрирует кольцевую структуру с радиусом $R \approx 10''$. Учет внутреннего поглощения межзвездной средой был сделан стандартным способом по бальмеровскому декременту. Мы нанесли наши измерения потоков в эмиссионных линиях на классическую диагностическую диаграмму механизмов возбуждения ионизованного газа [106]. Практически все точки располагаются в области доминирования механизма фотоионизации излучением молодых звезд, за исключением нескольких точек для центральной части галактики, попавших в область доминирования механизма нетеплового излучения от слабого активного ядра (LINER) или ударных волн (см. Рис. 5.8).

Для оценки обилий кислорода и азота в газе по измерениям эмиссионных линий мы использовали недавно предложенную Пилюгиным и Маттссеном NS-калибровку [159]. Эта калибровка не требует наличия линии кислорода $[O II] \lambda 3727 + \lambda 3729$, а базируется на линиях O^{++} , N^+ , S^+ . Калибровочные соотношения построены между потоками в линиях $H\beta$, $[O III] \lambda 5007$, $H\beta$, $[N II] \lambda 6548, 6583$, $[S II] \lambda 6717, 6730$ и обилиями кислорода и азота, измеренными по ярким HII областями прямым T_e -методом. Сравнение обилий кислорода и

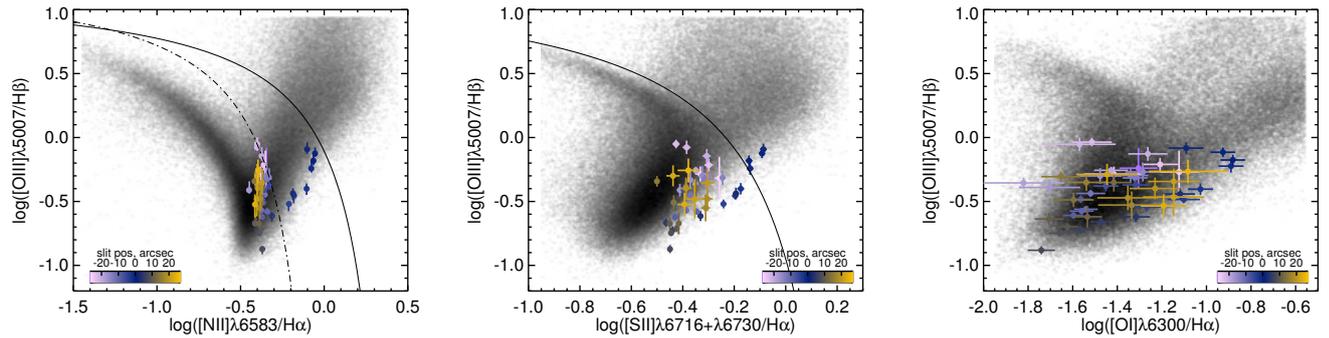


Рис. 5.8. Диагностические диаграммы механизмов ионизации газа. Слева диаграмма отношений линий $[N II]/H\alpha$ против $[O III]/H\beta$; посередине $[S II]/H\alpha$ против $[O III]/H\beta$ и справа $[O I]/H\alpha$ против $[O III]/H\beta$. Цветные точки показывают измерения эмиссионных линий по длиннощелевому спектру IC 719. Цветом закодировано расстояние от центра галактики. Для сравнения серым облаком показаны измерения отношений линий в спектрах SDSS для нескольких тысяч галактик, для которых “сигнал-шум” $S/N > 3$ в каждой линии. Черная сплошная линия разделяет область, где доминирующим механизмом ионизации газа является излучения от молодых звезд (снизу от линии), от области, где главную роль в ионизации могут играть нетепловое излучение ядра галактики (AGN/LINER), возбуждение ударными волнами или излучение звезд, сошедших с асимптотической ветви гигантов (post-AGB) взята из работы Кьюли и др. [105], а пунктирная линия из работы Кауффманн и др. [104].

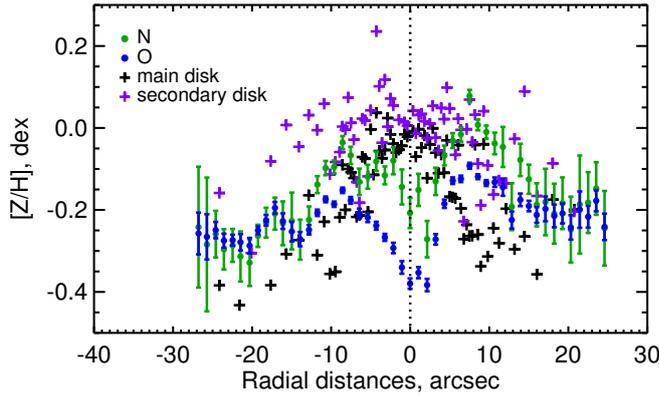


Рис. 5.9. Радиальные профили металличности звезд для обоих звездных компонентов (фиолетовые и черные крестики) и обилия кислорода (синие точки) и азота (зеленые точки) в ионизованном газе. Чтобы отобразить обилия элементов ионизованного газа в той же шкале что и звездная металличность, были приняты солнечные обилия кислорода $12 + \log O/H = 8.69$ и азота $12 + \log N/H = 7.83$ [130].

азота со звездной металличностью приводится на Рис. 5.9. В целом металличность газа выше, чем металличность основного звездного компонента и немного меньше или равна металличности вторичного звездного диска.

5.1.5. Обсуждение

Более ранние исследования галактики IC 719 были проведены научной группой ATLAS-3D, где они отмечали, что IC 719 обладает двумя нецентральными максимумами на поле дисперсии скорости, а поле скоростей характеризовали как нерегулярное и классифицировали IC 719 как быстрый ротатор на эффективном радиусе ($R_e = 12.6''$), который становится медленным при приближении к центральной части галактики (на $R_e/2$), что возможно связано с наличием противовращающихся компонентов [160, 161]. Однако анализируемое ими поле скоростей получено в предположении однокомпонентного звездного населения. Как было показано нами, при использовании более корректного приближения, учитывающего как присутствие двух компонентов, так их кинематическую и эволюционную обособленность друг от друга, даже в центральной области галактики диски обладают достаточно высокой амплитудой вращения (см. Рис. 5.5). Максимумы дисперсии скоростей на самом деле соответствуют

области, где оба компонента имеют сопоставимый вклад в спектр и при этом достаточное разделение по кинематике.

Впервые методика спектральной декомпозиции противовращающихся звездных дисков была предложена в работе Коккато и др 2011 [55]. Они одновременно измерили кинематику и свойства звездных населений противовращающихся звездных дисков в галактике NGC 5719 и обнаружили, что звездный компонент, который вращается в том же направлении, что и ионизованный газ, является более молодым, менее обогащенным металлами, но обогащен α -элементами и имеет меньшую светимость по отношению к основному звездному диску. Позже эта же команда исследователей изучила звездные населения еще двух хорошо известных примеров галактик с противовращением – NGC 3593 и NGC 4550 [56]. В обеих галактиках вторичный компонент менее массивный, имеет повышенную металличность и обилие α -элементов по сравнению с основным диском и со-вращается с ионизованным газом. Авторы делают вывод, что их находки исключают возможность образования вторичных компонентов внутренними динамическими механизмами, а свидетельствуют в пользу сценария образования путем внешней аккреции газа. Галактика NGC 4550 была исследована схожей методикой в работе Джохнстон и др. [57]. Авторы получили, что возраст вторичного диска немного моложе, чем в работе Коккато и др. [56]. В обеих работах делается вывод, что наиболее вероятным механизмом образования вторичных звездных компонентов в NGC 4550 является аккреция газа.

Какова причина образования противовращающегося диска в IC 719? Наиболее вероятной причиной является приобретение внешнего вещества в виде газа или звезд, обладающего угловым моментом отличным от углового момента самой галактики. В более общей форме ответом на поставленный вопрос могут быть процессы слияния или взаимодействия.

Как видно из анализа эмиссионного спектра, химия газа не является сильно обедненной металлами (по крайней мере в пределах звездного тела галактики),

что дает основание исключить предположение о первичности вещества противовращающегося газового диска, которое никогда не было обогащено в процессе жизни и эволюции звезд. Поэтому из рассмотрения следует исключить процесс холодной аккреции газа из космологических филаментов [102, 103], для которого ожидается металличность газа на уровне $1/10$ от солнечной $Z_{gas} \approx 1/10Z_{\odot}$ [138]. При этом IC 719 составляет изолированную невзаимодействующую пару с галактикой позднего типа сопоставимой светимости – IC 718. Картирование распределения нейтрального водорода показало, что обе галактики находятся в едином огромном облаке газа [153, 154]. HI диск IC 719 простирается до 100 кпк от центра галактики и выглядит компланарным по отношению к звездному диску. Сценарий слияния с некоторой третьей галактикой маловероятен в виду большой массы газа (по крайней мере 0.7 млрд. M_{\odot}) и умеренной звездной массы, около $6 \times 10^{10} M_{\odot}$ (см. M_K в Таблице 5.1), что предполагает слияние галактик с отношением масс более 1:10, которое привело бы к разрушению тонкого звездного диска [162, 163], если не рассматривать очень специфических условий – интенсивного и быстрого остывания горячего газа в гало [164] (однако сообщений о наличии рентгеновского гало у этой галактики не было) или строго компланарного падения спутников. Тем не менее, оба звездных диска в IC 719 остаются динамически холодными.

Несомненно, диск ионизованного газа обладает тесной взаимосвязью со вторичным звездным диском. Более того, процесс звездообразования в диске скорее всего начался совсем недавно и не успел произвести заметную долю молодого звездного населения, поэтому в массе наблюдается звездное население диска возрастом более 2 млрд. лет. Можно рассмотреть два сценария аккреции вещества с дальнейшим формированием противовращающихся структур.

- 1) Газ был приобретен галактикой в ходе одного события аккреции газа, с последующими двумя вспышками звездообразования, первая из которых образовало звезды вторичного диска, а вторая продолжается в настоящее время.
- 2)

Было два события аккреции газа, каждое с последующим звездообразованием. Мы отдаем предпочтение последнему сценарию, потому что первый сценарий не согласуется с нашими измерениями металличностей газа и звезд. В самом деле, в первом сценарии ожидается, что металличность самообогащенного газа будет выше металличности звезд вторичного компонента, однако Рис. 5.9 говорит скорее об обратном. Второй сценарий допускает, что межзвездная среда в галактике является результатом перемешивания бедного металлами внешнего газа со внутренним уже обогащенным газом и обладает меньшей металличностью, чем вторичный компонент, что согласуется с нашими измерениями. По всей видимости, крупномасштабный противовращающийся диск в IC 719 находится в стадии роста и в будущем станет похожим на галактику NGC 4550 – S0 галактику, обладающую двумя равными по массе противовращающимися звездными дисками [165, 166] без следов звездообразования [167].

5.2. Кинематика и звездное население линзовидной галактики NGC 4124

5.2.1. Введение

NGC 4124 – локально изолированная линзовидная галактика, имеющая галактоцентрическую скорость около 1600 км/с. Оптический радиус галактики $D_{25}/2 = 128''$. Галактика находится на расстоянии около 6 градусов от центральной галактики скопления VIRGO (M87), и, по-видимому, принадлежит этому скоплению, находясь на его периферии. Ее изображение (по данным обзора SDSS в фильтре r) показано на Рис. 5.10. Оно достаточно типично для S0-галактик: NGC 4124 не имеет тонких структурных деталей. Красноватый цвет звездного населения, $B - V = 0.83^m$, свидетельствует об отсутствии заметного текущего звездообразования в галактике в целом. Содержание HI в

галактике крайне низкое (по GOLDMINE⁴, $\log(M_{HI}/M_{\odot}) < 7.24$), что также характерно для линзовидных галактик; однако при этом в ней содержится весьма заметное количество молекулярного газа, $\log(M(H_2)/M_{\odot}) = 7.88$ [168]. По данным фотометрических наблюдений в инфракрасной полосе H галактика обладает небольшим балджем [169] (см. также GOLDMINE) с эффективным радиусом $r_{e,b} = 8''$, его вклад в светимость около 11%. Эффективный радиус диска с экспоненциальным профилем яркости в цитируемой работе найден равным $r_{e,d} = 57''$, чему соответствует радиальная шкала диска $r_0 = 34''$, или 2.8 кпк при принимаемом здесь расстоянии 17 Мпк. По данным HYPERLEDA⁵ угол наклона диска галактики, исходя из отношения осей изофот $b/a = 0.69$, составляет $i = 53^{\circ}$. Это явно завышенное отношение: в базе данных NED⁶ приведено $b/a = 0.33$, что, по-видимому, ближе к истине.

Наиболее любопытной деталью галактики является околядерная область радиусом $10'' - 15''$ (около 1 кпк), выделяющаяся на изображении галактики как кольцеобразная эллиптическая структура, вытянутая под тем же позиционным углом, что и диск (Рис. 5.10). Ближе к ядру отчетливо видна небольшая темная дуга, очевидно, связанная с поглощением света, полуэллипсом охватывающая ядро с северной стороны. Именно эта дуга и создает впечатление внутренней границы яркого кольца, окружающего ядро, хотя в действительности околядерный диск может быть сплошным, а не кольцеобразным. Заметим, что на карте распределения показателя цвета $g - r$, полученной по данным SDSS (Рис. 5.10), на фоне общего однородного цвета галактики выделяется только “красная” пылевая дуга, повышенный (по сравнению с окружением) показатель цвета которой свидетельствует о том, что она образована полупрозрачной средой, проецирующейся на яркий балдж.

⁴ <http://goldmine.mib.infn.it/>

⁵ <http://leda.univ-lyon1.fr/>

⁶ <http://ned.ipac.caltech.edu/>

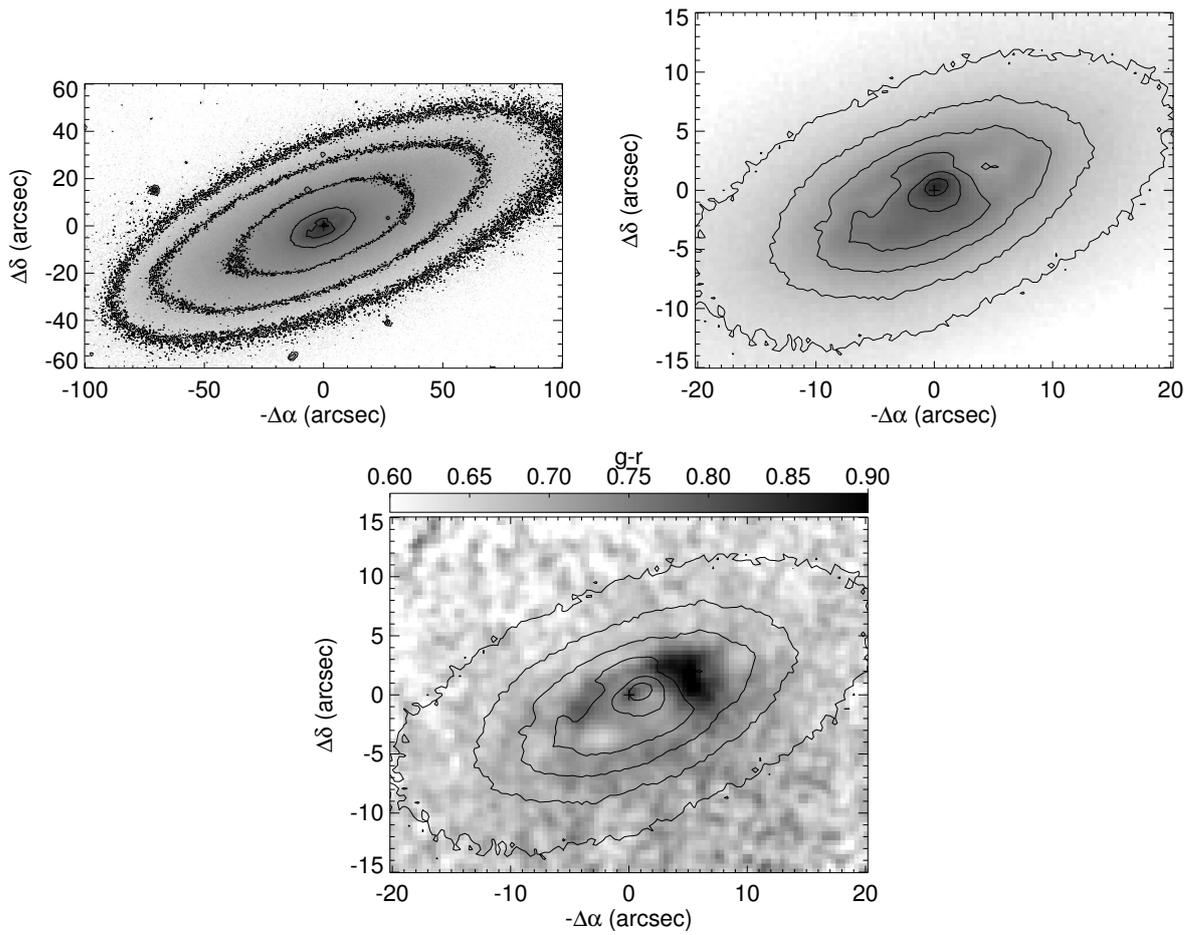


Рис. 5.10. *a)* изображение галактики NGC 4124 в фильтре r по данным SDSS; *b)* центральная область галактики; *c)* карта показателя цвета $g - r$.

Щелевой спектр галактики, полученный в работе Кьюджкен и др. [99], выявил наличие газа во внутренней области галактики, который вращается в ту же сторону, что и звездный диск, однако кривая вращения в работе не приведена. По оценкам этих авторов, около 25% линзовидных галактик имеют небольшие газовые противовращающиеся диски в центре. Поскольку при приобретении газа извне через поглощение спутника с произвольно ориентированной в пространстве орбиты прямое и обратное направление вращения равновероятны, можно предположить, что околядерные газовые диски, имеющие аккреционную природу, встречаются примерно у половины линзовидных галактик. При этом, согласно нашим результатам, изложенным в Главе 4, в изолированных S0 галактиках этот процент может достигать до 100%.

5.2.2. Наблюдения и обработка данных

Спектральные наблюдения

Спектральные наблюдения галактики NGC 4124 были проведены 20 февраля 2010 года в прямом фокусе 6-метрового телескопа БТА САО РАН с редуктором SCORPIO [28] в режиме длинной щели. Щель шириной 1" была ориентирована вдоль большой оси галактики, $PA = 112^\circ$. Длина щели 6.1 минут дуги, что позволяет использовать спектры с краев щели для учета (вычитания) спектров ночного неба. Масштаб вдоль щели составлял 0.36"/рх. Суммарная экспозиция составила 2 часа при качестве изображений 2". При наблюдениях использовалась голографическая решетка VPHG2300 с максимумом чувствительности в зеленой области спектра, обеспечивавшая спектральное разрешение 2.2 Å в диапазоне 4800–5500 Å.

Также при анализе кинематики мы использовали данные панорамного спектрографа SAURON [152], полученные для NGC 4124 1 марта 2008 года на 4.2-метровом телескопе Вильяма Гершеля (Ла Пальма, Канарские острова) в

рамках проекта ATLAS-3D [151]; данные наблюдений, вместе с калибровочными экспозициями (байес, лампа спектра сравнения, лампа континуального спектра, сумеречное небо) так же, как и для IC 719, были взяты из публичного архива Группы Исаака Ньютона (Кембриджский Центр астрономических данных). При экспонировании панорамного спектра со спектрографом SAURON использовался интерференционный фильтр, который вырезает спектральный диапазон 4800–5350 Å; обратная дисперсия 1.16–1.17 Å, спектральное разрешение около 4 Å. Рабочее поле зрения спектрографа – 44×38 элементов, при масштабе 0.94'' на элемент (на линзу). Небо в 1.7' от центра исследуемого объекта экспонировалось в крайних линзах блока одновременно с объектом. Для первичной обработки данных SAURON, использовался комплекс программ Власюка [170], созданный в свое время для обработки данных MPFS и модифицированный автором пакета с учетом особенностей конструкции SAURON. Более подробное описание редукции данных спектрографа SAURON можно найти в работе [156].

Редукция и анализ спектров проводилась таким же образом, как и для галактик рассмотренных в предыдущих главах. Кратко, наблюдаемые спектры аппроксимировались по-пиксельно моделями эволюционного синтеза звездных населений Pegase.HR [43] с помощью программного пакета NBURSTS. Модельная абсорбционная подложка вычиталась из наблюдаемых спектров, чтобы получить чистые эмиссии для их аппроксимации гауссианами. Результат обработки в виде радиальных профилей параметров модели: скорости, дисперсии скоростей, возраста и металличности звезд, а также поле скоростей звезд и газа и распределение потоков в линиях, приводятся на Рис. 5.11, 5.12, 5.13.

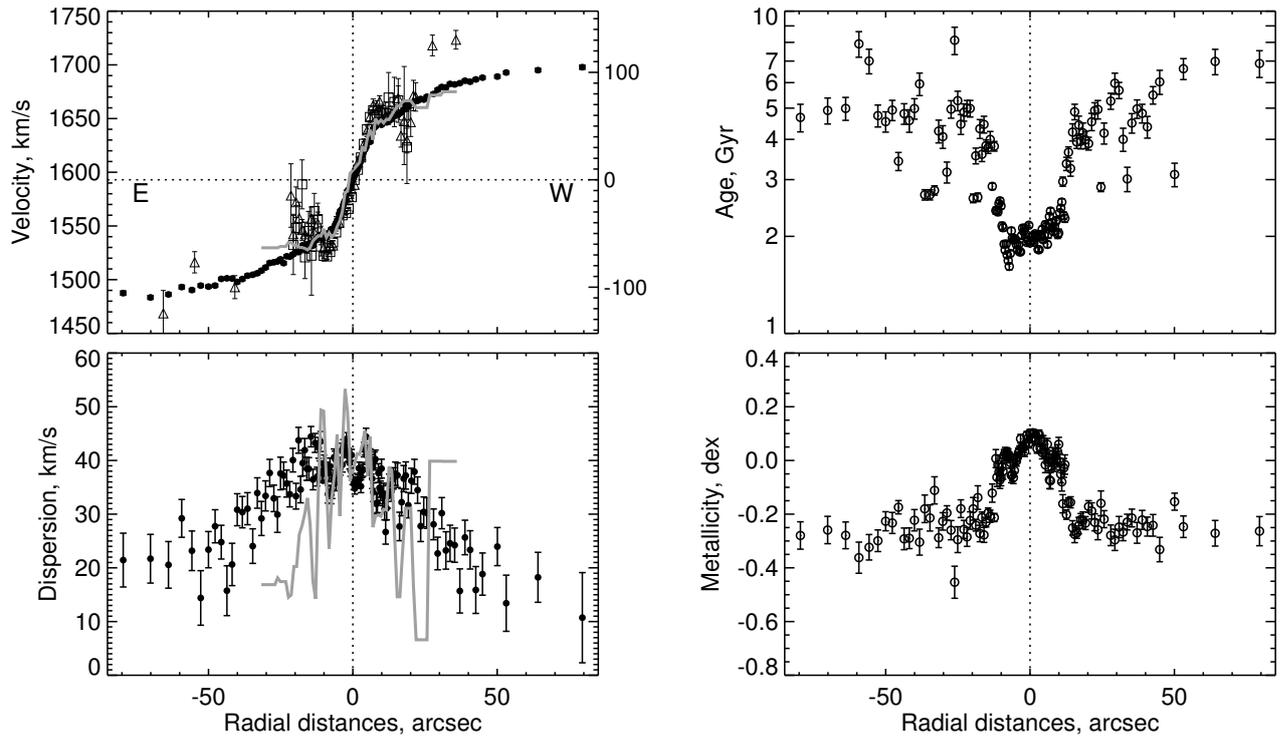


Рис. 5.11. Результаты обработки длиннощелевого спектра, полученного вдоль большой оси. Слева: радиальные профили лучевой скорости (сверху) и дисперсии скоростей (снизу). Скорости звезд обозначены черными точками, скорости по линиям [O III] и $H\beta$ – открытыми треугольниками и квадратами, соответственно. Справа: профили возраста (сверху) и металличности (снизу) звездного населения. Серой линией обозначены профили параметров по данным SAURON вдоль псевдощели.

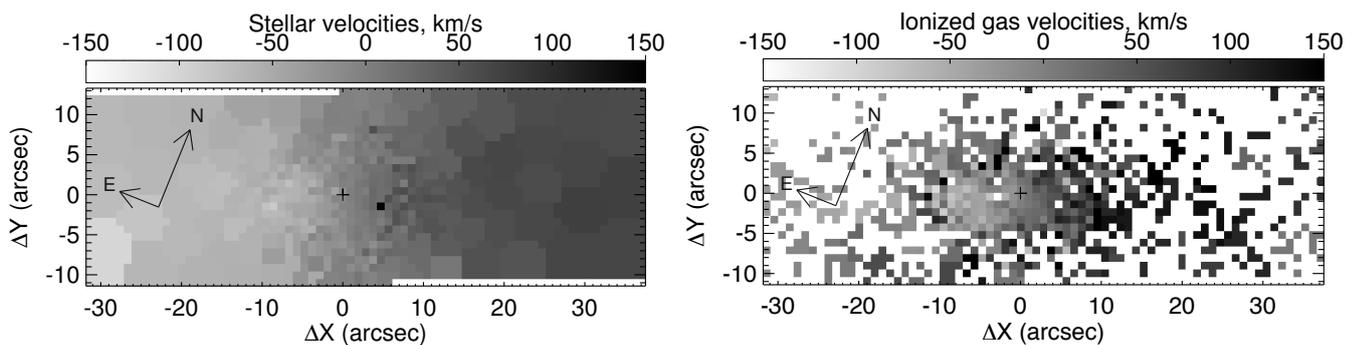


Рис. 5.12. Поля лучевых скоростей звезд (слева) и ионизованного газа (справа) по данным SAURON.

Фотометрия

Для анализа структуры галактики использовались публичные данные проекта SDSS/DR7. Была построена карта цвета $g-r$ (Рис. 5.10) и проведен анализ

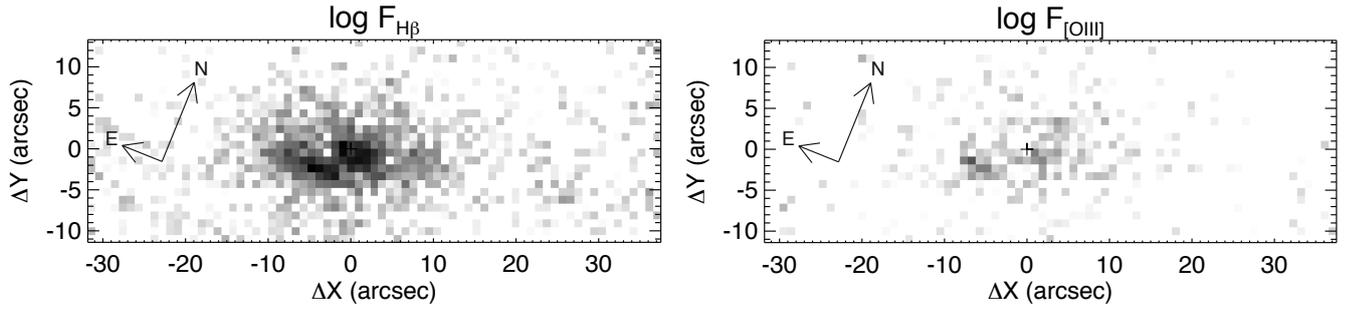


Рис. 5.13. Карты потоков (в относительных единицах) в эмиссионных линиях $H\beta$ (слева) и $[O III]$ (справа) по данным SAURON. Шкалы интенсивности одинаковы.

распределения поверхностной яркости в галактике, для чего мы использовали изображение в фильтре r (масштаб $0.4''$ на пиксель, качество изображений около $1''$). Одновременно определялись формы изофот (позиционный угол большой оси, эллиптичность, “ящикообразность” (boxiness)) и строился профиль поверхностной яркости. Яркость усреднялась в эллиптических кольцах, форма которых соответствует ориентации и вытянутости внешних изофот. Будучи отнесенными к тонкому круглому диску, изофоты дают нам углы ориентации в пространстве для плоскости симметрии галактики. На Рис. 5.14 представлен профиль поверхностной яркости галактики и параметры изофот. Видно, что на расстояниях от центра больше $20''$ в поверхностной яркости доминирует квази-экспоненциальный диск. На радиусе $R \approx 40''$ в профиле яркости виден некоторый избыток – широкая малоконтрастная кольцевая структура. Если аппроксимировать профиль поверхностной яркости диска экспоненциальным законом, исключая кольцо на $R = 35'' - 65''$, то мы находим радиальную шкалу диска $r_0 = 34''$, что согласуется с оценкой Гаваззи и др. [169], полученной при анализе изображения в ближнем инфракрасном диапазоне, в фильтре H . Из Рис. 5.14 (справа) следует, что эллиптичность изофот во внутренней части диска – 0.52; принимая отношение осей галактики $b_0/z_0 = 0.20 - 0.30$, получаем, что такая эллиптичность изофот соответствует углу наклона $i = 64 - 67^\circ$. Однако дальше от центра, на $R > 30''$, эллиптичность изофот несколько увеличивается, до

$1 - b/a = 0.64$, чему соответствует $i \approx 72^\circ$, а форма начинает отличаться от чисто эллиптической – она становится слегка “ящикообразной”. Причиной такого поведения эллиптичности может быть небольшой изгиб звездного диска (на $\sim 5^\circ$, учитывая постоянство ориентации линии узлов). Отклонение внешних изофот от эллиптичности свидетельствует о некотором нарушении осевой симметрии диска в его внешних областях (oval distortion).

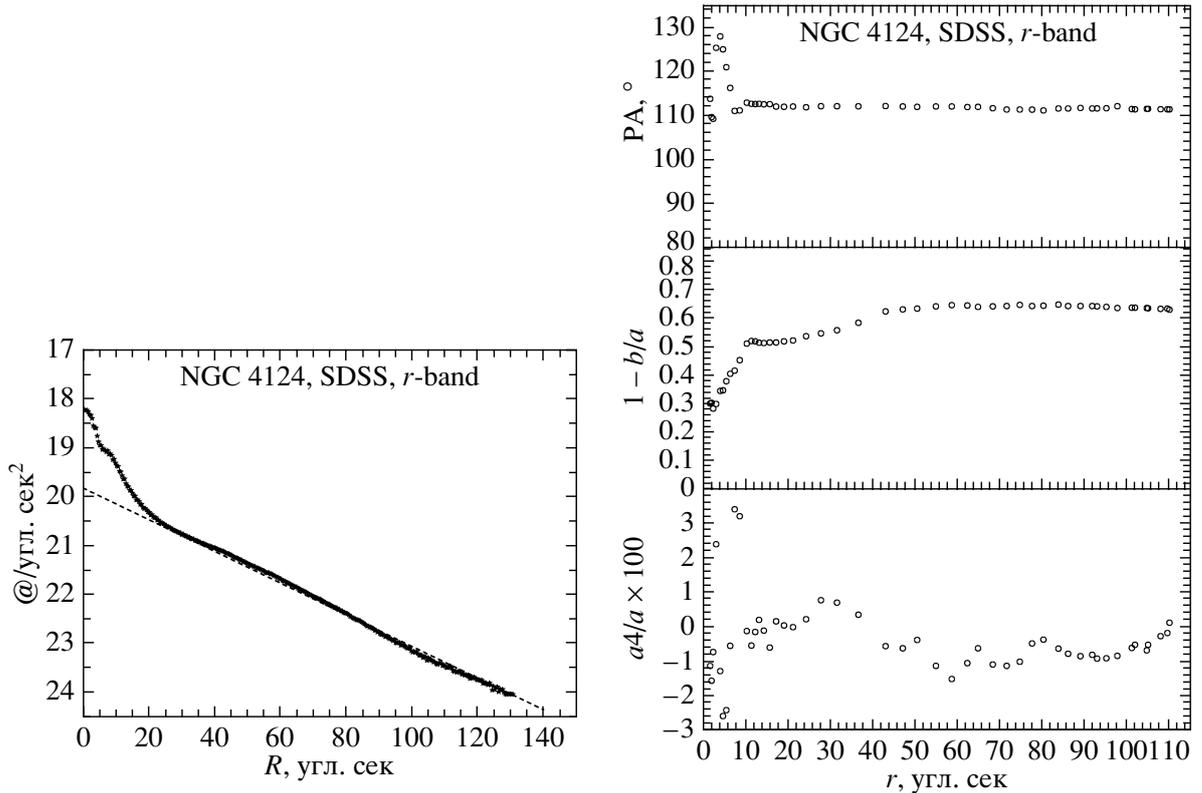


Рис. 5.14. Изофотный анализ изображения галактики NGC 4124 в фильтре r . *Слева*: радиальный профиль поверхностной яркости. Прямая линия – соответствует принятому экспоненциальному закону спада яркости; *справа*: радиальное распределение позиционного угла изофот, их сплюснутости и степени отличия от эллипсов.

5.2.3. Результаты анализа

На Рис. 5.11 показаны результаты обработки спектра, полученного вдоль большой оси. Длинная кривая, отражающая вращение диска (черные точки), прослеживается только для звездного компонента. Вращение звездного диска

имеет регулярный характер и прослеживается до $80''$. Совсем иначе ведет себя скорость газа. Градиент скорости на $R < 10''$ немного более крутой, чем для звезд, при этом регулярная скорость вращения прослеживается только в пределах околядерного диска. На $R > 10''$ скорость газа быстро падает симметрично с обеих сторон от центра, причем более круто, чем можно ожидать при круговом вращении в одной плоскости. Такой характер кривой указывает на то, что газовая система динамически обособлена от звездной. Без построения двумерного поля скоростей было бы трудно судить об ориентации плоскости, в которой движется газ, хотя о том, что она сильно наклонена к лучу зрения, свидетельствует упоминавшаяся выше пылевая дуга. Отношение видимых полюсей для нее составляет примерно 1:10 (для тонкого диска это соответствует наклонению 84°). Резкое падение скорости газа по обе стороны от центра на границе “кольца” в этом случае говорит об изгибе газового слоя и/или о резком возрастании некруговых движений в области, где газовый диск “входит” в звездный. По-видимому, этот эффект наблюдается на западной стороне от ядра, где выделяется область некруговых движений газа, которые ярче всего демонстрирует линия [O III]: лучевые скорости газа там на 20–60 км/с выше, чем скорости звезд. На изображении галактики эта область совпадает с концом пылевой дуги, где она переходит в темное пятно.

Чтобы оценить ориентации плоскостей вращения звезд и газа в центральной области NGC 4124, мы использовали двумерные поля лучевых скоростей, полученные по данным панорамного спектрографа интегрального поля SAURON (Рис. 5.12). В интервале расстояний от центра $7'' - 35''$ звездный компонент демонстрирует регулярное круговое вращение с постоянными параметрами ориентации плоскости вращения. Применение метода скользящих наклонных колец (tilted-rings) дает уверенные оценки для углов ориентации: позиционный угол линии узлов $PA_0 = 292^\circ$, что совпадает с ориентацией большой оси изофот, и наклон плоскости вращения к лучу зрения $i_* = 63^\circ \pm 4^\circ$, также согласующийся с

формой изофот в пределах поля зрения SAURON (см. выше). Анализ поля скоростей газа, проведенный ранее в рамках обзора ATLAS-3D, содержит только ориентации кинематических больших осей (поскольку сделан методом кинеметрии Фурье-разложением поля лучевых скоростей в азимутальном направлении [171]): в статье Дэвис и др. [23] приводятся значения $PA_{ion.gas} = 293^\circ \pm 19^\circ$ и $PA_{mol.gas} = 296^\circ \pm 12^\circ$. Для оценки ориентации газового диска мы использовали поле скоростей ионизованного газа, построенное по эмиссионной линии $H\beta$. Распределение потоков в линии $[O\ III]\lambda 5007$ выглядит довольно фрагментированным, а величина потока по всему полю меньше потока в линии $H\beta$ (см. Рис. 5.13). Наиболее яркая область на Рис. 5.13 соответствует ядру галактики, а вторая яркая эмиссионная область расположена вблизи конца пылевой дуги. Ориентация кинематической большой оси газового диска видимо совпадает с линией узлов звездного диска. При этом угол наклона плоскости вращения к лучу зрения на всем протяжении газового диска, вплоть до $R = 12''$, получается очень большим, $i_{gas} > 82^\circ$. Таким образом, наши кинематические данные свидетельствуют в пользу ориентации газового диска практически с ребра, подтверждая визуальное впечатление от ориентации околоядерной кольцевой пылевой структуры. Учитывая ориентацию диска, мы приходим к выводу, что газовый диск наклонен к плоскости симметрии галактики (к плоскости звездного диска) на $11 - 25^\circ$.

Звездная дисперсия скоростей в области $R < 20''$ не превышает величины 35–45 км/с (см. Рис. 5.11) и имеет два симметричных относительно центра минимума, локализованных в кольце повышенной яркости эмиссионной линии $H\beta$. В центре, где доминирует балдж, она максимальна, однако за пределами околоядерного диска дисперсия монотонно спадает до значений 10–20 км/с на $R \approx 72'' - 80''$. Анализ звездных населений мы проводили на основе только длиннопериодических данных, которые имеют более высокое отношение “сигнал-шум” и более высокое спектральное разрешение. На Рис. 5.11 (справа) приведено рас-

пределение среднего возраста звездного населения, определенного в рамках модели с одной короткой эпохой звездообразования (SSP модель). В околоядерном диске преобладает население промежуточного возраста (около 2 млрд. лет). За границей центрального диска возраст звездного населения резко возрастает до 4 млрд. лет и продолжает возрастать по мере удаления от ядра. Профиль металличности имеет зеркальный характер: в центре галактики металличность звезд $[Z/H]=0.00 \pm 0.1$ dex близка к солнечной, а за пределами $10'' - 15''$ она опускается до половины солнечного значения ($[Z/H] \approx -0.3$ dex). Такое двухуровневое распределение металличности и возраста довольно часто встречается в линзовидных галактиках и свидетельствует о быстром и раннем завершении звездообразования в основном звездном диске и об “омоложении” центральной области галактики во вторичной вспышке звездообразования на промежуточных красных смещениях $z < 0.5$ [26].

5.2.4. Обсуждение

NGC 4124 оказалась небольшой по размеру линзовидной галактикой, обладающей довольно ярким и массивным диском, центральная поверхностная плотность которого составляет $320 - 380 M_{\odot}/\text{пк}^2$ (см. [16], §, посвященный декомпозиции кривой вращения NGC 4124). Для сравнения, экстраполированная к центру плотность диска нашей Галактики, определенная по кривой вращения и соответствующая значениям M_d и r_0 в модели, предложенной в работе Софю [172], в полтора раза выше ($530 M_{\odot}/\text{пк}^2$). По-видимому, уже после формирования звездного диска исследуемая галактика потеряла и/или не смогла аккрецировать достаточное количество газа для продолжения звездообразования, что следует из относительно большого возраста звездного населения диска. Тем не менее, галактика несколько миллиардов лет назад должна была поглотить небольшой спутник, о чем свидетельствует наблюдаемый наклонный

газовый диск в центральной килопарсековой области. Судя по наличию полупрозрачного слоя пыли в этом диске, речь может идти о карликовой галактике, содержащей газ и пыль, причем попадание газа проглоченной галактики в центральную область NGC 4124 привело к вспышке звездообразования в центральной области – по крайней мере до $R < 20''$, что следует из сравнительно низкого среднего возраста звездного населения в этой части галактики. Судя по эмиссионному спектру газового диска, слабое звездообразования в нем продолжается и в современную эпоху.

Отличительной особенностью рассматриваемой галактики является сравнительно низкая масса темного гало по сравнению с массой звездных компонент в пределах нескольких радиальных шкал диска (см. [16]). Этот вывод достаточно надежен, поскольку фотометрические и динамические оценки массы диска согласуются друг с другом. В принципе, кривая вращения галактики может быть объяснена вообще без гало, хотя за пределами измеренной кривой вращения его вклад, по-видимому, все же существенен. Другой важной особенностью является то, что по крайней мере в области преобладающего вклада дискового компонента в гравитационный потенциал галактики $R \approx 2r_0$ дисперсия скоростей звезд диска близка к минимальному уровню, гарантирующему гравитационную устойчивость диска. К сожалению, большой разброс точек на радиальном профиле дисперсии скоростей и проблема радиальной зависимости параметра устойчивости Q_c не позволяет проследить, как меняется отношение дисперсии скоростей к критическому значению вдоль радиуса.

Известно, что существенная часть линзовидных галактик имеет сильно перегретые диски, хотя это относится не ко всем галактикам (см., обсуждение вопроса в работе Засова и др [173]). К числу галактик ранних типов с дисками, маргинально устойчивыми в пределах нескольких радиальных шкал от центра, можно отнести, к примеру, галактики NGC 338, NGC 2273 и NGC 3245, для которых методом N -тел были построены численные трехмерные модели,

описывающие динамическую эволюцию бесстолкновительных дисков к состоянию маргинальной устойчивости [174]. Как и в случае исследуемой здесь галактики NGC 4124, вблизи этих галактик нет соседей сопоставимой светимости. По-видимому, локальная изолированность галактик поднимает шанс избежать сильного динамического нагрева диска за космологическое время. Это не исключает динамического нагрева на раннем этапе формирования диска, когда галактика содержала большое количество газа [164].

Интересна проблема – как совместить динамическую “холодность” звездного диска и наличие наклонного газового диска, свидетельствующего о недавнем малом мерджинге, который, из общих динамических соображений, должен был бы нагреть звездный диск. Вероятно, такое сочетание возможно в случае, если поглощенный спутник был очень богат газом; для известной галактики с двумя противовращающимися звездными дисками NGC 4550, где *оба* звездных диска динамически холодные, был в свое время предложен именно такой сценарий в работе Рикса и др. [166]. Рассмотренная выше линзовидная галактика IC 719 обладает динамически холодными звездными противовращающимися дисками и, по всей видимости, в формировании ее дисков также было вовлечено большое количество газа.

Газовый диск в NGC 4124 наклонен к основной плоскости симметрии под небольшим углом, а это конфигурация, явно неустойчивая на временах нескольких оборотов диска. Тем не менее, наклонные газовые диски известны в линзовидных галактиках. Недавно мы опубликовали исследование NGC 7743 [117], где крупномасштабный газовый диск радиусом около 6 кпк наклонен к основной плоскости галактики (к плоскости звездного диска) под углом около 30 градусов (одно из решений). Средний возраст звездного населения во внешнем диске NGC 7743 – около 2 млрд лет, что близко к среднему возрасту звездного населения в центре NGC 4124, так что, если ориентироваться на вспышки звездообразования, провоцируемые событиями малого мерджинга, как на временные

метки этих событий, то вероятно времена существования наклонных газовых дисков в NGC 4124 и NGC 7743 сравнимы между собой.

5.3. Выводы

В настоящей Главе приводятся результаты исследования уникальной линзовидной галактики IC 719, в которой мы обнаружили наряду с противорвращающимся диском ионизованного газа еще и противорвращающийся вторичный звездный диск и исследуем историю его звездообразования. Результаты представленные в Главе опубликованы в работе Катков и др. 2013 [49]. Исследование сделано на основе наблюдательного материала, полученного на 6 метровом телескопе БТА в режиме длинной щели, и данных панорамной спектроскопии со спектрографом SAURON. Противорвращение газа к основному диску прослеживается до оптических границ галактики. Распределение интенсивностей эмиссионных линий показывает кольцевую структуру, а в соответствии с диагностическими диаграммами газ в кольце возбужден в основном излучением молодых звезд. Также мы показали, что история аккреции газа на IC 719 заключалась в двух событиях, каждое из которых имело последующую вспышку звездообразования.

Кроме того, в Главе приводятся результаты спектрального и фотометрического исследования локально изолированной линзовидной галактики NGC 4124, у которой обнаружен в центральной килопарсековой зоне наклоненный к основной плоскости диск ионизованного газа. По всей видимости, формирование этого диска связано с поглощением небольшого спутника, породившее также и позднюю вспышку звездообразования в центральной области, что подтверждается более низким средним возрастом (≈ 2 млрд. лет) звездного населения в центральной области по сравнению с возрастом диска ($\approx 5 - 7$ млрд. лет).

Заключение

В настоящей диссертационной работе приводятся результаты наблюдательной работы, направленной на исследование особого подкласса дисковых галактик – изолированных линзовидных галактик. Их уникальность определяется отсутствием для этого подкласса галактик места в современных общепринятых сценариях образования линзовидных галактик. Все сценарии формирования линзовидных галактик тесным образом связаны с физическими механизмами, работающими в плотных окружениях галактик, но при этом становятся малоэффективными в разреженном окружении.

Ранее О.К. Сильченко с соавторами [26] на основе наблюдений линзовидных галактик в группах получили очень интересные результаты, приведшие к необходимости пересмотра эволюционного пути S0 галактик. Они выявили, что крупномасштабные звездные диски близких линзовидных галактик в основном оказались очень старыми: у 60% галактик средний возраст звездного населения в дисках превышает 10 млрд. лет. Эпоха формирования основной части звездного населения этих объектов относится на красные смещения $z > 2$, в то время как распространенная в настоящее время точка зрения, что линзовидные галактики образовались из спиральных на $z = 0.4 - 0.5$ в плотном окружении путем удаления газа из диска и остановки ранее интенсивного звездообразования, противоречит полученному наблюдательному факту. Старыми оказались все диски S0-галактик в плотном окружении, при этом, чем разреженнее окружение, тем больше шансов у галактики испытать (малый) мержинг или аккрецию внешнего холодного газа и на вторичную вспышку звездообразования во внешнем диске, которая приводит к видимому омолаживанию звездного населения. На фоне таких открытий была поставлена задача изучения изолированных S0 галактик, которые представляют собой крайнюю точку последовательности эволюционных сценариев.

Действительно в настоящей работе было показано, что возраста дисков изолированных линзовидных галактик простираются в широком диапазоне от 1 и до >15 млрд. лет. В отличие от S0 галактик в более плотных окружениях, возраста звезд в дисках и балджах более скоррелированы, то есть для изолированных галактик менее эффективны механизмы омоложения балджей. Из зависимости $[Mg/Fe]$ от возраста структурных компонентов галактик мы получили свидетельства того, что и длительность эпохи формирования также может быть весьма различной. Получается, что свойства галактик в разреженном окружении критическим образом зависят от режимов аккреции газа, которые могут происходить в разное время и приводить к вспышкам звездообразования различной длительности.

Еще одним важным отличием изолированных S0 галактик от галактик в плотном окружении является повышенное содержание газа. В $72 \pm 11\%$ (13/18) объектах выборки встречаются крупномасштабные подсистемы ионизованного газа, при этом в половине случаев кинематика газа рассогласована от звезд, что свидетельствует о его внешнем происхождении. Благодаря оценкам обилия кислорода, которые удалось получить в областях звездообразования в 10 галактиках, мы показали, что химия ионизованного газа не согласуется со сценарием его приобретения из космологических филаментов, а основным источником газа является подсистема богатых газом карликовых спутников.

Полученные наблюдательные свидетельства естественным образом вписываются в предложенную в работе [26] концепцию формирования S0 галактик. В соответствии в ней, S0 галактики являются прародителями всех дисковых галактик и формируют основную массу своих звезд на красном смещении $z \sim 1.5-2$ из турбулентных неустойчивых газовых толстых дисков [93]. Дальнейшая судьба галактики зависит от плотности окружения, в котором ей посчастливилось образоваться. В случае рождения в плотном окружении, например, вблизи скопления, галактика быстро лишается внешнего источника газа, который мог

бы “омолодить” ее, так и остается S0 галактикой. Если галактика остается в более разреженном окружении, у нее остаются источники газа, и в зависимости от режима аккреции газа она может сформировать спиральную галактику, а может и остаться линзовидной. Последняя возможность как раз соответствует изолированным линзовидным галактикам, у которых мы наблюдаем очень большое разнообразие свойств звездных населений, а значит, и разнообразие событий аккреции газа. При этом история аккреции газа для изолированных S0 галактик, по-видимому, тесным образом связана с подсистемой богатых газом карликовых спутников.

Для прояснения истории аккреции газа необходимо приложить дополнительные наблюдательные усилия для получения данных, которые позволят с применением продвинутых методик анализа выявить следы аккреции и прояснить ее свойства и еще раз подчеркнуть ее важную роль. Пример подобных исследований мы представили для галактик NGC 4124 и IC 719 (см. Главу 5). Особо перспективным и интересным направлением будущих исследований в свете полученных результатов являются детальные исследования близких групп галактик с ярко выраженной центральной галактикой и множеством карликовых спутников (fossil group) и поиск связи свойств центральной галактики с подсистемой карликовых спутников.

Благодарности

В первую очередь автор настоящей работы выражает признательность своим родителям – Каткову Юрию Александровичу и Катковой Лидии Николаевне за веру, терпение, постоянно оказываемую моральную поддержку как во время всего обучения в Университете, так и в период подготовки и написания диссертации. Глубокую благодарность автор выражает своему научному руководителю – **Ольге Касьяновне Сильченко** за предложенную очень интересную тему

исследований, за поддержку в работе и чуткое руководство, не ограничивающее других научных интересов автора. Автор хотел бы отметить помощь Дмитрия Макарова при освоении методов, позволивших составить выборку галактик, исследуемых в работе и интересные обсуждения сопутствующих вопросов. Автор благодарит Анатолия Владимировича Засова, Анастасию Каспарову, Игоря Чилингаряна, Ивана Золотухина, Николая Подорванюка, Сергея Хоперскова, Алексея Князева, Олега Егорова, Анну Сабурову, Виктора Афанасьева, Алексея Моисеева, Дмитрия Бизяева, Якоба Волхера и всех сотрудников отдела внегалактической астрономии за содержательные научные обсуждения, советы и поддержку. Также следует отметить всех людей, причастных к подготовке и проведению наблюдений на телескопах БТА и SALT, в результате чего было получено основание для выполнения работы. Наконец, автор считает важным отметить роль всех Учителей, Наставников, которые были и/или остаются рядом.

Настоящая работа была поддержана грантами РФФИ 09-02-00870, 10-02-00062, 10-02-00178, 10-02-09739, 11-02-12247-офи-м, 12-02-00685, 13-02-00059, 12-02-31452, грантом Президента РФ МД-3288.2012.2 и некоммерческим фондом Дмитрия Зимина “Династия”.

Иван Катков

Москва, 2014 год

Литература

1. Laurikainen E., Salo H., Buta R. et al. Photometric scaling relations of lenticular and spiral galaxies // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2010. — Juny. Vol. 405. Pp. 1089–1118.
2. van den Bergh S. A new classification system for galaxies // [Astrophys. J.](#) 1976. — Juny. Vol. 206. Pp. 883–887.
3. Kormendy J., Bender R. A Revised Parallel-sequence Morphological Classification of Galaxies: Structure and Formation of S0 and Spheroidal Galaxies // [Astrophys. J. Suppl.](#) 2012. — January. Vol. 198. P. 2.
4. Cappellari M., Emsellem E., Krajnović D. et al. The ATLAS^{3D} project - VII. A new look at the morphology of nearby galaxies: the kinematic morphology-density relation // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2011. — September. Vol. 416. Pp. 1680–1696.
5. Spitzer L., Jr., Baade W. Stellar Populations and Collisions of Galaxies. // [Astrophys. J.](#) 1951. — March. Vol. 113. P. 413.
6. Icke V. Distant encounters between disk galaxies and the origin of S 0 spirals // [Astron. and Astrophys.](#) 1985. — March. Vol. 144. Pp. 115–123.
7. Byrd G., Valtonen M. Tidal generation of active spirals and S0 galaxies by rich clusters // [Astrophys. J.](#) 1990. — February. Vol. 350. Pp. 89–94.
8. Moore B., Katz N., Lake G. et al. Galaxy harassment and the evolution of clusters of galaxies // [Nature.](#) 1996. — February. Vol. 379. Pp. 613–616.
9. Gunn J. E., Gott J. R., III. On the Infall of Matter Into Clusters of Galaxies and Some Effects on Their Evolution // [Astrophys. J.](#) 1972. — August. Vol. 176. P. 1.
10. Quilis V., Moore B., Bower R. Gone with the Wind: The Origin of S0 Galaxies in Clusters // [Science.](#) 2000. — Juny. Vol. 288. Pp. 1617–1620.
11. Larson R. B., Tinsley B. M., Caldwell C. N. The evolution of disk galaxies and the origin of S0 galaxies // [Astrophys. J.](#) 1980. — May. Vol. 237. Pp. 692–707.
12. Dressler A. Galaxy morphology in rich clusters - Implications for the formation and evolution of galaxies // [Astrophys. J.](#) 1980. — March. Vol. 236. Pp. 351–365.
13. Naim A., Lahav O., Buta R. J. et al. A comparative study of morphological classifications of APM galaxies // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 1995. — Juny. Vol. 274. Pp. 1107–1125.
14. Sulentic J. W., Verdes-Montenegro L., Bergond G. et al. The AMIGA sample of isolated galaxies. II. Morphological refinement // [Astron. and Astrophys.](#) 2006. — April. Vol. 449. Pp. 937–949.
15. Sil'Chenko O. K., Chilingarian I. V., Sotnikova N. Y., Afanasiev V. L. Large-scale nested stellar discs in NGC 7217 // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2011. — July. Vol. 414. Pp. 3645–3655.

16. Zasov A. V., Sil'chenko O. K., Katkov I. Y., Dodonov S. N. Kinematics and stellar population of the lenticular galaxy NGC 4124 // [Astronomy Letters](#). 2013. — January. Vol. 39. Pp. 17–25.
17. Welch G. A., Sage L. J. The Cool Interstellar Medium in S0 Galaxies. I. A Survey of Molecular Gas // [Astrophys. J.](#) 2003. — February. Vol. 584. Pp. 260–277.
18. Welch G. A., Sage L. J., Young L. M. The Cool Interstellar Medium in Elliptical Galaxies. II. Gas Content in the Volume-limited Sample and Results from the Combined Elliptical and Lenticular Surveys // [Astrophys. J.](#) 2010. — December. Vol. 725. Pp. 100–114.
19. 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 Roy. Astron. Soc.](#) 2011. — Juny. Vol. 414. Pp. 940–967.
20. Pogge R. W., Eskridge P. B. Star formation in the disks of H I-rich S0 galaxies // [Astron. J.](#) 1993. — October. Vol. 106. Pp. 1405–1419.
21. Bertola F., Buson L. M., Zeilinger W. W. The external origin of the gas in S0 galaxies // [Astrophys. J. Let.](#) 1992. — December. Vol. 401. Pp. L79–L81.
22. Zeilinger W. W., Bertola F., Buson L. M. Kinematical Properties of the Ionized Gas in SO Galaxies // [European Southern Observatory Conference and Workshop Proceedings](#) / Ed. by I. J. Danziger, W. W. Zeilinger, K. Kj ar. Vol. 45 of [European Southern Observatory Conference and Workshop Proceedings](#). 1993. P. 593.
23. 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 Roy. Astron. Soc.](#) 2011. — October. Vol. 417. Pp. 882–899.
24. Birnboim Y., Dekel A., Neistein E. Bursting and quenching in massive galaxies without major mergers or AGNs // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2007. — September. Vol. 380. Pp. 339–352.
25. Sancisi R., Fraternali F., Oosterloo T., van der Hulst T. Cold gas accretion in galaxies // [A&A Rev.](#). 2008. — Juny. Vol. 15. Pp. 189–223.
26. Sil'chenko O. K., Proshina I. S., Shulga A. P., Kuposov S. E. Ages and abundances in large-scale stellar discs of nearby S0 galaxies // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2012. — November. Vol. 427. Pp. 790–805.
27. Afanasiev V. L., Moiseev A. V. Scorpio on the 6 m Telescope: Current State and Perspectives for Spectroscopy of Galactic and Extragalactic Objects // [Baltic Astronomy](#). 2011. — August. Vol. 20. Pp. 363–370.
28. Afanasiev V. L., Moiseev A. V. The SCORPIO Universal Focal Reducer of the 6-m Telescope // [Astronomy Letters](#). 2005. — March. Vol. 31. Pp. 194–204.
29. Burgh E. B., Nordsieck K. H., Kobulnicky H. A. et al. [Prime Focus Imaging Spectrograph for the Southern African Large Telescope: optical design](#) // [Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes](#) / Ed. by M. Iye, A. F. M. Moorwood. Vol. 4841 of [Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers \(SPIE\) Conference Series](#). 2003. — March. Pp. 1463–1471.

30. Crawford S. M., Still M., Schellart P. et al. [PySALT: the SALT science pipeline](#) // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. Vol. 7737 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. 2010. — July.
31. Kniazev A. Y., Zijlstra A. A., Grebel E. K. et al. The metallicity extremes of the Sagittarius dSph: SALT spectroscopy of PNe // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2008. — August. Vol. 388. Pp. 1667–1678.
32. van Dokkum P. G. Cosmic-Ray Rejection by Laplacian Edge Detection // [PASP](#). 2001. — November. Vol. 113. Pp. 1420–1427.
33. Prugniel P., Soubiran C., Koleva M., Le Borgne D. New release of the ELODIE library: Version 3.1 // [ArXiv Astrophysics e-prints](#). 2007. — March.
34. van der Marel R. P., Franx M. A new method for the identification of non-Gaussian line profiles in elliptical galaxies // [Astrophys. J.](#) 1993. — April. Vol. 407. Pp. 525–539.
35. Cappellari M., Emsellem E. Parametric Recovery of Line-of-Sight Velocity Distributions from Absorption-Line Spectra of Galaxies via Penalized Likelihood // [PASP](#). 2004. — February. Vol. 116. Pp. 138–147.
36. Chilingarian I. V., Novikova A. P., Cayatte V. et al. NGC 6340: an old S0 galaxy with a young polar disc. Clues from morphology, internal kinematics, and stellar populations // [Astron. and Astrophys.](#) 2009. — September. Vol. 504. Pp. 389–400.
37. Katkov I. Y., Chilingarian I. V. A New Sky Subtraction Technique for Low Surface Brightness Data // [Astronomical Data Analysis Software and Systems XX](#) / Ed. by I. N. Evans, A. Accomazzi, D. J. Mink, A. H. Rots. Vol. 442 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series. 2011. — July. P. 143.
38. Kelson D. D. Optimal Techniques in Two-dimensional Spectroscopy: Background Subtraction for the 21st Century // [PASP](#). 2003. — Juny. Vol. 115. Pp. 688–699.
39. Chilingarian I., Prugniel P., Sil’Chenko O., Koleva M. [NBursts: Simultaneous Extraction of Internal Kinematics and Parametrized SFH from Integrated Light Spectra](#) // [IAU Symposium](#) / Ed. by A. Vazdekis, R. Peletier. Vol. 241 of IAU Symposium. 2007. — August. Pp. 175–176.
40. Chilingarian I. V., Prugniel P., Sil’Chenko O. K., Afanasiev V. L. Kinematics and stellar populations of the dwarf elliptical galaxy IC 3653 // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2007. — April. Vol. 376. Pp. 1033–1046.
41. Worthey G., Faber S. M., Gonzalez J. J., Burstein D. Old stellar populations. 5: Absorption feature indices for the complete LICK/IDS sample of stars // [Astrophys. J. Suppl.](#) 1994. — October. Vol. 94. Pp. 687–722.
42. Jones L. A., Worthey G. New Age Indicators for Old Stellar Populations // [Astrophys. J. Let.](#) 1995. — Juny. Vol. 446. P. L31.
43. Le Borgne D., Rocca-Volmerange B., Prugniel P. et al. Evolutionary synthesis of galaxies at high spectral resolution with the code PEGASE-HR. Metallicity and age tracers // [Astron. and Astrophys.](#) 2004. — October. Vol. 425. Pp. 881–897.

44. Walcher C. J., Coelho P., Gallazzi A., Charlot S. Differential stellar population models: how to reliably measure $[\text{Fe}/\text{H}]$ and $[\alpha/\text{Fe}]$ in galaxies // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2009. — September. Vol. 398. Pp. L44–L48.
45. Prugniel P., Koleva M. [Spectral models of stellar populations resolved in chemical abundances](#) // IAU Symposium / Ed. by R. J. Tuffs, C. C. Popescu. Vol. 284 of IAU Symposium. 2012. — August. Pp. 16–19.
46. Tinsley B. M. Stellar lifetimes and abundance ratios in chemical evolution // [Astrophys. J.](#) 1979. — May. Vol. 229. Pp. 1046–1056.
47. Matteucci F., Greggio L. Relative roles of type I and II supernovae in the chemical enrichment of the interstellar gas // [Astron. and Astrophys.](#) 1986. — January. Vol. 154. Pp. 279–287.
48. Thomas D., Maraston C., Bender R. Stellar population models of Lick indices with variable element abundance ratios // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2003. — March. Vol. 339. Pp. 897–911.
49. Katkov I. Y., Sil'chenko O. K., Afanasiev V. L. Lenticular Galaxy IC 719: Current Building of the Counterrotating Large-scale Stellar Disk // [Astrophys. J.](#) 2013. — Juny. Vol. 769. P. 105.
50. Lawson Charles L., Hanson Richard J. Solving least squares problems. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 1995. Vol. 15 of Classics in Applied Mathematics. Pp. xii+337. ISBN: [0-89871-356-0](#). Revised reprint of the 1974 original.
51. Press William H., Teukolsky Saul A., Vetterling William T., Flannery Brian P. Numerical Recipes 3rd Edition: The Art of Scientific Computing. 3 edition. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007. ISBN: [0521880688](#), [9780521880688](#).
52. Kuijken K., Merrifield M. R. A New Method for Obtaining Stellar Velocity Distributions from Absorption-Line Spectra - Unresolved Gaussian Decomposition // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 1993. — October. Vol. 264. P. 712.
53. Katkov I., Chilingarian I., Sil'chenko O. et al. A Complex Stellar Line-of-Sight Velocity Distribution in the Lenticular Galaxy NGC 524 // [Baltic Astronomy.](#) 2011. — August. Vol. 20. Pp. 453–458.
54. De Bruyne V., De Rijcke S., Dejonghe H., Zeilinger W. W. Modelling galactic spectra - II. Simultaneous study of stellar dynamics and stellar mix in NGC 3258 // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2004. — April. Vol. 349. Pp. 461–475.
55. Coccato L., Morelli L., Corsini E. M. et al. Dating the formation of the counter-rotating stellar disc in the spiral galaxy NGC 5719 by disentangling its stellar populations // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2011. — March. Vol. 412. Pp. L113–L117.
56. Coccato L., Morelli L., Pizzella A. et al. Spectroscopic evidence of distinct stellar populations in the counter-rotating stellar disks of NGC 3593 and NGC 4550 // [Astron. and Astrophys.](#) 2013. — January. Vol. 549. P. A3.
57. Johnston E. J., Merrifield M. R., Aragón-Salamanca A., Cappellari M. Disentangling the stellar populations in the counter-rotating disc galaxy NGC 4550 // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2013. — January. Vol. 428. Pp. 1296–1302.

58. Makarov D., Karachentsev I. Galaxy groups and clouds in the local ($z \sim 0.01$) Universe // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2011. — April. Vol. 412. Pp. 2498–2520.
59. Makarov D. I., Karachentsev I. D. Galaxy triplets in the local supercluster // [Astrophysical Bulletin](#). 2009. — January. Vol. 64. Pp. 24–49.
60. Karachentsev I. D., Makarov D. I. Binary galaxies in the local supercluster and its neighborhood // [Astrophysical Bulletin](#). 2008. — December. Vol. 63. Pp. 299–345.
61. Karachentsev I. D., Makarov D. I., Karachentseva V. E., Melnyk O. V. Catalog of nearby isolated galaxies in the volume $z < 0.01$ // [Astrophysical Bulletin](#). 2011. — January. Vol. 66. Pp. 1–27.
62. York D. G., Adelman J., Anderson J. E., Jr. et al. The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary // [Astron. J.](#) 2000. — September. Vol. 120. Pp. 1579–1587.
63. Jones D. H., Saunders W., Colless M. et al. The 6dF Galaxy Survey: samples, observational techniques and the first data release // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2004. — December. Vol. 355. Pp. 747–763.
64. Zwaan M. A., Staveley-Smith L., Koribalski B. S. et al. The 1000 Brightest HIPASS Galaxies: The H I Mass Function and Ω_{HI} // [Astron. J.](#) 2003. — Juny. Vol. 125. Pp. 2842–2858.
65. Giovanelli R., Haynes M. P., Kent B. R. et al. The Arecibo Legacy Fast ALFA Survey. I. Science Goals, Survey Design, and Strategy // [Astron. J.](#) 2005. — December. Vol. 130. Pp. 2598–2612.
66. Fasano G., Poggianti B. M., Couch W. J. et al. The Evolution of the Galactic Morphological Types in Clusters // [Astrophys. J.](#) 2000. — October. Vol. 542. Pp. 673–683.
67. Capak P., Abraham R. G., Ellis R. S. et al. The Effects of Environment on Morphological Evolution at $0 < z < 1.2$ in the COSMOS Survey // [Astrophys. J. Suppl.](#) 2007. — September. Vol. 172. Pp. 284–294.
68. Fernández Lorenzo M., Sulentic J., Verdes-Montenegro L. et al. The AMIGA sample of isolated galaxies. X. A first look at isolated galaxy colors // [Astron. and Astrophys.](#) 2012. — April. Vol. 540. P. A47.
69. Strateva I., Ivezić Ž., Knapp G. R. et al. Color Separation of Galaxy Types in the Sloan Digital Sky Survey Imaging Data // [Astron. J.](#) 2001. — October. Vol. 122. Pp. 1861–1874.
70. Baldry I. K., Glazebrook K., Brinkmann J. et al. Quantifying the Bimodal Color-Magnitude Distribution of Galaxies // [Astrophys. J.](#) 2004. — January. Vol. 600. Pp. 681–694.
71. Davies R. L., Efstathiou G., Fall S. M. et al. The kinematic properties of faint elliptical galaxies // [Astrophys. J.](#) 1983. — March. Vol. 266. Pp. 41–57.
72. Barway S., Mayya Y. D., Kembhavi A. K., Pandey S. K. Multicolor Surface Photometry of Lenticular Galaxies. I. The Data // [Astron. J.](#) 2005. — February. Vol. 129. Pp. 630–646.
73. Katkov I. Y., Sil’chenko O. K., Afanasiev V. L. Decoupled gas kinematics in isolated S0 galaxies // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2014. — March. Vol. 438. Pp. 2798–2803.

74. Richter O.-G., Huchtmeier W. K. H I observations of galaxies in between the Local and the Hydra/Centaurus superclusters // *Astr. and Astroph. Suppl. Ser.* 1987. — March. Vol. 68. Pp. 427–467.
75. Jones D. H., Read M. A., Saunders W. et al. The 6dF Galaxy Survey: final redshift release (DR3) and southern large-scale structures // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 2009. — October. Vol. 399. Pp. 683–698.
76. Seifert W., Scorza C. Disk structure and kinematics of S0 galaxies. // *Astron. and Astrophys.* 1996. — Juny. Vol. 310. Pp. 75–92.
77. Baes M., Sil’chenko O. K., Moiseev A. V., Manakova E. A. Metallicity and age gradients in round elliptical galaxies // *Astron. and Astrophys.* 2007. — Juny. Vol. 467. Pp. 991–1001.
78. Simien F., Prugniel P. Kinematical data on early-type galaxies. VI. // *Astron. and Astrophys.* 2002. — March. Vol. 384. Pp. 371–382.
79. Blumenthal G. R., Faber S. M., Primack J. R., Rees M. J. Formation of galaxies and large-scale structure with cold dark matter // *Nature.* 1984. — October. Vol. 311. Pp. 517–525.
80. Governato F., Mayer L., Wadsley J. et al. The Formation of a Realistic Disk Galaxy in Λ -dominated Cosmologies // *Astrophys. J.* 2004. — Juny. Vol. 607. Pp. 688–696.
81. Governato F., Willman B., Mayer L. et al. Forming disc galaxies in Λ CDM simulations // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 2007. — February. Vol. 374. Pp. 1479–1494.
82. MacArthur L. A., Courteau S., Holtzman J. A. Structure of Disk-dominated Galaxies. I. Bulge/Disk Parameters, Simulations, and Secular Evolution // *Astrophys. J.* 2003. — January. Vol. 582. Pp. 689–722.
83. Méndez-Abreu J., Aguerri J. A. L., Corsini E. M., Simonneau E. Structural properties of disk galaxies. I. The intrinsic equatorial ellipticity of bulges // *Astron. and Astrophys.* 2008. — February. Vol. 478. Pp. 353–369.
84. Bekki K., Couch W. J. Transformation from spirals into S0s with bulge growth in groups of galaxies // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 2011. — August. Vol. 415. Pp. 1783–1796.
85. Kronberger T., Kapferer W., Ferrari C. et al. On the influence of ram-pressure stripping on the star formation of simulated spiral galaxies // *Astron. and Astrophys.* 2008. — April. Vol. 481. Pp. 337–343.
86. Kormendy J. The velocity dispersion in the disk of the S0 galaxy NGC 1553 // *Astrophys. J.* 1984. — November. Vol. 286. Pp. 116–131.
87. Laurikainen E., Salo H., Athanassoula E. et al. Statistics of the structure components in S0s: implications for bar-induced secular evolution // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 2013. — April. Vol. 430. Pp. 3489–3509.
88. Butcher H., Oemler A., Jr. The evolution of galaxies in clusters. I - ISIT photometry of C1 0024+1654 and 3C 295 // *Astrophys. J.* 1978. — January. Vol. 219. Pp. 18–30.

89. Dressler A., Oemler A., Jr., Couch W. J. et al. Evolution since $Z = 0.5$ of the Morphology-Density Relation for Clusters of Galaxies // [Astrophys. J.](#) 1997. — December. Vol. 490. P. 577.
90. Martig M., Bournaud F. Formation of Late-type Spiral Galaxies: Gas Return from Stellar Populations Regulates Disk Destruction and Bulge Growth // [Astrophys. J. Let.](#) 2010. — May. Vol. 714. Pp. L275–L279.
91. Martig M., Bournaud F., Croton D. J. et al. A Diversity of Progenitors and Histories for Isolated Spiral Galaxies // [Astrophys. J.](#) 2012. — September. Vol. 756. P. 26.
92. Bournaud F., Elmegreen B. G. Unstable Disks at High Redshift: Evidence for Smooth Accretion in Galaxy Formation // [Astrophys. J. Let.](#) 2009. — April. Vol. 694. Pp. L158–L161.
93. Bournaud F., Elmegreen B. G., Martig M. The Thick Disks of Spiral Galaxies as Relics from Gas-rich, Turbulent, Clumpy Disks at High Redshift // [Astrophys. J. Let.](#) 2009. — December. Vol. 707. Pp. L1–L5.
94. Buta R., Crocker D. A. Metric characteristics of nuclear rings and related features in spiral galaxies // [Astron. J.](#) 1993. — April. Vol. 105. Pp. 1344–1357.
95. Trager S. C., Faber S. M., Worthey G., González J. J. The Stellar Population Histories of Early-Type Galaxies. II. Controlling Parameters of the Stellar Populations // [Astron. J.](#) 2000. — July. Vol. 120. Pp. 165–188.
96. Karachentseva V. E., Karachentsev I. D., Melnyk O. V. Faint companions of isolated 2MIG galaxies // [Astrophysical Bulletin.](#) 2011. — October. Vol. 66. Pp. 389–406.
97. Wakamatsu K.-I. Structure of polar ring galaxies - Shock waves in the gas of polar rings // [Astron. J.](#) 1993. — May. Vol. 105. Pp. 1745–1752.
98. Katkov I., Sil'chenko O., Afanasiev V. Decoupled gas kinematics in isolated early-type disc galaxies // [ArXiv e-prints.](#) 2013. — December.
99. Kuijken K., Fisher D., Merrifield M. R. A search for counter-rotating stars in S0 galaxies. // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 1996. — December. Vol. 283. Pp. 543–550.
100. Kaviraj S., Peirani S., Khochfar S. et al. The role of minor mergers in the recent star formation history of early-type galaxies // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2009. — April. Vol. 394. Pp. 1713–1720.
101. Kaviraj S., Tan K.-M., Ellis R. S., Silk J. A coincidence of disturbed morphology and blue UV colour: minor-merger-driven star formation in early-type galaxies at $z \approx 0.6$ // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2011. — March. Vol. 411. Pp. 2148–2160.
102. Dekel A., Birnboim Y. Galaxy bimodality due to cold flows and shock heating // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2006. — May. Vol. 368. Pp. 2–20.
103. Kereš D., Katz N., Weinberg D. H., Davé R. How do galaxies get their gas? // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2005. — October. Vol. 363. Pp. 2–28.
104. Kauffmann G., Heckman T. M., Tremonti C. et al. The host galaxies of active galactic nuclei // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2003. — December. Vol. 346. Pp. 1055–1077.

105. Kewley L. J., Groves B., Kauffmann G., Heckman T. The host galaxies and classification of active galactic nuclei // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2006. — November. Vol. 372. Pp. 961–976.
106. Baldwin J. A., Phillips M. M., Terlevich R. Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects // [PASP.](#) 1981. — February. Vol. 93. Pp. 5–19.
107. Allen M. G., Groves B. A., Dopita M. A. et al. The MAPPINGS III Library of Fast Radiative Shock Models // [Astrophys. J. Suppl.](#) 2008. — September. Vol. 178. Pp. 20–55.
108. Stasińska G., Vale Asari N., Cid Fernandes R. et al. Can retired galaxies mimic active galaxies? Clues from the Sloan Digital Sky Survey // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2008. — November. Vol. 391. Pp. L29–L33.
109. Sarzi M., Shields J. C., Schawinski K. et al. The SAURON project - XVI. On the sources of ionization for the gas in elliptical and lenticular galaxies // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2010. — March. Vol. 402. Pp. 2187–2210.
110. Singh R., van de Ven G., Jahnke K. et al. The nature of LINER galaxies: Ubiquitous hot old stars and rare accreting black holes // [Astron. and Astrophys.](#) 2013. — October. Vol. 558. P. A43.
111. Bremer M., Scharwächter J., Eckart A. et al. What produces the extended LINER-type emission in the NUGA galaxy NGC 5850? // [Astron. and Astrophys.](#) 2013. — October. Vol. 558. P. A34.
112. Moiseev A. V., Smirnova K. I., Smirnova A. A., Reshetnikov V. P. A new catalogue of polar-ring galaxies selected from the Sloan Digital Sky Survey // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2011. — November. Vol. 418. Pp. 244–257.
113. God´Inez-Mart´Inez A., Watson A. M., Matthews L. D., Sparke L. S. Photometry of Polar-Ring Galaxies // [Rev. Mexicana Astron. Astrofis.](#) 2007. — October. Vol. 43. Pp. 315–327.
114. Karataeva G. M., Drozdovsky I. O., Hagen-Thorn V. A. et al. The Stellar Content of the Polar Rings in the Galaxies NGC 2685 and NGC 4650A // [Astron. J.](#) 2004. — February. Vol. 127. Pp. 789–797.
115. Gallagher J. S., Sparke L. S., Matthews L. D. et al. Wide Field Planetary Camera 2 Observations of the Polar Ring Galaxy NGC 4650A // [Astrophys. J.](#) 2002. — March. Vol. 568. Pp. 199–209.
116. Sil’chenko O.K., Moiseev A.V., Afanasiev V. Two More Disk Galaxies with Global Gas Counterrotation // [Astrophys. J.](#) 2009. — April. Vol. 694. Pp. 1550–1558.
117. Katkov I. Y., Moiseev A. V., Sil’chenko O. K. Stars and Ionized Gas in the S0 Galaxy NGC 7743: An Inclined Large-scale Gaseous Disk // [Astrophys. J.](#) 2011. — October. Vol. 740. P. 83.
118. Kehrig C., Monreal-Ibero A., Papaderos P. et al. The ionized gas in the CALIFA early-type galaxies. I. Mapping two representative cases: NGC 6762 and NGC 5966 // [Astron. and Astrophys.](#) 2012. — April. Vol. 540. P. A11.

119. Osterbrock D. E., Ferland G. J. Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei. 2006.
120. Fitzpatrick E. L. Correcting for the Effects of Interstellar Extinction // *PASP*. 1999. — January. Vol. 111. Pp. 63–75.
121. Dopita M. A., Evans I. N. Theoretical models for H II regions. II - The extragalactic H II region abundance sequence // *Astrophys. J.* 1986. — August. Vol. 307. Pp. 431–440.
122. Pilyugin L. S. On the oxygen abundance determination in H II regions. The problem of the line intensities - oxygen abundance calibration // *Astron. and Astrophys.* 2000. — October. Vol. 362. Pp. 325–332.
123. Pilyugin L. S. On the oxygen abundance determination in H II regions. High-metallicity regions // *Astron. and Astrophys.* 2001. — April. Vol. 369. Pp. 594–604.
124. Pettini M., Pagel B. E. J. [OIII]/[NII] as an abundance indicator at high redshift // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 2004. — March. Vol. 348. Pp. L59–L63.
125. Tremonti C. A., Heckman T. M., Kauffmann G. et al. The Origin of the Mass-Metallicity Relation: Insights from 53,000 Star-forming Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey // *Astrophys. J.* 2004. — October. Vol. 613. Pp. 898–913.
126. Pilyugin L. S., Thuan T. X. Oxygen Abundance Determination in H II Regions: The Strong Line Intensities-Abundance Calibration Revisited // *Astrophys. J.* 2005. — September. Vol. 631. Pp. 231–243.
127. Stasińska G. [Ar III]/[O III] and [S III]/[O III]: well-behaved oxygen abundance indicators for H II regions and star forming galaxies // *Astron. and Astrophys.* 2006. — August. Vol. 454. Pp. L127–L130.
128. Kewley L. J., Ellison S. L. Metallicity Calibrations and the Mass-Metallicity Relation for Star-forming Galaxies // *Astrophys. J.* 2008. — July. Vol. 681. Pp. 1183–1204.
129. López-Sánchez Á. R., Esteban C. Massive star formation in Wolf-Rayet galaxies. IV. Colours, chemical-composition analysis and metallicity-luminosity relations // *Astron. and Astrophys.* 2010. — July. Vol. 517. P. A85.
130. Asplund M., Grevesse N., Sauval A. J., Scott P. The Chemical Composition of the Sun // *An. Rev. Astron. Astrophys.* 2009. — September. Vol. 47. Pp. 481–522.
131. Bekki K. Formation of a Polar Ring Galaxy in a Galaxy Merger // *Astrophys. J.* 1998. — May. Vol. 499. P. 635.
132. Bournaud F., Jog C. J., Combes F. Galaxy mergers with various mass ratios: Properties of remnants // *Astron. and Astrophys.* 2005. — July. Vol. 437. Pp. 69–85.
133. Reshetnikov V., Sotnikova N. Global structure and formation of polar-ring galaxies. // *Astron. and Astrophys.* 1997. — September. Vol. 325. Pp. 933–942.
134. Bournaud F., Combes F. Formation of polar ring galaxies // *Astron. and Astrophys.* 2003. — April. Vol. 401. Pp. 817–833.

135. Dekel A., Birnboim Y., Engel G. et al. Cold streams in early massive hot haloes as the main mode of galaxy formation // *Nature*. 2009. — January. Vol. 457. Pp. 451–454.
136. Roškar R., Debattista V. P., Brooks A. M. et al. Misaligned angular momentum in hydrodynamic cosmological simulations: warps, outer discs and thick discs // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 2010. — October. Vol. 408. Pp. 783–796.
137. Algorry D. G., Navarro J. F., Abadi M. G. et al. Counterrotating stars in simulated galaxy discs // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 2014. — February. Vol. 437. Pp. 3596–3602.
138. Agertz O., Teyssier R., Moore B. Disc formation and the origin of clumpy galaxies at high redshift // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 2009. — July. Vol. 397. Pp. L64–L68.
139. Spavone M., Iodice E., Arnaboldi M. et al. Chemical Abundances in the Polar Disk of NGC 4650A: Implications for Cold Accretion Scenario // *Astrophys. J.* 2010. — May. Vol. 714. Pp. 1081–1095.
140. Spavone M., Iodice E., Arnaboldi M. et al. Chemical abundances of the PRGs UGC 7576 and UGC 9796. I. Testing the formation scenario // *Astron. and Astrophys.* 2011. — July. Vol. 531. P. A21.
141. Spavone M., Iodice E. VGS31b: a highly inclined ring along a filament in a void. Implication for the cold accretion // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 2013. — October. Vol. 434. Pp. 3310–3321.
142. Freitas-Lemes P., Rodrigues I., Faúndez-Abans M. et al. Imagery and long-slit spectroscopy of the polar ring galaxy AM 2020-504 // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 2012. — December. Vol. 427. Pp. 2772–2779.
143. Lequeux J., Peimbert M., Rayo J. F. et al. Chemical composition and evolution of irregular and blue compact galaxies // *Astron. and Astrophys.* 1979. — December. Vol. 80. Pp. 155–166.
144. Kinman T. D., Davidson K. Spectroscopic observations of 10 emission-line dwarf galaxies // *Astrophys. J.* 1981. — January. Vol. 243. Pp. 127–139.
145. Rubin V. C., Ford W. K., Jr., Whitmore B. C. Luminosity-dependent line ratios in disks of spiral galaxies // *Astrophys. J. Let.* 1984. — Juny. Vol. 281. Pp. L21–L24.
146. Kobayashi C., Springel V., White S. D. M. Simulations of Cosmic Chemical Enrichment // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 2007. — April. Vol. 376. Pp. 1465–1479.
147. Finlator K., Davé R. The origin of the galaxy mass-metallicity relation and implications for galactic outflows // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 2008. — April. Vol. 385. Pp. 2181–2204.
148. Köppen J., Weidner C., Kroupa P. A possible origin of the mass-metallicity relation of galaxies // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 2007. — February. Vol. 375. Pp. 673–684.
149. Brooks A. M., Governato F., Booth C. M. et al. The Origin and Evolution of the Mass-Metallicity Relationship for Galaxies: Results from Cosmological N-Body Simulations // *Astrophys. J. Let.* 2007. — January. Vol. 655. Pp. L17–L20.

150. Chilingarian I. V., Melchior A.-L., Zolotukhin I. Y. Analytical approximations of K-corrections in optical and near-infrared bands // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2010. — July. Vol. 405. Pp. 1409–1420.
151. 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 Roy. Astron. Soc.](#) 2011. — May. Vol. 413. Pp. 813–836.
152. Bacon R., Copin Y., Monnet G. et al. The SAURON project - I. The panoramic integral-field spectrograph // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2001. — September. Vol. 326. Pp. 23–35.
153. Grossi M., di Serego Alighieri S., Giovanardi C. et al. The HI content of early-type galaxies from the ALFALFA survey. II. The case of low density environments // [Astron. and Astrophys.](#) 2009. — May. Vol. 498. Pp. 407–417.
154. 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 Roy. Astron. Soc.](#) 2012. — May. Vol. 422. Pp. 1835–1862.
155. 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 Roy. Astron. Soc.](#) 2011. — Juny. Vol. 414. Pp. 940–967.
156. Sil'chenko O. K., Chilingarian I. V. Star formation history at the centers of lenticular galaxies with bars and purely exponential outer disks from SAURON data // [Astronomy Letters.](#) 2011. — January. Vol. 37. Pp. 1–10.
157. Jedrzejewski R. I. CCD surface photometry of elliptical galaxies. I - Observations, reduction and results // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 1987. — Juny. Vol. 226. Pp. 747–768.
158. Peng C. Y., Ho L. C., Impey C. D., Rix H.-W. Detailed Structural Decomposition of Galaxy Images // [Astron. J.](#) 2002. — July. Vol. 124. Pp. 266–293.
159. Pilyugin L. S., Mattsson L. Abundance determination in H II regions from spectra without the [O II] λ 3727+ λ 3729 line // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2011. — April. Vol. 412. Pp. 1145–1150.
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 Roy. Astron. Soc.](#) 2011. — July. Vol. 414. Pp. 2923–2949.
161. Emsellem E., Cappellari M., Krajnović D. et al. The ATLAS^{3D} project - III. A census of the stellar angular momentum within the effective radius of early-type galaxies: unveiling the distribution of fast and slow rotators // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2011. — Juny. Vol. 414. Pp. 888–912.
162. Walker I. R., Mihos J. C., Hernquist L. Quantifying the Fragility of Galactic Disks in Minor Mergers // [Astrophys. J.](#) 1996. — March. Vol. 460. P. 121.
163. Thakar A. R., Ryden B. S. Formation of Massive Counterrotating Disks in Spiral Galaxies // [Astrophys. J.](#) 1996. — April. Vol. 461. P. 55.

164. Moster B. P., Macciò A. V., Somerville R. S. et al. The effects of a hot gaseous halo on disc thickening in galaxy minor mergers // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2012. — July. Vol. 423. Pp. 2045–2057.
165. Rubin V. C., Graham J. A., Kenney J. D. P. Cospatial counterrotating stellar disks in the Virgo E7/S0 galaxy NGC 4550 // [Astrophys. J. Let.](#) 1992. — July. Vol. 394. Pp. L9–L12.
166. Rix H.-W., Franx M., Fisher D., Illingworth G. NGC 4550 - A laboratory for testing galaxy formation // [Astrophys. J. Let.](#) 1992. — November. Vol. 400. Pp. L5–L8.
167. Crocker A. F., Bureau M., Young L. M., Combes F. Molecular gas and star formation in early-type galaxies // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2011. — January. Vol. 410. Pp. 1197–1222.
168. 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 Roy. Astron. Soc.](#) 2011. — June. Vol. 414. Pp. 940–967.
169. Gavazzi G., Franzetti P., Scodeggio M. et al. 1.65 μm (H-band) surface photometry of galaxies. V. Profile decomposition of 1157 galaxies // [Astron. and Astrophys.](#) 2000. — September. Vol. 361. Pp. 863–876.
170. Vlasjuk V. V. Software for reduction of spectral data obtained with panoramic detectors of the 6 m telescope. // [Bulletin of the Special Astrophysics Observatory.](#) 1993. Vol. 36. Pp. 107–117.
171. Krajnović D., Cappellari M., de Zeeuw P. T., Copin Y. Kinemetry: a generalization of photometry to the higher moments of the line-of-sight velocity distribution // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2006. — March. Vol. 366. Pp. 787–802.
172. Sofue Y. Rotation Curve and Mass Distribution in the Galactic Center - From Black Hole to Entire Galaxy // [Publ. of the Astr. Soc. of Japan.](#) 2013. — December. Vol. 65. P. 118.
173. Zasov A. V., Khoperskov A. V., Saburova A. S. Gravitational stability and dynamical overheating of galactic stellar disks // [Astronomy Letters.](#) 2011. — June. Vol. 37. Pp. 374–384.
174. Zasov A. V., Khoperskov A. V., Katkov I. Y. et al. Kinematics and stellar disk modeling of lenticular galaxies // [Astrophysical Bulletin.](#) 2012. — October. Vol. 67. Pp. 362–373.

Приложение А

Таблица 2. Список изолированных линзовидных галактик.

№	Назв.	Координаты	Тип	V_{LG} км/с	m_K mag	M_K mag	I_{min}	Сосед "сверху"				Сосед "снизу"					
								Назв.	δv км/с	δr Мпк	δm_K mag	II	Назв.	δv км/с	δr Мпк	δm_K mag	II
1	6dF J0942084-233544	J094208.4-233544	-2.0	3043	11.05	-22.05	45.8	ESO566-029	765	6.2	3.00	45.8	NGC3100	154	2.4	-0.25	134.5
2	6dF J1118261-332539	J111826.0-332539	-2.0	2463	11.39	-21.25	6.1	ESO378-004	246	0.4	2.03	6.1	NGC3606	113	1.3	-1.50	71.8
3	6dF J1833412-450057	J183341.2-450057	-2.0	3207	12.84	-20.38	126.6	ESO282-006	356	3.2	3.05	126.6	ESO281-033	582	3.8	-0.31	5850.8
4	ESO003-001	J013200.7-851040	-0.1	3820	9.70	-23.89	62.8	ESO003-011	633	1.1	0.26	62.8	ESO003-007	525	1.7	-4.20	136.3
5	ESO040-002	J131017.7-752948	-2.9	2674	9.19	-23.63	6.1	ESO040-014	288	1.5	0.25	17.6	ESO040-012	35	1.2	-2.44	6.1
6	ESO052-014	J015925.1-674716	0.0	2884	10.65	-22.33	151.8	NGC0802	1897	17.5	4.35	295.2	NGC1399	1588	0.0	-0.69	151.8
7	ESO069-001	J161730.2-680225	-2.2	3343	9.82	-23.49	6.7	PGC141862	160	1.7	1.02	6.7	IC4595	213	2.2	-3.84	56.6
8	ESO071-013	J182851.5-720532	-2.9	3034	9.63	-23.46	2.7	2MASX J18013947-7250543	381	0.4	1.22	2.7	IC4704	113	1.6	-2.29	18.3
9	ESO078-010	J235711.3-644055	-0.9	1800	12.67	-19.29	26.2	PGC289052	85	0.6	0.81	26.2	IC1532	285	3.9	-0.02	6716.1
10	ESO085-030	J050129.8-631736	-0.7	1059	10.72	-20.08	4.0	ESO085-014	157	2.2	4.45	4.0	NGC1553	77	0.2	-1.02	8.4
11	ESO101-014	J164840.9-623622	-3.0	2292	8.61	-23.88	12.4	ESO101-017	856	1.2	0.14	76.1	ESO137-045	334	0.5	-3.26	12.4
12	ESO103-056	J184333.1-640625	-0.3	3187	11.14	-22.06	5.3	PGC093517	42	0.9	0.17	5.3	IC4723	339	0.6	-0.95	60.1
13	ESO105-012	J194644.5-651449	-2.0	3994	10.48	-23.21	8.1	NGC6776A	165	1.6	1.03	8.1	ESO105-004	299	2.6	-0.61	77.3
14	ESO159-003	J051609.1-540617	-2.1	3663	10.41	-23.09	138.9	ESO159-020	393	4.4	1.14	145.8	NGC1803	220	2.7	-2.80	138.9
15	ESO185-027	J195614.5-565437	-3.0	2072	10.59	-21.67	3.2	ESO185-041	63	0.9	1.77	3.2	IC4901	157	0.3	-3.39	12.3
16	ESO194-021	J002941.7-513114	-2.9	3274	9.00	-24.26	17.5	ESO194-022	167	2.5	-0.37	17.5	NGC0092	211	2.3	-2.26	24.4
17	ESO207-026	J071317.2-514318	0.0	2054	11.34	-20.91	14.2	ESO208-001	281	2.4	1.24	170.5	ESO208-034	143	0.3	-0.34	14.2
18	ESO208-026	J073521.1-500235	-0.9	2708	10.83	-22.01	26.9	ESO208-003	123	1.5	0.35	26.9	ESO208-031	176	1.5	-0.80	48.3
19	ESO216-017	J113431.9-475603	-0.9	2811	13.20	-19.72	75.1	PGC511551	706	9.7	6.10	75.1	NGC4696	329	0.8	-0.22	637.9
20	ESO219-034	J130932.9-481433	-0.4	3330	12.49	-20.81	2.6	ESO269-046	140	1.1	3.96	2.6	ESO219-041	124	1.0	-0.38	40.8
21	ESO222-005	J142642.3-494021	-0.3	3806	9.68	-23.91	23.9	PGC050966	3514	6.0	5.78	187.2	NGC5128	159	2.1	-1.07	23.9
22	ESO232-021	J194436.1-513609	-2.0	3921	10.38	-23.27	78.8	IC4875	1174	4.0	3.09	78.8	NGC6868	808	1.0	-2.34	334.9
23	ESO235-051	J210500.8-515654	-1.0	2240	10.73	-21.70	6.1	NGC6990	171	2.1	3.51	6.1	NGC7049	310	1.9	-0.19	216.5
24	ESO250-005	J040435.6-460231	-1.8	1106	11.23	-19.67	3.5	PGC103193	169	0.9	4.18	3.5	NGC1433	111	0.7	-2.37	92.0
25	ESO265-033	J112634.9-430331	-1.7	3904	9.99	-23.65	82.5	ESO319-008	1364	12.0	2.89	97.6	NGC4696	209	2.9	-1.17	82.5
26	ESO269-013	J125651.2-430736	0.0	3527	9.45	-23.97	4.1	ESO269-024	128	1.9	0.14	4.2	NGC4706	201	0.4	-4.12	4.1
27	ESO270-014	J132827.3-441019	-3.0	3598	9.73	-23.73	4.9	PGC159073	441	1.6	2.22	4.9	NGC5090	661	0.2	-1.22	29.9
28	ESO274-017	J152926.8-425328	-0.4	2991	10.87	-22.19	70.0	ESO273-022	348	3.9	2.34	70.0	NGC5786	145	2.1	-1.14	119.3
29	ESO286-044	J210538.7-424653	-2.8	2378	10.88	-21.68	7.6	ESO341-032	269	0.2	0.76	7.6	ESO286-050	411	2.1	-0.64	384.7
30	ESO289-004	J221357.4-423528	-2.9	1964	10.42	-21.73	4.1	PGC558560	190	1.9	3.39	4.1	NGC7213	218	0.3	-4.16	22.7
31	ESO289-037	J223320.0-443260	-2.4	1246	12.68	-18.48	23.8	PGC130771	388	2.8	5.37	23.8	NGC7582	64	0.9	-1.28	280.9
32	ESO301-009	J032255.1-421123	-1.7	1015	10.84	-19.88	3.5	PGC131167	304	0.3	5.18	3.5	NGC1291	204	0.6	-2.08	182.4
33	ESO302-008	J034713.5-385806	-2.0	921	11.80	-18.71	4.2	ESO302-009	493	1.2	5.50	4.2	NGC1399	61	0.1	-1.12	7.9
34	ESO316-013	J095955.9-390927	-0.7	3413	9.80	-23.55	14.3	PGC182155	975	4.8	1.69	45.9	NGC3268	201	1.3	-1.68	14.3
35	ESO323-079	J130640.5-381632	-0.5	3015	9.73	-23.35	3.0	ESO323-092	294	3.4	2.63	3.0	NGC4696	95	1.4	-0.21	8.7
36	ESO323-089	J131035.6-393616	-1.9	2650	8.92	-23.88	2.8	ESO323-078	301	3.2	1.82	2.8	NGC4696	61	1.0	-2.47	3.2
37	ESO324-029	J132903.6-415946	-0.6	1947	8.84	-23.29	19.7	ESO325-010	1648	1.0	4.94	22.6	NGC5128	181	1.5	-3.43	19.7

№	Назв.	Координаты	Тип	V_{LG} км/с	m_K mag	M_K mag	I_{min}	Сосед "сверху"				Сосед "снизу"					
								Назв.	δv км/с	δr Мпк	δm_K mag	II	Назв.	δv км/с	δr Мпк	δm_K mag	II
38	ESO345-042	J224231.5-371847	-2.0	2040	11.12	-21.11	4.2	PGC085256	277	1.5	4.33	4.2	IC1459	0	1.0	-1.47	33.8
39	ESO372-010	J091428.1-335721	-2.2	1994	10.21	-21.97	4.0	HIPASSJ0917-34	111	0.8	0.99	4.0	ESO372-016	76	0.5	-3.39	4.3
40	ESO376-006	J104108.5-332852	-0.7	3491	11.88	-21.52	7.4	ESO375-070	378	4.6	3.81	7.4	NGC3311	59	1.1	-0.63	28.4
41	ESO386-041	J145700.4-355305	-1.1	3899	9.39	-24.25	39.4	ESO387-011	218	3.2	-0.03	39.4	ESO386-004	260	3.6	-3.07	108.7
42	ESO403-029	J214748.6-341257	-1.4	2983	12.38	-20.68	4.2	PGC132410	264	0.5	3.54	4.2	NGC7135	306	0.6	-0.10	169.5
43	ESO420-013	J041349.7-320025	-1.2	3449	9.47	-23.90	47.6	PGC132188	2289	0.3	2.75	47.6	NGC1532	350	2.0	-2.31	61.8
44	ESO443-022	J130023.7-312618	-1.0	3471	10.49	-22.89	6.0	ESO443-046	140	1.3	0.80	6.0	ESO443-053	82	1.8	-0.62	33.4
45	ESO446-049	J142014.4-294451	-1.1	3683	9.84	-23.68	22.1	IC4388	382	5.0	2.35	22.1	NGC5419	192	2.0	-1.36	24.1
46	ESO449-009	J152311.9-322419	0.0	3243	10.82	-22.42	261.9	ESO514-023	1080	5.5	2.80	261.9	NGC5898	605	4.3	-1.15	933.0
47	ESO469-006	J225508.0-305520	-1.1	3027	11.41	-21.67	111.5	PGC133414	1267	3.0	4.62	111.5	IC1459	453	2.4	-2.27	1012.3
48	ESO477-020	J020036.2-250304	-1.9	3969	10.85	-22.83	234.1	ESO544-004	2718	14.4	4.55	285.2	NGC1399	386	2.7	-1.33	234.1
49	ESO481-029	J032902.5-262643	-0.8	1830	11.35	-20.64	3.6	PGC134080	181	1.1	3.53	4.5	NGC1302	37	0.4	-0.58	3.6
50	ESO483-013	J041241.1-230932	-2.8	792	10.82	-19.36	6.6	NGC1518	3	0.4	0.76	6.6	ESO550-024	22	0.5	-0.32	12.4
51	ESO486-038	J051513.8-223301	-2.0	3988	10.52	-23.16	19.6	ESO553-019	184	2.1	0.89	21.0	ESO553-020	76	1.5	-2.64	19.6
52	ESO487-003	J052150.7-235705	-0.8	3730	12.83	-20.72	20.3	ESO486-043	96	1.0	1.01	20.3	ESO487-005	179	2.1	-1.13	427.6
53	ESO496-003	J083945.2-232732	-2.4	2139	9.73	-22.60	15.3	ESO563-003	186	1.6	0.65	15.3	ESO563-028	154	1.4	-0.51	15.8
54	ESO498-004	J092347.7-253817	-3.0	2258	9.38	-23.07	2.9	ESO498-006	164	0.5	-0.14	3.3	NGC2891	261	0.2	-0.12	2.9
55	ESO498-006	J092452.5-254718	-2.4	2531	9.50	-23.20	2.9	ESO497-027	261	0.2	0.12	2.9	ESO498-004	178	1.2	-1.91	18.1
56	ESO499-014	J095318.8-250430	-0.4	2561	11.40	-21.33	6.2	ESO499-011	409	0.9	3.54	6.2	NGC3078	186	0.2	-0.69	15.4
57	ESO501-092	J104537.3-230030	-0.5	2302	12.50	-20.00	31.2	ESO569-002	1032	3.5	4.43	31.2	NGC3311	545	0.5	0.00	601.8
58	ESO506-011	J122827.4-243813	-2.0	3060	10.85	-22.26	6.3	ESO506-019	75	1.2	1.19	6.3	IC3289	138	1.6	-0.42	33.4
59	ESO506-033	J124013.8-251937	-2.0	1083	9.21	-21.65	19.4	AM 1246-251	323	3.2	4.27	19.4	NGC4594	176	0.5	-4.09	37.5
60	ESO508-033	J131623.3-263342	-1.7	3113	10.76	-22.39	14.7	ESO443-059	1264	0.6	3.66	14.7	NGC5078	184	2.3	-0.88	113.0
61	ESO545-040	J023811.7-201001	-2.0	1468	10.01	-21.50	4.5	ESO479-025	150	1.4	2.79	4.5	NGC2908	112	1.5	-1.16	68.4
62	ESO554-038	J054835.8-184013	-0.1	1886	9.83	-22.23	2.8	ESO554-028	108	0.9	0.89	3.7	NGC0076	40	0.6	-2.94	2.8
63	ESO563-024	J084919.0-190015	-2.0	2423	9.65	-22.96	9.4	ESO563-003	81	1.4	0.12	9.4	ESO563-036	207	1.9	-0.60	37.1
64	ESO563-031	J085218.3-174440	-2.0	1425	9.06	-22.40	1.7	PGC880134	67	0.9	-0.15	3.5	NGC2665	63	0.4	-3.64	1.7
65	ESO571-004	J112959.6-203459	-0.3	3296	10.16	-23.12	9.5	ESO571-007	378	4.6	1.50	81.7	NGC3497	74	1.1	-4.23	9.5
66	ESO603-029	J225624.2-212227	-1.4	3475	10.90	-22.49	4.2	ESO604-001	29	0.9	0.35	4.2	IC5261	165	2.0	-1.95	94.1
67	IC0271	J025559.5-120028	-1.0	1581	12.74	-18.94	5.0	PGC011135	199	2.0	5.75	5.0	NGC0988	0	0.4	-1.05	10.8
68	IC0276	J025841.7-154207	-2.1	2904	10.15	-22.85	5.9	PGC010994	309	1.0	1.84	5.9	NGC1209	153	1.2	-2.15	15.6
69	IC0537	J092522.6-122330	0.0	3596	9.70	-23.76	2.5	PGC958874	1943	0.7	1.75	219.0	NGC2855	21	0.9	-4.38	2.5
70	IC0741	J115031.8-045009	-0.8	3156	10.41	-22.77	78.8	PGC135784	2246	9.7	5.02	78.8	NGC4472	182	2.4	-3.27	137.3
71	IC0745	J115412.3+000812	-1.9	954	11.07	-19.51	4.1	UGC06850	256	3.5	5.68	4.1	NGC4472	98	0.6	-1.90	74.2
72	IC0875	J131707.6+573222	-2.0	2913	10.29	-22.71	4.2	PGC046033	300	2.0	1.24	31.0	NGC4814	0	0.8	-3.98	4.2
73	IC1445	J222530.3-171436	-2.6	2746	9.75	-23.13	2.0	ESO602-016	178	2.3	0.73	27.0	NGC7302	49	0.7	-3.58	2.0
74	IC1502	J233620.5+753853	-1.0	2237	8.73	-23.70	46.2	UGC12247	1039	8.3	2.84	158.6	IC0356	312	1.3	-4.65	46.2
75	IC1608	J005924.4-341944	-0.5	3446	9.57	-23.80	12.8	ESO351-028	234	2.9	0.10	43.5	IC1657	109	1.5	-3.10	12.8
76	IC2035	J040901.9-453103	-2.3	1289	8.86	-22.37	2.4	PGC103193	301	3.8	2.56	7.8	NGC1399	64	0.5	-4.74	2.4
77	IC2552	J101046.1-345041	-2.9	2797	8.92	-23.99	2.6	6dFJ1008107	332	2.1	0.81	2.9	NGC3268	16	1.0	-3.43	2.6
78	IC2963	J114924.5-050706	-0.8	1448	11.05	-20.44	3.7	PGC1063652	67	0.8	2.19	3.8	NGC3818	0	0.4	-1.10	3.7
79	IC4200	J130934.8-515807	-2.0	3674	8.66	-24.85	1.5	PGC045237	478	2.1	0.14	28.3	ESO219-041	146	0.7	-5.28	1.5
80	IC4310	J133857.1-255045	-1.9	2239	8.84	-23.59	1.8	ESO509-090	418	2.2	1.74	8.9	NGC5078	267	0.1	-3.88	1.8
81	IC4453	J143428.6-273107	-2.0	3399	8.78	-24.56	3.0	ESO447-019	106	1.8	-0.27	5.1	ESO512-012	236	0.6	-1.26	3.0
82	IC4653	J172707.2-605246	-0.6	1748	10.05	-21.84	73.2	HIPASS J1730-60	837	0.7	3.16	78.6	NGC6300	333	0.3	-4.37	73.2
83	IC4913	J195647.6-371942	-3.0	3634	9.78	-23.71	6.3	PGC161828	1055	8.6	2.48	146.2	NGC6868	117	1.2	-2.72	6.3
84	NGC0016	J000904.3+274346	-2.7	3300	8.77	-24.51	1.9	PGC000446	825	5.0	0.37	214.2	NGC7817	147	0.6	-5.53	1.9

№	Назв.	Координаты	Тип	V_{LG} км/с	m_K mag	M_K mag	II_{min}	Сосед "сверху"				Сосед "снизу"					
								Назв.	δv км/с	δr Мпк	δm_K mag	II	Назв.	δv км/с	δr Мпк	δm_K mag	II
85	NGC0114	J002658.2-014710	-2.0	3843	10.31	-23.29	112.7	PGC1075005	438	5.7	0.75	267.4	NGC0279	474	1.2	-1.48	112.7
86	NGC0216	J004127.1-210244	-1.6	1619	10.56	-21.17	25.1	PGC838777	1304	1.0	6.79	28.2	NGC0253	0	0.9	-3.74	25.1
87	NGC0244	J004546.4-153549	-1.8	1022	11.04	-19.70	26.9	NGC0337A	712	1.5	7.27	26.9	NGC0253	231	2.3	-1.28	1383.9
88	NGC0270	J005032.5-083906	-0.9	3883	9.58	-24.05	46.8	PGC020425	281	3.9	0.84	55.2	NGC0151	209	2.6	-2.57	46.8
89	NGC0324	J005714.8-405733	-1.9	3402	9.89	-23.45	15.6	ESO295-007	245	3.4	0.77	48.9	NGC0424	153	1.5	-2.43	15.6
90	NGC0404	J010927.0+354304	-2.8	218	8.55	-999.00	59.7	UGC01281	157	2.2	4.19	59.7	IC0342	153	0.6	-1.08	164.5
91	NGC0448	J011516.5-013734	-2.6	2041	9.33	-22.90	2.4	PGC1126889	406	3.4	2.38	17.3	NGC0488	121	0.3	-4.02	2.4
92	NGC0802	J015906.0-675213	-1.0	1294	11.35	-19.90	22.2	ESO052-010	480	5.5	5.07	53.8	NGC1553	88	0.3	-1.16	22.2
93	NGC0814	J021037.6-154625	-1.8	1617	11.17	-20.56	12.0	PGC916523	188	1.9	3.91	12.0	NGC0720	180	0.6	-2.29	83.6
94	NGC0944	J022641.5-143056	-0.9	3774	10.98	-22.59	4.6	PGC009335	187	1.7	0.28	23.0	PGC009732	14	0.8	-0.93	4.6
95	NGC1107	J024919.6+080534	-2.0	3524	8.35	-25.07	3.8	PGC087291	287	3.4	-0.35	18.4	NGC1024	104	1.5	-5.52	3.8
96	NGC1138	J025636.4+430250	-2.0	2543	8.97	-23.74	3.1	UGC02370	281	1.2	1.52	5.4	NGC1161	172	0.3	-4.21	3.1
97	NGC1211	J030652.4-004740	0.0	3238	9.21	-24.03	12.6	SDSSJ030715.63 +004352.0	267	3.6	-0.64	56.3	NGC1153	211	1.1	-5.97	12.6
98	NGC1222	J030856.7-025719	-3.0	2473	9.90	-22.75	24.6	PGC011885	268	1.0	0.46	24.6	NGC1266	223	0.8	-3.54	31.5
99	NGC1266	J031600.8-022538	-2.1	2208	9.44	-22.96	12.1	PGC011885	83	1.5	-0.07	12.1	NGC1248	79	1.2	-4.00	12.1
100	NGC1289	J031849.8-015824	-2.1	2851	9.46	-23.49	4.4	PGC012439	157	1.2	0.12	4.4	NGC1320	94	1.1	-2.14	6.0
101	NGC1304	J032112.8-043503	-2.9	3971	10.29	-23.38	3.0	NGC1314	196	2.7	1.37	13.7	NGC1358	154	0.5	-0.32	3.0
102	NGC1362	J033353.1-201658	-2.4	1159	10.21	-20.79	3.5	ESO548-029	309	0.7	3.17	4.3	NGC1332	66	0.3	-0.54	3.5
103	NGC1656	J044553.4-050812	-1.3	3688	9.71	-23.81	6.9	IC2102	213	2.4	1.64	6.9	NGC1700	157	1.3	-1.52	7.7
104	NGC2110	J055211.4-072722	-3.0	2169	8.01	-24.36	4.1	PGC178737	804	6.9	0.34	339.1	NGC1964	90	1.2	-4.24	4.1
105	NGC2128	J060434.2+573740	-3.0	3211	8.78	-24.44	6.7	UGC03354	133	2.1	0.18	6.7	UGC03445	131	2.2	-0.66	13.5
106	NGC2267	J064051.7-322856	-1.5	1242	9.01	-22.14	3.3	ESO426-027	354	2.3	1.93	37.5	NGC2217	54	0.6	-3.22	3.3
107	NGC2350	J071312.2+121558	0.0	1774	9.20	-22.73	12.1	UGC03775	457	3.1	0.73	135.1	NGC2339	244	0.3	-4.92	12.1
108	NGC2510	J080210.7+092910	-2.0	3849	10.52	-23.09	14.9	PGC022426	373	5.0	1.27	209.2	NGC2470	142	1.5	-0.95	14.9
109	NGC2612	J083350.1-131028	-2.9	1462	8.76	-22.75	1.4	PGC937227	233	3.3	1.96	50.0	NGC2613	129	0.1	-3.87	1.4
110	NGC2641	J084757.5+725345	-2.0	3285	9.86	-23.41	2.6	UGC04502	491	0.3	1.15	2.6	IC0520	176	0.8	-3.87	9.8
111	NGC2824	J091902.2+261612	-1.9	2672	10.11	-22.70	22.2	PGC026570	129	2.1	0.46	22.2	NGC2750	299	0.6	-3.12	48.5
112	NGC2917	J093426.9-023015	-2.0	3452	10.03	-23.34	33.5	PGC027331	1794	1.5	3.80	106.7	NGC2974	235	1.7	-2.06	33.5
113	NGC3081	J095929.5-224935	0.0	2103	8.89	-23.41	4.1	ESO499-017	143	1.9	1.04	4.1	NGC3078	138	0.6	-2.54	4.1
114	NGC3098	J100216.7+244240	-1.4	1305	9.09	-22.17	1.9	PGC2806869	143	1.4	1.64	4.1	NGC3190	62	0.4	-4.88	1.9
115	NGC3292	J103534.4-061047	-2.0	1999	10.76	-21.43	2.5	PGC031979	117	0.6	2.13	2.5	IC0630	210	1.9	-1.29	194.5
116	NGC3302	J103547.4-322131	-2.0	3775	9.32	-24.25	3.9	ESO375-056	200	1.5	0.50	3.9	ESO436-027	150	1.3	-3.79	5.8
117	NGC3413	J105120.7+324559	-1.8	610	10.72	-18.89	5.9	UGC05829	44	0.6	2.73	5.9	NGC3486	30	0.4	-0.55	9.9
118	NGC3483	J105900.2-282837	-1.3	3264	8.98	-24.27	4.4	ESO437-069	287	3.9	0.91	4.7	NGC3311	159	1.1	-1.36	4.4
119	NGC3499	J110311.0+561318	0.0	1618	10.22	-21.50	4.3	SDSSJ111517.56 +581136.5	196	1.3	2.32	4.3	NGC3610	95	1.0	-5.83	29.5
120	NGC3597	J111442.0-234340	-1.0	3240	9.76	-23.47	9.9	PGC3081839	410	4.4	2.50	29.5	ESO569-024	204	0.6	-2.37	9.9
121	NGC3682	J112741.2+663523	0.0	1653	9.31	-22.47	4.9	NGC3622	182	1.7	2.46	4.9	NGC4125	201	0.4	-1.53	13.1
122	NGC4014	J115835.8+161038	-0.1	3659	9.49	-24.01	5.4	NGC3934	445	4.0	0.68	32.6	NGC3801	103	1.5	-0.95	5.4
123	NGC4087	J120535.3-263122	-3.0	3075	8.89	-24.24	12.2	PGC788397	1212	2.0	1.39	73.2	NGC4105	127	1.7	-5.04	12.2
124	NGC4385	J122542.8+003422	-0.7	1982	9.77	-22.40	1.1	PGC040329	201	2.6	2.51	4.6	NGC4261	78	0.2	-3.02	1.1
125	NGC4696E	J124826.1-405611	-1.8	1552	10.75	-20.89	2.6	PGC043553	1291	0.2	3.64	4.1	NGC4696	0	0.4	-1.24	2.6
126	NGC4720	J125042.8-040921	-2.6	1452	10.76	-20.73	2.5	PGC043341	88	1.2	3.72	2.5	NGC4666	98	0.1	-1.44	5.0
127	NGC4878	J130020.2-060614	-1.0	3666	9.46	-24.04	6.8	PGC045127	273	2.7	0.90	6.8	NGC4759	200	1.2	-0.90	7.1
128	NGC5062	J131823.6-352731	-1.9	3053	8.80	-24.31	1.3	PGC652152	612	3.0	1.32	13.4	IC4296	200	0.2	-4.71	1.3
129	NGC5273	J134208.3+353915	-1.9	1139	8.66	-22.30	4.8	PGC047020	185	1.6	2.22	4.8	NGC5005	107	1.1	-5.74	17.3
130	NGC5283	J134105.8+674020	-2.0	3301	9.97	-23.31	7.3	UGC08604	381	3.8	0.76	80.1	NGC5218	91	1.1	-1.66	7.3
131	NGC5338	J135326.5+051228	-2.0	702	10.37	-19.55	5.0	SDSSJ134757.44 +041850.5	457	0.1	3.44	5.0	NGC5363	151	0.3	-3.75	78.3

№	Назв.	Координаты	Тип	V_{LG} км/с	m_K mag	M_K mag	I_{min}	Сосед "сверху"				Сосед "снизу"					
								Назв.	δv км/с	δr Мпк	δm_K mag	II	Назв.	δv км/с	δr Мпк	δm_K mag	II
132	NGC5701	J143911.1+052149	-0.4	1470	8.13	-23.39	1.5	NGC5668	240	1.6	1.26	4.0	NGC5746	81	0.6	-3.57	1.5
133	NGC5890	J151751.2-173521	-1.0	1990	9.73	-22.44	6.7	ESO582-004	146	1.6	1.61	10.6	NGC5878	127	0.5	-2.09	6.7
134	NGC5973	J154015.5-083603	-1.0	3617	10.21	-23.26	243.7	PGC055224	526	4.7	0.71	243.7	PGC054811	404	3.7	-1.78	294.2
135	NGC6014	J155557.4+055555	-1.8	2463	9.78	-22.86	28.6	NGC6017	820	6.8	2.85	101.3	NGC5846	618	0.2	-0.01	28.6
136	NGC6547	J180510.0+251357	-1.3	2922	9.45	-23.56	24.4	PGC061274	377	1.8	0.18	28.2	NGC6589	359	0.8	-1.38	24.4
137	NGC6654	J182407.6+731060	-0.4	2204	8.57	-23.83	18.4	PGC062387	460	0.7	0.30	21.1	NGC6643	136	1.7	-3.44	18.4
138	NGC6757	J190503.4+554255	0.0	2666	10.11	-22.71	36.9	UGC11457	175	2.2	0.75	36.9	NGC6798	250	3.2	-4.00	332.1
139	NGC6762	J190537.1+635603	-0.1	3205	10.19	-23.02	151.2	NGC6687	435	3.9	0.92	151.2	NGC6667	548	4.4	-0.71	449.7
140	NGC6798	J192403.2+533729	-2.0	2741	9.35	-23.52	6.1	UGC11457	176	2.4	0.02	31.1	NGC6764	74	1.1	-4.75	6.1
141	NGC7007	J210527.9-523307	-3.0	3041	8.95	-24.15	21.2	PGC065483	255	2.9	0.24	21.2	NGC6942	181	2.5	-3.91	40.3
142	NGC7180	J220218.5-203252	-2.3	1599	9.61	-22.10	3.8	ESO532-015	295	0.1	-0.08	3.8	NGC7185	226	0.8	-2.15	40.5
143	NGC7208	J220824.4-290304	-1.7	2729	10.78	-22.08	3.7	PGC068140	173	2.1	2.78	3.7	NGC7176	72	1.2	-0.78	18.1
144	NGC7693	J233310.5-011731	-1.0	2761	11.17	-21.72	6.1	SDSS J233631.29 -002943.3	83	1.2	1.87	6.1	NGC7716	87	0.8	-4.49	11.2
145	NGC7702	J233528.9-560044	-1.1	3143	8.99	-24.17	4.5	ESO148-020	188	2.5	0.73	14.5	NGC7796	75	1.2	-3.17	4.5
146	NGC7709	J233527.5-164218	-1.8	1878	10.66	-21.40	9.3	PGC072271	217	2.0	2.98	9.3	NGC7727	205	0.9	-2.70	104.1
147	NGC7710	J233546.1-025251	-1.8	2727	10.67	-22.20	10.4	UGC12648	286	0.4	-0.10	21.7	NGC7694	112	0.8	-1.57	10.4
148	NGC7744	J234459.2-425439	-2.6	3073	8.32	-24.80	3.8	ESO291-034	157	2.2	0.40	7.4	IC5328	132	1.4	-3.32	3.8
149	PGC002425	J004019.8-072716	-0.5	3759	12.15	-21.41	20.9	PGC001996	231	2.5	3.05	20.9	NGC0151	107	1.7	-1.66	140.6
150	PGC002646	J004448.4+050809	-0.4	3066	11.66	-21.45	87.3	IC0052	822	6.0	4.71	87.3	NGC0488	946	0.9	-0.87	1823.3
151	PGC003757	J010310.4-033637	-2.7	2708	11.60	-21.25	13.6	PGC003429	221	1.7	3.16	13.6	NGC0357	0	1.0	-0.18	20.3
152	PGC008650	J021555.5-020054	-0.5	3102	12.42	-20.72	151.3	PGC008865	483	4.7	4.05	151.3	NGC1032	183	1.0	-3.32	162.5
153	PGC010873	J025222.7+364406	-0.1	3451	11.02	-22.35	33.0	UGC02166	328	1.3	1.28	33.0	UGC02456	178	2.0	-2.95	104.5
154	PGC011756	J030832.2-022536	-1.4	3591	11.37	-22.09	32.5	[HB91] 0258-015	359	1.4	2.16	32.5	NGC1211	469	2.0	-0.21	289.3
155	PGC012117	J031546.2-120128	-1.0	3119	10.53	-22.63	4.9	PGC012368	242	2.3	0.93	29.7	NGC1196	66	0.8	-2.02	4.9
156	PGC012154	J031621.3-255117	-0.1	1228	11.11	-20.02	2.7	ESO481-019	430	0.1	3.29	2.7	NGC1302	231	0.7	-2.26	253.2
157	PGC015648	J043652.9-643420	-2.0	1288	10.50	-20.73	5.8	ESO084-013	313	2.4	4.23	5.8	NGC1553	49	0.8	-3.64	27.7
158	PGC016688	J050451.4+014952	-0.7	2933	10.91	-22.11	18.9	PGC016267	112	1.4	0.58	18.9	UGC03258	210	2.1	-0.57	97.4
159	PGC020611	J071804.4+682034	0.0	2796	10.87	-22.05	37.3	UGC03748	321	2.4	1.44	37.3	UGC03714	221	1.9	-2.75	131.1
160	PGC023834	J082938.7+520435	-2.0	1804	12.45	-19.51	27.5	UGC04333	93	1.4	3.13	27.5	UGC04551	618	0.7	-2.00	2608.4
161	PGC025795	J090928.9-011039	-1.8	3370	12.08	-21.24	48.2	PGC025906	393	4.3	3.79	48.2	NGC2713	89	1.4	-0.94	81.5
162	PGC028052	J094631.1+155310	-0.3	3667	12.64	-20.86	10.1	SDSSJ094719.94 +122347.3	109	1.5	3.22	10.1	NGC2954	228	3.0	-2.53	1456.5
163	PGC029033	J100138.4-081456	-1.6	202	12.23	-999.00	4.4	PGC1034827	233	0.1	6.36	4.4	NGC3115	351	0.2	-0.72	5144.8
164	PGC029347	J100618.1+285640	-1.7	1295	11.60	-19.64	9.1	UGC05478	110	1.5	3.75	10.3	NGC3245	32	0.4	-0.69	9.1
165	PGC030985	J103023.7-351513	-2.0	918	11.48	-19.02	19.8	IC2563	552	0.0	0.97	19.8	ESO375-041	118	0.8	-1.16	177.3
166	PGC033145	J110004.9-160622	-2.8	3910	11.75	-21.90	8.3	ESO569-031	79	1.4	1.85	8.3	NGC3456	170	2.1	-1.54	149.1
167	PGC033696	J110734.3+825114	-2.0	1876	13.06	-18.99	16.5	UGC05114	289	2.6	5.47	16.5	NGC2300	111	1.3	-0.21	388.0
168	PGC034728	J112038.2-071819	-2.8	3431	10.94	-22.42	5.6	PGC1046849	82	1.3	1.43	5.6	NGC3660	328	1.9	-2.40	167.7
169	PGC035560	J113157.8-025518	-0.7	1364	11.46	-19.89	4.8	PGC035705	564	5.9	6.08	13.4	NGC4472	48	0.2	-2.33	4.8
170	PGC035771	J113437.5-093847	-0.7	3951	10.48	-23.19	39.0	NGC3711	530	2.6	0.96	119.9	NGC3660	217	1.8	-2.21	39.0
171	PGC036642	J114526.3+000015	-1.9	3752	12.35	-21.21	3.0	PGC1142852	2815	9.4	6.97	91.6	NGC4472	0	0.4	-1.90	3.0
172	PGC036750	J114700.7-001739	-1.7	1271	12.90	-18.30	3.7	PGC1104651	61	1.1	5.58	3.7	NGC4030	64	0.5	-1.86	81.0
173	PGC037075	J115114.6+210006	-2.0	3302	12.03	-21.25	13.1	PGC1651666	253	3.5	3.21	26.8	NGC3801	70	0.7	-2.60	13.1
174	PGC037148	J115157.2+464901	-2.0	3281	11.32	-21.94	14.4	PGC036991	172	1.5	1.63	14.4	NGC3811	0	1.1	-1.80	21.8
175	PGC037312	J115357.5+254106	-2.0	3755	10.91	-22.65	3.3	UGC06806	170	0.5	0.73	4.1	NGC3944	82	0.8	-0.80	3.3
176	PGC037392	J115504.9+014311	-0.8	1109	12.41	-18.50	3.3	PGC3111475	275	3.4	7.02	3.3	NGC4472	34	0.9	-1.64	263.5

№	Назв.	Координаты	Тип	V_{LG} км/с	m_K mag	M_K mag	I_{min}	Сосед "сверху"				Сосед "снизу"					
								Назв.	δv км/с	δr Мпк	δm_K mag	II	Назв.	δv км/с	δr Мпк	δm_K mag	II
177	PGC043151	J124719.8-092952	-1.9	2717	10.19	-22.67	4.7	PGC1004715	130	1.6	0.91	13.2	NGC4671	51	0.8	-1.72	4.7
178	PGC044433	J125818.8+132329	0.0	2542	10.77	-21.94	15.0	PGC3090638	1560	2.8	5.38	15.0	NGC4472	97	1.4	-3.52	59.2
179	PGC044782	J130034.8+642649	0.0	2230	12.85	-19.58	38.2	PGC2661153	399	3.6	5.69	38.2	NGC5322	303	0.7	-0.76	709.3
180	PGC046474	J131942.8-112828	0.0	2412	11.66	-20.94	5.5	PGC170245	318	0.7	3.46	5.5	NGC5077	176	1.2	-0.98	99.8
181	PGC046516	J132006.9+143235	-0.4	3573	11.97	-21.48	38.8	SDSSJ131623.94 +123120.1	332	2.2	2.90	38.8	NGC5020	148	1.9	-1.77	176.9
182	PGC048085	J133700.6-081239	-2.3	2693	9.84	-22.99	3.5	PGC994586	213	2.7	0.59	38.3	NGC5343	73	0.8	-3.50	3.5
183	PGC049927	J140124.0+364800	-0.5	2773	11.53	-21.37	3.1	PGC169753	223	2.6	3.91	3.1	NGC5353	175	1.8	-4.05	196.1
184	PGC050966	J141604.8-480739	-0.1	3904	10.75	-22.89	3.6	ESO272-002	159	2.1	1.07	23.9	ESO272-005	0	0.8	-1.30	3.6
185	PGC052002	J143309.6-152419	-1.8	2511	10.18	-22.51	8.0	PGC926277	207	1.7	2.04	8.0	NGC5728	181	1.2	-3.24	37.5
186	PGC053415	J145638.6-162916	-2.0	2297	10.57	-21.92	9.8	PGC939275	599	0.4	2.46	9.8	NGC5796	123	2.0	-2.96	150.3
187	PGC054116	J150945.5-075016	-1.8	1980	12.22	-19.94	3.6	PGC053877	148	1.0	4.29	3.6	NGC5812	0	0.7	-0.53	24.1
188	PGC056762	J160202.2+184860	-0.2	2614	12.62	-20.15	5.5	UGC10140	284	1.2	2.05	121.6	NGC6035	104	0.1	-2.71	5.5
189	PGC056772	J160211.6+070510	0.0	2706	10.92	-21.92	28.1	UGC10225	210	1.0	0.39	28.1	NGC6063	423	1.7	-0.07	217.1
190	PGC058114	J162604.3+025424	-1.6	1599	10.32	-21.39	13.5	PGC057818	144	2.0	1.67	50.8	NGC6118	44	0.8	-1.35	13.5
191	PGC059363	J165842.8+570554	-2.5	3586	11.89	-21.56	6.3	PGC059192	344	3.2	2.42	75.5	NGC6307	0	0.7	-0.64	6.3
192	PGC060701	J174137.7+830759	-1.4	2120	12.02	-20.29	142.8	UGC10125	392	5.5	4.43	142.8	NGC2300	267	1.5	-1.74	728.3
193	PGC061274	J180107.7+244436	-2.0	3280	10.83	-22.43	9.5	UGC10999	133	1.6	1.21	9.5	NGC6484	200	2.1	-0.26	74.3
194	PGC061689	J181732.2+192640	-0.6	3145	11.12	-22.06	3.7	UGC11152	156	0.8	2.01	3.7	NGC6587	212	1.1	-1.45	56.3
195	PGC061855	J182515.7+205446	-2.1	3443	10.84	-22.53	5.1	PGC166546	113	1.2	1.07	5.1	UGC11229	192	1.7	-0.44	35.6
196	PGC063536	J194157.4-290317	-3.0	2010	10.47	-21.73	3.2	ESO460-034	972	6.6	2.51	496.8	NGC6925	0	0.5	-2.58	3.2
197	PGC064833	J203030.7+015159	-0.3	3896	11.29	-22.35	2.8	UGC11577	176	2.1	1.05	33.2	IC1317	87	0.5	-1.18	2.8
198	PGC065089	J203730.9-163230	-0.2	3694	10.50	-23.02	8.8	PGC902799	135	1.9	-0.24	19.5	PGC064822	133	0.9	-2.54	8.8
199	PGC068401	J221502.6-113060	-0.9	2926	10.57	-22.45	19.6	PGC068080	196	2.7	1.27	59.3	NGC7171	114	1.4	-0.12	19.6
200	PGC071692	J23214.4+022434	-0.8	3649	12.14	-21.36	25.1	PGC135889	450	5.9	4.13	40.3	NGC7619	177	0.4	-1.10	25.1
201	PGC071704	J232324.6+065102	-2.2	3832	10.93	-22.67	5.2	PGC071529	217	3.0	2.93	5.2	NGC7619	115	1.2	-0.85	12.4
202	PGC072544	J234951.6-122802	-0.8	3595	12.38	-21.08	150.6	PGC905144	244	3.4	2.60	150.6	NGC7717	288	3.9	-1.09	2029.1
203	PGC085239	J23213.3-411010	-2.2	1634	14.34	-17.41	11.9	PGC558560	125	2.0	6.89	11.9	IC5267	567	1.5	-0.25	19949.7
204	PGC088955	J140314.6-340118	-0.4	2577	12.05	-20.69	5.0	PGC089814	1219	0.2	4.55	5.0	NGC5419	445	0.5	-0.08	198.5
205	PGC098114	J140106.0-333005	-0.2	3023	12.12	-20.96	3.7	PGC657606	772	0.4	4.63	3.7	NGC5419	502	2.5	-0.77	1439.1
206	PGC090359	J201731.5+720726	-2.0	2692	10.71	-22.12	86.8	PGC063911	271	3.5	2.15	90.5	NGC6911	204	2.0	-0.85	86.8
207	PGC101167	J203955.9-364111	-2.0	2770	12.91	-19.98	5.6	PGC621771	105	1.4	4.53	5.6	NGC6958	144	2.1	-0.78	832.2
208	PGC101243	J222221.8-370322	-2.5	2375	13.95	-18.61	29.5	ESO404-037	380	3.9	5.95	29.5	NGC7176	252	1.4	-0.23	1537.6
209	PGC128338	J233254.4-575527	0.0	3057	14.12	-18.99	2.9	PGC390870	0	0.4	1.96	2.9	ESO148-020	121	1.0	-0.02	174.8
210	PGC131687	J223722.6-393057	-2.0	3739	11.84	-21.70	94.6	ESO345-021	434	4.3	3.23	94.6	IC5179	549	1.4	-0.36	577.8
211	PGC131705	J222416.1-412112	0.0	3183	14.58	-18.62	14.2	PGC558560	0	0.8	3.05	14.2	ESO344-021	990	1.3	-0.01	29170.6
212	PGC131925	J004328.9-362741	-2.6	3931	11.91	-21.74	216.4	PGC002235	619	5.2	2.79	216.4	NGC0424	531	1.2	-2.16	639.8
213	PGC132188	J041258.6-342917	0.0	3118	11.78	-21.37	51.6	ESO359-031	1732	4.5	5.48	51.6	NGC1399	1786	0.0	-0.16	346.4
214	PGC133036	J032802.5-281641	-2.7	1714	13.74	-18.11	2.9	PGC2815803	358	2.8	7.44	2.9	NGC1399	193	1.8	-1.05	2534.3
215	PGC133826	J014306.5-252005	-0.5	3932	11.50	-22.16	288.6	ESO544-004	3624	6.4	7.73	288.6	NGC0253	433	4.3	-0.68	972.3
216	PGC1365837	J093323.4+092918	-2.0	3385	12.30	-21.03	2.5	SDSSJ093301.30 +101945.4	310	0.4	3.60	2.5	NGC2911	0	0.7	-1.48	12.2
217	PGC148136	J055802.3-125547	-0.6	743	11.94	-18.10	4.4	PGC3097696	33	0.4	1.70	11.1	PGC017978	42	0.1	-1.15	4.4
218	PGC148318	J060349.4-331128	-0.2	2663	12.98	-19.83	4.8	PGC679759	0	0.7	1.73	4.8	IC2153	0	0.9	-1.38	88.6
219	PGC153352	J085900.3-182303	-0.6	1803	12.01	-19.96	13.4	PGC862077	103	0.7	0.70	16.0	ESO564-019	79	0.3	-0.86	13.4
220	PGC154630	J100600.2-425126	-0.7	2845	11.80	-21.15	9.3	PGC100728	378	3.0	3.74	9.3	NGC3256	212	2.3	-1.60	432.9
221	PGC1578957	J052037.0+190307	-0.5	3806	10.67	-22.92	116.9	PGC016477	231	3.1	0.21	116.9	PGC143022	659	7.3	-0.58	2273.9
222	PGC161828	J195936.7-360436	-2.0	3523	12.50	-20.92	6.3	ESO399-017	117	1.2	2.72	6.3	IC4913	42	1.2	-0.31	50.2
223	PGC165749	J180243.5-683042	0.0	3168	10.42	-22.77	5.4	ESO071-004	325	2.9	2.00	15.0	IC4704	54	0.9	-0.97	5.4

Приложение В

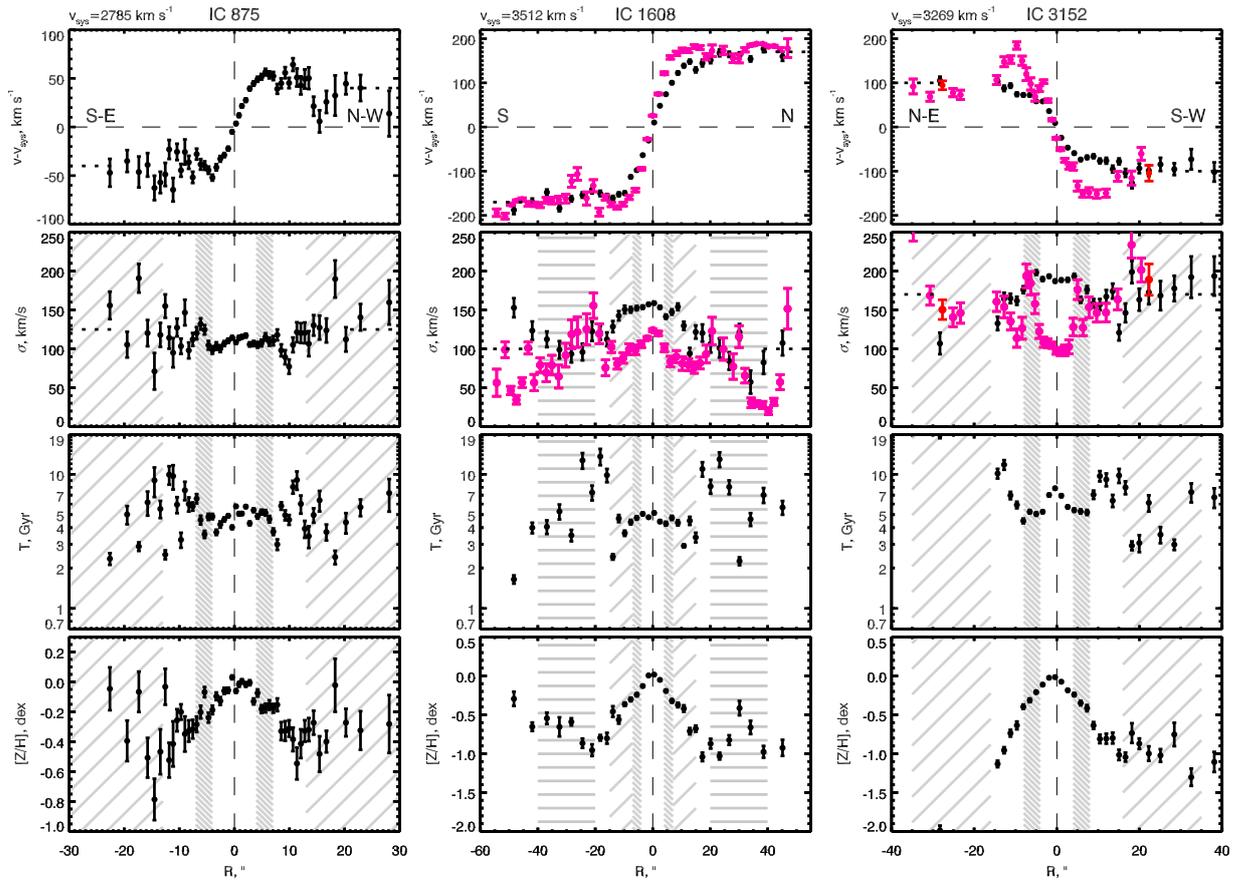


Рис. 0. Результат анализа длиннощелевых спектров исследуемых галактик. Каждый блок содержит четыре панели с радиальными профилями параметров для одной галактики. На панелях *сверху вниз* показаны лучевые скорости звезд и ионизованного газа, дисперсия скоростей на луче зрения звезд и газа, возрасты и металличности звездного населения. Штриховая заливка оозначает области, по которым происходило усреднение профилей для отдельных структурных компонентов: “/” - диск, “\” - балдж, “_” - область кольца/линзы.

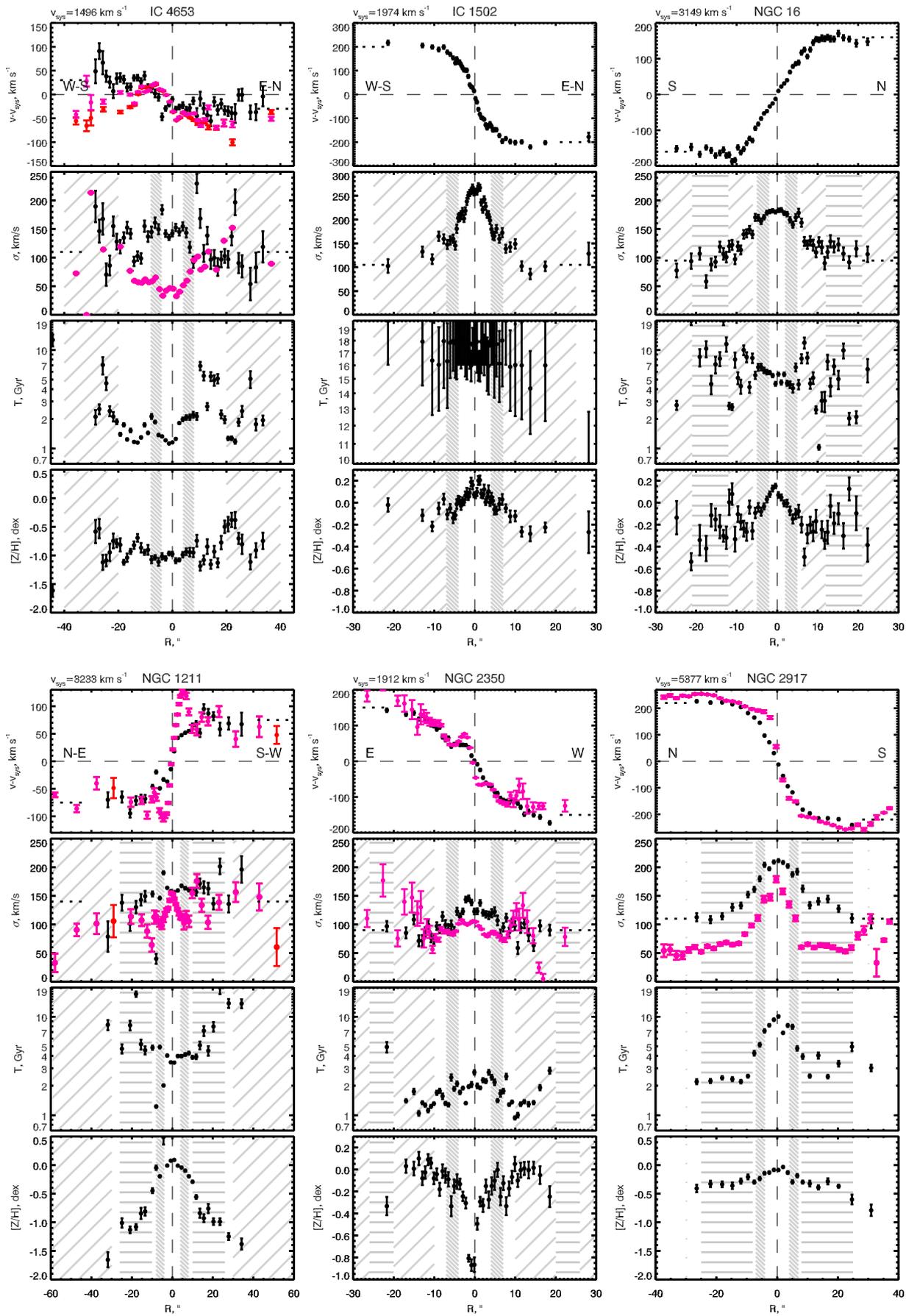


Рис. 1. Продолжение.

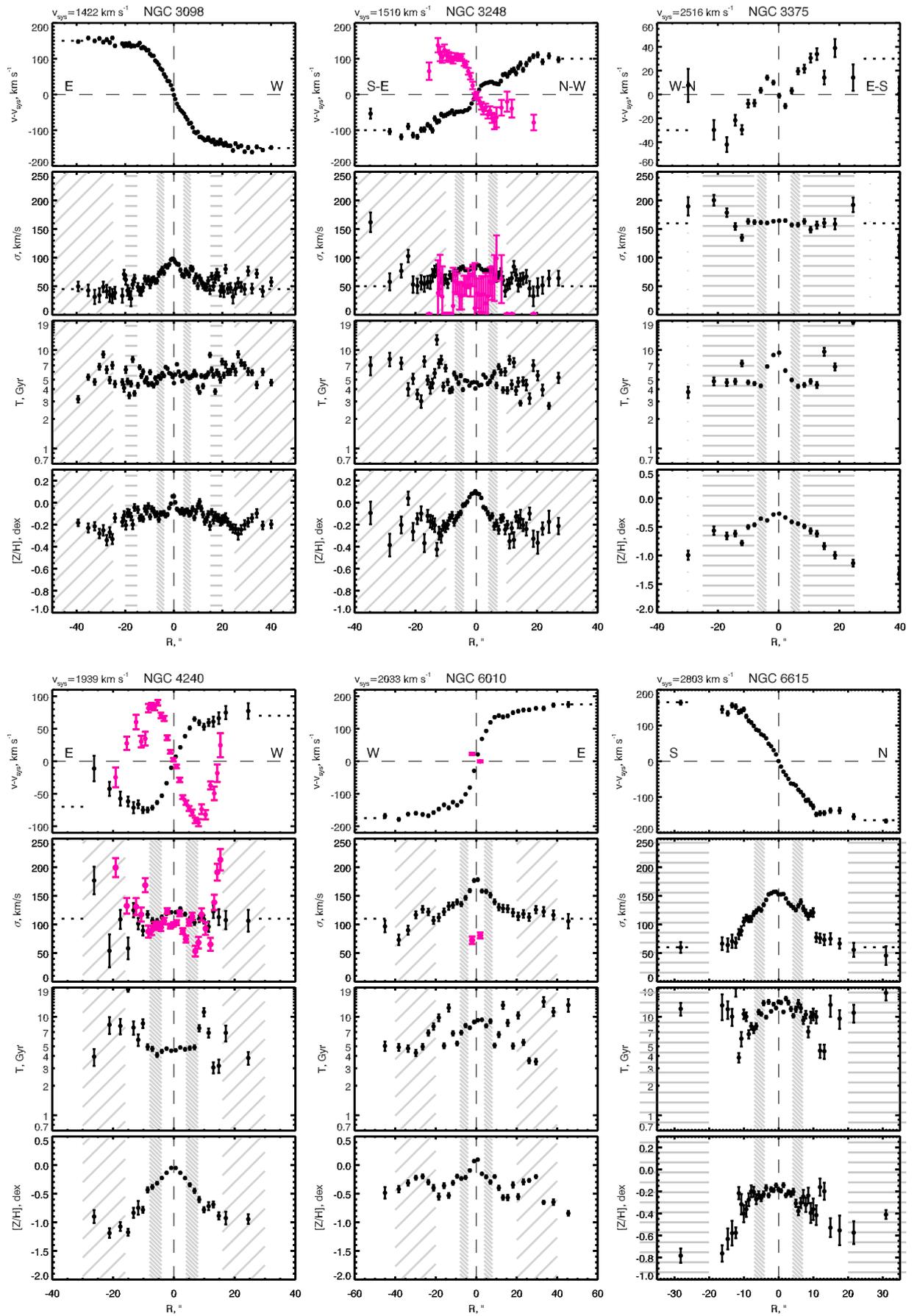


Рис. 0. Продолжение.

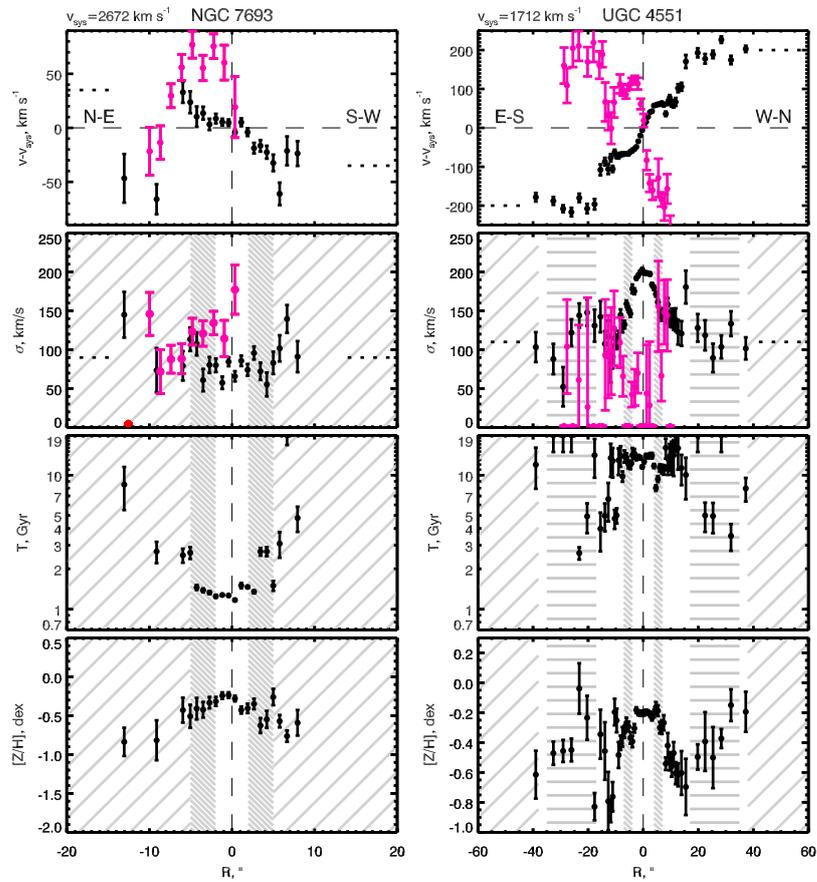
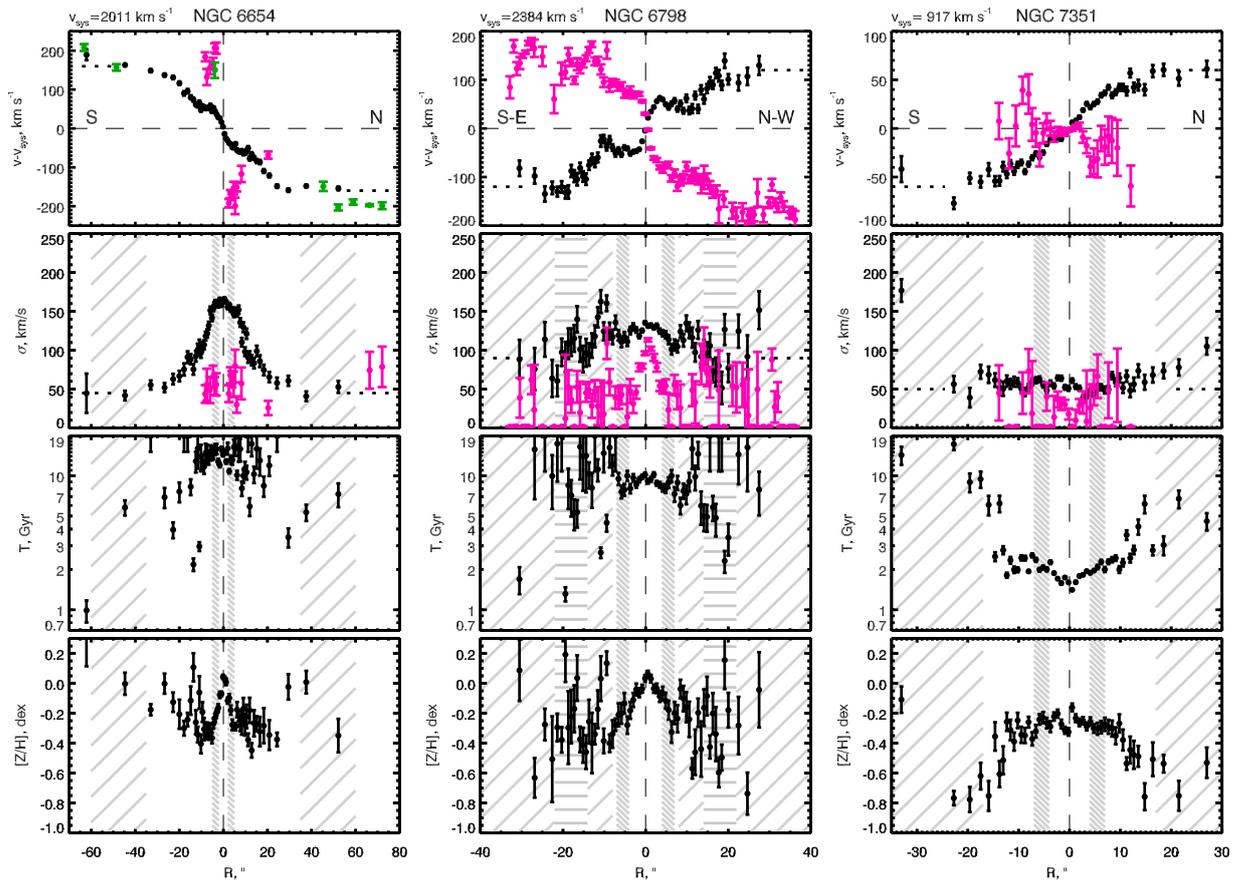


Рис. 0. Продолжение.

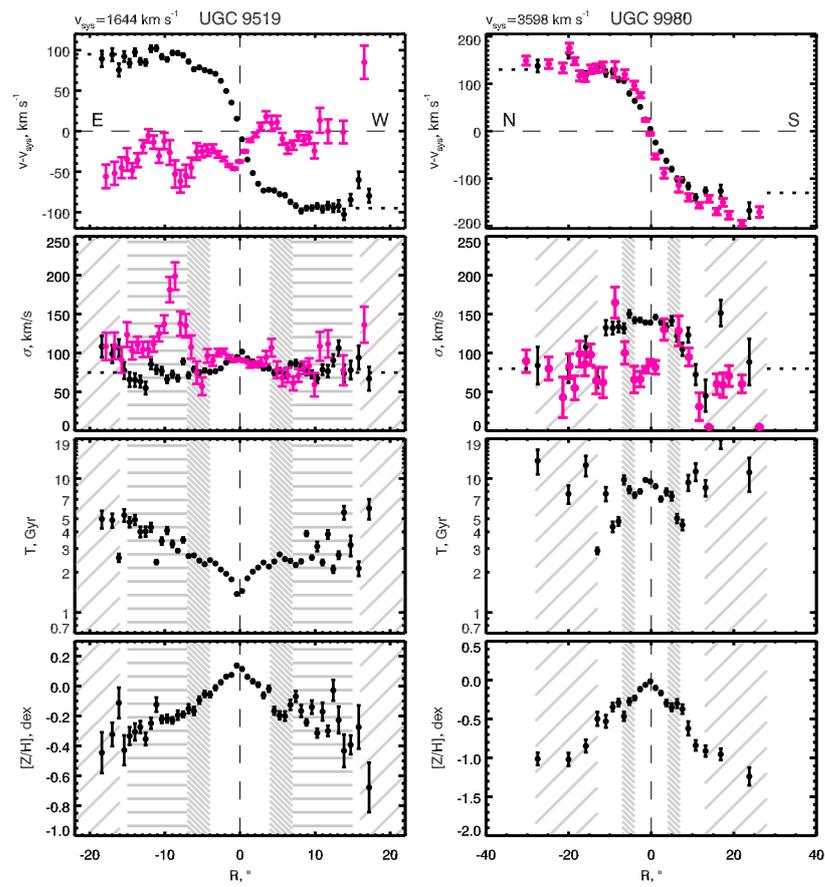


Рис. 0. Продолжение.