

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

На правах рукописи

УДК 520.353; 524.7-8

МОИСЕЕВ Алексей Валерьевич

**СТРУКТУРА И ЭВОЛЮЦИЯ ГАЛАКТИК ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ИХ
ВНУТРЕННЕЙ КИНЕМАТИКИ**

(01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия)

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Нижний Архыз – 2012

Оглавление

Введение	6
1 Методика наблюдений и обработки данных о внутренней кинематике галактик	22
1.1 Введение: методы панорамной спектроскопии	22
1.2 Редуктор светосилы SCORPIO	23
1.2.1 Прямые снимки (SCORPIO/DI)	26
1.2.2 Спектроскопия с длинной щелью (SCORPIO/LS)	27
1.2.3 Панорамная спектроскопия с ИФП (SCORPIO/IFP)	27
1.2.4 Редуктор светосилы SCORPIO-2	27
1.3 Наблюдения со сканирующим ИФП	28
1.3.1 Основы метода	28
1.3.2 Проблема бликов	29
1.3.3 Основные этапы обработки данных наблюдения со сканирующим ИФП	31
1.3.4 Измерение дисперсии скоростей	35
1.4 Наблюдения с мультиспектральным спектрографом MPFS	36
1.4.1 Первичная редукция	36
1.4.2 Кросс-корреляционная техника измерения параметров звездной кинематики	38
1.5 Методы анализа полей скоростей	40
1.5.1 Модель квазикругового вращения	40
1.5.2 Двумерная модель изогнутого диска	42
1.5.3 Учет вклада от ионизованных оболочек	43
2 Противовращение в дисках галактик	47
2.1 Введение: противовращающиеся компоненты	47
2.2 Противовращение центральных областей	48
2.2.1 Выборка галактик с перемычками: NGC 3945	48
2.2.2 Кинематически выделенное ядро NGC 1316	49
2.3 Крупномасштабные противовращающиеся диски	52
2.3.1 NGC 2551 и NGC 5631	52
2.3.2 Кольцевая галактика NGC 7742	54
2.4 Наклонный диск в NGC 7743	59
2.4.1 Кинематика звезд и газа	59
2.4.2 Источники ионизации газа	64
2.4.3 Выводы о структуре галактики	64
3 Лобовые столкновения галактик	67
3.1 Введение: столкновительные кольца	67
3.2 Кольцевые волны в Agr 10	68
3.2.1 Анализ поля скоростей	70
3.2.2 Спутник - “возмутитель”	72
3.2.3 Численное моделирование	72
3.3 Malin 1 как столкновительная система	74

3.3.1	Malin 1 и Malin 1B	74
3.4	Mrk 334: прямое столкновение со спутником	77
3.4.1	Структура диска	78
3.4.2	Источники ионизации	81
3.4.3	Кинематика газа	84
3.4.4	Обсуждение структуры галактики	86
4	Галактики с полярными кольцами и проблема внешней аккреции	89
4.1	Введение: история изучения ГПК	89
4.2	Изогнутое полярное кольцо в Agr 212	91
4.2.1	Анализ поля лучевых скоростей	93
4.2.2	Пространственная ориентация орбит	95
4.2.3	Двумерная модель	96
4.2.4	Трехмерная структура газовой подсистемы Agr 212	96
4.2.5	Происхождения внешней газовой подсистемы	99
4.3	Дальнее полярное кольцо SDSS J075234.33+292049.8	101
4.3.1	Морфология, химсостав, звездное население	101
4.3.2	Кинематика газа и звезд	102
4.3.3	Проблема формирования кольца	105
4.4	Объект Хога: доказательства космологической аккреции	107
4.4.1	Ядро	109
4.4.2	Кольцо	110
4.4.3	Обсуждение	113
4.5	Новый каталог кандидатов в галактики с полярными кольцами	114
4.5.1	Составление каталога	114
4.5.2	Описание каталога	116
4.5.3	Подтверждение кандидатов	121
4.5.4	Статистика ГПК	125
5	Внутренние полярные кольца и диски	128
5.1	Введение: внутренние полярные структуры	128
5.2	Новые околоядерные полярные диски	129
5.2.1	NGC 5850	129
5.2.2	Группа Leo I: NGC 3368	129
5.2.3	Группа Leo II: NGC 3599 и NGC 3626	132
5.3	Полярные диски в карликовых галактиках	134
5.3.1	NGC 7468 (Mrk 314)	135
5.3.2	Mrk 33	138
5.3.3	Mrk 370	138
5.4	Наблюдаемые свойства внутренних полярных структур	139
5.4.1	Список подтвержденных полярных структур	139
5.4.2	Галактики, не вошедшие в список	141
5.5	Статистические свойства	141
5.5.1	Общие замечания	141
5.5.2	Размеры	144
5.5.3	Морфологические типы	144
5.5.4	Наклонный или полярный?	147
5.5.5	Бары и трехосные балджи	147
5.5.6	Внешнее окружение	149
5.6	Обсуждение	149

6	Истечения и оболочки в областях звездообразования	152
6.1	Введение: звездные группировки и межзвездная среда	152
6.2	Звезды и межзвездная среда в IC1613	154
6.2.1	Гигантская биполярная туманность вокруг звезды WO	154
6.2.2	Система оболочек нейтрального и ионизованного газа	156
6.3	IC 10: синхротронная сверхоболочка как остаток гиперновой	159
6.4	Сверхветер в NGC 4460	163
6.4.1	Структура окооядерной области	164
6.4.2	Параметры ионизованного газа	164
6.4.3	Кинематика газа	168
6.5	Спиральные галактики	172
6.5.1	“Отрог” в NGC 1084	172
6.5.2	Аналоги в других спиральных галактиках	175
7	Турбулентные движения газа в карликовых галактиках	178
7.1	Введение: дисперсия скоростей газа в областях звездообразования	178
7.2	Диаграммы $I - \sigma$	181
7.2.1	Выборка близких галактик местного объема	181
7.2.2	DDO 53	182
7.2.3	DDO 99	185
7.2.4	DDO 125	185
7.2.5	DDO 190	185
7.2.6	UGC 8508	185
7.2.7	UGCA 92	186
7.2.8	VII Zw 403	186
7.3	Влияние пространственного разрешения	187
7.4	Обсуждение	192
	Заключение	197

Посвящается всем сотрудникам Специальной Астрофизической Обсерватории – инженерам и астрономам, механикам и электрикам, программистам и администрации – благодаря труду которых продолжает работать Большой Азимутальный Телескоп



Введение

Актуальность темы

Внегалактическая астрономия – один из наиболее бурно развивающихся разделов современной астрофизики. За последние 10–15 лет наши представления о галактиках, их структуре и эволюции претерпели заметные изменения, что связано, прежде всего, с получением огромного количества новых наблюдательных данных и развитием методик их анализа. Прогресс в изучении объектов на больших красных смещениях сопровождается успехами в изучении близких галактик. Здесь приходится отказываться от многих привычных представлений. Например, оказалось, что профиль распределения яркости в дисках заметного числа галактик отличается от классического экспоненциального закона, здесь следует говорить о многоярусных дисках, сложная структура которых обусловлена взаимодействиями и поглощением спутников (Erwin et al., 2005). В современную эпоху продолжается медленная (“секулярная”) перестройка структурных компонент галактик, как под действием внешних факторов, так и под воздействием внутренних коллективных процессов. Формируются и исчезают перемычки-бары, перестраивается распределение массы в центральной области, образуются кольца звездообразования и “псевдобалджи” (Kormendy & Kennicutt, 2004). Внимательный взгляд показывает, что галактики – значительно более сложные объекты, нежели представлялось ранее. Это открытые системы, активно взаимодействующие с окружением. И если на ранних этапах образования галактик ($z = 1 - 5$) основную роль играли “большие слияния” объектов с примерно эквивалентными массами, то в современную эпоху, соответствующую красным смещениям $z < 0.4$, доминирующую роль играют “малые слияния” – захват карликовых компаньонов (López-Sanjuan et al., 2011). Все больше косвенных указаний на то, что для объяснения многих аспектов эволюции галактик требуется учет аккреция газа из межгалактической среды (Kauffmann et al., 2010).

С другой стороны, процессы, происходящие в галактиках, тоже влияют на их окружение. Фотоионизационное излучение ОВ-звезд, кинетическая энергия звездных ветров и взрывов сверхновых нагревают газ, формируют как упорядоченные, так и хаотические истечения. Часть газа покидает галактику и либо рассеивается в межгалактическом пространстве, либо, охлаждаясь, возвращается обратно и вновь принимает участие в звездообразовании. К еще более масштабным эффектам приводит работа аккреционной машины активного ядра, особенно когда речь идет о центральных галактиках скоплений (Churazov et al., 2002). Учет такого взаимовлияния (feedback) оказывается критически необходимым в численных расчетах, посвященных как космологической эволюции в целом, так и объяснению параметров отдельных галактик (Hopkins et al., 2012).

Таким образом, наблюдательное изучение морфологии и кинематики галактик является важной и актуальной задачей. Эти исследования важны как потому, что позволяют обнаруживать какие-либо новые эффекты и структуры, так и потому, что для понимания процессов галактической эволюции требуется детальное сравнение наблюдений с результатами численных расчетов в рамках тех или иных моделей. С точки зрения подхода к наблюдениям в современной внегалактической астрономии выделяются два направления. Беспрецедентные объемы данных, представленных в архивах цифровых обзоров неба, позволяют сравнивать общие свойства галактик, сводя их к ограниченному количеству интегральных параметров: цвет, светимость, металличность, средняя дисперсия

скоростей, масса звезд и газа и т.п. Здесь скрадываются индивидуальные различия, но за счет статистики большого количества объектов удается обнаруживать интересные закономерности и сравнивать их с модельными предсказаниями. Другой подход подразумевает детальное изучение отдельных галактик, сбор максимально возможной информации о двумерном распределении параметров в картинной плоскости: поверхностной яркости в широких фильтрах и узких линиях, лучевой скорости (поле скоростей), дисперсии скоростей и т.д. Сложность этого подхода состоит в необходимости одновременного анализа разнообразного наблюдательного материала и разработке моделей, адекватно описывающих все наблюдаемые характеристики. Тем не менее, детальное изучение небольших выборок галактик позволяет обнаруживать новые, иногда неожиданные, эффекты, требующие объяснения в рамках расчетов эволюции галактик на космологических шкалах. Именно этот подход реализован в данной диссертации, большая часть которой основана на наблюдениях, выполненных на 6-м телескопе БТА САО РАН.

Цель работы

Основной целью данной диссертации является детальное изучение движений ионизованного газа и звезд в близких галактиках для решения вопроса о влиянии окружения (карликовых спутников, облаков межгалактического газа и т.д.) на возникновение и эволюцию различных структур как в самих галактических дисках, так и за их пределами. С другой стороны, предполагается рассмотреть различные наблюдательные свидетельства воздействия процессов текущего звездообразования на межзвездную среду галактик с целью понять причины возникновения в ней высокоскоростных турбулентных движений. Для решения этих задач необходимо получить и проанализировать обширный наблюдательный материал по спектроскопии газовой и звездной подсистем близких галактик.

Научная новизна работы

1. Разработанная диссертантом методика обработки и анализа данных наблюдений со сканирующим интерферометром Фабри-Перо позволила “поставить на конвейер” измерения дисперсии скоростей ионизованного газа в дисках галактик. В результате удалось изучить особенности распределения турбулентных скоростей в 22 близких карликовых галактиках, при том, что ранее такой наблюдательный материал был представлен менее чем для десятка объектов.
2. В трех галактиках раннего типа открыты глобальные газовые диски, вращающиеся в противоположном направлении относительно звезд. Показано, что ионизация газа в этих дисках часто обусловлена ударными волнами, возникающими в результате падения богатых газом спутников.
3. Обнаружено расширение колец звездообразования в галактике Agr 10. Это вторая столкновительно-кольцевая система (после галактики VV 784), в которой напрямую измерена скорость кольцевой волны плотности.
4. На примере Mrk 334 впервые продемонстрирован эффект возмущения газового диска в результате пролета сквозь него карликового спутника: понижение плотности газа, аномальная ионизация, возмущение поля скоростей.
5. Открыты внешние полярные кольца в семи галактиках, детально исследована кинематика ионизованного газа в полярных кольцах галактик Agr 212 и SPC-7. Составлен новый каталог кандидатов в галактики с полярными кольцами, в три раза увеличивший известное число таких объектов.
6. Впервые изучена кинематика газового и звездного компонентов в уникальной кольцевой галактике – Объекте Хога. Приведены аргументы в пользу того, что объект

образовался в результате холодной аккреции газа из филаментов межгалактической среды.

7. Обнаружены околоядерные полярные диски в галактиках различных морфологических типов: Mrk 33, Mrk 370, NGC 3368, NGC 3599, NGC 3626, NGC 5850, NGC 7742. Составлен наиболее полный на сегодняшний день список таких объектов, аргументировано существование прямой связи между наличием внутреннего полярного компонента и событием недавнего взаимодействия с компаньоном или поглощением карликовых спутников.
8. Продемонстрировано, что диагностические диаграммы $I - \sigma$, построенные в эмиссионных линиях ионизованного газа, могут с успехом использоваться для поиска разного рода компактных туманностей в близких галактиках. Предложена интерпретация наблюдаемого в карликовых галактиках распределения точек на этих диаграммах, существенно дополняющая предыдущие работы по этой теме.

Научная и практическая ценность работы

Представленная в диссертации методика обработки и анализа данных, получаемых со сканирующим интерферометром Фабри-Перо, с успехом применяется как в САО РАН, так и в других астрономических учреждениях (ГАИШ МГУ, СПбГУ, Ruhr-University Bochum).

Результаты детального изучения кинематики галактик с противовращающимися дисками, столкновительных кольцевых систем, галактик с полярными кольцами, могут использоваться (и уже используются) для численного моделирования таких объектов. Это позволяет не только лучше понять процесс взаимодействия галактик, но и наложить пределы на массу и даже форму темного гало, что важно для понимания роли темной материи в эволюции галактик.

Дальнейшее изучение объектов из нового каталога галактик с полярными кольцами (SPRC) позволит лучше понять происхождение таких структур, оценить их стабильность, а также проверить гипотезу о том, что часть массивных полярных колец образовалось в результате холодной аккреции из филаментов межгалактической среды. Наблюдения галактик из SPRC уже проводятся как на 6-м телескопе САО РАН, так и в других обсерваториях (IRAM).

Наблюдаемые параметры структуры, кинематики и звездного населения Объекта Хога накладывают жесткие условия на возможность формирования таких галактик либо в результате холодной аккреции газа, либо в процессе слияния галактик.

Приведенные в диссертации характеристики внутренних полярных структур могут использоваться для сравнения численных моделей взаимодействия галактик с наблюдениями.

Полученные в диссертации параметры хаотических движений ионизованного газа в карликовых галактиках, являются важным исходным материалом для сравнения с расчетами воздействия молодых звездных группировок на газовую среду галактик. То же относится к наблюдаемым характеристикам выбросов газа над плоскостью диска, обнаруженных диссертантом в ряде спиральных галактик.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Методика наблюдения и анализа данных, позволяющая с помощью сканирующего интерферометра Фабри-Перо картировать распределение дисперсии скоростей ионизованного газа в галактиках и эмиссионных туманностях.
2. Обнаружение противовращающихся компонент в ряде галактик ранних типов: околоядерных газовых и звездных дисков в NGC 1316 и NGC 3945, крупномасштабных

газовых дисков в NGC 2551, NGC 5631 и NGC 7742. Вывод об ударной ионизации газа в случаях, когда плоскость вращения газового компонента наклонена под небольшим углом к звездному диску. Вывод об образовании противовращающихся компонент этих галактик в результате захвата богатых газом спутников. Обнаружение наблюдательных свидетельств в пользу идеи генерации резонансных колец звездообразования в ходе такого взаимодействия.

3. Результаты наблюдательного изучения галактик, испытавших лобовое столкновение с массивным компаньоном. Обнаружение расширения и вертикальных движений в кольцах пекулярной галактики Agr 10, доказательства того, что кольцевые волны в диске являются результатом центрального столкновения со спутником, определение параметров столкновения. Наблюдательные аргументы, показывающие, что область аномальной ионизации в галактике Mrk 334 является местом недавнего столкновения с ядром разрушенной галактики-спутника.
4. Результаты детального изучения кинематики газа в галактиках с внешними полярными или сильно наклоненными подсистемами: в Agr 212 обнаружен внешний газовый диск со сложной геометрией, а в SPRC-7 гигантский звездно-газовый полярный диск. Новый каталог галактики с полярными кольцами, позволивший в несколько раз увеличить число надежных кандидатов в такие объекты. На основании наблюдений на 6-м телескопе САО РАН подтверждено существование внешних полярных колец в пяти галактиках каталога.
5. Результаты изучения морфологии и кинематики уникальной кольцевой галактики - Объекта Хога. Объяснение пекулярной структуры этой галактики холодной аккрецией газа из межгалактической среды на прародительницу – эллиптическую галактику.
6. Обнаружение околядерных газовых и звездно-газовых полярных и наклонных дисков в ряде галактик как ранних, так и поздних морфологических типов. Результаты статистического изучения наблюдаемых характеристик внутренних полярных структур. Наблюдательные аргументы в пользу их внешнего происхождения в результате поглощения галактик-спутников.
7. Результаты анализа внутренней кинематики ионизованного газа в ряде карликовых галактик Местного Объем. Определение характеристик различных структур, образованных в результате воздействия молодых звездных группировок на межзвездную среду: гигантских расширяющихся оболочек в карликовых галактиках, биполярной туманности в IC 1613, возможного остатка Гиперновой в IC 10, галактического ветра в NGC 4460. Обнаружение высокоскоростных движений ионизованного газа вокруг областей звездообразования ряда близких спиральных галактик. Объяснение наблюдаемого распределения дисперсии скоростей ионизованного газа в карликовых галактиках наличием у областей III корон возмущенного газа низкой плотности с высокими турбулентными скоростями.

Достоверность представленных результатов

Достоверность результатов обусловлена применением хорошо отработанных и зарекомендовавших себя методик обработки и анализа наблюдательных данных; полученные результаты физически непротиворечивы и удовлетворительно согласуются с теоретическими модельными расчетами. Важным свидетельством достоверности полученных в диссертации результатов является их апробация на национальных и международных симпозиумах и конференциях, а также обсуждение этих результатов со специалистами в данной области и публикация основных положений в ведущих астрофизических журналах.

Апробация результатов

Основные результаты диссертации лично докладывались диссертантом на семинарах и конкурсах научных работ САО РАН, семинарах ГАИШ МГУ, ИКИ РАН, ИНАСАН, университета г. Падуи (Италия), Канарского института астрофизики (Испания), Южной европейской обсерватории (Чили), Рурского университета г. Бохума (Германия), а также на следующих 11 всероссийских и 20 международных конференциях (в том числе, в форме приглашенных докладов и лекций):

“Galactic dynamics”, JENAM–2003, (Будапешт, 2003); Всероссийская астрономическая конференция ВАК–2004, (Москва, 2004); “The life of galaxies”, JENAM–2004, (Гранада, 2004); “5th Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics”, (Вршац, 2005); “Science Perspectives for 3D Spectroscopy”, (Гаршинг, 2005); XVII Canary islands winter school of astrophysics “3D spectroscopy”, (Пуэрто-Круз, 2005); Всероссийская конференция “Астрономия 2006: традиции, настоящее и будущее”, (С.-Петербург, 2006); Симпозиум IAU 235 “Galaxy Evolution Across the Hubble Time”, (Прага, 2006); “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, (Пушино, 2007); “Cosmic Physics”, (Н. Архыз, 2007); “6th Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics”, (Сремски Карловцы, 2007); “Dynamics of Galaxies”, (Пулково, 2007); “Formation and Evolution of Galaxy Disks”, (Рим, 2007); “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, (Пушино, 2008); “Gas and Stars in Galaxies - A Multi-Wavelength 3D Perspective”, (Гаршинг, 2008); “Tumbling, Twisting, and Winding Galaxies: Pattern Speeds along the Hubble Sequence”, (Падуя, 2008); “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, (Пушино, 2009); “7th Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics”, (Зренианин, 2009); “Nearby Dwarf Galaxies”, (Н. Архыз, 2009); “Hunting for the Dark: The Hidden Side of Galaxy Formation”, (Мальта, 2009); “Физика Космоса”, (Екатеринбург, 2009); “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра – 2009” (Москва, 2009); Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2010, (Н. Архыз, 2010); “Dynamics and evolution of disc galaxies”, (Пушино, 2010); “A Universe of Dwarf galaxies: observations, theories, simulations”, (Лион, 2010); “8th Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics”, (Дивчибаре, 2011); “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра – 2010” (Москва, 2010); “Minor merging as a driver of galaxy evolution”, EWASS – 2011, (С. -Петербург, 2011); “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра – 2011” (Москва, 2011); “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, (Пушино, 2012); “European Week of Astronomy and Space Science – 2012”, (Рим, 2012)

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения; содержит 78 рисунков, 8 таблиц. Список цитируемой литературы включает 370 наименований. Общий объем диссертации – 347 страниц. В конце каждой главы приводятся список полученных результатов и указание на основные статьи, в которых они были представлены.

Краткое содержание диссертации

Во **Введении** обсуждается актуальность работы, цели и задачи исследования, научная новизна, научная и практическая ценность полученных результатов, формулируются основные положения, выносимые на защиту, приводится список работ, в которых опубликованы результаты диссертации, с указанием личного вклада диссертанта в совместных публикациях.

Первая глава посвящена методике наблюдений и анализу данных о внутренней кинематике галактик. В §1.1 обсуждаются методы панорамной (3D) спектроскопии, позволяющие получать спектральную информацию ото всех участков протяженного объекта, заполняющих поле зрения прибора. Далее описывается аппаратура, используемая для наблюдений методами панорамной спектроскопии на 6-м телескопе САО РАН. Имен-

но, в §1.2 кратко представлен редуктор светосилы SCORPIO, созданный при участии диссертанта. Основная часть наблюдательного материала, на котором основана диссертация, была получена с помощью сканирующего интерферометра Фабри-Перо (ИФП) в составе прибора SCORPIO. В §1.3 представлена разработанная диссертантом методика обработки данных, получаемых со сканирующим ИФП. Особое внимание уделяется проблеме измерения дисперсии скоростей ионизованного газа. В §1.4 обсуждается кросс-корреляционная техника измерения параметров звездной кинематики (лучевой скорости и дисперсии скоростей) на основе материала, получаемого со спектрографами MPFS и SCORPIO (в режиме длинной щели). В §1.5 рассматриваются различные модельные представления полей скоростей ионизованного газа дисковых галактик: модель квазикругового вращения, двумерная модель изогнутого диска. Рассмотрен метод корректного учета вклада от расширяющихся ионизованных оболочек в наблюдаемую кинематику газа в карликовых галактиках.

Во **второй главе** рассматривается феномен противовращения в дисках галактик. В §2.1 кратко обсуждается проблема малых слияний, когда захват карликового спутника, не искажая в целом структуры дисковой галактики, может инициировать активность ядра, вспышку звездообразования или сформировать кинематически выделенный компонент в диске. Если направление орбитального момента спутника заметно отличалось от момента вращения галактического диска, то в дальнейшем может оказаться, что часть звезд или газовых облаков в галактике вращаются в направлении противоположном остальному диску. Примеры подобных кинематически выделенных структур, обнаруженных диссертантом, приводятся в §2.2. По результатам наблюдений со спектрографом MPFS показано, что диск ионизованного газа в околоядерной области ($r < 500$ пк) линзовидной галактики NGC 3945 вращается в противоположном направлении относительно звездного, хотя и располагается в той же плоскости. А в эллиптической галактике NGC 1316, остатки разрушенного спутника сформировали компактный ($r < 200$ пк) звездный диск, вращающийся в противоположную сторону относительно внешнего звездного сфероида.

В отличие от кинематически выделенных структур в центральном килопарсеке, крупномасштабное противовращение встречается значительно реже. Всего известно чуть больше десятка близких галактик с протяженными (более нескольких кпк) противовращающимися подсистемами (Sil'chenko et al., 2009). Этот список включает и три объекта, в которых крупномасштабная кинематика была впервые изучена в наблюдениях на 6-м телескопе САО РАН: NGC 2551, NGC 5631 и NGC 7743. Они рассматриваются в §2.3. Показано, что весь газ в их дисках вращается в противоположном направлении относительно звездного компонента, диаметры дисков ионизованного газа составляют $0.7 - 1 D_{25}$, т.е. сравнимы с характерными размерами звездных дисков. В этих галактиках мы видим последовательные стадии одного и того же процесса – поглощения маломассивного богатого газом спутника имеющего соответствующее направление момента вращения. В NGC 5631 прецессия разрушенного спутника не завершилась, газ еще не опустился в плоскость галактики и не сжался до требуемой плотности. Заметного звездообразования в нем нет, ионизация газа, во всем диапазоне радиусов, обеспечивается ударными волнами. Во внутренних областях NGC 2551 в захваченном газе уже началось звездообразование, в то время как на периферии ионизация газа скорее всего обусловлена ударными волнами. А в NGC 7742 уже весь газ диска ионизован ультрафиолетовым излучением молодых звезд. В диске идет активное звездообразование, большая часть которого сосредоточена в кольце диаметром около 2 кпк, представляющим собой редкий пример “резонансного кольца без бара”. Предложен сценарий, согласно которому кольцевая структура является результатом недавнего взаимодействия – при определенных условиях возмущение гравитационного потенциала в результате пролета компаньона будет сходно с воздействием бара на диск галактики. Впоследствии эта идея нашла подтверждение в численных расчетах взаимодействия галактик.

В §2.4 рассмотрена внутренняя кинематика NGC 7743. Наблюдения на 6-м телескопе показали, что здесь весь ионизованный газ располагается в диске радиусом около 5 кпк,

значительно наклоненном к звездному диску галактики. В зависимости от принятой взаимной ориентации дисков угол наклона составляет $34 \pm 9^\circ$ или $77 \pm 9^\circ$. По происхождению и механизму ионизации этот газовый диск родствен рассмотренным выше противоразворачивающимся структурам и представляет собой наиболее ранний этап их формирования. Наиболее вероятной причиной образования такого диска является аккреция из богатого газом окружения галактики, что подтверждается данными наблюдений в линии 21 см. Наблюдаемое отношение потоков эмиссионных линий заставляет предположить, что основной вклад в ионизацию вносят ударные волны, возникающие при пересечении потенциальной ямы звездного диска газовыми облаками на наклонных орбитах. Отмечается, что наклонный газовый диск в NGC 7743 является одной из самых малоконтрастных структур такого рода, обнаруженных в других галактиках.

Третья глава посвящена галактикам, пережившим лобовое столкновения с компаньонами. В §3.1 кратко рассмотрены современные представления о формировании столкновительных кольцевых галактик. Такие объекты, образовавшиеся в результате осевого прохождения достаточно массивного спутника, представляют собой уникальную лабораторию для изучения распространения сверхзвуковой волны плотности по невозмущенному диску, а также для проверки различных теорий распространения звездообразования. Согласно наиболее популярной точке зрения, подтверждаемой рядом численных расчетов (Appleton & Struck-Marcell, 1996), волна, движущаяся из центра диска к периферии, динамически разогревает диск, а также, подобно спиральям галактик, сжимает газ, что приводит к массовому образованию звезд. Серьезную помощь в построении самосогласованных моделей столкновительных кольцевых галактик может оказать изучение кинематики газовых дисков, включая прямые измерения скорости распространения кольцевых волн. Но до недавнего времени такие измерения были крайне немногочисленны, противоречивы и касались в основном только галактики “Тележное колесо” (VV 784).

В §3.2 рассмотрен случай пекулярной галактики Arp 10, кроме всего прочего, интересной еще и тем, что это один из немногих известных объектов, когда повезло застать сразу два кольца, бегущих по диску. По результатам наблюдений Arp 10 удалось в деталях изучить движения газа в диске, возмущенном кольцевыми волнами. На основании полученных данных построена численная гидродинамическая модель распространения кольцевых волн, удовлетворительно описывающая наблюдаемые характеристики галактики. Предполагается, что до столкновения Arp 10 представляла из себя галактику типа Sb, с протяженным звездным диском относительно низкой поверхностной яркости и развитой спиральной структурой. 85 млн. лет назад произошло лобовое столкновение с менее массивной спиральной галактикой раннего типа, которая пролетела сквозь диск Arp 10 примерно в 3 кпк от центра, почти параллельно направлению оси вращения. Удалось обнаружить и сам “компаньон-возмутитель”, в картинной плоскости он проецируется близко к ядру основной галактики и по большей части закрыт от нас ее диском. Возникшие возмущения гравитационного потенциала порождают две расширяющиеся наружу волны плотности, которые сейчас видны на изображениях галактики.

В §3.3 рассматриваются результаты изучения на 6-м телескопе прототипа галактик низкой поверхностной яркости Malin 1. Измерения лучевых скоростей звездного компонента показали, что небольшая галактика Malin 1B, заметная на снимках HST, является спутником Malin 1. Текущее взаимодействие с Malin 1B может объяснить основные морфологические особенности центральной области Malin 1 - двухрукавную спиральную структуру, бар и внешнюю однурукавную спираль. Рассматриваются аргументы в пользу того, что ее уникальный по протяженности звездно-газовый диск (размером до 120 кпк) является закономерным итогом эволюции кольцевой волны в соответствии со сценарием Marcelli et al. (2008). Рассмотрение крупномасштабного окружения Malin 1 приводит к выводу, что галактика SDSS J123708.91 + 142253.2 является наиболее вероятным компаньоном, ответственным за формирование протяженной оболочки низкой поверхностной яркости, возникшей вследствие лобового столкновения с Malin 1.

В §3.4 описывается еще одно любопытное последствие столкновения галактик, когда впервые удалось обнаружить точное место пролета компаньона через диск галактики.

ки. Здесь представлено исследование структуры и кинематики сейфертовской галактики Mrk 334. На глубоких изображениях найдены протяженные приливные структуры в виде петель и арок – результат недавнего взаимодействия с достаточно большим спутником ($1/3–1/5$ от массы основной галактики). В диске обнаружена каверна, заполненная ионизованным газом низкой плотности. Весь набор имеющихся данных (измерения лучевых скоростей звезд и ионизованного газа, диагностические диаграммы отношений потоков в линиях разного возбуждения, морфология приливных деталей и т.д.) удается интерпретировать в рамках предположения, что мы наблюдаем место недавнего (около 12 млн. лет назад) пролета остатков разрушенного спутника через газовый диск основной галактики. Необычно высокое отношение линий $[OIII]/H\beta$ наблюдаемое в этой области, объясняется мощной ударной волной со скоростью более 250 км/с. Согласие всех трех оценок скорости столкновения (по кривой вращения, по возмущению поля скоростей и по ионизационным моделям) свидетельствует в пользу предложенной интерпретации образования ионизованной каверны.

Четвертая глава посвящена исследованию галактик с полярными кольцами (ГПК), представляющих собой пекулярные системы, в которых наблюдаются внешние кольца или диски из газа, пыли и звезд, вращающиеся в плоскости примерно перпендикулярной к диску основной галактики. Считается, что образование ГПК вызвано слиянием галактик с соответствующим направлением момента вращения, аккрецией на галактику вещества спутника или газовых филаментов из межгалактической среды. В §4.1 кратко обсуждаются основные проблемы исследования таких объектов, перспективы их дальнейшего изучения. Выделены два возможных пути решения вопросов, связанных с формированием и эволюцией полярных колец. Во-первых, это детальное изучение уже известных кандидатов с привлечением данных о морфологии и кинематике. Во-вторых, расширение списка кандидатов, как с целью уточнения функции светимости ГПК и продвижения в сторону больших красных смещений, так и с целью поиска объектов, в которых и кольцо, и галактика “удобно” развернуты к лучу зрения, что позволило бы одновременно исследовать и кинематику, и детали внутренней структуры. Оба этих направления представлены в диссертации. В §4.2 рассмотрена кинематика газа в Aгp 212. Здесь обнаружены две кинематически различные подсистемы вращающегося газа – внутренний диск и внешние эмиссионные филаменты. Вращение первой подсистемы происходит в плоскости звездного диска, в то время как внешние области звездообразования находятся в плоскости, наклоненной к нему под значительным углом. Свидетельством взаимодействия между газом полярного кольца и газом внутреннего диска является наличие ударных фронтов в центральных областях галактики. Aгp 212 оказывается первой из ГПК, в которой удастся непосредственно наблюдать взаимодействие между обеими газовыми подсистемами. Наиболее вероятной причиной образования полярного кольца является аккреция газа с карликового спутника UGC 12549.

В §4.3 представлено исследование галактики с полярным кольцом SDSS J075234.33 +292049.8 (SPRC-7), случайно обнаруженной на снимках SDSS. Анализ поля скоростей ионизованного газа показал, что это гигантское (48 кпк диаметром) кольцо вращается под заметным углом к плоскости центральной галактики. В зависимости от принятой геометрии угол между ними составляет $58 \pm 10^\circ$ или $73 \pm 11^\circ$. Наблюдаемые характеристики полярного диска представляют собой серьезную проблему для существующих теорий формирования ГПК, так как галактике требуется захватить извне массу газа и звезд, равную собственной звездной массе, что проблематично. Альтернативное предположение о слиянии двух близких по массам галактик с ортогонально ориентированными дисками находится в противоречии с параметрами центральной галактики, прежде всего с ее относительно быстрым вращением. Возможно, что кольцо образовалась в результате аккреции холодного газа из протяженных филаментов межгалактической среды.

Схожий сценарий предлагается и для объяснения образования Объекта Хога – уникальной кольцевой галактики, которой посвящен §4.4. Благодаря наблюдениям, выполненным на 6-м телескопе САО РАН, впервые удалось изучить внутреннюю кинематику газа и звезд, а также возраст и металличность звездного населения как в центральной

эллиптической галактике, так и в гигантском (диаметром 50 кпк) кольце, состоящем из ионизованного газа и областей звездообразования. В отличие от ГПК, вращение обоих компонент здесь происходит в одной плоскости. Но формирование столь массивного и протяженного кольца удается объяснить только в рамках гипотезы, предлагавшейся для некоторых полярных колец. Именно, предполагается, что ядро объекта Хога сформировалось в результате монолитного коллапса массивного газового облака, что обеспечивает как резкий градиент металличности, так и относительно быстрое вращение звездного сфероида. Дальнейшее существование изолированной эллиптической галактики в достаточно богатом газом окружении подразумевает медленную (так называемую “холодную”) аккрецию облаков газа из межгалактической среды. Ряд современных космологических моделей указывают на то, что газ должен накапливаться в протяженных филаментах, которые с свою очередь аккрецируются массивными гало галактик (Brook et al., 2008). Аккреция из космологического филамента позволяет сформировать вокруг эллиптического ядра достаточно массивный диск HI, обладающий заметным моментом вращения. По достижению необходимой плотности газа несколько млрд. лет назад в диске началось звездообразование, продолжающееся и в современную эпоху.

Прогресс в изучении ГПК скованоется малым числом известных объектов этого типа. К 2010 г. к ним можно было отнести лишь около двух десятков кинематически подтвержденных галактик, из которых лишь несколько не входили изначально в каталог кандидатов Whitmore et al. (1990), основанный на изучении фотографий отдельных галактик. В современную эпоху для поиска объектов разумно использовать цифровые обзоры неба. В §4.5 описывается новый каталог кандидатов в ГПК, основанный на результатах проекта Galaxy Zoo, в рамках которого сотни тысяч волонтеров выполняют классификацию галактик в обзоре SDSS. Опираясь на предварительную классификацию Galaxy Zoo для ~ 900 тысяч галактик, была построена выборка из 41958 галактик с пекулярной морфологией. Объекты, найденные в ходе просмотра отобранных изображений, вместе с кандидатами из интернет-форума проекта составили новый каталог SPRC (Sloan-based Polar Rings Catalog). Он содержит 275 галактик, из которых 70 отнесены к “наилучшим кандидатам”, 115 кандидатов классифицированы как “хорошие”, 53 галактики отнесены к связанным с ГПК объектам (с сильно изогнутыми дисками и взаимодействующие). Также выделено 37 галактик, у которых предполагаемое полярное кольцо сильно развернуто к лучу зрения, включая несколько галактик, похожих на Объект Хога. В результате пробных спектральных наблюдений на 6-м телескопе САО РАН подтверждено существование полярных колец в пяти галактиках каталога. Вместе с имеющимися в литературе данными к кинематически-подтвержденным ГПК можно отнести уже 10 галактик из SPRC. Новый каталог в три раза увеличивает число уверенных кандидатов в ГПК и может служить хорошей основой для дальнейшего детального изучения как отдельных галактик, так и для статистического исследования полярных колец, частоты взаимодействий между галактиками и т.д.

В **пятой главе** рассматривается феномен внутренних (околоядерных) полярных колец и дисков, размер которых меньше характерных размеров балджа или внешнего диска. В §5.1 кратко описывается история открытия и исследования внутренних полярных структур (ВПС). Несмотря на то, что число таких объектов даже превышает число кинематически подтвержденных внешних полярных колец, природа их во многом остается неясной. Отсутствует внятный самосогласованный сценарий их формирования, вопросы устойчивости подобных структур не решены. Противоречивы взгляды на связь ВПС с барами галактик и их внешним окружением: наличием спутников и следов взаимодействия.

В §5.2 представлены результаты исследования ВПС, обнаруженных в ходе наблюдений на 6-м телескопе САО РАН различных выборок галактик с помощью панорамного спектрографа MPFS. Описываются особенности внутренней кинематики, даются оценки основных параметров внутренних структур, которые в каждой галактике имеют свои особенности. Так в NGC 5850 и NGC 3368 внутренние газовые диски ориентированы почти ортогонально к звездным дискам галактик, при этом в NGC 3368 газопылевой диск

располагается перпендикулярно к большой оси бара. В линзовидных галактиках NGC 3599 и NGC 3626 – членах группы Leo II – ситуация иная. В первом случае речь идет не о диске, а о кольце: внутри центральных ~ 100 пк газ вращается в той же плоскости, что и звезды, а с ростом расстояния от центра наклон орбит газовых облаков увеличивается, составляя около 50° на $r = 700$ пк. В NGC 3626, наоборот – газовый диск сильно наклонен внутри ~ 500 пк от центра, в то время как на больших радиусах газ и звезды вращаются в одной плоскости, но в противоположных направлениях.

В §5.3 рассмотрены примеры ВПС, обнаруженных в голубых компактных карликовых галактиках в ходе изучения кинематики ионизованного газа с помощью сканирующего ИФП: NGC 7468, Mrk 33, Mrk 370. Во всех случаях внутренняя часть газового диска оказывается сильно наклоненной к основной плоскости.

В §5.4 представлены основные параметры ВПС, описанных в литературе, включая и объекты, изученные диссертантом. Список содержит 47 галактик, для которых имеются веские аргументы в пользу того, что в их внутренних областях заметная часть излучающей материи стационарно вращается в плоскости, сильно наклоненной к плоскости основного диска. В §5.5 обсуждаются статистические свойства характеристик как самих внутренних структур, так и содержащих их галактик. Показано, что ВПС встречаются в галактиках всех морфологических типов – от E до Irr. Радиус большинства из них не превышает 1.5 кпк. Возможно, что это ограничение связано с тем, что для устойчивого существования полярных орбит необходим стабилизирующий фактор – сфероидальный или трехосный потенциал. Для классических ГПК это гравитационный потенциал темного гало, а для внутренних структур – потенциал балджа или бара. ВПС одинаково часто встречаются как в галактиках с перемычками, так и без них. В тоже время, если галактика обладает баром (или трехосным балджем), то это приводит к стабилизации полярного диска так, что его ось вращения совпадает с большой осью бара. Самые внутренние области этих структур, как правило, расположены в полярной плоскости, с ростом расстояния от ядра часто наблюдается изгиб – приближение орбит к плоскости галактики. У 70% галактик с внутренними полярными структурами заметны те или иные следы недавнего взаимодействия, что указывает на ведущую роль внешнего окружения (взаимодействия галактик, захвата материи с соответствующим направлением орбитального момента) в формировании этих пекулярных структур.

В **шестой главе** рассматриваются крупномасштабные (пространственные шкалы от 100 пк до нескольких кпк) движения газа, так или иначе вызванные происходящим в их дисках звездообразованием. §6.1 представлен обзор некоторых вопросов, связанных с изучением воздействия молодых звездных группировок на межзвездную среду галактик.

В §6.2 описывается цикл работ, посвященных карликовой галактике Местной Группы IC 1613. В начале приводятся результаты изучения с помощью сканирующего ИФП кинематики гигантской биполярной туманности S3 вокруг единственной в галактике звезды Вольфа-Райе. В результате впервые удалось измерить скорость расширения обоих “пузырей”, составляющих туманность (диаметром около 110 и 220 пк) и оценить возраст ионизованной структуры (0.3–1 млн. лет). Необычная морфология туманности объясняется тем, что звезда образовалась в плотной газовой стенке на краю гигантской каверны в распределении HII, так что звездный ветер прорывался в двух направлениях из плотного слоя газа. Последующий анализ данных наблюдений галактики в линии 21 см на телескопе VLA подтвердил это предположение. Одновременно используя результаты наблюдений со сканирующим ИФП и данные VLA, впервые удалось детально исследовать кинематику и распределение газа в гигантском комплексе ионизованных и нейтральных оболочек в единственном очаге современного звездообразования в галактике. Уточнены скорости расширения и кинематический возраст основных эмиссионных оболочек, составивший 0.6–2.2 млн. лет. А также обнаружены оболочки нейтрального газа диаметром 300–350 пк с кинематическим возрастом 5.3–5.6 млн. лет. Столкновение расширяющихся оболочек приводит к сжатию газа в плотное газовое кольцо, в котором рождаются молодые звезды. Этот эффект демонстрируется на примере оболочек R2 и R4. Кроме этих оболочек в распределении HII в IC 1613 найдены кольцевые и дугообразные структуры

значительно большего размера, особенно впечатляет гигантская каверна размером 1–1.5 кпк. Расчеты, основанные на полученном наблюдательном материале показали, что требуемый для образования сверхоболочки II источник энергии соответствует темпу звездообразования почти в 20 раз превосходящему наблюдаемый внутри этой суперкаверны. Скорее всего, проблема решается при учете последовательного воздействия на межзвездную среду нескольких поколений звезд.

В §6.3 рассмотрена другая карликовая иррегулярная галактика Местной Группы – IC 10, отличающаяся относительно бурным современным звездообразованием. В радионаблюдениях Yang & Skillman (1993) здесь была обнаружена так называемая “синхротронная сверхоболочка” размером около 200 пк, которую традиционно считают результатом практически одновременной вспышки десятка сверхновых. Измерения, выполненные на 6-м телескопе САО РАН, позволили измерить скорость расширения, электронную плотность и общую кинетическую энергию оболочки. Анализ имеющихся радиоданных, представленный в работе Lozinskaya & Moiseev (2007), показал, что вспышка Гиперновой (экстремально массивной звезды, выход энергии при вспышке которой превышает 10^{51} эрг) лучше, чем множественные сверхновые, объясняет природу синхротронной сверхоболочки, поскольку последующие вспышки сверхновых мало добавляют к радиояркости оболочки, сформированной первыми вспышками. Центр сверхоболочки ассоциируется с ярчайшим в галактике рентгеновским источником IC 10 X-I – аккрецирующей двойной системой, состоящей из звезды Вольфа-Райе и темного компонента, масса которого согласно новым оценкам составляет 23 – 34 M_{\odot} . Столь внушительная величина, является дополнительным аргументом в пользу недавнего (менее 10^5 лет назад) взрыва Гиперновой.

§6.4 посвящен исследованию изолированной линзовидной галактики NGC 4460, в центральной части которой в ходе H α -обзора близких галактик (Kaisin & Karachentsev, 2008) была обнаружена яркая протяженная туманность. Галактика исследовалась на 6-м телескопе САО РАН методами панорамной и длиннощелевой спектроскопии. Анализ архивных изображений SDSS, GALEX и HST указывает на то, что все современное звездообразование сосредоточено в компактной области диска галактики радиусом около 1 кпк. Показано, что наблюдаемые параметры ионизованного газа (кинематика, состояние ионизации, плотность) объясняются выбросом газа над плоскостью галактики, вызванным центральной вспышкой звездообразования. Полученные параметры галактического ветра (скорость истечения $V_{out} \approx 130$ км/с, кинематический возраст эмиссионной структуры 10 – 12 млн. лет, кинетическая энергия 3×10^{52} эрг) сравнимы с известными характеристиками ветра в NGC 253. Обсуждается причина звездообразования как в NGC 4460, так и в других изолированных E-S0 галактиках Местного Объемы. Приводятся соображения в пользу того, что процесс подпитки изолированных галактик межгалактическим газом на космологической шкале носит монотонный, невоспыхечный характер.

§6.5 описываются крупномасштабные движения ионизованного газа в спиральных галактиках, явно указывающие на существование газовых облаков, выброшенных из плоскости диска, либо падающих на него. Так, в северо-восточной стороне диска галактики NGC 1084 обнаружены как минимум две системы ионизованного газа. Первая связана с нормальным вращением в диске. Вторая – с движениями газа вокруг системы областей звездообразования со скоростями до 150 км/с по лучу зрения. Размер пекулярной области составляет около 3 кпк. Эти движения часто сопровождаются интенсивным высвечиванием в запрещенной линии [NII] на фронтах ударных волн. Наиболее вероятная интерпретация состоит в том, что мы наблюдаем газ, выброшенный из областей звездообразования – “галактические фонтаны”. Обсуждается возможная связь этого явления с высокоскоростными облаками нейтрального водорода, наблюдаемыми как в Млечном Пути, так и в ряде близких галактик. Морфологически и кинематически схожие области обнаружены еще в четырех галактиках (IC 1525, NGC 2964, NGC 3893, NGC 6643), что составляет треть выборки спиральных галактик, кинематика ионизованного газа в которых детально изучалась на 6-м телескопе САО РАН со сканирующим ИФП.

Седьмая глава посвящена вопросу о природе высокоскоростных турбулентных дви-

жений ионизованного газа в гигантских областях звездообразования и карликовых галактиках. §7.1 обсуждается важность изучения хаотических движений газа в карликовых галактиках. Из-за малой глубины потенциальной ямы и отсутствия спиральных волн плотности, такие галактики являются замечательным “полигоном” для рассмотрения процессов взаимодействия молодых звездных группировок с межзвездной средой. Кроме того, важно уметь правильно учитывать воздействие этих эффектов на газовую среду, чтобы из наблюдаемого распределения лучевых скоростей получить кривую кругового вращения. Рост точности измерений позволяет строить и анализировать не только поля лучевых скоростей, но и двумерные карты дисперсии скоростей ионизованного газа (σ). В то же время, природа наблюдаемых в карликовых галактиках сверхзвуковых ($\sigma > 10 - 20$ км/с) турбулентных движений ионизованного газа является предметом давней дискуссии, окончательная точка в которой еще не поставлена.

Поэтому необходимо уметь корректно интерпретировать структуры, наблюдаемые на картах дисперсии скоростей ионизованного газа. Именно этому посвящен §7.2, в котором представлены результаты изучения нескольких близких карликовых галактик (DDO 53, DDO 99, DDO 125, DDO 190, UGC 8508, UGCA 92 и VII Zw 403) с помощью сканирующего ИФП на 6-м телескопе САО РАН. Рассмотрены как двумерные карты дисперсии лучевых скоростей, так и диаграммы “поверхностная яркость – дисперсия скоростей” ($I - \sigma$). В пяти галактиках обнаружены расширяющиеся оболочки ионизованного газа диаметром до 350 пк с кинематическим возрастом 1–4 млн. лет. Кроме индивидуальных особенностей каждого объекта удалось выявить ряд общих закономерностей, указывающих на связь величины хаотических движений газа с процессами текущего звездообразования. Яркие области III показывают малую ширину линий, с уменьшением поверхностной яркости разброс наблюдаемых величин растет, так что в большинстве областей низкой яркости дисперсия значительно превосходит среднее значение. Отмечается, что диаграммы $I - \sigma$ могут с успехом использоваться для поиска в галактиках отдельных уникальных объектов – остатков вспышек сверхновых, расширяющихся туманностей вокруг массивных звезд и т.п. Так, в UGC 8508 обнаружена компактная туманность, которая, судя по последующим спектральным наблюдениям со SCORPIO, связана с новым кандидатом в яркие голубые переменные – звездой LBV.

Поскольку типичное пространственное разрешение наблюдений с ИФП составляло 30 – 50 пк, возникает опасность, что потеря информации о мелкомасштабной кинематике газа может серьезно отразиться на виде диаграмм $I - \sigma$ и распределении дисперсии скоростей. С целью проверки этого эффекта в §7.3 анализируются результаты наблюдений более близких галактик IC 10 и IC 1613, сглаженные до разрешения ~ 40 пк. Показано, что несмотря на потерю точек, сглаживание мало влияет на общий вид диаграмм $I - \sigma$.

Далее, в §7.4 обсуждаются причины наблюдаемого роста дисперсии скоростей ионизованного газа с удалением от центра областей звездообразования. Показано, что модель, ранее предложенная Muñoz-Tuñón et al. (1996) для объяснения вида диаграммы $I - \sigma$ отдельных комплексов звездообразования, требует существенного дополнения в случае карликовых галактик. Наиболее важным здесь является то, что основная часть областей с высокой дисперсией скоростей связана не с конкретными расширяющимися оболочками, а принадлежит диффузному фону низкой яркости, окружающему комплексы звездообразования. Это поведение наблюдаемых распределений σ объясняется наличием у гигантских областей III корон возмущенного газа низкой плотности с высокими турбулентными скоростями. Такое объяснение согласуется с современными представлениями о турбулентности в межзвездной среде.

В **Заключении** перечислены основные результаты диссертации и обсуждаются перспективы дальнейшего исследования затронутых в ней вопросов.

Основные публикации по теме диссертации

Статьи в рецензируемых журналах:

1. Moiseev A.V., “Strong non-circular motions of gas in the spiral galaxy NGC 1084”, 2000, *Astronomy and Astrophysics*, v. 363, p. 843 – 850
2. Афанасьев В.Л., Лозинская Т.А., Моисеев А.В., Блантон Е., “Гигантская биполярная оболочка вокруг WO-звезды в галактике IC1613: структура и кинематика”, 2000, *Письма в Астрономический журнал*, т. 26, с. 190 – 199
3. Moiseev A.V., “Measurement of radial velocities and velocity dispersion of stars in circumnuclear regions of galaxies using the 2D spectroscopy technique”, 2001, *Bulletin of the Special Astrophys. Observatory*, v. 51, p. 11 – 20
4. Лозинская Т.А., Моисеев А.В., Афанасьев В.Л., Вилкотс Э., Госс М., “Межзвездная среда вокруг WO звезды в галактике IC 1613: новые наблюдения в оптическом и радио диапазонах”, 2001, *Астрономический журнал*, т. 78, с. 235 – 250
5. Лозинская Т.А., Архипова В.П., Моисеев А.В., Афанасьев В.Л., “Наблюдения звездных объектов на границе оболочек в комплексе звездообразования в галактике IC 1613”, 2002, *Астрономический журнал*, т. 79, с. 19 – 30
6. Моисеев А.В., “Панорамная спектроскопия галактик с двойными барами”, 2002, *Письма в Астрономический журнал*, т. 28, с. 840 – 854
7. Moiseev A.V., “Reduction of the CCD-observations with scanning interferometer Fabry-Perot”, 2002, *Bulletin of the Special Astrophys. Observatory*, v. 54, p. 74 – 88
8. Лозинская Т.А., Моисеев А.В., Подорванюк Н.Ю., “Кинематика ионизованного и нейтрального газа в комплексе звездообразования в галактике IC 1613”, 2003, *Письма в Астрономический журнал*, т. 29, с. 95 – 110
9. Sil’chenko O.K., Moiseev A.V., Afanasiev V.L., Chavushyan V.H., Valdes J.R., “The Leo I Cloud: Secular nuclear evolution of NGC 3379, NGC 3384, and NGC 3368?”, 2003, *Astrophysical Journal*, v. 591, p. 185 – 203
10. Moiseev A.V., Valdes J.R., Chavushyan V.H., “Structure and kinematics of candidate double-barred galaxies”, 2004, *Astronomy and Astrophysics*, v. 421, p. 433 – 453
11. Шаляпина Л.В., Моисеев А.В., Яковлева В.А., Гаген-Торн В.А., Барсунова О.Ю., “NGC 7468: галактика с внутренним полярным диском”, 2004, *Письма в Астрономический журнал*, т. 30, с. 643 – 652
12. Афанасьев В.Л., Моисеев А.В., “Универсальный редуктор светосилы 6-м телескопа SCORPIO”, 2005, *Письма в Астрономический журнал*, т. 31, с. 214 – 225
13. Afanasiev V.L., Gazhur E.B., Zhelenkov S.R., Moiseev A.V., “SCORPIO: prime focus focal reducer of BTA”, 2005, *Bulletin of the Special Astrophys. Observatory*, v. 58, p. 90 – 116
14. Fridman A.M., Afanasiev V.L., Dodonov S.N., Khoruzhii O.V., Moiseev A.V., Sil’chenko O.K., Zasov A.V., “The velocity fields of spiral galaxies. I. The data”, 2005, *Astronomy and Astrophysics*, v. 430, p. 67 – 81
15. Sil’chenko O.K., Moiseev A.V., “Nature of nuclear rings in unbarred galaxies: NGC 7742 and NGC 7217”, 2006, *Astronomical Journal*, v. 131, p. 1336 – 1346
16. Лозинская Т.А., Моисеев А.В., Авдеев В.Ю., Егоров О.В., “Структура и кинематика межзвездной среды в области звездообразования в BCD галактике VII Zw 403 (UGC 6456)”, 2006, *Письма в Астрономический журнал*, т. 32, с. 403 – 418
17. Silich S., Lozinskaya T., Moiseev A., Podorvanuk N., Rosado M., Borissova J., Valdez-Gutierrez M., 2006, *Astronomy and Astrophysics*, p. 448, v. 123–131

18. Martínez-Delgado I., Tenorio-Tagle G., Muñoz-Tuñón C., Moiseev A.V., Cairós L.M., “3D spectroscopy of Blue Compact Galaxies. Diagnostic Diagrams”, 2007, *Astronomical Journal*, v. 133, p. 2892 – 2897
19. Lozinskaya T.A., Moiseev A.V., “Synchrotron Superbubble in the IC 10 Galaxy: A Hypernova Remnant?”, 2007, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 381, p. L26 – L29
20. Bizyaev D.V., Moiseev A.V., Vorobyov E.I., “Propagating star formation in the collisional ring galaxy Arp 10”, 2007, *Astrophysical Journal*, v. 662, p. 304 – 321
21. Моисеев А.В., “К вопросу об измерении лучевых скоростей звезд с прибором SCORPIO”, 2008, *Астрофизический Бюллетень*, т. 63, с. 74 – 87
22. Моисеев А.В., Егоров О.В., “Обработка ПЗС-наблюдений со сканирующим интерферометром Фабри-Перо. II Дополнительные процедуры”, 2008, *Астрофизический Бюллетень*, т. 63, с. 193 – 204
23. Abolmasov P., Moiseev A., “Kinematics of the Nebular Complex MН9/10/11 Associated with HoIX X-1”, 2008, *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica*, v. 44, p. 301 – 309
24. Лозинская Т.А., Моисеев А.В., Подорванюк Н.Ю., Буренков А.Н., “Синхротронная сверхоболочка в галактике IC 10: структура, кинематика и спектр свечения ионизованного газа”, 2008, *Письма в Астрономический Журнал*, т. 34, с. 243 – 258
25. Засов А.В., Моисеев А.В., Хоперсков А.В., Сидорова Е.А., “Дисковые галактики ранних типов: структура и кинематика”, 2008, *Астрономический Журнал*, т. 85, с. 99 – 114
26. Моисеев А.В., “Изогнутое полярное кольцо в галактике Arp 212”, 2008, *Астрофизический Бюллетень*, т. 63, с. 215 – 230
27. Sil’chenko O.K., Moiseev A.V., Afanasiev V.L., “Two more disk galaxies with global gas counterrotation”, 2009, *Astrophysical Journal*, v. 694, p. 1550 – 1558
28. Reshetnikov V.P., Moiseev A.V., Sotnikova N.Ya., “Malin1: interacting galaxy pair?”, 2010, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 406, p. L90 – L94
29. Егоров О.В., Лозинская Т.А., Моисеев А.В., “Область бурного звездообразования в Irr галактике IC 10: структура и кинематика ионизованного и нейтрального газа”, 2010, *Астрономический Журнал*, т. 87, с. 316 – 334
30. Moiseev A.V., Pustilnik S.A., Kniazev A.Yu., “Study of very metal-poor galaxies: ionized gas kinematics of nine objects”, 2010, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 405, p. 2453 – 2470
31. Brosch N., Kniazev A., Moiseev A., Pustilnik S., “On the Nature of the Apparent Ring Galaxy SDSS J075234.33+292049.8”, 2010, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 401, p. 2067 – 2080
32. Sil’chenko O. K., Moiseev A. V., Shulga A. P. “Lenticular galaxies at the outskirts of the Leo II group: NGC 3599 and NGC 3626”, 2010, *Astronomical Journal*, v. 140, p. 1462 – 1474
33. Smirnova A., Moiseev A., “3D spectroscopy of merger Seyfert galaxy Mrk 334: nuclear starburst, superwind and the circumnuclear cavern”, 2010, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 401, p. 307 – 318
34. Smirnova A.A., Moiseev A.V., Afanasiev V.L., “Seyfert galaxies that are undergoing merging but appear non-interacting”, 2010, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 408, p. 400 – 406

35. Moiseev A.V., Karachentsev I.D., Kaisin S.S., “Ionized gas outflow in the isolated S0 galaxy NGC 4460”, 2010, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 403, p. 1849 – 1858
36. Katkov I. Yu., Moiseev A.V., Sil’chenko O.K., “Stars and ionized gas in S0 galaxy NGC 7743: an inclined large-scale gaseous disk”, 2011, Astrophysical Journal, v. 740, id. 83 (10 pages)
37. Moiseev A.V., Smirnova K.I., Smirnova A.A., Reshetnikov V.P., “A new catalogue of polar-ring galaxies selected from the SDSS”, 2011, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 418, p. 244 – 257
38. Finkelman I., Moiseev A., Brosch N., Katkov I., “Hoag’s Object: Evidence for Cold Accretion onto an Elliptical Galaxy”, 2011, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 418, p. 1834 – 1849
39. Beletsky Yu., Gadotti D.A., Moiseev A., Alves J., Kniazev A., “Looking inside the nest: the hidden structure of the merger galaxy NGC 1316 (Fornax A)”, 2011, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 418, p. L6 – L10
40. Moiseev A.V., Lozinskaya T.A., “Ionized gas velocity dispersion in nearby dwarf galaxies: looking at supersonic turbulent motions”, 2012, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 423, p. 1831 – 1844
41. Моисеев А.В., “Внутренние полярные кольца и диски: наблюдаемые свойства”, 2012, Астрофизический Бюллетень, т. 67, с. 154 – 167

Сборники трудов конференций (в том числе, прошедшие рецензирование):

42. Zasov A.V., Moiseev A.V., “Nuclear kpc-sized disks of spiral galaxies”, 1999, IAU Symposium 194, SanFrancisco: ASP, p. 279 – 284
43. Moiseev A.V., Afanasiev V.L., Dodonov S.N., “Fabry-Perot observations at the 6m telescope”, 2002, ASP Conf. Ser., v. 282, p. 443 – 444
44. Lozinskaya T.A., Moiseev A.V., Podorvanyuk N. Yu., “The Irregular Galaxy IC1613: Detailed Kinematics of H I and H II Shells in the Complex of Ongoing Star Formation”, 2003, RevMexAA (Serie de Conferencias), v. 15, p. 284 – 286
45. Moiseev A.V., Bizyaev D.V., Vorobyov E.I., “Long-slit and Fabry-Perot spectroscopy of collisional ring galaxy Arp 10”, 2004, AAS Meeting 205, #26.05; astro-ph/0501601 (6 pages)
46. Bizyaev D.V., Moiseev A.V., Vorobyov E.I., “Modeling the star formation history in the ring galaxy Arp 10 with the help of spectral indices”, 2005, AAS Meeting 207, #134.05; astro-ph/0602209 (7 pages)
47. Moiseev A.V., Afanasiev V.L., “Scanning Fabry-Perot interferometer in the extragalactic researches”, 2005, Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplement, v. 7, p. 44 – 47
48. Лозинская Т.А., Моисеев А.В., Авдеев В.Ю., Егоров О.В., Подорванюк Н.Ю., “Структура и кинематика межзвездной среды в областях звездообразования неправильных и BCD галактик”, 2006, Труды совещания “Звездообразование в Галактике и за ее пределами”, Москва, с. 196 – 203
49. Moiseev A.V., “Internal kinematics of Galaxies: 3D spectroscopy on Russian 6-m telescope”, 2007, ESO Astrophysics symposia, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p. 105 – 109

50. Moiseev A.V., Smirnova A.A., “Fuelling of Circumnuclear Regions: 3D Spectroscopy View”, 2007, Proceedings of the IAU Symp. 235, Cambridge University Press, p. 125 – 125
51. Moiseev A.V., “3D spectroscopy of the ionized gas kinematics in galactic rings”, 2008, ASP Conference Series, v. 396, p. 283 – 284
52. Smirnova A.A., Moiseev A.V., “Merging as a key to reforming of disk and AGN triggering in Sy galaxy Mrk334”, 2008, ASP Conference Series, v. 396, p. 291 – 292
53. Moiseev A.V., Bizyaev D.V., “3D spectroscopic study of galactic rings: formation and kinematics”, 2009, New Astronomy Reviews, v. 53, p. 169 – 174
54. Моисеев А.В., “Галактические кольца”, 2009, труды 38-й международной студенческой конференции “Физика Космоса”, под редакцией П.Е. Захаровой и др., Изд-во Уральского университета, с. 129–143
55. Moiseev A., Sil’chenko O., Katkov I., “Inner polar disks and rings: how do they form?”, 2010, AIP Conference Proceedings, v. 1240, p. 251 – 252
56. Moiseev A.V., “Kinematically detected polar rings/disks in blue compact dwarf galaxies”, 2011, EAS Publications Series, v. 48, p.115 – 118
57. Afanasiev V.L., Moiseev A.V “SCORPIO at the 6-m telescope: current state and perspectives for spectroscopy of galactic and extragalactic objects”, 2011, Baltic Astronomy, v. 20, p. 363 – 370

Личный вклад в совместных работах

Основные результаты диссертации опубликованы в 57 работах общим объемом 580 страниц, 47 работ написаны совместно с другими авторами. В статьях, где диссертант стоит первым в списке соавторов, его вклад является определяющим. В большинстве остальных совместных работ диссертант выполнял наблюдения на 6-м телескопе САО РАН, обработку и анализ данных о кинематике звездных и газовых компонент в изучаемых объектах, а вклад в интерпретацию полученного материала равноценен с остальными соавторами. Исключение составляют статьи [36] и [38], в которых обработка и анализ данных спектральных наблюдений, включающий оценку кинематических параметров, а также параметров звездного населения, выполнялся И.Ю. Катковым под руководством диссертанта. В статьях, посвященных изучению кинематики газа в галактиках Местной Группы, построение диаграмм “позиция-скорость”, с помощью программ, написанных диссертантом, выполнялось соавторами: Н.Ю. Подорванюком (работы [8], [17], [24]) и О.В. Егоровым (статьи [16] и [29]). У последнего диссертант также являлся со-руководителем кандидатской диссертации. В статье [39] диссертантом выполнен как анализ кинематики звезд по данным наблюдения с инфракрасным спектрографом SINFONI/VLT, так и обоснование существования околярного противовращающегося диска. В статьях [12], [13] и [57] описывается прибор SCORPIO, разработанный В. Л. Афанасьевым. Роль диссертанта в этих работах в основном сводилась к разработке системы управления и методики наблюдения со сканирующим ИФП.

Глава 1

Методика наблюдений и обработки данных о внутренней кинематике галактик

“Эксперимент есть Эксперимент, что здесь еще можно сказать?”

(А.Н. и Б.Н. Стругацкие)

Общее замечание об описании наблюдательных данных

Диссертация основана на обширном наблюдательном материале, детальное описание которого привело бы к излишней перегрузке текста и только отвлекало бы читателя от сути работы. Поэтому далее основной акцент делается на выводах, следующих из анализа тех или иных данных, о самих же наблюдениях будет упоминаться лишь вскользь: “на рисунке X показано поле скоростей галактики $Y...$ ” Подразумевается, что подробности обработки и первичного анализа полученного материала, равно как и журналы наблюдений можно найти в соответствующих статьях, посвященных конкретному объекту. Ситуацию упрощает то, что почти все наблюдения, за редкими исключениями, выполнены на 6-м телескопе САО РАН с помощью приборов SCORPIO и MPFS, общие сведения о которых, а также о методах обработки и анализа данных, полученных с их помощью, даются в первой главе диссертации.

1.1 Введение: методы панорамной спектроскопии

Методы панорамной (называемой также “2D-” или “3D-”) спектроскопии, активно развивающиеся в последние пару десятилетий, позволяют получать независимую спектральную информацию от всех участков протяженного объекта, заполняющих поле зрения прибора. После определенной обработки наблюдательные данные легко представить в виде “куба данных” (X, Y, Z) . В этом кубе X и Y соответствуют координатам в картинной плоскости (пространственные координаты), а длины волн λ (или доплеровские скорости в определенной спектральной линии) являются третьей (спектральной) координатой - Z (рис. 1.1). По способу регистрации куба данных спектрографы делятся на два типа. В полевых (integral-field) спектрографах одновременно регистрируются спектры от всех пространственных элементов, конструктивно выполненных в виде матрицы микролинз (Bacon et al., 1995), пучка световолокон (Arribas, 1998) или системы зеркал – резателей изображений (Weitzel, 1996). Для решения спектрофотометрических задач наиболее оптимальной оказалась комбинация микролинз и световолокон, предложенная Куртесом (Courtes, 1982) и впервые реализованная в спектрографе MPFS (Афанасьев и др., 1990; Afanasiev et al., 2001). Число пространственных элементов в полевых спектрографах ограничено прежде всего размером детектора и обычно не превышает нескольких

сотен, достигая ~ 1500 в спектрографе SAURON (Bacon et al., 2001). Поэтому поле зрения таких приборов обычно составляет не более нескольких десятков угловых секунд, в то время как протяженность куба данных по шкале длин волн может составлять сотни или тысячи ангстрем. Пока рекордным полем зрения ($74'' \times 65''$) среди инструментов этого класса обладает ПРАК/РМАС на 3.5-м телескопе обсерватории Калар-Альто, но за это приходится расплачиваться низкой детализацией с размером пространственного элемента $2''.7$ (Kelz et al., 2006).

В другом типе спектрографов происходит последовательная регистрация изображений на разных длинах волн. К таким приборам относятся системы с использованием сканирующего интерферометра Фабри-Перо (ИФП Fabry & Perot, 1901). Здесь относительно небольшой спектральный интервал (всего несколько десятков ангстрем) компенсируется значительно большим полем зрения, которое даже на крупных телескопах может составлять несколько угловых минут.

Наблюдения с ИФП состоят из последовательного получения нескольких десятков изображений интерференционных колец от изучаемого объекта (или калибровочной лампы) при изменении оптического пути между плоскопараллельными пластинками ИФП. Радиус колец является функцией длины волны и расстояния между пластинами интерферометра. Полный набор таких изображений, заполняющий свободный спектральный диапазон интерферометра, называют циклом сканирования. После обработки изображения могут быть представлены в виде куба данных (рис. 1.1). Для наблюдения галактик впервые подобная техника построения куба данных, с использованием фотопластинки в качестве детектора, была применена Tully (1974) при изучении движений ионизованного газа в M 51 в линии $H\alpha$. В последующие десятилетия системы со сканирующим ИФП применялись для наблюдений на многих крупных телескопах: приборы TAURUS-2 и GHaFaS на 4.2-м телескопе WHT (Испания), PUMA на 2.1-м телескопе OAN (Мексика), SIGALE на 3.6-м телескопе (ESO) и т.д. Важно отметить, что наш 6-м телескоп до сих пор остается одним из крупнейших инструментов в мире, где реализован метод 3D спектроскопии с помощью ИФП¹.

На 6-м телескопе САО РАН изучение движений ионизованного газа в галактиках с помощью сканирующего ИФП было начато в первой половине 80-х годов группой из Марсельской обсерватории в соавторстве с коллегами из САО (Boulesteix et al., 1982; Plana et al., 1998). Наблюдения проводились с помощью системы SIGALE, представляющей собой редуктор фокуса с интерферометром Фабри-Перо и двумерным счетчиком фотонов IPCS в качестве детектора (Додонов и др., 1995). Счетчик фотонов был в 1997 г. заменен ПЗС-матрицей с низким шумом считывания. Дальнейшее развитие метода связано с вводом в строй редукторы светосилы SCORPIO.

1.2 Редуктор светосилы SCORPIO

Идея применения на телескопе укорачивающей фокус оптической системы (фокального редуктора) была предложена и реализована Куртесом еще в 50-60 гг. прошлого века (Courtes, 1960). Фокальный редуктор позволяет одновременно решить несколько задач. Во-первых, увеличиваются эквивалентная светосила системы и поле зрения, что важно для исследования протяженных объектов. Во-вторых, использование специально рассчитанной оптики позволяет скомпенсировать внеосевые aberrации главного зеркала. В-третьих, появляется возможность установки в параллельном пучке между коллиматором и камерой диспергирующих элементов (гризм, интерферометров Фабри-Перо и т.п.), что превращает редуктор в универсальный спектрограф.

Построенные по такой схеме приборы, в первую очередь предназначенные для спектроскопии и фотометрии слабых протяженных объектов, получили широкое распро-

¹ Более крупные телескопы (SUBARU, GTC.) пока оснащены только перенастраиваемыми фильтрами (tunable filters), представляющими собой интерферометры низкого разрешения, позволяющими получать только изображения в отдельных линиях. Осенью 2011 г. начаты пробные наблюдения со сканирующим ИФП на телескопе SALT, но о результатах пока не сообщалось.

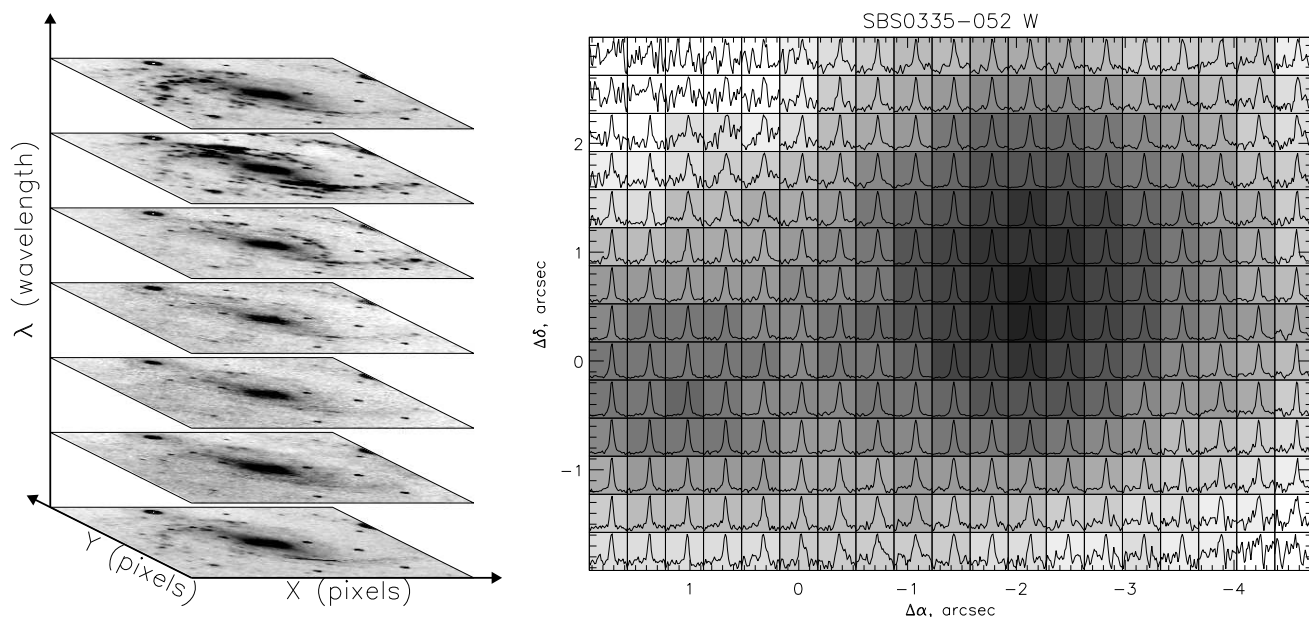


Рис. 1.1 Два различных представления кубов данных, полученный со сканирующим ИФП в линии $H\alpha$. Слева – куб в виде набора узкополосных изображения галактики NGC 6951 (Moiseev et al., 2004). Справа – фрагмент куба для карликовой галактики SBS0335-052W, каждый пиксель изображения содержит 36-канальный спектр (Moiseev et al., 2010b)

странение, начиная с камеры EFOSC 3.6-м телескопа ESO (Buzzoni et al., 1984), во многом ставшей прототипом современных спектрографов 8-10 м телескопов, таких как FORS/VLT (Nicklas et al., 1997) или FOCAS/SUBARU (Kashikawa et al., 2002).

Первый фокальный редуктор для интерферометрических наблюдений на 6-м телескопе БТА был создан в CAO РАН в середине 80-х годов с использованием коммерческих фотообъективов. Несмотря на такие недостатки, как плохое качество изображений на краю поля зрения, малое пропускание оптики (около 30% в максимуме) и отсутствие автоматизации, редуктор использовался на БТА более десяти лет, пока не встал вопрос о его модернизации. В 1999 г. в CAO РАН под руководством В.Л. Афанасьева и при участии автора были начаты работы по созданию нового прибора.

Новый редуктор светосилы SCORPIO (Spectral Camera with Optical Reducer for Photometric and Interferometric Observations) “увидел первый свет” в сентябре 2000 г. Он позволяет реализовать в первичном фокусе 6-м телескопа следующие виды наблюдений протяженных и звездообразных объектов (рис. 1.2):

- ПЗС-фотометрия в широких, средних и узких полосах.
- Панорамная спектроскопия с интерферометром Фабри-Перо.
- Спектроскопия с “длинной щелью”.
- Бесщелевая спектроскопия.
- Многообъектная спектроскопия с 16 щелями, дистанционно перемещаемыми в фокальной плоскости.
- Поляриметрия в фильтрах и спектрополяриметрия.

Оптическая схема редуктора светосилы включает в себя линзу поля и коллиматор, формирующие выходной зрачок системы, камерный объектив и сменные оптические элементы – сканирующий ИФП, дифракционные решетки, светофильтры, анализатор поляризации и фазовые пластинки. Эквивалентная светосила системы в первичном фокусе 6-м телескопа составляет $F/2.6$. На оптические поверхности нанесены просветляющие

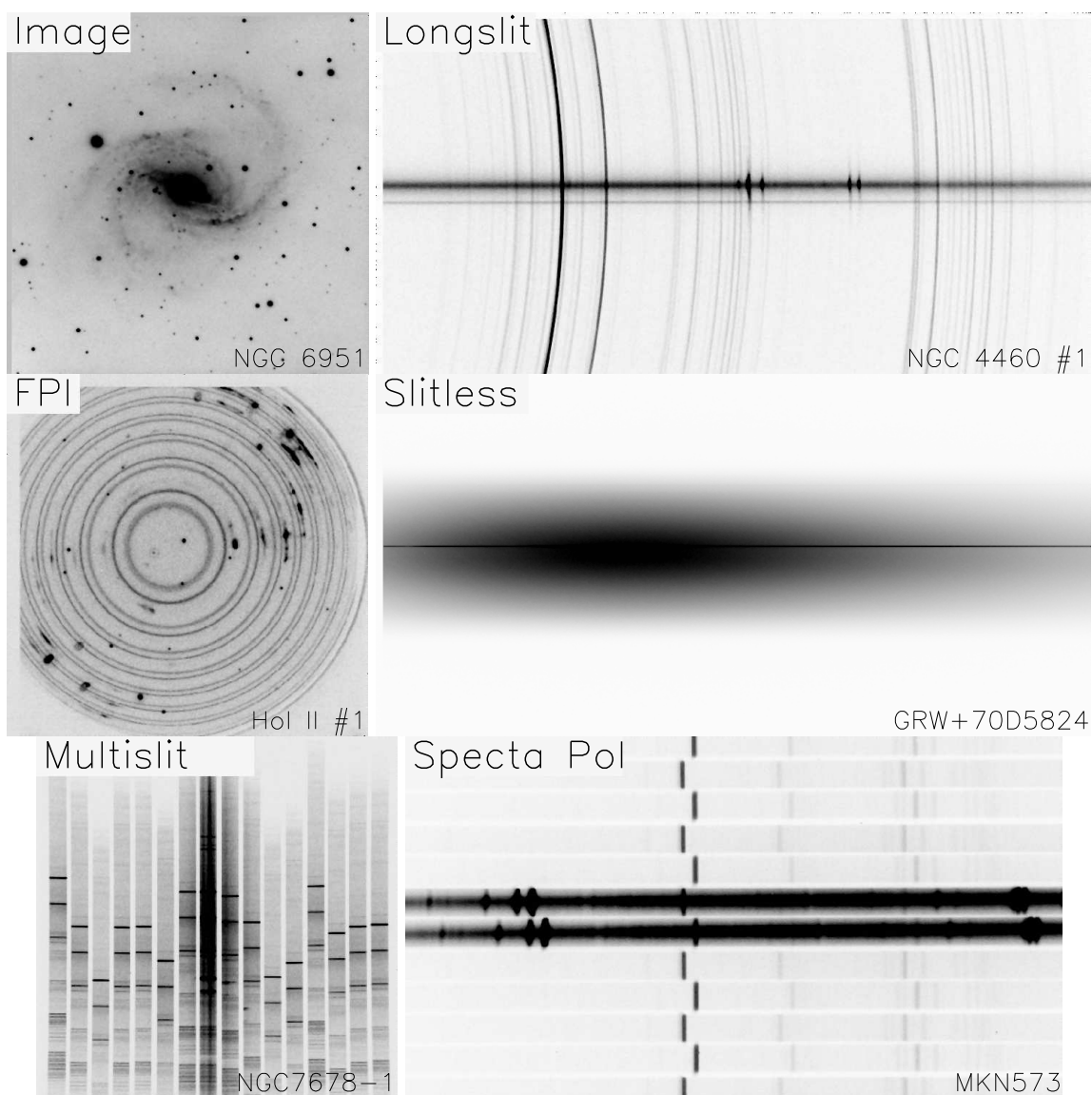


Рис. 1.2 Примеры ПЗС-кадров, полученных со SCORPIO в различных режимах наблюдений. Подписаны имена объектов и названия режимов (Afanasiev & Moiseev, 2011).

покрытия, работающие в диапазоне длин волн $3\,500 - 10\,000 \text{ \AA}$. Оптика коллиматора компенсирует кому и кривизну поля главного зеркала телескопа. Диаметр коллимированного пучка 40 мм. Эквивалентное фокусное расстояние редуктора, установленного на 6-м телескопе БТА равно 15.6 м, что соответствует масштабу изображения $75 \text{ мкм}/''$.

Две турели на шесть позиций предназначены для ввода в пучок различных сменных элементов — светофильтров, щелей, масок и т.д.. В первой турели, в фокальной плоскости телескопа обычно установлены средне- и узкополосные интерференционные фильтры, а также щель для спектральных наблюдений. Во второй турели (за полевой линзой, перед коллиматором) — широкополосные стеклянные светофильтры, фазовая пластина и маска для бесщелевой спектроскопии. Между коллиматором и камерой расположена каретка с двумя переключаемыми позициями для ввода в параллельный пучок диспергирующих элементов — интерферометров Фабри-Перо или призмы прямого зрения. Встроенный микропроцессор управляет всеми механизмами редуктора. Команды на микропроцессор подаются с персонального компьютера по стандартному протоколу обмена RS232.

Редуктор светосилы устанавливается на универсальной платформе-адаптере первичного фокуса, которая содержит два перемещаемых жгута световодов для внеосевого гидирования, а также оптику осветителя калибровки, формирующую на входе редуктора сходящийся пучок со светосилой $F/4$, телецентрически эквивалентный пучку, формируемому главным зеркалом телескопа. Такая схема тракта калибровки строит зрачок системы в том же положении, где находится изображение зеркала телескопа, что позволяет проводить не только корректную калибровку шкалы длин волн лампой линейчатого спектра, но и калибровку пропускания системы по полю в различных режимах работы (“плоское поле”). Входная площадка тракта калибровки освещается через интегрирующую сферу (шар Ульбрихта) двумя калибровочными лампами: с He-Ne-Ag наполнением для калибровки шкалы длин волн, и галогенной лампой непрерывного спектра для создания “плоского поля”. Подробное описание прибора дается в статьях Afanasiev et al. (2005) и Афанасьев и Моисеев (2005).

С 2000 по 2003 гг. в качестве детектора использовалась ПЗС матрица ТК1024, размером 1024×1024 пикселя, дающая масштаб изображения $0.32''/\text{пиксель}$. Начиная с апреля 2003 г. на SCORPIO в основном применяется ПЗС матрица EEV 42-40 размером 2048×2048 элементов, обеспечивающая поле зрения $6.1' \times 6.1'$ при масштабе $0.18''/\text{пиксель}$, а с 2009 года часть наблюдений выполнялась с E2V 42-90 (2048×4600 пикселей), имевшей лучшую чувствительность в красной области спектра при том же масштабе изображения. Эти матрицы с обратной засветкой обладают высокой квантовой эффективностью (до 95%), низким шумом считывания ($1.5-2\bar{e}$) и малым темновым током. Охлаждение детектора осуществляется жидким азотом. Весь комплект для наблюдений с ПЗС разработан и изготовлен в лаборатории перспективных разработок САО РАН.

Наблюдательные данные, на которых основана диссертация, были получены в трех режимах наблюдений, кратко рассмотренных ниже.

1.2.1 Прямые снимки (SCORPIO/DI)

SCORPIO укомплектован несколькими наборами светофильтров для получения изображений в поле зрения $6.1' \times 6.1'$. Стеклянные широкополосные светофильтры реализуют фотометрическую систему UBVR_cI_c Johnson-Cousins. Имеется также набор среднеполосных интерференционных фильтров с шириной полосы $50 - 400 \text{ \AA}$, использующихся для построения спектрального распределения энергии слабых объектов в поле или получения изображений протяженных объектов как в различных эмиссионных линиях (H_{α} , [OIII] и т.д), так и в континууме. Обычно в таких наблюдениях ПЗС-матрицы EEV 42-40/E2V 42-90 считываются в режиме аппаратного биннинга 2×2 , так что итоговый масштаб — $0.36''/\text{пиксель}$ обеспечивает хорошую дискретизацию при типичном размере изображений звезд в наблюдениях на БТА $1.5 - 1.7''$ (согласно статистическому исследованию Панчука и Афанасьева, 2011) .

Таблица 1.1 Параметры сканирующих интерферометров Фабри-Перо

	IFP235	IFP501	IFP751
порядок интерференции ¹	235	501	751
спектральное разрешение, $\delta\lambda^1$	2.5 Å	0.8 Å	0.5 Å
спектральный интервал, $\Delta\lambda^1$	29 Å	13 Å	8.7 Å
добротность $F^1 = \Delta\lambda/\delta\lambda$	11	17	20
количество спектральных каналов n_z	32	36	40

¹ на длине волны 6563 Å

1.2.2 Спектроскопия с длинной щелью (SCORPIO/LS)

Возможность предварительного получения прямых изображений оказывается чрезвычайно полезной при щелевой спектроскопии протяженных объектов, поскольку точно известно место на детекторе, куда проецируется изображение щели. Когда в текущую позицию первой турели устанавливается щель, а в коллимированный пучок вводится гризма прямого зрения (комбинация прозрачной решетки и двух призм), редуктор превращается в светосильный спектрограф. SCORPIO укомплектован набором призм, использующими объемные фазовые голографические решетки (VPHG), которые отличаются высоким пропусканием и малым уровнем рассеянного света. Они обеспечивают спектральное разрешение от 1.5 до 15 Å (при ширине щели 1") в различных областях оптического спектра, при этом достигается квантовая эффективность 20-50%.

1.2.3 Панорамная спектроскопия с ИФП (SCORPIO/IFP)

Сканирующий пьезоэлектрический интерферометр ET-50 (Queensgate/IC Optical Systems) устанавливается между коллиматором и камерой там, где располагается выходной пучок оптической системы. Параметры используемых интерферометров приведены в таблице 1.1. Обычно для наблюдения объектов с ожидаемым большим разбросом лучевых скоростей (диски спиральных галактик, галактики с активными ядрами) применяется интерферометр низкого разрешения IFP235, а для детального изучения профилей эмиссионных линий – IFP501 (с 2009 г. – IFP751), дающий более высокое спектральное разрешение. Выделение требуемого участка спектра осуществляется узкополосным фильтром шириной $FWHM = 10 - 20 \text{ Å}$. Для наблюдений галактик имеется набор таких фильтров, центрированных на длину волны изучаемых эмиссионных линий ($H\alpha$, $[OIII]\lambda 5007$, $[SII]\lambda 6717, 6731$) с учетом красного смещения объекта. Обычно в этих наблюдениях считывание ПЗС-матрицы EEV 42-40/E2V 42-90 выполняется в режиме аппаратного биннинга 4×4 с целью экономии времени считывания и увеличения отношения сигнал/шум. Результирующий размер пикселя ($0''.72$) в большинстве случаев соответствует типичному качеству изображений при многочасовой суммарной экспозиции. В случаях особенно хороших атмосферных условий и достаточно ярких объектов наблюдения выполняются с биннингом 2×2 .

1.2.4 Редуктор светосилы SCORPIO-2

Универсальность прибора, высокая квантовая эффективность, возможность быстрой смены программы наблюдений в зависимости от текущих атмосферных условий привели к тому, что начиная с 2006 г. около 50% всех ночей на 6-м телескопе распределяются для наблюдений, выполняемых с помощью SCORPIO. Согласно базе данных SAO/NASA ADS, за период с 2001 по июнь 2012 г. данные, полученные с этим прибором были представлены в 253 публикациях, цитировавшихся в сумме более 1000 раз. Они послужили основой не менее 15 диссертаций, не считая данную. Однако за более чем десять лет работы прибор начал стареть как физически, так и морально. Запросы и пожелания наблюда-

телей также постоянно росли. Поэтому под руководством В.Л. Афанасьева в САО РАН был разработан новый фокальный редуктор SCORPIO-2 (или SCORPIO-N). Основные отличия нового спектрографа от прибора предыдущего поколения следующие:

- Значительно (в два раза) уменьшена величина внеосевых аберраций.
- Спектральный режим с длинной щелью полностью использует площадь детектора E2V 42-90 $2K \times 4.6K$, что, по сравнению со старым SCORPIO, в два раза увеличило спектральный диапазон при том же спектральном разрешении. Щель с регулируемой шириной позволяет более гибко подбирать комбинацию диапазон/разрешение.
- Прибор специально разработан для работы в режиме удаленных наблюдений из здания лабораторного корпуса САО РАН. Значительно увеличено число одновременно установленных сменяемых элементов: 3 турели для светофильтров на 9 позиций каждая, отдельная турель с VPHG, независимый ввод сканирующего ИФП.
- Значительно расширены возможности спектрополяриметрии.
- В прибор включен отдельный узел для панорамной спектроскопии с многозрачковым растром, значительно расширяющий возможности этого метода в сравнении со старым спектрографом MPFS.

Первые наблюдения со SCORPIO-2 на 6-м телескопе состоялись в июне 2010 г., сейчас идут работы по отладке отдельных независимых узлов (многощелевой и многозрачковый блоки). Мы надеемся, что к началу 2013 г. прибор войдет в штатную эксплуатацию на 6-м телескопе. С этим фокальным редуктором уже было получено некоторое количество наблюдательного материала, использованного в данной работе. Поскольку параметры наблюдений в режиме ИФП и “прямые снимки” практически не отличаются от того, что было ранее со SCORPIO, а в режиме “длинной щели” основные отличия сводятся в основном к увеличению доступного спектрального диапазона, то мы не будем отдельно останавливаться на их описании.

1.3 Наблюдения со сканирующим ИФП

1.3.1 Основы метода

Теория интерферометра Фабри-Перо в приложении к астрономическим исследованиям подробно изложена в ряде работ (Courtes, 1960; Bland & Tully, 1989; Gordon, 2000). Ниже приводятся только некоторые соотношения, наиболее важные для понимания сути метода, описанного в наших статьях (Moiseev, 2002; Моисеев и Егоров, 2008).

Если на интерферометр под углом ϑ к оптической оси падает коллимированный монохроматический пучок света с длиной волны λ , то условие максимума интерференционной картины записывается в виде:

$$n\lambda = 2l\mu \cos \vartheta = \frac{2l\mu}{\sqrt{1 + \left(\frac{r}{f}\right)^2}}. \quad (1.1)$$

Здесь n – порядок интерференции, l – расстояние между пластинами интерферометра, а μ – показатель преломления среды между ними. Оптическая система (камера с фокусным расстоянием f) строит изображение интерференционных колец радиусом r на двумерном приемнике. Расстояние между соседними порядками интерференции определяет свободный спектральный диапазон:

$$\Delta\lambda = \lambda/n \quad (1.2)$$

Важной характеристикой интерферометра является добротность (Finesse):

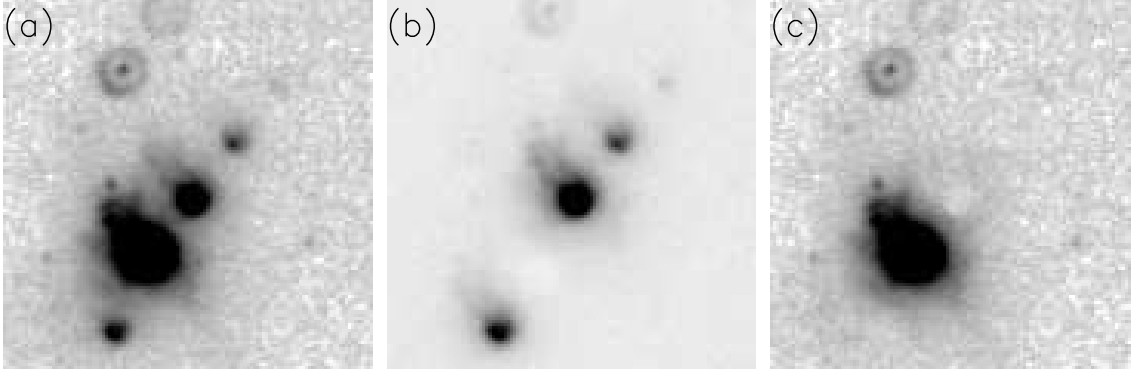


Рис. 1.3 Вычитание бликов, показана сумма всех каналов куба данных в линии $\text{H}\alpha$ для карликовой галактики II Zw 70. (a) исходное изображение. (b) модель распределения яркости в бликах. (c) результат вычитания модели из исходного куба.

$$F = \Delta\lambda/\delta\lambda, \quad (1.3)$$

где $\delta\lambda$ – полуширина аппаратного контура, которая определяет спектральное разрешение и, в первую очередь, зависит от характеристик отражающих покрытий пластин.

Для сканирующего интерферометра $2\mu l = A + Bz$, где z -номер спектрального канала, а A и B – некоторые константы (Gordon, 2000). При этом

$$B = \frac{A}{n n_z}, \quad (1.4)$$

где n_z – количество каналов в цикле сканирования.

На изображении протяженного объекта в канале z будут видны только те области, для которых выполняется условие (1.1). Таким образом, в каждом кадре смешаны пространственная и спектральная информация, так что точке (x, y) в плоскости изображения соответствует некоторая длина волны λ . Это хорошо видно из рис. 1.2 (FPI), где сплошные кольца соответствуют эмиссионным линиям ночного неба, а клочковатые структуры – областям галактики, для которых на данном радиусе выполняется условие (1.1) в линии $\text{H}\alpha$. Из (1.1) с учетом того, что $r \ll f$ и, согласно (1.4) $A \gg B$, получаем выражение для номера канала, в котором на данном радиусе наблюдается интерференционный максимум:

$$p(r) \cong \frac{n}{B}\lambda + \frac{A}{2Bf^2}r^2 - \frac{A}{B}. \quad (1.5)$$

Распределение величины $p(x, y)$ в плоскости изображения для линии калибровочной лампы называют *картой фазового сдвига*, а процедуру перехода от z к λ – *фазовой коррекцией*. Выражение (1.5) позволяет перейти от наблюдаемых интерферограмм к кубу данных в шкале длин волн.

1.3.2 Проблема бликов

Установка ИФП в выходном зрачке системы, между коллиматором и камерой фокального редуктора, приводит к появлению на изображении паразитных бликов. Блики возникают в результате переотражения света внутри пластин интерферометра и между ними и ближайшими линзами фокального редуктора, поверхностями узкополосного фильтра и т.д. Ввод в пучок IFR235 порождает блики симметричные основному изображению относительно оптической оси ИФП (“диаметральный блик”, согласно классификации из Jones, et al., 2002), интенсивность которых составляет около 10% от интенсивности основного изображения. Обычно в таких случаях рекомендуется наклонить ИФП к оптической оси системы, но из-за конструктивных особенностей SCORPIO это невозможно. Поэтому, в

процессе наблюдений необходимо располагать изображением объекта в стороне от оптической оси, а также следить за тем, что бы на него не накладывались блики от звезд поля.

При наблюдениях с IFR501 возникает еще одно семейство бликов – “экспоненциальное” (Jones, et al., 2002). Эти блики образуются в результате переотражений внутри пластин ИФП и создают значительно более серьезную проблему, чем диаметрально, поскольку ближайший из них появляется на расстоянии всего 16'' от изображения объекта и имеет значительную интенсивность (около 12% от яркости объекта). Столь интенсивные блики являются следствием деградации просветляющего покрытия внешних поверхностей пластин IFR501. К сожалению, стоимость замены пластин (или перенапыление покрытий) в данном случае близка к стоимости сборки нового ИФП, которая весьма велика. Поэтому в работе Моисеев и Егоров (2008) нами был рассмотрен алгоритм удаления бликов на этапе обработки данных.

Если идеальный (без бликов) куб данных обозначить как I_{real} , то приведенный в шкалу длин волн наблюдаемый куб выглядит как:

$$I_{obs}(x, y, \lambda) = I_{real}(x, y, \lambda) + I_{ghost}(x, y, \lambda) \quad (1.6)$$

где семейство экспоненциальных бликов можно представить в виде:

$$I_{ghost}(x, y, \lambda) \approx f_0 \hat{P} I_{real}^{-1}(x - \Delta x_0, y - \Delta y_0, z) + \sum_{i=1}^{i_{max}} f_i I_{real}(x - \Delta x_i, y - \Delta y_i, \lambda) \quad (1.7)$$

Относительная яркость бликов f_i убывает в геометрической прогрессии с ростом i , поэтому суммирование ведется не до бесконечности, а до $i_{max} = 3 - 5$, вклад бликов более высоких порядков обычно незначителен. По этой же причине не учитывается вклад вторичных бликов, таких как немонохроматические сателлиты от бликов монохроматического семейства. Первое слагаемое в (1.7) описывает блик E_0G , смещенный по шкале длин волн. Здесь \hat{P} обозначает операцию “фазовой коррекции”, т.е. переход от спектров в шкале номеров каналов ИФП z к шкале длин волн:

$$I(x, y, \lambda) = \hat{P} I(x, y, z) = I(x, y, k(z + p(x, y))),$$

где значения коэффициентов линейной функции $k(z) = k_1 z + k_0$, определяются конкретным ИФП. Соответственно, I_{real}^{-1} – есть результат обратного перехода от шкалы длин волн к каналам интерферометра:

$$I_{real}^{-1}(x, y, z) = \hat{P}^{-1} I_{real}(x, y, \lambda)$$

Нашей задачей является получение из I_{obs} наилучшего приближение к очищенному от бликов кубу I_{real} . Для этого мы используем следующую итерационную процедуру. Подставляя в выражение (1.7) I_{obs} вместо I_{real} , получаем первое приближение для модели бликов – $I_{ghost}^1(I_{real})$. Тогда, согласно (1.6) первое приближение для очищенного куба: $I_{obs}^1 = I_{obs} - I_{ghost}^1$. Подставляется I_{obs}^1 в выражение (1.7), получаем следующее приближение к модели блика I_{ghost}^2 и так далее, до I_{ghost}^n . Относительная яркость бликов невелика ($f_i \ll 1$), поэтому требуется всего $n = 3 - 4$ итерации, чтобы построить модель блика, близкую к реальной.

Поскольку для семейства монохроматических бликов ($i \geq 1$) выполняются соотношения:

$$\Delta x_i = i \Delta x_1, \quad \Delta y_i = i \Delta y_1, \quad f_i = f^i,$$

то модель (1.7) имеет всего шесть свободных параметров, которые подбираются так, чтобы минимизировать отклонения между I_{ghost}^n и I_{obs} . На рис. 1.3 показано вычитания бликов вокруг изображения карликовой галактики II Zw 70.

При наблюдениях объектов с очень большим градиентом поверхностной яркости, может получиться так, что интенсивный блик от компактной детали проецируется на значительно менее яркие области. Уровень пуассоновских шумов определяется суммарной интенсивностью блика и подложки. Поэтому после вычитания блика полезный сигнал в этой области будет сравним с амплитудой шумов, обусловленного статистикой фотонов. Чтобы избежать потерь спектральной информации от областей низкой яркости в случаях таких объектов, рекомендуется разделить планируемую экспозицию пополам и выполнять наблюдения последовательно при двух различных ориентациях поля зрения прибора, развернутых по позиционному углу примерно на 90° . Блики в полученных двух кубах данных будут проецироваться на разные области объекта. После первичной обработки из каждого куба вычитается своя модель бликов и маскируются области, где после удаления бликов резко уменьшилось отношение сигнал/шум. Затем кубы комбинируются в один, причем спектры из замаскированных областей в каждом кубе заменяются “хорошими” спектрами из другого набора данных (см. пример на рис.1.4).

1.3.3 Основные этапы обработки данных наблюдения со сканирующим ИФП

Для обработки наблюдений, получаемых с ИФП на SCORPIO, на языке IDL автором написан пакет программ IFPWID с многооконным дружественным интерфейсом. Тексты программ находятся в открытом доступе по адресу <http://www.sao.ru/hq/moisav/soft>. Исходными для обработки являются следующие наборы ПЗС-кадров:

- **OBJ** - интерферограммы исследуемого объекта. Чтобы избежать систематических ошибок при изменении атмосферной прозрачности и качества изображений в начале экспозиции выполняют в нечетных каналах интерферометра (1,3,5..), а затем – в четных (2,4,6...).
- **NEON** – изображения интерференционных колец от эмиссионной линии, выделяемой узким интерференционным фильтром из спектра встроенной He-Ne-Ar лампы. Обычно калибровка производится до и после наблюдательной ночи.
- **FLAT** – интерферограммы равномерной засветки “плоского поля” от встроенной лампы непрерывного спектра, полученные с тем же фильтром, что и при наблюдениях объекта.
- **TEST** – изображения колец от He-Ne-Ar лампы в отдельных каналах, получаемые до и после экспозиции объекта. Используются для мониторинга точности сканирования интерферометра и для контроля смещений положения центра колец интерференционной картины, возникающих из-за гнуптий прибора.

Также необходимы стандартные для ПЗС-наблюдений кадры тока смещения (**BIAS**) и темнового тока (**DARK**). В дальнейшем мы не будем говорить об учете темнового тока, поскольку в используемых ПЗС он незначителен на экспозициях 3 – 10 мин.

Первый этап обработки обычно не требует от пользователя специальных настроек, достаточно указать лишь номер наблюдательной ночи, шаблоны для имен файлов и требуемый формат кадров (иногда при наблюдениях с ИФП считывается лишь фрагмент ПЗС). Всю остальную необходимую информацию (параметры ИФП, номера спектральных каналов и т.п.) программа получает из дескрипторов FITS-файлов, которые заполняются автоматически в процессе наблюдений. Кратко перечислим этапы формирования кубов.

- Поиск и усреднение кадров тока смещения, снятых в требуемом режиме считывания ПЗС. Построенный кадр `superbias` будет вычитаться из всех кадров накоплений объекта и калибровок.

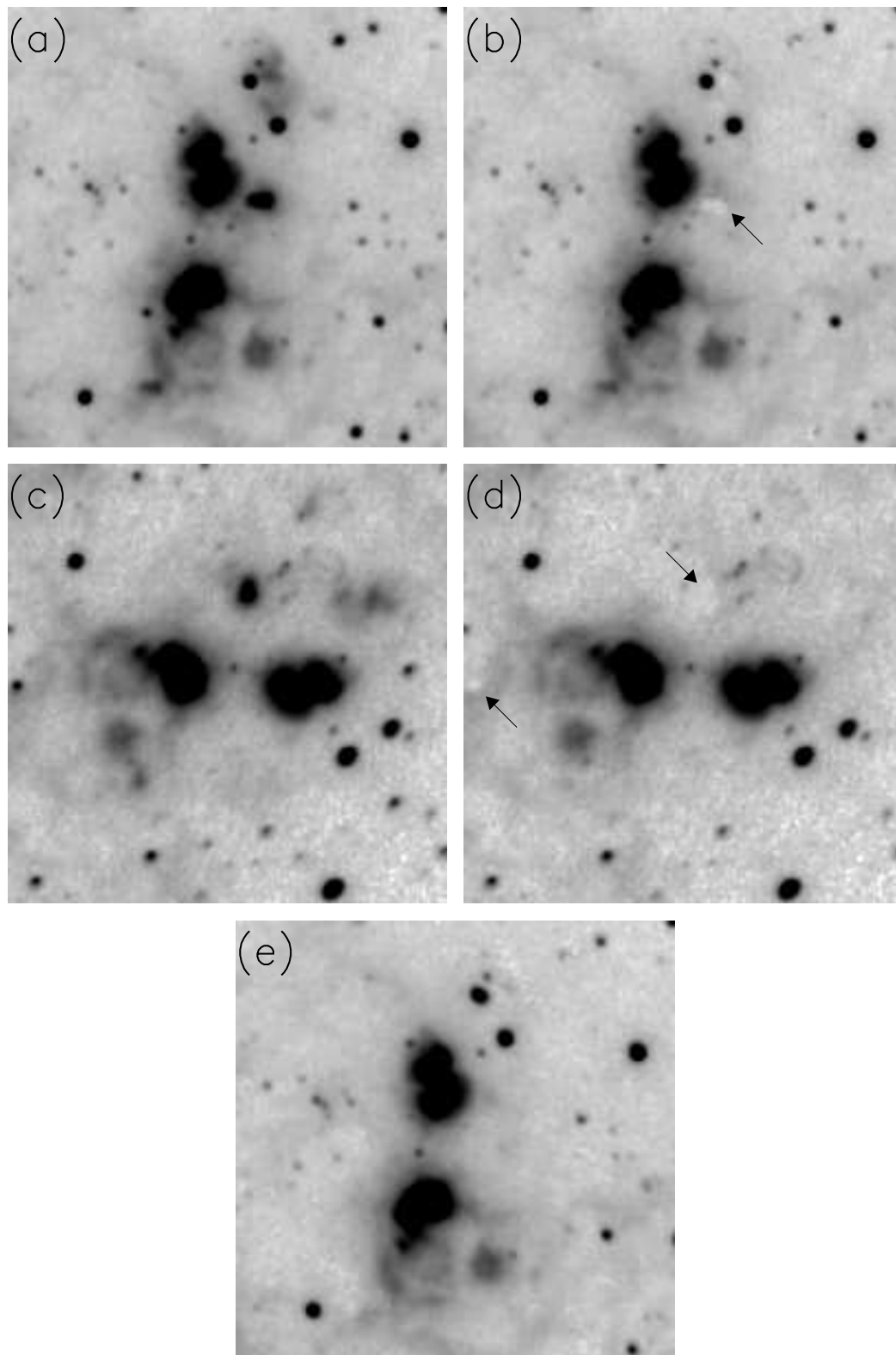


Рис. 1.4 Сумма каналов в кубах данных для галактики IC 10 в линии H α : (a) исходное изображение в первом кубе; (b) после вычитания бликов, стрелка указывает на области с неудовлетворительным качеством вычитания; (c) изображение в кубе, полученном после поворота поля зрения на 90°; (d) вычитание бликов из второго куба; (e) сумма обоих наборов данных.

- Формирование кубов данных из отдельных кадров. Вычитается *superbias*, маскируются дефектные колонки. Дальнейшая обработка производится уже не над двумерными изображениями, а над трехмерными кубами (поканально собранными интерферограммами объекта и калибровок). Кубы сохраняются в стандартном формате FITS (NAXIS=3).
- Чистка следов космических частиц в кубах накоплений света от калибровочных ламп с линейчатым и непрерывным спектром. Используется простой σ -фильтр: отсчеты в спектре, отличающиеся от среднего на установленное пороговое значение, заменяются полусуммой отчетов из соседних каналов.
- Построение карты фазового сдвига (1.5) на основании данных аппроксимации линий в кубе NEON профилем Лоренца. При необходимости – коррекция неравномерности сканирования калибровочного куба.
- Проверка точности построения шкалы длин волн.
- Определение поправок к построенной по калибровочному кубу шкале длин волн. Вычисляются смещения (по обеим координатам в плоскости ПЗС и по длине волны) накоплений TEST относительно куба NEON). При необходимости – коррекция выявленных поканальных сдвигов.
- При необходимости – коррекция относительных вариаций яркости лампы FLAT в течении сканирования калибровочного куба.
- Измерение смещения между максимумами пропускания узкополосного фильтра, измеренными по кубу FLAT, и по спектрам выбранных звезд в поле объекта. Обычно эта процедура необходима только при наблюдениях с IFR 235, когда полуширина узкополосного фильтра заметно меньше, чем спектральный диапазон между соседними порядками интерференции. Обычно смещение близко к нулю, но с некоторыми фильтрами оно может достигать 2 – 3.5 Å.
- Деление куба объекта на плоское поле (учет кривой пропускания узкополосного фильтра), чистка следов космических частиц.

Далее следует набор процедур обработки, которые чаще, чем при сборке кубов, требуют вмешательства пользователя. Как правило, обработка выполняется в следующем порядке:

- Коррекция неравномерности фона. Пользователь может задать параметры двумерного распределения яркости, на которое нормируется куб объекта.
- Создание маски для вычитания спектра ночного неба. За основу берется изображение суммы каналов куба объекта, области с яркостью меньше заданного предела считаются “фоном”. При необходимости, полученную маску можно редактировать.
- Задание параметров для вычитания фона неба. Применяемая методика вычитания неба подробно изложена в статье Moiseev (2002). Кратко она заключается в том, что в каждом канале куба OBJ эмиссия фона неба усредняется по азимутальному углу в узких кольцах, с центром на оптической оси ИФП, с учетом маски, построенной на предыдущем этапе обработки. Средний профиль яркости вычитается из интерферограммы объекта. При необходимости усреднение можно проводить в отдельных секторах, что полезно для учета вариаций аппаратного контура по полю.
- Вычитание спектра ночного неба, согласно заданным выше параметрам.
- Фотометрия звезд в каждом канале куба объекта. Для звезд из предварительно созданного списка измеряются относительные смещения центра изображения, вариации FWHM и интегрального потока. Строятся усредненные зависимости этих параметров от номера канала в кубе.

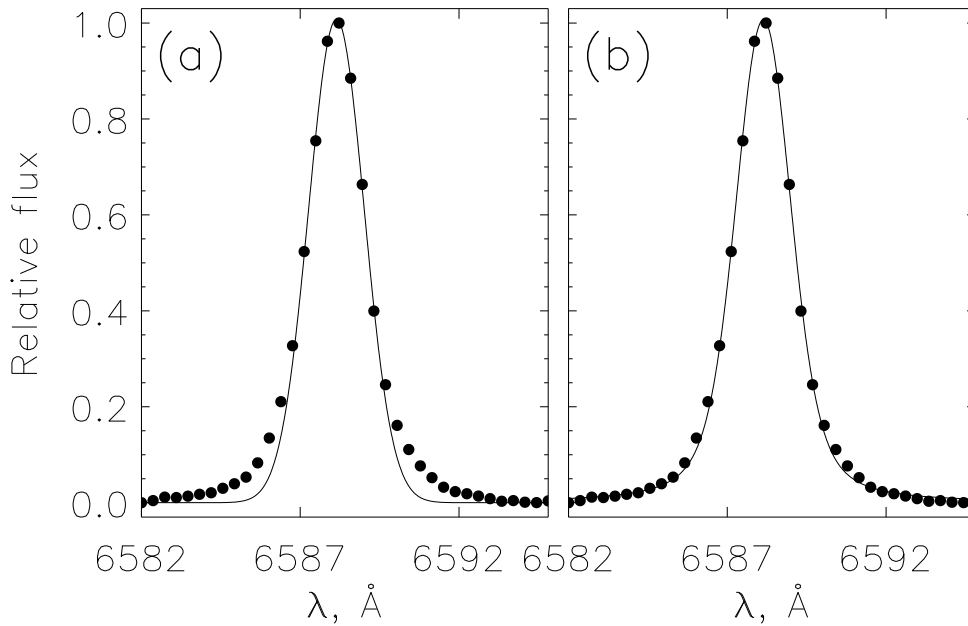


Рис. 1.5 Пример профиля спектральной линии $H\alpha$ в галактике II Zw 70 по наблюдениям с IFR501 (точки). Линией показана аппроксимация функцией Гаусса (a) и профилем Фойгта (b).

- Коррекция куба объекта на основании результатов поканальной фотометрии звезд. Производятся смещения каналов, учет вариаций атмосферной прозрачности (умножение каналов на рассчитанные коэффициенты) и качества звездных изображений (свертка с двумерными гауссианами). В результате амплитуда вариаций FWHM звездных изображений уменьшается от нескольких десятков процентов до 1–5%, хотя в целом пространственное разрешение в кубе ухудшается. Вариации атмосферной прозрачности учитываются в предположении, что в изучаемом узком спектральном диапазоне континуум в звездах плоский. Разумеется, это не всегда так (особенно в области абсорбции $H\alpha$), но если используется 8–10 звезд на разных расстояниях от центра колец, то вариации среднего потока, как правило, соответствуют вариациям экстинкции и не зависят от спектральных особенностей в звездах.
- Перевод куба объекта в шкалу длин волн.
- Вычитание бликов, как описано в разделе 1.3.2.

Итогом вышеописанных этапов обработки является куб в шкале длин волн, в котором максимально учтены все аппаратные эффекты (рис. 1.1). В таком виде он может анализироваться с помощью различных программных средств, в зависимости от желания пользователя и от поставленной задачи. Для построения полей скоростей, карт дисперсии скоростей, монохроматических изображений в эмиссионной линии и в континууме применяется написанная автором программа GAUS, с помощью которой можно проводить анализ индивидуальных профилей в выбранных пикселях куба данных, применяя аппроксимации профилей эмиссионных линий функциями Лоренца, Фойгта или Гаусса. Главная задача, решаемая с помощью данной программы – автоматическое отождествление эмиссионных линий в кубе данных и их аппроксимация теми или иными функциями на основании заданных параметров. Это тем более важно потому, что количество пикселей с полезным сигналом в наших кубах данных может достигать сотен тысяч, так что индивидуальный подход к каждому спектру попросту невозможен. Результатом являются двумерные карты параметров профиля (доплеровские скорости, поток в линии и т.д.).

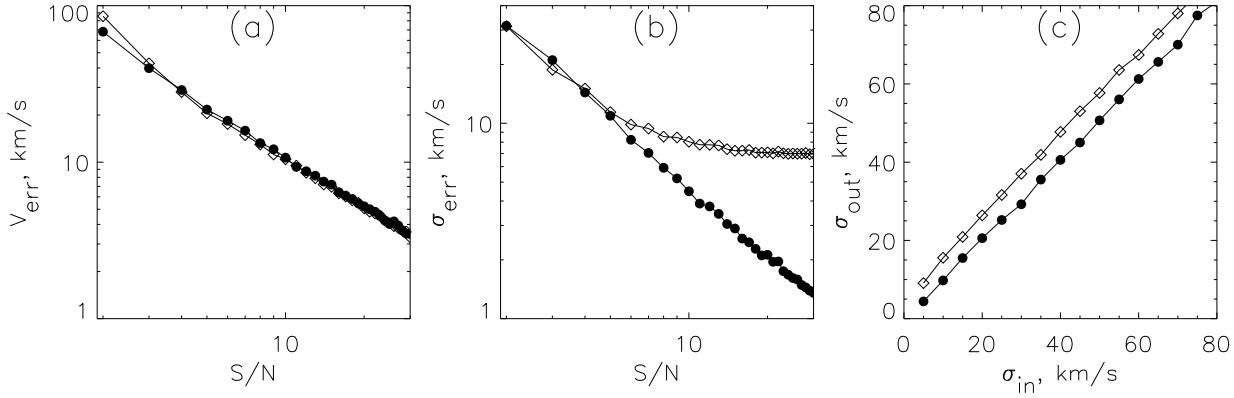


Рис. 1.6 Моделирование ошибок измерения кинематических параметров (по уровню 1σ). Расчет проводился для IFR501. Ромбики – аппроксимация гауссианой, черные кружки – профилем Фойгта. (a) зависимость ошибки измерения лучевой скорости от уровня отношения сигнал-шум, средняя величина дисперсии скоростей составляла 50 км/с; (b) зависимость ошибки измерения дисперсии скоростей от уровня отношения сигнал-шум при тех же условиях; (c) сравнение исходной и измеренной дисперсии скоростей (для $S/N = 20$)

1.3.4 Измерение дисперсии скоростей

Ряд наблюдательных задач требует точных оценок полуширин эмиссионных линий. При этом необходимо учитывать уширение, вносимое аппаратным профилем прибора. Часто используется соотношение, подразумевающее что и аппаратный профиль спектрографа, и исходный (до аппаратного уширения) профиль линии описываются функциями Гаусса с дисперсиями σ_{real} и σ_{ins} соответственно:

$$\sigma_{obs} = \sqrt{\sigma_{real}^2 + \sigma_{ins}^2} \quad (1.8)$$

Здесь σ_{obs} обозначает дисперсию гауссианы, описывающей профиль линии, наблюдаемой на выходе прибора. Говоря в дальнейшем о проблеме измерения дисперсии скоростей, мы будем иметь в виду проблему оценки σ_{real} из наблюдаемых спектров. При этом необходимо помнить, что за уширение линий в наблюдаемом объекте может быть ответственны не только дисперсия скоростей σ_{gas} (мера хаотических движений газовых облаков вдоль луча зрения), но и ряд других факторов. Так, для интегрального спектра НН-областей можно записать, в согласии с работой Rozas et al. (2000):

$$\sigma_{real}^2 = \sigma_{gas}^2 + \sigma_N^2 + \sigma_{tr}^2, \quad (1.9)$$

где $\sigma_N \approx 3$ км/с и $\sigma_{tr} \approx 9.1$ км/с соответствуют естественной ширине эмиссионной линии и ее тепловому уширению при температуре 10^4 К.

Благодаря своей простоте и наглядности, соотношение (1.8) широко используется в анализе спектральных данных, часто его обобщают, заменяя σ на FWHM. Но при этом следует понимать, что строгое равенство в (1.8) выполняется только для функций Гаусса, поскольку результатом свертки двух гауссиан является тоже гауссиана. Для щелевого спектрографа предположение о гауссовской форме инструментального профиля, как правило, верно. Однако аппаратный профиль ИФП, задаваемый функцией Эри, имеет широкие крылья, так что его лучшей аппроксимацией является не гауссиана, а профиль Лоренца. Поэтому, если исходный профиль эмиссионной линии является гауссовским с дисперсией, определяемой соотношением (1.9), то наблюдаемый профиль является сверткой профилей Гаусса и Лоренца, т.е. задается функцией Фойгта (Voigt):

$$V(\lambda, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{real}} \frac{y}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-x^2} dx}{y^2 + (a-x)^2}, \quad (1.10)$$

где

$$a = \frac{\lambda - \lambda_0}{\sqrt{2}\sigma_{real}}, y = \frac{w_{ins}}{\sqrt{2}\sigma_{real}}.$$

Здесь λ_0 - центральная длина волны, а через w_{ins} обозначена полуширина аппаратного (Лоренцевского) профиля ИФП, определяемая по спектру калибровочной лампы. Аппроксимируя наблюдаемый профиль функцией (1.10), получаем требуемую оценку σ_{real} . Рисунок 1.5 демонстрирует, что профиль Фойгта значительно лучше, в сравнении с гауссианой, описывает наблюдаемые эмиссионные линии. Из общих соображений ясно, что использование соотношения (1.8) для оценки дисперсии скоростей менее корректно, по сравнению с выражением (1.10). В первом случае приходится использовать гауссовскую аппроксимацию для профилей линий, систематически отличающихся от этого приближения, что может внести ошибку в оценку σ_{real} . Тем не менее, этот подход популярен, что видимо вызвано тем, что возможность гаусс-аппроксимации профилей спектральных линий имеется практически во всех пакетах обработки астрономических данных. Применение профиля Фойгта для анализа внегалактических спектров менее распространено, несмотря на то, что при современном уровне вычислительных средств расчет интеграла в (1.10) труда не представляет.

Для оценки ошибок измерения кинематических параметров (лучевой скорости v и дисперсии скоростей σ) в обоих вышеописанных подходах модельный аппаратный профиль ИФП сглаживался гауссианой с дисперсией σ_{in} , в результирующий спектр добавлялись шумы и производилась оценка дисперсии скоростей обоими методами. Отличие между полученными значениями (σ_{out}) и исходными (σ_{in}) позволяет оценить ошибку измерения дисперсии скоростей σ_{err} . Для каждого фиксированного отношения сигнал-шум (S/N) проводилось 1000 независимых измерений. Аналогично оценивалась ошибка измерения лучевой скорости. Расчеты проводились для параметров спектров, соответствующих IFR501, с шириной аппаратного контура $w_{ins} = 35$ км/с вблизи линии $\text{H}\alpha$. Результаты расчетов – зависимости ошибки измерения лучевых скоростей и дисперсии скоростей от уровня сигнала, показаны на рис. 1.6. Как и ожидалось, в случае симметричных линий, ошибка измерения лучевой скорости не зависит от алгоритма измерения. На уровне сигнала $S/N = 30$ она составляет 2.5 км/с.

С ошибкой измерения дисперсии скоростей ситуация иная. Для измерений, основанных на аппроксимации профилем Фойгта, ошибка плавно уменьшается с ростом уровня сигнала и составляет всего несколько км/с при $S/N > 20$. Напротив, если измерения основаны на соотношении (1.8), то при $S/N \geq 10$ начинает доминировать не случайная, а систематическая ошибка измерений, так, что происходит переоценка дисперсии скоростей (рис. 1.6с). Оценки, полученные из гаусс-аппроксимации профилей, больше реальных на 7–8 км/с. Поэтому при $\sigma_{real} = 10 - 20$ км/с переоценка дисперсии скоростей может достигать 100%, что критично при исследовании кинематики ионизованного газа в областях звездообразования.

1.4 Наблюдения с мультизрачковым спектрографом MPFS

1.4.1 Первичная редукция

Мультизрачковый волоконный спектрограф MPFS (Afanasiev et al., 2001) позволяет одновременно регистрировать спектры от 256 пространственных элементов, конструктивно выполненных в виде прямоугольного массива линз размером 16×16 элементов, при сменном масштабе $0''.5$, $0''.75$ и $1''$ на линзу (все наблюдения, представленные в диссертации выполнялись в режиме, обеспечивающим максимальное поле зрения, т.е. $16'' \times 16''$). За каждой линзой располагается световолокно, другой конец которого упакован в щель спектрографа. Описание прибора представлено на web-странице САО РАН по адресу <http://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices.html>. В качестве детектора в разное время использовались те же ПЗС матрицы, что и на SCORPIO: ТК 1024 и EEV 42-40.

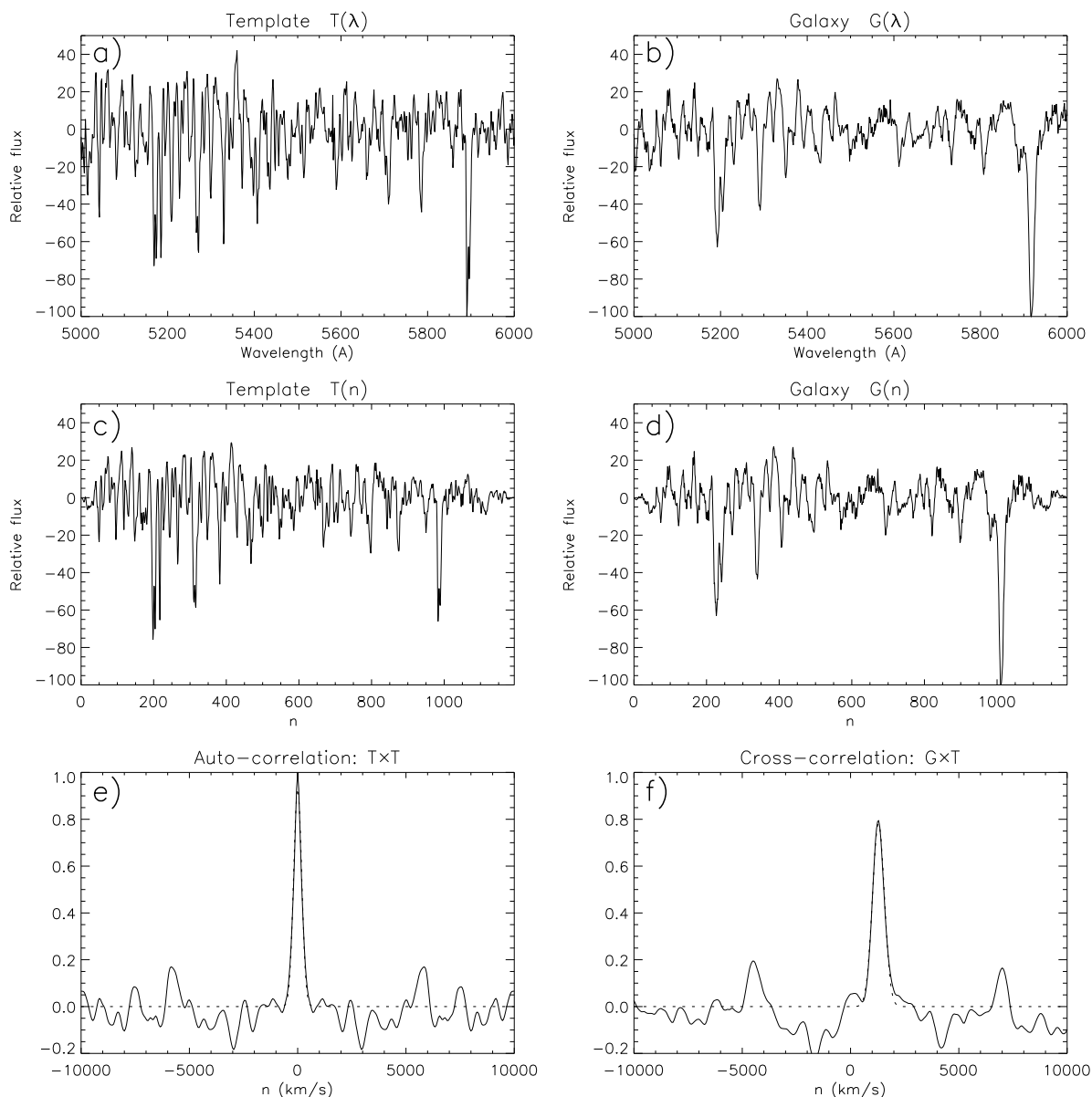


Рис. 1.7 Кросс-корреляционный метод (Moiseev, 2001a). a,b – спектры звезды класса КIII и галактики NGC 2950, континуум вычтен; c, d – спектры в логарифмической шкале с шагом 50 км/с; e,f – автокорреляционная и кросс-корреляционная функции, пунктиром показана аппроксимация пиков гауссианой.

Для обработки наблюдений применялся пакет программ, написанный на языке IDL В.Л. Афанасьевым и А.В. Моисеевым. При обработке спектров MPFS исходными являются следующие наборы ПЗС-кадров: кадры с накоплением спектров от объекта, спектр встроенной лампы с He-Ne-Ar наполнением, используемый для калибровки шкалы длин волн, кадры с равномерной засветкой от встроенной лампы непрерывного спектра (спектральное “плоское поле”). Характерной особенностью MPFS является наличие встроенной геометрической калибровки, по исторической причине именуемой “эталон”. Калибровка основана на том, что внутри щели каждые 16 световолокон от одного ряда микролинз перемежаются световолокном, идущим от площадки для накопления спектра неба. При засветке “небесных” световолокон лампой непрерывного спектра на выходе спектрографа формируется изображение четких, далеко отстоящих друг от друга спектральных траекторий. Анализ их изображений позволяет упростить и автоматизировать отождествление спектров с соответствующими световолокнами. Обработка делится на следующие этапы:

1. Суммирование кадров одного типа, вычитание кадра тока смещения, коррекция сдвигов между исходными кадрами (причинами которых являются гнутия прибора),

чистка следов космических частиц.

2. Выделение траекторий спектров от каждого 17-го световолокна по кадрам эталона. Исправление геометрических искажений – “выпрямление” спектральных траекторий. Интерполяция траекторий для всех спектров.
3. Деление на нормированное “плоское поле”. Эта процедура позволяет учесть виньетирование камеры спектрографа, вариации пропускания отдельных световолокон, а также локальные неоднородности чувствительности ПЗС.
4. Интегрирование спектров вдоль индивидуальных траекторий с гауссовским взвешиванием.
5. Перевод спектров в шкалу длин волн на основании измерений положения линий встроенной He-Ne-Ar лампы.
6. Вычитание спектра ночного неба, который собирается с площадки, удаленной на расстояние около 4' от центра поля зрения MPFS и накапливается одновременно с экспозицией объекта.
7. Построение кривой спектральной чувствительности и перевод спектров галактики в энергетические единицы ($\text{эрг/с/см}^2/\text{Å}$) с помощью спектрофотометрических стандартов, наблюдавшихся в те же ночи, что и объект, на основе кривой атмосферной экстинкции для САО РАН (Карташева и Чунакова, 1978). Спектры звезд-стандартов также используются для коррекции атмосферных полос поглощения кислорода и водяного пара в области $\lambda 6900 - 8200\text{Å}$.
8. Коррекция за атмосферную дисперсию (дифференциальную рефракцию атмосферы). Это явление заключается в изменении угла рефракции светового луча в зависимости от его длины волны. В наблюдениях в широком (более тысячи Å) спектральном диапазоне на умеренных зенитных расстояниях ($z = 20 - 60^\circ$) атмосферная дисперсия может приводить к смещению изображений в “красном” и “синем” концах спектра на $0.5 - 1''$, что является существенной величиной. При наблюдениях центральных областей галактик сдвиги, вызванные атмосферной дисперсией, определяются и корректируются по смещениям барицентра звездобразного ядра на изображениях в разных длинах волн.

Результатом обработки является куб данных, в котором каждому элементу изображения в поле $16'' \times 16''$ соответствует спектр.

1.4.2 Кросс-корреляционная техника измерения параметров звездной кинематики

Идею методов измерения лучевой скорости (v) и дисперсии лучевых скоростей (σ) звездного населения рассмотрим на примере спектра от одного пространственного элемента. Пусть $G(\lambda)$ и $T(\lambda)$ – наблюдаемые спектры галактики и звезды-шаблона с вычтенным континуумом. Спектры дискретизированы по длине волны λ .

Наблюдаемые спектры переводятся в логарифмическую шкалу, в которой номер спектрального элемента n связан с длиной волны λ_n соотношением:

$$n = a \lg(\lambda_n) + b, \quad a = \lg^{-1}(1 + \Delta v/c), \quad b = -a \lg(\lambda_0) \quad (1.11)$$

Здесь Δv – шаг по скорости в км/с, c – скорость света. В логарифмической шкале доплеровское смещение приводит к равномерному сдвигу спектра по шкале n .

Спектр галактики может быть представлен как смещенный по скорости спектр шаблона, свернутый с некоторой функцией уширения, обусловленной внутренними движениями звезд в галактике вдоль луча зрения:

$$G(n) = \alpha T(n) \odot B(n - v), \quad (1.12)$$

где α – численный коэффициент, а функция уширения $B(n)$ представляется гауссианой:

$$B(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{n^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1.13)$$

здесь v и σ – искомые скорость и дисперсия скоростей вдоль луча зрения.

Метод базируется на классической статье Tonry & Davis (1979) и основан на вычислении нормализованной кросс-корреляционной функции:

$$C(n) = G(n) \otimes T(n) = \frac{1}{N\sigma_g\sigma_t} \sum_m G(m)T(m - n), \quad (1.14)$$

где

$$\sigma_g^2 = \frac{1}{N} \sum_n G(n)^2, \quad \sigma_t^2 = \frac{1}{N} \sum_n T(n)^2$$

Вычисления удобно проводить в пространстве Фурье, где соотношение (1.14) записывается в виде:

$$\tilde{C}(k) = \frac{1}{N\sigma_g\sigma_t} \tilde{G}(k)\tilde{T}^*(k). \quad (1.15)$$

Здесь звездочка обозначает комплексное сопряжение, а тильда – дискретное преобразование Фурье.

Применяя операцию кросс-корреляции к выражению (1.12), легко получить:

$$C(n) = (T(n) \otimes T(n)) \odot B(n - v), \quad (1.16)$$

т.е. кросс-корреляционная функция спектра галактики и звезды является сверткой автокорреляционной функции спектра звезды-шаблона $T(n)$, которая несет информацию об аппаратном контуре спектрографа, с функцией уширения $B(n)$. Таким образом, скорость v определяется по положению максимума кросс-корреляционной функции $C(n)$. Можно показать, что если центральный пик кросс-корреляционной функции представляется гауссианой с дисперсией μ :

$$C(n) = c_0 \exp\left(-\frac{(n - v)^2}{2\mu^2}\right), \quad (1.17)$$

а пик автокорреляционной функции спектра звезды-шаблона – гауссианой с дисперсией τ , то квадрат дисперсии скоростей вычисляется как:

$$\sigma^2 = \mu^2 - \tau^2 \quad (1.18)$$

При этом $\tau/\sqrt{2}$ является дисперсией гауссианы, описывающей аппаратный контур спектрографа. На практике, из-за отличия формы пика от гауссовского, вклада низкочастотной компоненты и т.д., соотношение между σ и μ может отличаться от (1.18), что вносит систематические ошибки в оценку σ . В работе Moiseev (2001a) подробно описывается использование эмпирической зависимости между шириной кросс-корреляционного пика и дисперсией скоростей для учета негауссовости пика.

Описанная методика использовалась нами как для анализа данных MPFS, так и для измерения v и σ по спектрам, получаемым с прибором SCORPIO в режиме длинной щели.

1.5 Методы анализа полей скоростей

1.5.1 Модель квазикругового вращения

Практически всегда при анализе наблюдаемых полей скоростей газовых или звездных дисков галактик в качестве первого приближения используется модель квазикругового вращения, часто называемая методом “наклонных колец” (tilted-rings). Основные принципы метода достаточно подробно описаны в ряде работ, см., например Begeman (1989); Teuben (2002). Ниже излагается методика, описанная в наших работах (Моисеев и Мусцевой, 2000; Moiseev et al., 2004), адаптированная для анализа полей скоростей ионизованного газа.

Если R , φ – радиальная и азимутальная координаты в плоскости галактики, а V_φ , V_R , V_Z – соответственно азимутальная, радиальная и вертикальная составляющие вектора скорости, то наблюдаемая лучевая скорость определяется выражением:

$$V_{OBS} = V_{SYS} + V_R \sin \varphi \sin i + V_\varphi \cos \varphi \sin i + V_Z \cos i, \quad (1.19)$$

где V_{SYS} – системная скорость, i – наклон плоскости галактики к картинной плоскости. При этом $\varphi = 0$ для точек на линии узлов. В случае только кругового вращения: $V_R = V_Z = 0$, $V_\varphi \equiv V_{ROT}$, где V_{ROT} – скорость кругового вращения на данном радиусе.

Введем в картинной плоскости полярную систему координат (r, PA) , где r – видимое расстояние от центра вращения и PA – позиционный угол. В предположении чисто кругового вращения тонкого плоского диска наблюдаемая лучевая скорость определяется как:

$$V_{OBS}(r, PA) = V_{SYS} + V_{ROT}(R(r)) \frac{\cos(PA - PA_{kin}) \sin i}{(1 + \sin^2(PA - PA_{kin}) \tan^2 i)^{1/2}}, \quad (1.20)$$

а расстояние до центра вращения в плоскости галактики:

$$R(r) = r(1 + \sin^2(PA - PA_0) \tan^2 i)^{1/2} \quad (1.21)$$

Здесь PA_{kin} – позиционный угол кинематической оси. В случае чисто круговых движений $PA_{kin} \equiv PA_0$, где PA_0 – позиционный угол линии узлов.

В ходе анализа наблюдаемое поле скоростей разбивается на эллиптические кольца, задаваемые уравнением (1.21) для $R = const$. В каждом кольце проводится аппроксимация наблюдаемой зависимости $V_{OBS}(PA)$ модельной кривой (1.20), на основании χ^2 -минимизации. В результате на каждом радиусе r удается оценить параметры ориентации PA_{kin} , i и скорость кругового вращения V_{ROT} . Если есть уверенность, что в плоскости диска нет сильных изгибов, то можно положить наклон и системную скорость независимыми от радиуса ($i(R) = i_0$, $V_{SYS} = const$), в таком случае радиальные вариации PA_{kin} будут отражать особенности некруговых компонент трехмерного вектора скорости.

Даже в объектах с сильно возмущенной кинематикой (галактики с активными ядрами, взаимодействующие и т.д.), использование модели кругового вращения с переменными параметрами ориентации на каждом радиусе позволяет не только определить кривую вращения, но сделать ряд важных выводов о характере внутренних движений, выделить области с пекулярными (некруговыми) скоростями и т.д. На основании анализа результатов численного моделирования нами было показано (Моисеев и Мусцевой, 2000), что использование формальной модели движений по круговым орбитам при анализе поля скоростей галактик с перемычками может привести к неверному выводу о присутствии наклонного (полярного) диска в центре галактики. Но сравнение взаимных ориентаций фотометрической и кинематической осей позволяет отличить бар от наклонного диска. Радиальные движения газа под действием гравитационного потенциала перемычки приводят к тому, что “кинематическая ось”, измеряемая по PA_{kin} , отклоняется в другую сторону от линии узлов диска, в сравнении с “фотометрической осью”, определяемой по ориентации изофот (рис. 1.8).

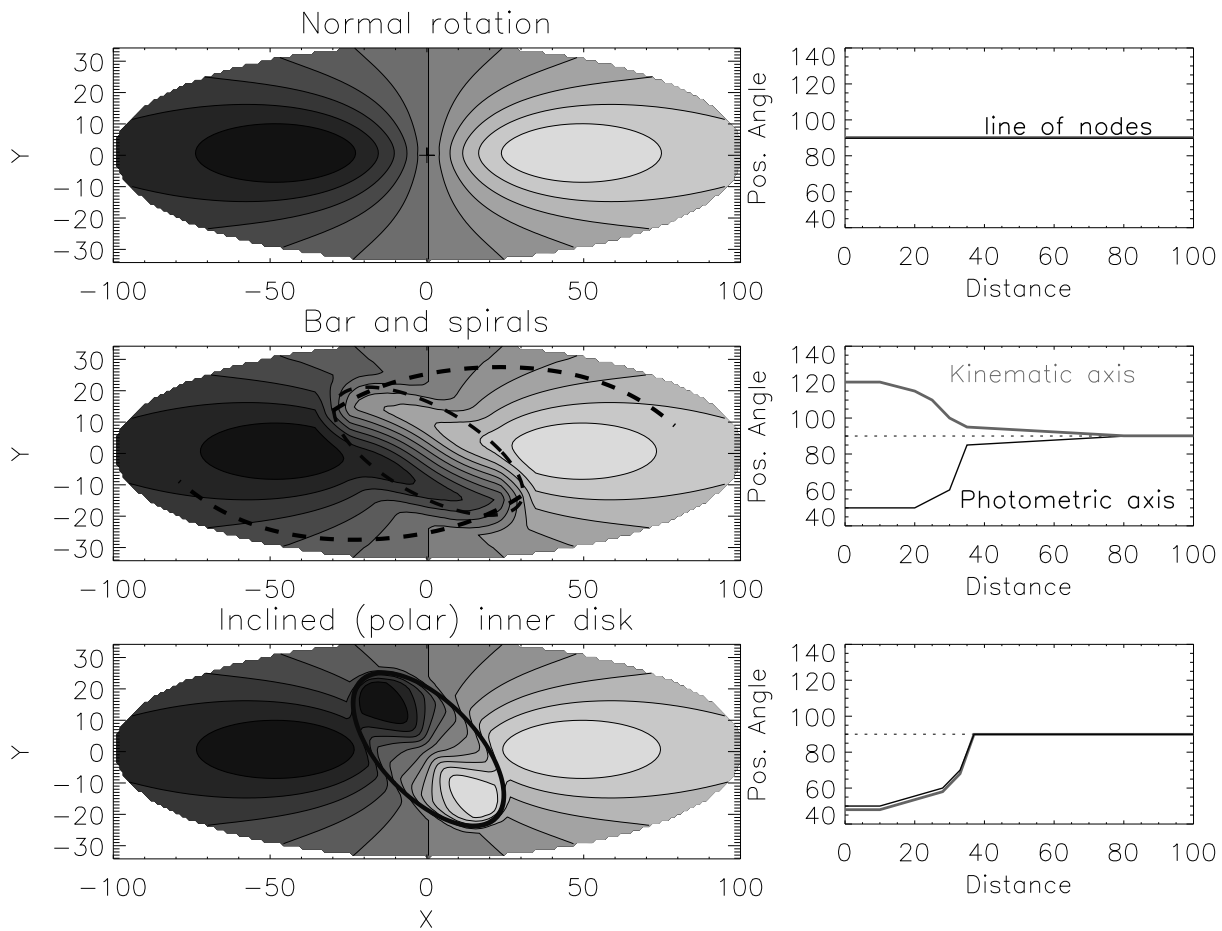


Рис. 1.8 Вид наблюдаемого поля лучевых скоростей газа в различных типах галактических дисков (Moiseev & Afanasiev, 2005). Слева – поля скоростей, справа – радиальные изменения позиционных углов кинематической и фотометрической осей. Вверху — только круговые движения, в середине – спираль с баром (показаны пунктиром), внизу – околоядерный диск, наклоненный к основной плоскости галактики.

При анализе полей скоростей определенную проблему представляет поиск параметров, которые в дальнейшем фиксируются – положение центра вращения, а также позиционного угла линии узлов и наклона плоскости диска, в согласии с которыми задается положение и ориентация эллиптических колец. Общих рецептов здесь нет, но в большинстве случаев в качестве первого приближения можно использовать фотометрические параметры ориентации. Дальнейшее их уточнение производится методом последовательных приближений, при этом на каждом из шагов маскируются области, выделяющиеся своей пекулярной кинематикой. Если центр симметрии поля лучевых скоростей лежит вблизи центра симметрии внутренних изофот на изображении в континууме, то часто при анализе поля скоростей именно фотометрический центр фиксируется в качестве центра кругового вращения. Для определения средних параметров ориентации PA_0 и i_0 удобно использовать приближение регулярно вращающегося плоского диска, положив в (1.20) $i(R), PA_{kin}(R) = const$.

1.5.2 Двумерная модель изогнутого диска

Рассмотрение кинематики газа методом “наклонных колец” позволяет достаточно адекватно понять характер движений в плоском диске. Если же плоскость диска изгибается, этот метод помогает получить первое приближение для параметров такого изгиба. Однако серьезную проблему представляет то, что аппроксимация наблюдаемых точек в узком кольце выражением (1.20) часто оказывается неустойчива по параметру $i(r)$, особенно при небольших углах наклона. Для более уверенного определения ориентации орбит газовых облаков лучше сразу все поле скоростей описывать в рамках единой двумерной модели с фиксированным числом параметров.

В таких случаях (см. примеры в главе 4) использовалась двумерная модель изогнутого диска, основанная на принципах, описанных в работе Soccato et al. (2007). Здесь диск разбивается на узкие кольца, ориентация n -го кольца радиусом R_n относительно основной плоскости галактики (с параметрами ориентации PA_0 и i_0) задается вертикальным углом δ_n и азимутальным углом γ_n . Тогда позиционный угол кольца PA_n и наклон i_n относительно луча зрения задаются соотношениями:

$$\cos i_n = \cos \delta_n \cos i_0 - \sin \delta_n \cos \gamma_n \sin i_0, \quad (1.22)$$

$$\tan PA_n = \frac{\sin PA_0 (\sin \delta_n \cos \gamma_n \cos i_0 + \cos \delta_n \sin i_0) + \cos PA_0 \sin \delta_n \sin \gamma_n}{\cos PA_0 (\sin \delta_n \cos \gamma_n \cos i_0 + \cos \delta_n \sin i_0) - \sin PA_0 \sin \delta_n \sin \gamma_n}. \quad (1.23)$$

С учетом возможно переналожения колец при пересечении луча зрения, модельная лучевая скорость в точке (x, y) картинной плоскости определяется выражением:

$$v(x, y) = \frac{\sum_{n=1}^M v_n(x, y) f_n(x, y)}{\sum_{n=1}^M f_n(x, y)}, \quad (1.24)$$

где

$$v_n(x, y) = V_{ROT}(R_n) \sin i_n \cos PA_n + V_{SYS} \quad (1.25)$$

Весовой множитель $f_n(x, y)$ определяет относительный вклад от n -го кольца в лучевую скорость, а M – полное число таких колец. После того, как выражение (1.24) вычислено в каждой точке, модельное поле свертывается с двумерной гауссианой с полупрошириной, соответствующей пространственному разрешению наблюдательных данных.

Принципиальным отличием данного подхода от методов раздела 1.5.1 является то, что здесь мы строим модель сразу всего поля скоростей и подгоняем ее под наблюдения, применяя χ^2 -минимизацию. В общем случае имеется $3 \times M + 3$ параметра, включая PA_0 , i_0 и V_{sys} , но их число можно принципиально сократить, задав простые аналитические

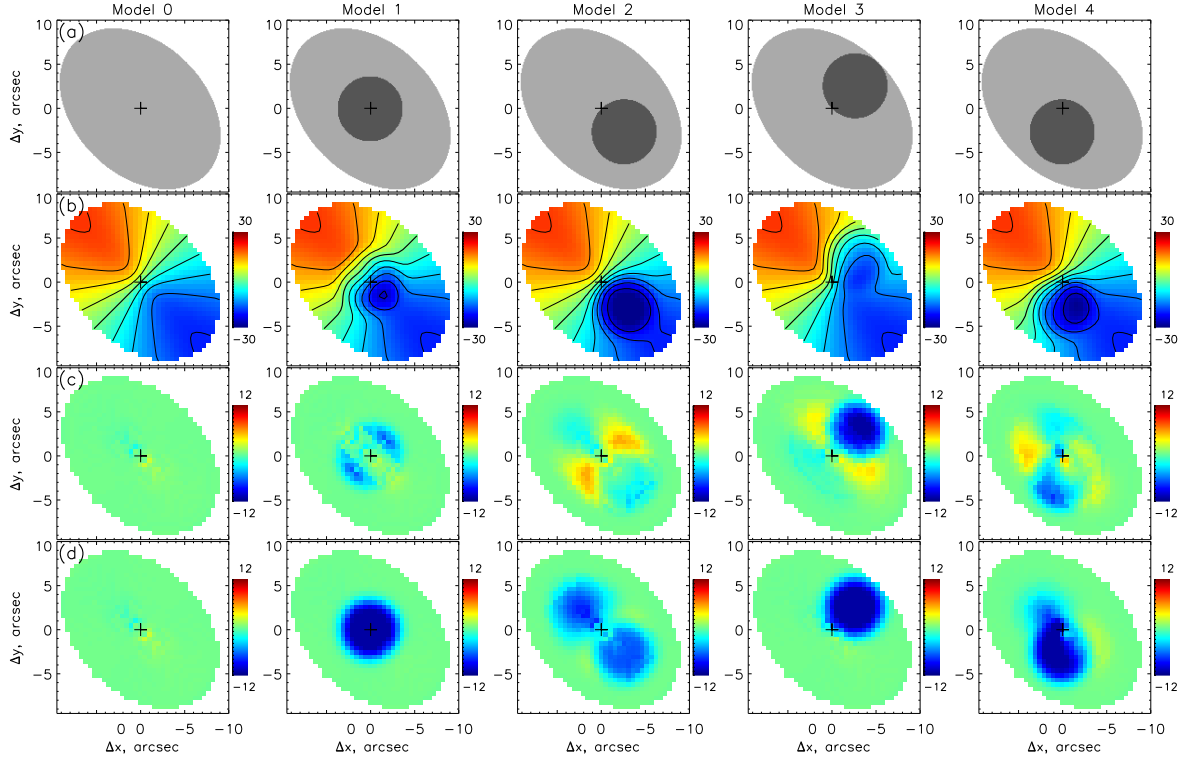


Рис. 1.9 Расширяющаяся оболочка в галактическом диске. (а) – относительные положения диска (серый цвет) и оболочки (чёрный). (б) – модельные поля скоростей, после вычитания $V_{sys} = 1000$ км/с. (с) – остаточные поля скоростей в Методе I, в котором разрешаются радиальные вариации PA и V_{sys} . (д) – остаточные поля скоростей в Методе II, где $PA, V_{sys} = \text{const}$

выражения для ориентации орбит и кривой вращения. Так, для описания изогнутого внешнего диска в *Авр* 212 (см. далее §4.2) использовалось всего 7 параметров, что значительно повысило устойчивость модельного решения.

1.5.3 Учет вклада от ионизованных оболочек

Описанный выше метод наклонных колец пользуется большой популярностью при анализе полей скоростей газа в дисках галактик. Он позволяет не только определить кривую вращения, но и легко связать радиальные изменения кинематически определенных PA и i с реальными изменениями геометрических параметров диска (изгиб, полярное кольцо и т.п.) или с регулярными некруговыми движениями, вызванными спиральными рукавами или баром. Однако в карликовых галактиках расширяющиеся оболочки, индуцированные звездообразованием, могут значительно исказить поле скоростей диска, поскольку амплитуда кривой вращения мала, а размер оболочки часто сравним с диском. Если мы допустим вариации кинематического PA с радиусом, то это может привести к ошибочным выводам об ориентации диска или о характере некруговых движений. Ниже на простых модельных примерах рассмотрим этот эффект подробнее.

Представим “наблюдаемые” скорости в двухкомпонентной модели в виде суммы лучевых скоростей для диска и оболочки

$$V_{obs} = V_{disc} + V_{shell} = V_{sys} + V_{rot} \cos \varphi \sin i + V_{shell}. \quad (1.26)$$

Это приближение допускает равный вклад от обоих компонент в поле лучевых скоростей, в той области, где они перекрываются. Это отличается от реальной ситуации более сложного распределения яркости, но может быть использовано в качестве первого приближения. Одно из ограничений, используемых в моделях рассматриваемых ниже, состоит в том, что V_{shell} не должно превышать типичную $FWHM$ наблюдаемых эмиссионных линий (около 30 – 50 км/с). Иначе при наблюдениях со сканирующим ИФП мы

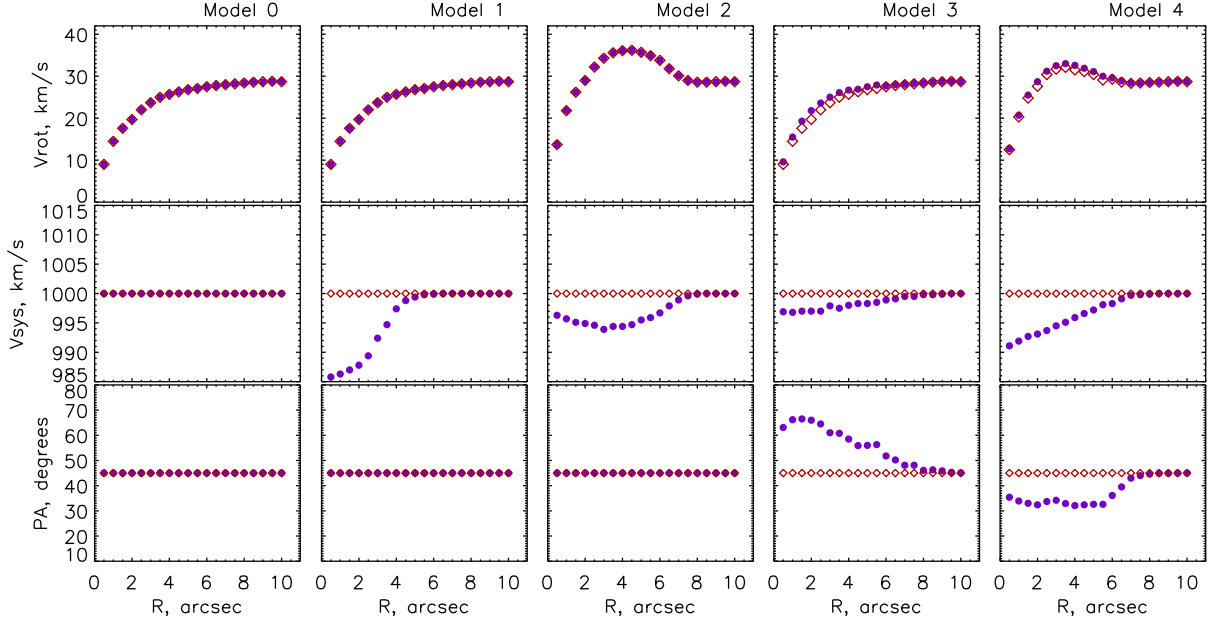


Рис. 1.10 Параметры аппроксимации для модельного поля скоростей: скорость вращения (вверху), позиционный угол (посередине) и системная скорость (внизу). Синие точки и красные ромбы показывают результаты Метода I и Метода II, соответственно.

увидим двухкомпонентные профили линий и сможем построить отдельные поля скоростей каждой из подсистем.

Азимутальный угол в плоскости галактики φ связан с позиционным углом соотношением: $\tan \varphi = \tan(PA - PA_0) / \cos i$. Растущая кривая вращения задавалась в виде:

$$V_{rot} = \frac{2}{\pi} V_{max} \arctan \frac{R}{h}, \quad (1.27)$$

где $h = 1''$ и максимальная скорость $V_{max} = 30$ км/с, что является типичными значениями для карликовых галактик из выборки Moiseev et al. (2010b).

Для оболочки принята модель тонкой расширяющейся полусферы. Это предполагает, что мы видим только приближающуюся к наблюдателю сторону, в то время как удаляющаяся скрыта поглощением:

$$V_{shell} = -V_{exp} \sqrt{1 + \frac{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2}{R_s^2}}. \quad (1.28)$$

Здесь x_s и y_s координаты центра оболочки в картинной плоскости относительно центра диска. Радиус оболочки задавался $R_s = 3''.5$, скорость расширения $V_{exp} = 15$ км/с.

Применяя (1.26), мы построили поля скоростей умеренно наклоненного диска ($i = 45^\circ$, $PA_0 = 45^\circ$) с максимальным радиусом $10''$ и с разными величинами x_s и y_s . Принятая характерная системная скорость $V_{sys} = 1000$ км/с, никак не влияет на результат.

Модели строились на сетке с размером элемента $0''.1$, а после сворачивались с двумерной функцией Гаусса с $FWHM = 1''.5$, что воспроизводит типичный эффект влияния земной атмосферы при наших наблюдениях с ИФП.

На рис. 1.9 показаны примеры построенных полей скоростей. Модель 0 представляет диск без оболочки. Модель 1 - оболочку в центре диска. Модель 2 и Модель 3 - центр оболочки сдвинут вдоль большой и малой осей соответственно. В Модели 4 центр оболочки смещен в направлении $PA = 180^\circ$.

Модельные поля скоростей анализировались в рамках квазикругового приближения (§1.5.1) двумя способами. Метод I разрешает радиальные вариации PA и V_{sys} , в то время как в Метод II эти величины фиксируются и свободным параметром остается только

скорость вращения. Угол наклона и центр вращения фиксировались в обоих случаях. На рис. 1.9 показаны остаточные скорости, полученные обоими методами, а на рис. 1.10 – радиальное поведение параметров моделей. Видно, как расширяющаяся оболочка влияет на наблюдаемое поле скоростей и оцениваемые кинематические параметры. Именно центральное положение оболочки или ее сдвиг вдоль большой оси вызывает радиальные вариации V_{sys} (Модели 1 и 2). Положение оболочки вне большой оси диска также вносит систематические ошибки в оценки PA (Модели 3 и 4). В том случае, если центр оболочки лежит на малой оси, радиальные вариации PA достигают максимальной амплитуды ($\sim 20^\circ$ в наших моделях). Такие большие вариации PA могут привести к ошибочным выводам относительно изгиба плоскости диска.

Остаточные скорости в Методе I рассеяны по гораздо большей площади диска, нежели та, которую в реальности занимает оболочка (рис. 1.9), они относительно малы и составляют около $\pm 5 - 7$ км/с. Кроме того, пик отрицательных ('голубых') остаточных скоростей обычно не совпадает с центром оболочек. Но если принять PA и V_{sys} постоянными с радиусом (Метод II), то модель остаточных скоростей находится в хорошем согласии с местоположением оболочки и величина отрицательных остаточных скоростей находится в соответствии с V_{exp} , за исключением Модели 2.

Заметим, что кривая вращения, определяемая из модельных полей скоростей, может быть искажена при применении любого из методов анализа, как видно для на рис. 1.10 для Моделей 2 и 4. Однако в приближении Метода II, мы можем однозначно обнаружить на картах остаточных скоростей возмущенную область диска и затем получить реальную кривую вращения на второй итерации, после маскирования области оболочки. Последнее невозможно, если PA и V_{sys} – свободные параметры аппроксимации, так как в этом случае трудно распознать местоположение оболочки.

Вышеописанный подход был успешно применен нами при анализе полей скоростей карликовых галактик (Moiseev et al., 2010b). В той или иной степени, описанные рецепты оказываются полезными при изучении полей скоростей ионизованного газа маломассивных галактик, а также объектов с центральными истечениями: Mrk 334 (глава 3), NGC 4460 (глава 6).

Основные результаты главы 1

- Разработана методика наблюдения и анализа данных, позволяющая с помощью сканирующего интерферометра Фабри-Перо картировать распределение дисперсии скоростей ионизованного газа в галактиках и эмиссионных туманностях. Предложены алгоритмы, позволяющие существенно уменьшить влияние систематических ошибок на измеряемую дисперсию скоростей.
- Описаны методы анализа полей скоростей ионизованного газа в галактиках, включая объекты с изогнутыми дисками.
- Описана методика измерения параметров звездной кинематики – лучевых скоростей и дисперсии скоростей методом кросс-корреляций.
- Предложен алгоритм анализа полей скоростей карликовых галактик, позволяющий корректно учитывать вклад, вносимый в наблюдаемое поле скоростей гигантскими расширяющимися оболочками.

Основные публикации, представляющие результаты этой главы:

- Moiseev A.V., "Measurement of radial velocities and velocity dispersion of stars in circumnuclear regions of galaxies using the 2D spectroscopy technique", 2001, Bulletin of the Special Astrophys. Observatory, v. 51, p. 11

- Moiseev A.V., “Reduction of the CCD-observations with scanning interferometer Fabry-Perot”, 2002, Bulletin of the Special Astrophys. Observatory, v. 54, p. 74
- Афанасьев В.Л., Моисеев А.В., “Универсальный редуктор светосилы 6-м телескопа SCORPIO”, 2005, Письма в Астрономический журнал, т. 31, с. 214
- Afanasiev V.L., Gazhur E.B., Zhelenkov S.R., Moiseev A.V., “SCORPIO: prime focus focal reducer of BTA”, 2005, Bulletin of the Special Astrophys. Observatory, v. 58, p. 90
- Моисеев А.В., Егоров О.В., “Обработка ПЗС-наблюдений со сканирующим интерферометром Фабри-Перо. II Дополнительные процедуры.”, 2008, Астрофизический Бюллетень, т. 63, с. 193
- Abolmasov P., Moiseev A., “Kinematics of the Nebular Complex M19/10/11 Associated with HoIX X-1”, 2008, Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica, v. 44, p. 301 – *одна из лучших иллюстраций наших возможностей по измерению дисперсии скоростей со сканирующим ИФП*
- Moiseev A. V., Pustilnik S. A., Kniazev A. Y., “Study of very metal-poor galaxies: ionized gas kinematics of nine objects”, 2010, MNRAS, v. 405, p. 2453 – *карты дисперсии скоростей, анализ кинематики диска с учетом вклада от ионизованных оболочек*
- Afanasiev V.L., Moiseev A.V., “SCORPIO at the 6-m telescope: current state and perspectives for spectroscopy of galactic and extragalactic objects”, 2011, Baltic Astronomy, v. 20, p. 363

Глава 2

Противовращение в дисках галактик

“Почти все, что вращается (а вращается во Вселенной почти все), рано или поздно принимает форму диска.”

(Н.Н. Горькавый, А.М. Фридман)

2.1 Введение: противовращающиеся компоненты

Взаимодействия играют в эволюции галактик одну из важнейших ролей. Даже поглощение относительно небольшого спутника, так называемые “малые слияния” (minor merging) с отношением масс менее $1/5 - 1/10$, не искажая в целом структуры дисковой галактики, могут способствовать концентрации газа в ее центральных областях, инициируя этим активность ядра или вспышку звездообразования. Расчеты показывают, что за последние 8 млрд. лет в жизни галактики, похожей на нашу, такие события должны были происходить многократно (Kazantzidis et al., 2009). Более того, прямые оценки темпов слияний галактик на $z < 1$ показывают, что в современную эпоху ($z \leq 0.4$) малые слияния начинают доминировать над большими (López-Sanjuan et al., 2011).

Заметить следы даже недавних слияний на фоне яркой галактики достаточно сложно. Необходимы либо очень глубокие снимки, выявляющие внешние приливные структуры (см. к примеру, Martínez-Delgado et al., 2010; Smirnova & Moiseev, 2010), либо кропотливое изучение особенностей звездного населения и внутренней кинематики. Если направление орбитального момента спутника заметно отличалось от момента вращения галактического диска, то в дальнейшем может оказаться, что часть звезд или газовых облаков в галактике станет вращаться в направлении противоположном остальному диску. Действительно, если плоскость вращения разрушенного приливными силами спутника находится под заметным углом к диску галактики, то эти орбиты быстро прецессируют и сваливаются в диск. В зависимости от изначального направления орбитального момента вращения примерно в половине случаев упавшее вещество будет противовращаться относительно остального диска. В нашей Галактике такое обратное вращение наблюдается у части звезд толстого диска и гало, что связывают с аккрецией небольших спутников (Steinmetz, 2012; Borkova & Marsakov, 2003). Но чтобы обнаружить противовращение в других галактиках, требуется, чтобы на ретроградных орбитах было достаточное количество излучающей материи.

В окооядерных областях (в пределах 1–2 кпк от центра) подобные кинематически выделенные противовращающиеся структуры могут встречаться достаточно часто, особенно в галактиках ранних типов. При взаимодействии и последующем приливном трении о диск часть вещества спутника теряет угловой момент вращения, перемещаясь ближе к центру, где и формируется внутренний противовращающийся компонент. Так, согласно имеющимся оценкам, он наблюдается в $\sim 25\%$ близких линзовидных галактик (Kuijken et al., 1996; Bureau & Chung, 2006). В то же время, глобальные противовращающиеся подсистемы, по размерам сравнимые с основным звездным диском, встречаются значительно реже (см. обсуждение и ссылки в Sil’chenko et al., 2009). Поэтому, каждый новый объ-

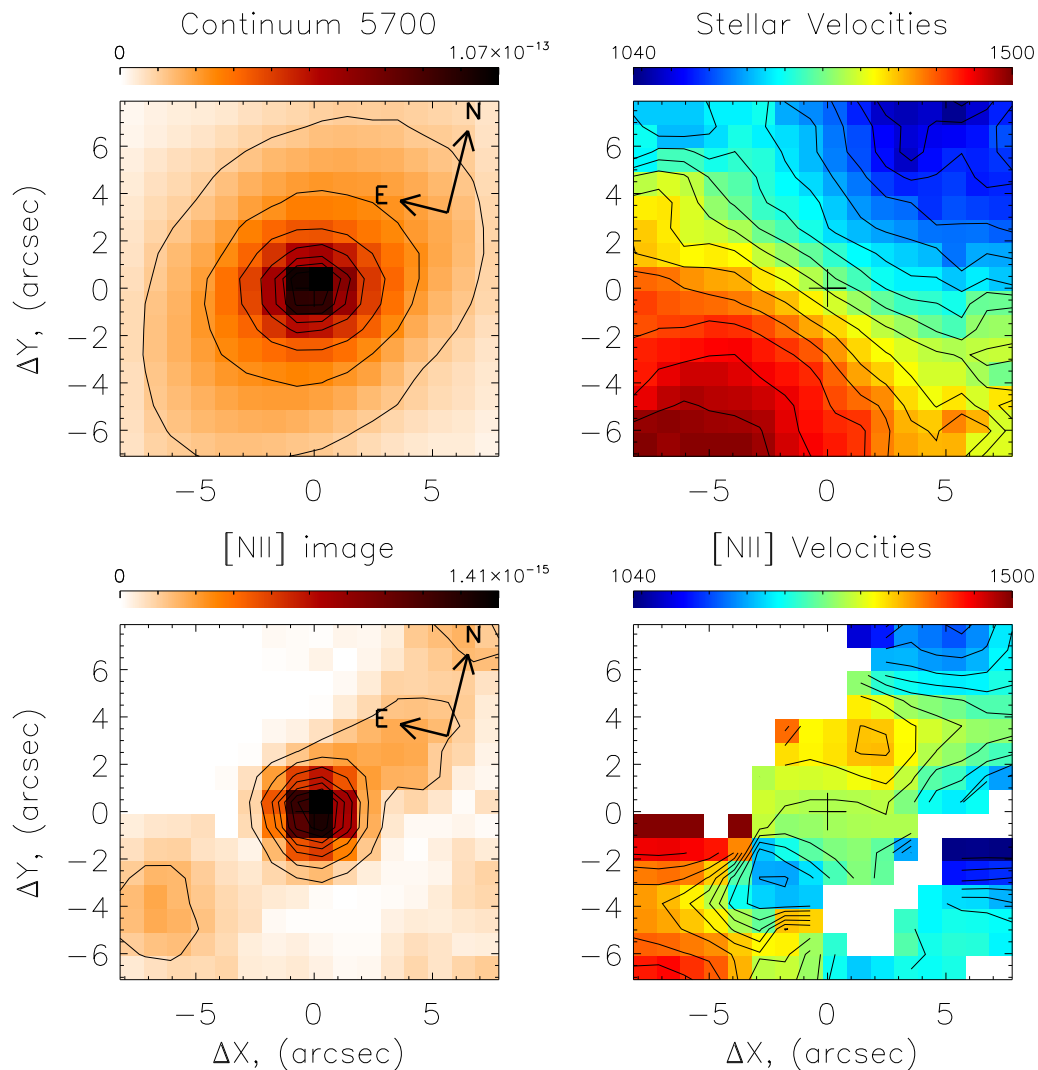


Рис. 2.1 Результаты наблюдений NGC 3945 со спектрографом MPFS (Moiseev et al., 2004). Вверху – изображение в континууме и поле скоростей звезд. Внизу – изображение и поле скоростей в эмиссионных линиях $[\text{NII}]\lambda\lambda 6548, 6883$.

ект представляет большой интерес. Детальное исследование этого феномена позволяет лучше понять особенности эволюции дисковых галактик и их связь с окружением.

В начале данной главы описываются противовращающиеся компоненты, обнаруженные в околядерных областях галактик ранних типов – NGC 3915 и NGC 1316. Далее рассматриваются три линзовидные галактики, в которых при участии автора были найдены протяженные противовращающиеся газовые диски. Особенно интересен случай NGC 7742, где взаимодействие галактик привело к формированию кольца звездообразования. В конце обсуждается наклонный газовый диск в NGC 7743, который хотя и не лежит в плоскости галактики, но по происхождению и механизму ионизации родственен противовращающимся дискам.

2.2 Противовращение центральных областей

2.2.1 Выборка галактик с перемычками: NGC 3945

Линзовидная галактика NGC 3945 входит в список 13 кандидатов в галактики с “двойными барами”, детально изученных в статье Moiseev et al. (2004). Опираясь на изофотный

анализ оптических изображений, Erwin & Sparke (1999) заключили, что внутри крупномасштабного бара, вытянутого вдоль малой оси галактики, на $r = 4 - 18''$ (340–1540 пк, при принятом расстоянии до галактики 17.7 Мпк) располагается околоядерный диск. Поле скоростей звезд в этом внутреннем диске, согласно наблюдениям с панорамным спектрографом MPFS (рис. 2.1), следует круговому вращению, поскольку PA_{kin} совпадает с направлением линии узлов ($PA_0 = 157 \pm 2^\circ$). В поле скоростей газа ситуация более сложная. Измерения лучевых скоростей в дублете [NII] показали, что эмиссионные линии видны вплоть до $10''$ от центра. Внутри радиуса $6''$ (0.5 кпк) лучевые скорости газа близки по максимальной амплитуде к звездным (80 и 120 км/с соответственно), но противоположны по знаку (рис. 2.1). На больших расстояниях направление вращения газа резко меняется и совпадает с вращением звездного компонента. Поле скоростей газа, построенное с ИФП для эмиссионных областей, расположенных во внешнем кольце (см Moiseev et al., 2004), подтверждает факт нормального вращения на больших радиусах от центра, вплоть до $140''$ (~ 11 кпк).

Таким образом, диск ионизованного газа в околоядерной области вращается в противоположном направлении относительно звездного, хотя и располагается в той же плоскости. Если такое поведение связано с захватом галактикой вещества карликового компаньона, то разумно ожидать, что часть звезд, разрушенного приливными силами спутника, должна находиться на противовращающихся орбитах. В том числе и на больших расстояниях от центра, так как известные механизмы перераспределения углового момента при взаимодействии галактик более эффективно действуют на газ, так что он быстрее концентрируется в килопарсековой области, в отличие от звезд. И противовращающийся звездный компонент действительно был обнаружен в недавних спектральных наблюдениях Fabricius et al. (2012) вплоть до расстояний $r = 8''$ (700 пк) от центра. При этом речь идет, скорее всего, именно о звездах бывшего компаньона, поскольку их дисперсия скоростей заметно выше, чем у звезд основного диска.

2.2.2 Кинематически выделенное ядро NGC 1316

Один из ярчайших радиоисточников на небе, гигантская эллиптическая галактика NGC 1316 (Fornax A) располагается в скоплении Печь. Как и во многих других сD галактиках, здесь видны многочисленные следы былых взаимодействий – приливные петли, рукава, пылевые полосы и т.д. Выделяют не менее трех, относительно недавних, поглощений спутников: 3 млрд. лет назад (Goudfrooij et al., 2001) и дважды в более позднюю эпоху (Schweizer, 1980; Mackie & Fabbiano, 1998). Внимательный взгляд на внутренние области Fornax A позволяет и там найти последствия таких событий. Ниже кратко изложены результаты нашего исследования, инициированного, в общем-то, другой задачей, а именно изучением особенностей распределения пылевых и молекулярных облаков на снимках в ближнем инфракрасном диапазоне. Однако выводы о внутреннем строении галактики оказались столь интересными, что мы представили их в отдельной статье (Beletsky et al., 2011).

На рис. 2.2 приведены изображения NGC 1316 в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах (масштаб – 90 пк/'' для принятого расстояния 18.6 Мпк), а также остаточные интенсивности после вычитания двумерной модели, представляющей из себя сплюснутый сфероид Серсика с $n \approx 4$, что типично для распределения яркости эллиптической галактики. В остаточных интенсивностях заметна дископодобная внутренняя структура диаметром около 400-500 пк. И если в оптическом диапазоне наблюдаемую картину сильно портит пылевое поглощение, то инфракрасные изофоты диска искажены значительно меньше. Распределение яркости этого диска в фильтрах $JHKs$, по данным наблюдений с прибором SOFI на 3.6-м телескопе NTT близко к экспоненциальному, с характерной шкалой в разных фильтрах $h_{ma} = 110 - 170$ пк.

Используя только данные фотометрии, мы могли лишь гадать о том, что представляет собой этот избыток яркости. Помочь могла информация о звездной кинематике, поскольку пекулярная структура наблюдается в распределении звездного компонента. Отметим,

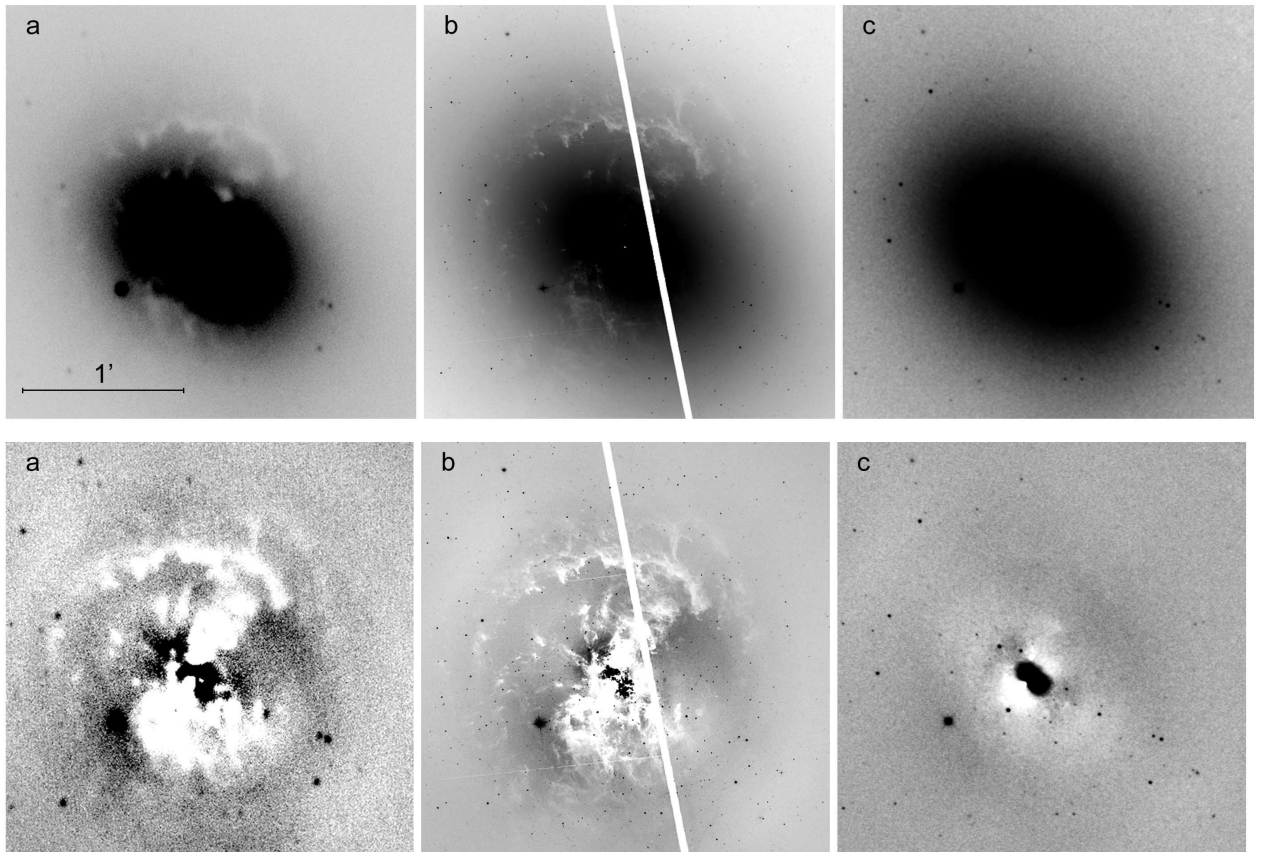


Рис. 2.2 Изображения NGC 1316. Верхний ряд (a) фильтр B (СТЮ, 0.9m), (b) фильтр V (F555W) HST/ASC, (c) фильтр Ks (SOFI/NTT). Нижний ряд: Остатки после вычитания 2D-модели распределения яркости в тех же фильтрах. Более темные градации соответствуют положительным избыткам.

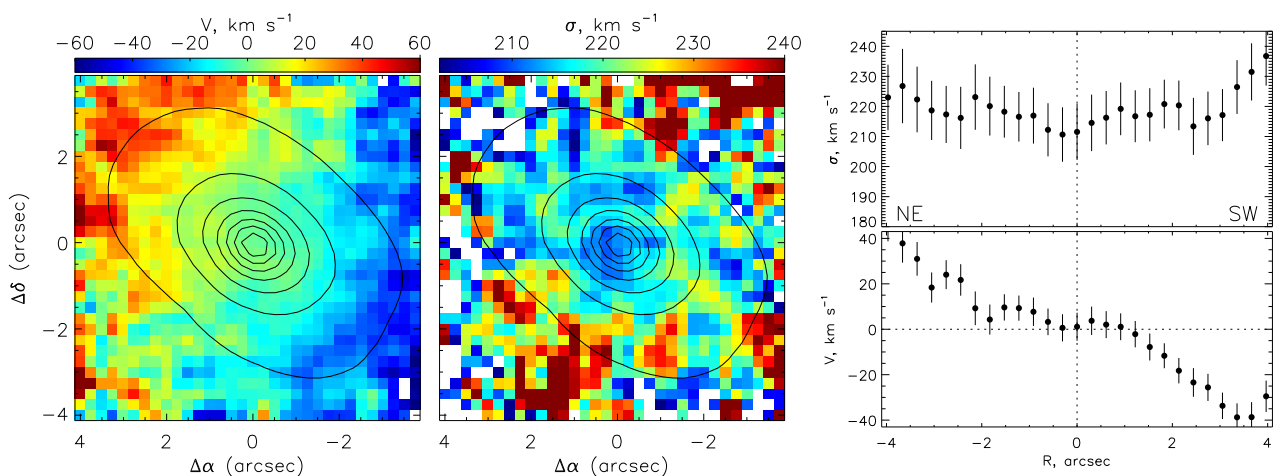


Рис. 2.3 Околяядерная кинематика звезд по данным SINFONI/VLT: поле скоростей (слева) карта дисперсии лучевых скоростей (в центре), наложены изофоты континуума на $2.1\mu m$. Справа показаны распределения скорости и дисперсии скоростей вдоль большой оси диска ($PA = 53^\circ$). Системная скорость принята равной 1785 км/с .

что газ здесь вовлечен в ряд сложных движений, связанных как с джетом из активного ядра, так и с потоками охлаждения остывающего газа, падающего к центру, поэтому кинематика газа и звезд заметно различается. При этом, даже если избыток яркости связан с кинематически выделенным компонентом, эффект, вносимый им в наблюдаемую вдоль луча зрения кинематику, должен быть не очень велик, так как светимость внутреннего диска даже в полосе K_s в пределах $r < 2''$ не превышает 25% от суммарной светимости основного звездного сфероида на этих радиусах, причем этот вклад уменьшается как с ростом расстояния от центра, так и с уменьшением длины волны.

Для кинематического анализа мы использовали данные наблюдений с помощью инфракрасного панорамного спектрографа SINFONI 8-м телескопа VLT, впервые представленные Nowak et al. (2008). Исследование этих авторов было сфокусировано исключительно на самой центральной области, зоне гравитационного влияния сверхмассивной черной дыры, при этом исходные данные сильно заглаживались азимутальным биннингом. Нина Новак любезно предоставила нам уже обработанный куб данных SINFONI (отмеченный как “250 mas data” в их статье), представляющий собой набор спектров в диапазоне $1.95 - 2.45 \mu m$, покрывающих поле $8'' \times 8''$ с дискретизацией $0''.25$.

На рис. 2.3 показаны карты лучевых скоростей (v) и дисперсии скоростей звезд (σ), построенные кросс-корреляционным методом, аналогичным применяемому для анализа данных MPFS (§1.4.2). Заметны две особенности, отличающиеся от простой картины, ожидаемой для вращающегося сплюсненного сфероида. Во-первых, вращение центральной области ($r < 1.5 - 2''$) в проекции на луч зрения практически отсутствует. Разрез поля скоростей вдоль большой оси галактики (рис. 2.3 справа) показывает, что околоядерное распределение лучевых скоростей довольно сложное, есть даже намек на противовращение с малой амплитудой на $r < 1''$ к юго-западу от ядра галактики.

Вторая особенность – центральная депрессия дисперсии скоростей на $r < 2''$, заметная как голубое пятно на карте σ , а также как минимум в радиальном распределении σ вдоль большой оси. Nowak et al. (2008) ранее уже обсуждали возможные причины формирования такого провала в распределении дисперсии (“ σ -drop”), заметного и в данных с более высоким пространственным разрешением. Они пришли к выводу, что наблюдаемый провал связан либо с нетепловым континуумом в излучении активного ядра, либо с динамически холодной звездной подсистемой. Они же показали, что активное ядро искажает звездную кинематику только в самом центре $r \leq 0.06''$. Поэтому σ -drop на больших радиальных масштабах, скорее всего, вызван динамически холодным звездным населением.

Важно, что пространственный масштаб, на котором наблюдаются перечисленные особенности звездной кинематики, хорошо согласуется с шкалой, характеризующей избыток яркости в ИК. Поэтому связь между околоядерной морфологией и кинематически выделенными структурами очевидна. Но почему динамически холодная (с низкой дисперсией скоростей) и видимая с ребра (что является результатом анализа поверхностной яркости) звездная система не показывает заметного вращения в картинной плоскости? Скорее всего, это вызвано противовращением диска относительно основного звездного сфероида. di Matteo et al. (2007) продемонстрировали формирование противовращающегося компонента в центре эллиптической галактики в результате слияния со спиральной галактикой на ретроградной орбите. В проекции на луч зрения мы видим в основном медленное вращение сфероидальной компоненты во внешних областях галактики. Однако ближе к ядру удастся заметить оба кинематических компонента: сфероид и противовращающийся диск, сформированный из остатков поглощенного компаньона. Диск заметен в основном в ближнем ИК-диапазоне, что связано как с малым пылевым поглощением, так и со специфическим звездным населением, его составляющим. Возможно, что здесь присутствуют относительно молодые звезды, рожденные из газа, захваченного со спутника, что и объясняет понижение σ в околоядерной области.

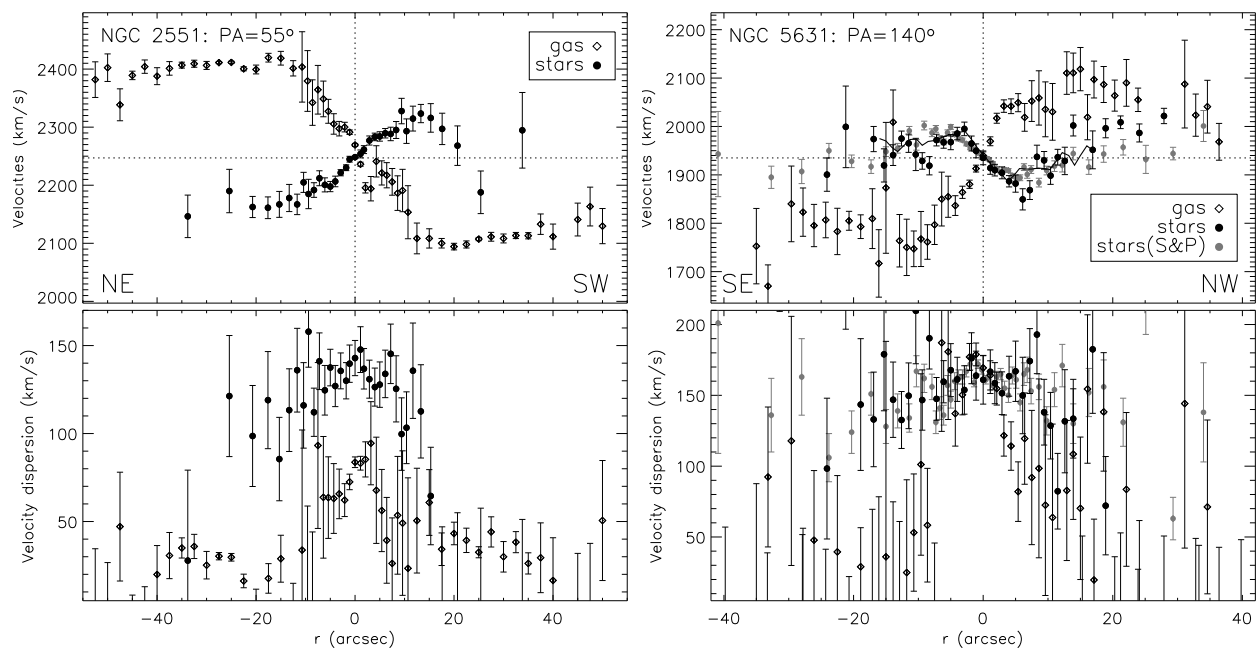


Рис. 2.4 Распределения лучевых скоростей и дисперсии скоростей газового и звездного компонент для галактики NGC 2551 (слева) и NGC 5631 (справа). Наблюдения выполнены со спектрографом SCORPIO, щель располагалась в направлении близком к PA большой оси галактик. Для NGC 5632 серыми точками показаны результаты из работы Simien & Prugniel (2002) для звездного компонента.

2.3 Крупномасштабные противовращающиеся диски

Радиус кинематически выделенных подсистем, описанных выше, не превышает 1 кпк, что типично для большинства известных структур такого рода (см. §2.1). Феномен крупномасштабного противовращения встречается значительно реже. В статье Sil'chenko et al. (2009) приводится список галактик с протяженными противовращающимися газовыми дисками, включая несколько случаев, когда из этого газа уже формируется звездный диск с обратным вращением. Список невелик и содержит всего 13 близких S0–Sb галактик, три из которых исследовались на 6-м телескопе: NGC 2551, NGC 5631 и NGC 7742.

2.3.1 NGC 2551 и NGC 5631

Наблюдения этих двух близких ($D = 37.1$ и 32.1 Мпк, соответствующий масштаб 180 и 156 пк/''') богатых газом S0 галактик, выполненные со спектрографом MPFS в рамках наблюдательной программы О.К. Сильченко (ГАИШ МГУ) “Эволюция галактик в группах”, показали, что газ в пределах поля зрения спектрографа, т.е. в области центрального килопарсека, вращается в другом направлении относительно звезд. Важно отметить, что, судя по построенным полям скоростей, вращение газа и звезд действительно происходит почти точно в одной плоскости (о небольших различиях речь пойдет ниже). Чтобы понять, насколько протяженными могут быть эти диски, мы провели дополнительные исследования со спектрографом SCORPIO в режиме длинной щели. Анализ всего имеющегося набора наблюдений, включая также архивные данные панорамного спектрографа SAURON (4.2-м телескоп WHT) и изображения из обзора SDSS, приводится в нашей статье (Sil'chenko et al., 2009).

Спектры SCORPIO позволили нам одновременно изучить распределение лучевых скоростей и дисперсии скоростей как ионизованного газа (через гаусс-аппроксимацию эмиссионных линий), так и звезд (методом кросс-корреляций, §1.4.2). Соответствующие распределения вдоль больших осей галактик показаны на рис. 2.4. Хорошо видно, что газ и звезды в обеих галактиках вращаются в противоположных направлениях вплоть до

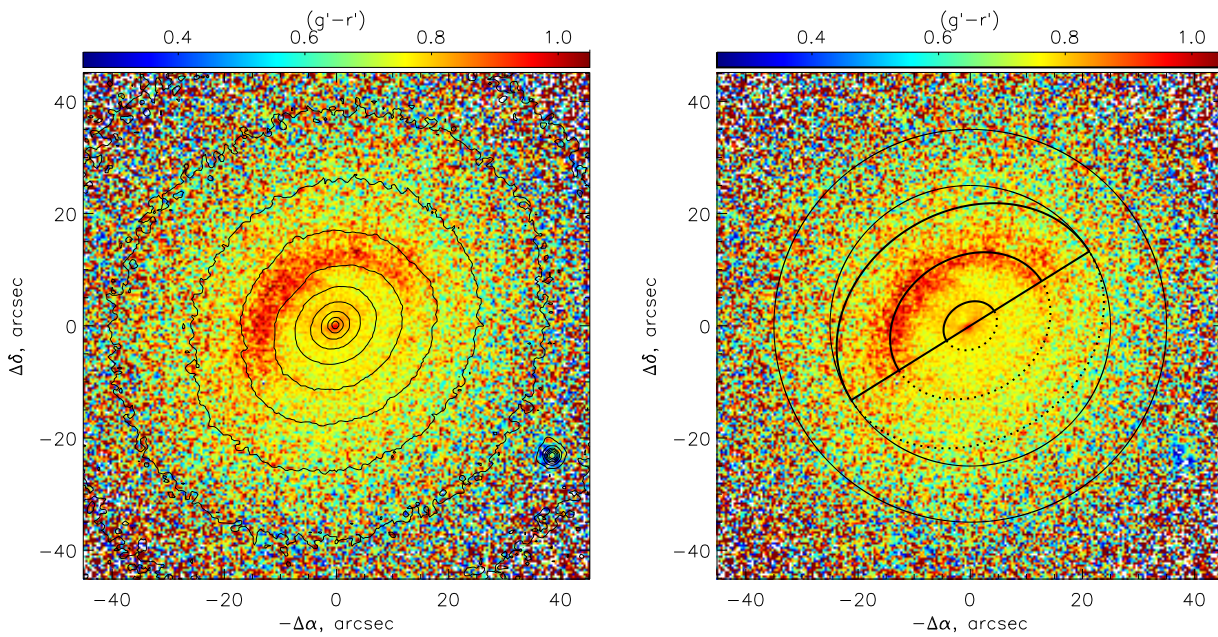


Рис. 2.5 Карта показателя цвета $(g - r)$ для NGC 5631 по данным SDSS, на которую наложены изофоты r -изображения (слева) и схематически показана ориентация газового и звездного дисков (справа). Принятые параметры для газопылевого диска: $i = 35^\circ$, $PA = 122^\circ$.

самых внешних частей. В NGC 2551 газовый диск тянется вплоть до $r = 55''$ (9.9 кпк), что даже чуть больше оптического диаметра $R_{25} = 8.5$ кпк. Аналогично, в NGC 5631 удается проследить противовращающийся газовый диск до $r \approx 35''$ (5.4 кпк, $0.7R_{25}$).

То, что в обоих случаях амплитуда вращения звездного компонента заметно меньше, чем у газового, неудивительно. Это известный эффект “асимметричного дрейфа” – наблюдаемая скорость вращения подсистемы тем ниже, чем выше ее дисперсия скоростей (см. примеры и моделирование для случая линзовидных галактик в работе Засов и др., 2008). Но необычно, что в NGC 5631 на $r \approx 20''$ вращение звездного компонента падает до нуля, а с дальнейшим ростом расстояния от центра есть даже намек на противовращение, т.е. движение в ту же сторону, что и у газа. Такое поведение наблюдается вдоль обоих полученных спектральных разрезов с $PA = 115, 140^\circ$, вблизи ее большой оси ($PA_0 = 126 \pm 2^\circ$). Внимательное рассмотрение формы кросс-корреляционного пика, отражающего распределения лучевых скоростей вдоль луча зрения (line-of-sight velocity distribution = LOSVD), показывает, что на расстояниях больше 1.5–2 кпк от центра в LOSVD заметна двухпиковая структура. По-видимому, мы наблюдаем сразу два противовращающихся звездных компонента: балдж и диск галактики, а также звезды разрушенного спутника.

Анализ оптических изображений SDSS показывает, что профиль яркости NGC 5631 описывается балджем Серсика и двумя экспоненциальными дисками. Причем внешний диск, доминирующий в яркости на $r > 30-40''$, ориентирован почти плашмя, но внутренний диск либо овален, либо наклонен под углом $i \approx 35^\circ$. И именно с этим компонентом связан противовращающийся компонент, чей вклад в LOSVD становится заметным тогда, когда яркость внутреннего диска начинает превышать яркость балджа. На рис. 2.5 приведено распределение показателя цвета $(g - r)$ в этой галактике, на котором хорошо заметно пылевое (“красное”) полукольцо. Наблюдаемую картину, вместе с отмеченными особенностями распределения яркости, удастся объяснить в предположении, что звездно-газовый противовращающийся диск еще не до конца спрецессировал в плоскость галактики, а наклонен к ней под углом не более $30-35^\circ$. Правая панель на рис. 2.5 показывает предполагаемую взаимную ориентацию основной плоскости галактики (внешний диск) и противовращающегося внутреннего компонента. Внутренний диск развернут так, что его юго-западная сторона скрыта от нас балджем галактики.

Обе рассмотренные галактики принадлежат к рассеянным группам (Geller & Huchra, 1983), но не имеют близких (в пределах 100 кпк) соседей, аккреция вещества которых могла бы привести к формированию массивных противовращающихся дисков. Судя по всему, в NGC 2551 и NGC 5631 мы видим две последовательные стадии одного и того же процесса – поглощения маломассивного богатого газом спутника, имеющего соответствующее (т.е. обратное) направление момента вращения. При этом в захваченном газе может начаться вспышка звездообразования, инициированная взаимодействием. Отношение интенсивностей линий $H\alpha/[NII]$, согласно измерениям со SCORPIO, указывает на то, что во внутренней области $r < 40''$ NGC 2551 основной вклад в ионизацию вносит излучение молодых звезд. Но на больших расстояниях от центра в этом спектральном диапазоне мы видим только одну эмиссионную линию $[NII]\lambda 6583$, что косвенно указывает на ударные волны, как основной источник ионизации газа. В NGC 5631 в противовращающемся газовом диске нет современного звездообразования, ионизация газа, согласно имеющимся спектрограммам, во всем диапазоне радиусов обеспечивается ударными волнами. Скорее всего, здесь прецессия разрушенного спутника в плоскость галактики не закончилась, газ еще не опустился в плоскость галактики и не сжался до требуемой плотности. Закономерным финалом дальнейшей эволюции таких структур является галактика, в которой сосуществуют сразу два противовращающихся звездных диска – прежний и более молодой, сформировавшийся из аккрецированного газа. Такие объекты наблюдаются редко, но они известны, например NGC 4138 (Thakar et al., 1997).

2.3.2 Кольцевая галактика NGC 7742

Формирования кольцевых структур

На взгляд автора, NGC 7742 является одним из лучших примеров противовращения газового и звездного дисков. Но в начале следует немного остановиться на проблеме кольцевых структур в галактических дисках, к которой мы еще будем возвращаться в последующих главах.

Концентрические кольцевые структуры достаточно часто заметны на изображениях галактик. Прежде всего, это относится к спиральным галактикам с перемычками (морфологические типы SBa–SBd), хотя в некоторых случаях кольца обнаруживаются и в галактиках без баров. Диапазон возможных размеров весьма велик: от ультракомпактных околядерных колец размером 30–40 пк (Comerón et al., 2008), до гигантских столкновительных колец диаметром в сотню килопарсек (Ghosh & Mapelli, 2008). Даже с чисто эстетической точки зрения, кольца на оптических снимках выглядят весьма выразительно, во многом благодаря тому, что здесь часто концентрируются очаги современного звездообразования, молодые звезды и газопылевая материя. Этим они напоминают спиральные рукава галактик, более того, исследователи часто используют термин “псевдокольцо” для описания туго закрученных спиральных ветвей. Действительно, в обоих случаях мы, как правило, сталкиваемся с результатом работы коллективных процессов в звездно-газовых дисках. Существует несколько причин, по которым в галактиках образуются кольцевые структуры. Это иногда приводит к путанице в терминологии, когда даже специалисты, говоря о “галактических кольцах”, имеют в виду только какой-то один, строго определенный тип таких колец. В тоже время, по механизму образования их можно разделить на следующие три основных класса:

- Кольца, связанные с внутренними и внешними линдбладовскими резонансами галактического диска (в дальнейшем – “резонансные”). Это самый многочисленный тип, встречающийся среди более чем 20% близких спиральных галактик (Buita & Combes, 1996), в подавляющем большинстве это галактики с перемычками.
- Значительно реже встречаются кольцевые волны плотности в столкновительных кольцевых галактиках. Термин “столкновительные кольца”, возможно, не очень удачен, являясь калькой с английского “colliding rings”, но верно передает смысл процес-

са взаимодействия галактик, порождающего подобные структуры, рассматриваемые далее в главе 3.

- Полярные кольца также являются результатом взаимодействия галактик (см. далее главы 4 и 5). Сюда же можно отнести и разного рода кольцеобразные приливные структуры и “приливные потоки”.

Таким образом, в невозмущенном внешним воздействием галактическом диске следует ожидать только образование резонансных колец и псевдоколец звездообразования. В подавляющем большинстве они морфологически связаны с неосесимметричным возмущением гравитационного потенциала центральной переемычкой (баром). Эта связь, установленная сперва в наблюдениях, позднее нашла подтверждение в многочисленных теоретических работах и модельных расчетах, обзор которых дан Buta & Combes (1996). Условие резонанса между угловой скоростью вращения бара Ω_p , скоростью дифференциального вращения диска $\Omega(r)$ и эпициклической частотой $\kappa(r)^2 = r \frac{d\Omega(r)^2}{dr} + 4\Omega(r)^2$ записывается в виде:

$$\Omega_p = \Omega \pm \kappa/m,$$

При $m = 2$ (азимутальная гармоника, соответствующая бару) знак плюс соответствует внешнему (OLR), а минус — внутреннему (ILR) линдбладовскому резонансу. В области резонансов резко меняется ориентация периодических орбит, составляющих “орбитальный каркас” бара. Под воздействием неосесимметричного потенциала переемычки возникает момент сил, действующий таким образом, что газ из областей с $r < r_{CR}$ перемещается ближе к ядру, а из областей с $r > r_{CR}$ наоборот движется наружу. Знак момента сил меняется на радиусе коротации, где $\Omega_p = \Omega(r_{CR})$. Численные расчеты показывают, что в областях резонансов газ накапливается, так как здесь радиальные движения прекращаются. Возможна ситуация, когда большая часть газа диска сконцентрируется на резонансах. При достижении необходимой плотности газа вспыхивает звездообразование и в дальнейшем мы видим не только газовые, но и звездные кольца (Combes, 2001). Теория неплохо согласуется с большинством наблюдательных данных, в частности объясняет эмпирическое разделение колец на ядерные (размером около 1 кпк, расположенные на ILR), внешние (расположенные на OLR) и внутренние, соответствующие ультрагармоническому резонансу 1:4 (UHR), расположенному между ILR и коротацией (Buta & Crocker, 1993).

Наибольший интерес представляют факты, выпадающие из общей картины формирования резонансных колец, например присутствие четко выраженных колец в галактиках без бара. При этом морфологически кольца выглядят очень похоже на “внутренние” (радиусом 1–3 кпк) резонансные структуры. В некоторых случаях здесь удается все-таки найти малоконтрастное неосесимметричное возмущение, вроде трехосного балджа или “овальной дисторсии”, достаточной чтобы заменить действие потенциала переемычки (Jungwiert & Palous, 1996). Либо же говорят о том, что бар в галактике был, но разрушился (Athanassoula, 1996) под воздействием внутренних или внешних факторов. Еще одна возможность — гравитационное резонансное возмущение диска в процессе близкого прохождения или даже поглощения компаньона (Buta et al., 1992; Knapen et al., 2004; Тутуков и Федорова, 2006). Последний из перечисленных механизмов, возможно, наиболее вероятен, но требует проверки как численными расчетами, так и наблюдениями.

Кинематика и структура NGC 7742

Одним из наиболее известных примеров кольцевой галактики без бара является NGC 7742 морфологического типа Sb. Кольцо звездообразования, радиусом 8 – 12'' (0.7–1.1 кпк при принятом расстоянии $D = 19.2$ Мпк и шкале 93''/пк) настолько выразительно (рис.2.6), что изображение галактики, полученное с HST, красуется на постерах проекта “Hubble Heritage”. Относительно наблюдателя диск расположен почти точно в положении

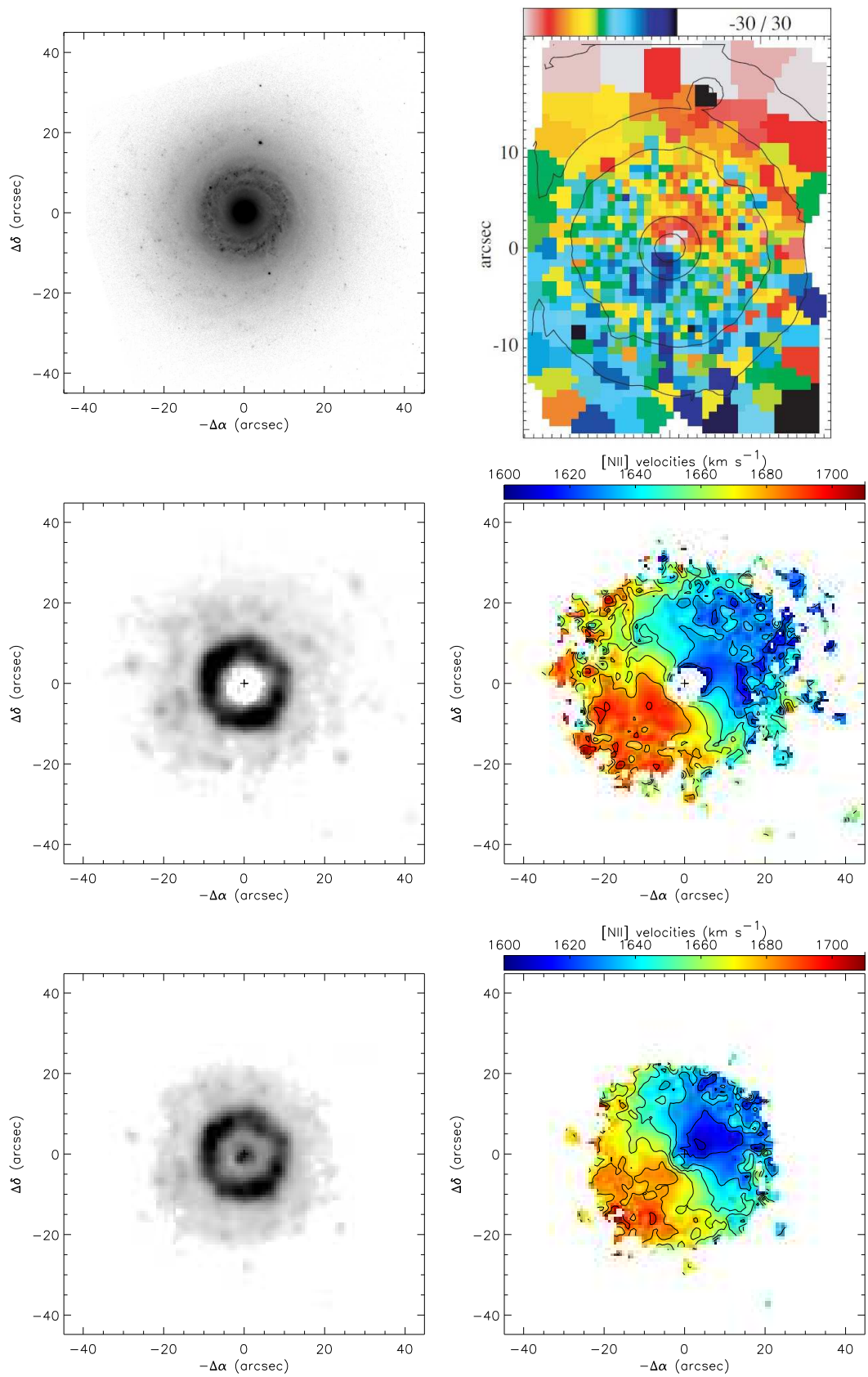


Рис. 2.6 NGC 7742. Верхний ряд: оптическое изображения с WFPC2/HST в фильтре $F675W$ (слева) и поле скоростей звезд (справа) по данным SAURON (Falcón-Barroso et al., 2006). Средний ряд: наблюдения в линии $H\alpha$ со сканирующим ИФП. Слева – карта распределения яркости, справа – поле скоростей ионизованного газа. Нижний ряд - тоже самое в линии $[NII]\lambda 6583$.

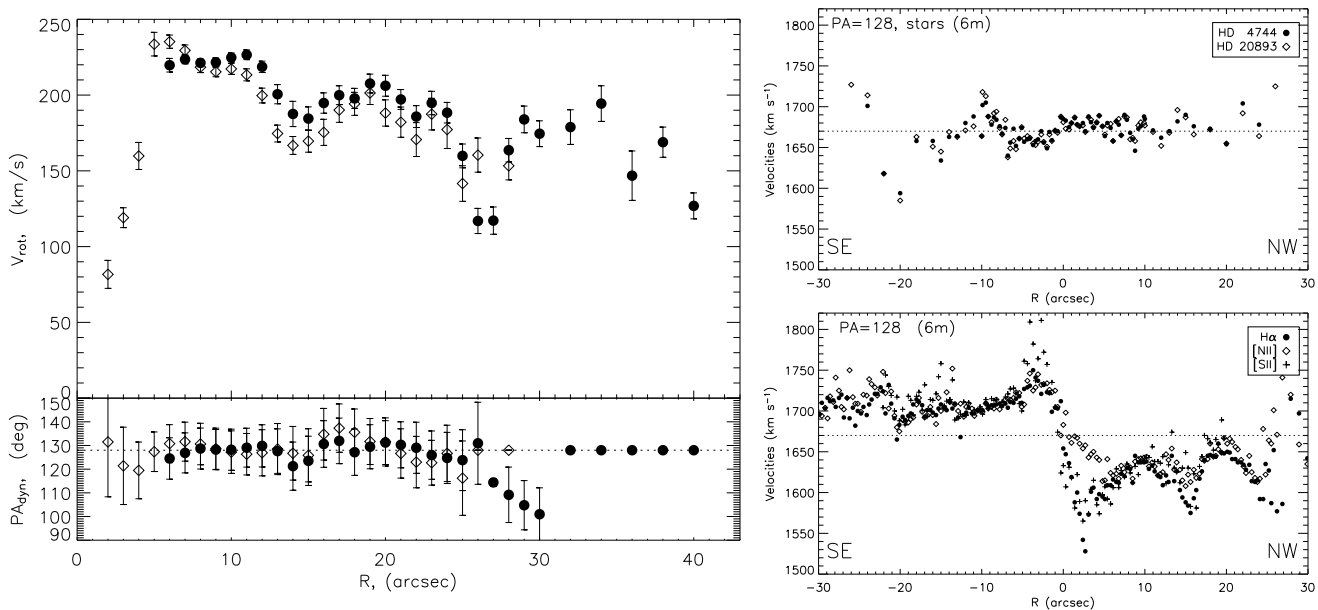


Рис. 2.7 Слева: радиальные изменения скорости вращения и PA_{kin} , измеренные по полям скоростей $H\alpha$ (черные точки) и $[NII]$ (ромбики). Справа: распределения лучевых скоростей вдоль щели спектрографа. Верхняя панель – звездное население (указаны два варианта используемых кросс-корреляционных шаблонов), внизу – эмиссионные линии ионизованного газа. Пунктиром показана системная скорость.

“плашмя” ($i \approx 0$), поэтому, рассматривая ориентацию и сжатие изофот, легко убедиться в отсутствии бара. Наблюдения с панорамным спектрографом SAURON позволили обнаружить противовращение газовых и звездных компонент, по крайней мере, на $r \leq 10''$ (de Zeeuw et al., 2002). Вопрос о том, насколько протяженным является противовращающийся диск оставался открытым. Поэтому по инициативе О.К. Сильченко было предпринято комплексное изучение кинематики и структуры галактики на 6-м телескопе САО РАН с помощью приборов MPFS и SCORPIO. Ниже представлены основные результаты этой работы, подробно описанные в нашей статье (Sil’chenko & Moiseev, 2006).

На рис. 2.6 показаны результаты наблюдения NGC 7742 со сканирующим ИФП на 6-м телескопе. В изучаемый спектральный диапазон попадали сразу две эмиссионные линии – $H\alpha$ и $[NII]\lambda 6583$. Два набора измерений хорошо дополнили друг друга: в области балджа эмиссия $H\alpha$ “проваливается” внутрь контрастной звездной абсорбции, а во внешних областях эта линия относительно ярче, что позволяет проследить движения ионизованного газа вплоть до $r = 40 - 45''$, в несколько раз дальше, чем по данным SAURON. Сравнение с полем скоростей звезд ясно показывает, что не только внутренняя часть, но весь газовый диск вращается в противоположном направлении. Определенные в рамках модели регулярно вращающегося плоского диска параметры ориентации равны: $i_{gas} = 9 \pm 4^\circ$, $PA_{gas} = 128 \pm 1^\circ$. Угол наклона i хотя и мал, но достаточен, чтобы создать заметный градиент лучевых скоростей в картинной плоскости. Кривая вращения газового диска и радиальные вариации PA_{kin} , определенные методом “наклонных колец”, приводятся на рис. 2.7. Видно, что значимых изгибов диска нет как минимум до $r = 30''$, далее данные уже не очень уверенные. Во всяком случае, в отличие от рассмотренного выше случая NGC 5631, у нас нет оснований считать, что плоскости газового и звездного дисков не совпадают. Хотя кинематические параметры по полю скоростей звезд определяются не очень уверенно ($PA_* \approx 325^\circ = PA_{gas} + 197^\circ$), ориентация поля скоростей ионизованного газа неплохо согласуется с ориентацией внешних изофот звездного диска.

На рис. 2.7 также показаны разрезы лучевых скоростей вдоль большой оси галактики, полученные со SCORPIO/LS. В распределении лучевых скоростей звезд обращает на себя внимание разброс значений на $r = \pm 10''$ от ядра. Мы считаем, что здесь заметный вклад в наблюдаемый спектр вносят звезды классов F-G-K, рожденные в кольце звездообразования в противовращающемся газовом диске.

В области $r < 3''$ заметен резкий рост лучевых скоростей по данным щелевых наблюдений. В поле скоростей эта особенность менее заметна из-за более низкого пространственного разрешения наблюдений с ИФП ($2''.5$ против $1''.5$). Формально лучевые скорости в 150 км/с должны соответствовать нереально высокой скорости вращения $\sim 960 \text{ км/с}$. Очевидно, что это не может быть вращением в плоскости галактики. Fathi (2004), рассмотрев поле скоростей газа с SAURON, где, кроме отмеченного роста амплитуды скоростей, так же наблюдается разворот PA_{kin} на $r < 2''$, предположил, что речь идет о радиальных потоках газа. Но существование истечения со скоростями в сотни км/с выглядит сомнительно, так как ядро не является активным и звездообразование там умеренное. Более разумным выглядит предположение о том, что внутри 300 пк от центра наблюдается круговое вращение, но в плоскости, заметно наклоненной к звездному диску. Оценка по амплитуде вращения показывает, что наклон диска к лучу зрения $i \geq 35^\circ$. Такие наклонные или полярный мини-диски уже обнаружены в ряде близких галактиках. Им посвящена глава 5. Пока лишь заметим, что наиболее вероятная причина образования таких структур – захват вещества компаньона.

Анализ снимка в полосе V показал, что, аналогично описанному выше случаю NGC 5631, азимутально усредненный профиль поверхностной яркости лучше всего описывается балджем и двумя экспоненциальными дисками. Внешний диск доминирует на $r > 40''$, его центральная яркость $\mu_{0,V} = 21.04^m/\square''$ и шкала $r_0 = 1.9 \text{ кпк}$ типичны для дисков спиральных галактик (Freeman, 1970; de Jong, 1996). Внутренний диск значительно более компактен и ярк: $\mu_{0,V} = 18.45^m/\square''$ и $r_0 = 0.67 \text{ кпк}$, именно в нем локализовано кольцо звездообразования.

Резонансные кольца как результат взаимодействия

Интересно, что перечисленные структурные особенности, необычные сами по себе, встречаются и в других “кольцевых галактиках без баров”. В статье Sil’chenko & Moiseev (2006) мы рассматриваем Sb-галактику NGC 7217, которая так же как и NGC 7742 имеет двухъярусный диск (внешний – с типичными для спиральных галактик параметрами, внутренний – яркий и компактный), внутренний полярный диск диаметром несколько сотен парсек, а также противовращающийся компонент (около трети звезд диска движется по орбитам в обратном направлении). Все эти признаки обычно связаны со взаимодействием или поглощением спутника. Для NGC 7217 в свое время предлагался сценарий, согласно которому в галактике изначально существовал бар, впоследствии разрушенный гравитационным воздействием компаньона (Athanassoula, 1996). Но представляется крайне сомнительным, чтобы кольца выжили после столь сильного воздействия на диск, во всяком случае, нам неизвестны примеры численных моделей, это подтверждающих. Более естественным представляется вариант, когда кольца образуются уже после (или в процессе) взаимодействия. Действительно, при определенных условиях возмущение гравитационного потенциала в результате пролета компаньона будет сходно с воздействием бара на диск галактики (Смирнов и Комберг, 1978; Buita et al., 1992). Сходная идея была предложена Knapen et al. (2004) для объяснения кольца звездообразования галактики NGC 278, во внешних областях которой в HI обнаруживаются приливные структуры – свидетельства недавнего взаимодействия. А опубликованный профиль яркости NGC 278 имеет ту же многоярусную структуру, что и в NGC 7217 и NGC 7742. Почти сразу после публикации нашей работы с исследованием этих двух галактик появилась статья, в которой авторы, используя дополнительные спектральные наблюдения, также пришли к выводу, что причиной образования кольца звездообразования в NGC 7742 явилось поглощение карликового спутника, богатого газом (Mazzuca et al., 2006).

Еще одним аргументом в пользу предложенного сценария формирования кольцевых структур служит работа Тутукова и Федоровой (2006), опубликованная почти одновременно с нашей статьей о NGC 7742. Здесь авторы, используя численные расчеты взаимодействия галактик, показали, что в случае движения компаньона в экваториальной плоскости против направления вращения основной галактики его гравитационное воз-

действие на диск приводит к формированию в нем кольцевой структуры. Конечно, самосогласованная модель таких объектов должна включать не только близкие прохождения, но и последующее слияние с поглощением компаньона. Тем не менее, первый шаг на этом пути уже сделан.

2.4 Наклонный диск в NGC 7743

Среди галактик сравнимой светимости ближайшей к NGC 7742 является NGC 7743. Проекционное расстояние между ними $50'$ (279 кпк), системные скорости различаются всего на 50 км/с. На первый взгляд, это типичная линзовидная галактика с перемычкой, морфологический тип – (R)SB0⁺(s), светимость, согласно базе данных HyperLeda $M_B = -19.4$. На оптически снимках галактики доминирует гладкая двухрукавная структура (рис. 2.8) без заметных областей звездообразования. Согласно Ho et al. (1997), NGC 7743 обладает активным ядром типа Sy 2. В свое время внимание автора привлек поворот внутренних изофот, благодаря которому объект был включен в список галактик с двойными барами (Moiseev, 2001b). Но исследовав морфологию и кинематику окооядерной области более детально, в том числе и с панорамным спектрографом MPFS, мы пришли к выводу, что поворот изофот, ранее приписывавшийся трехосному балджу, на самом деле вызван искажениями, которые вносит в оптические изображения окооядерная пылевая спираль, заметная на снимках HST (Martini et al., 2003) на $r < 300 - 500$ pc. В статье Moiseev et al. (2004) мы заподозрили, что на этих же масштабах внутренняя часть диска возможно наклонена относительно внешней.

Впоследствии по заявке А.В. Засова (ГАИШ МГУ) с помощью SCORPIO на 6-м телескопе САО РАН были получены достаточно глубокие спектры NGC 7743 с целью определения степени динамического нагрева звездного диска на основании сравнения кривой вращения и радиального распределения дисперсии скоростей с модельными оценками. Но оказалось, что слабые эмиссионные линии обнаруживаются не только в ядре, а прослеживаются почти до границ оптического диска. При этом движения ионизованного газа систематически отличаются от вращения звездной компоненты. Последующие спектральные наблюдения подтвердили это предположение. Ниже приводятся основные результаты нашего исследования кинематики и состояния ионизации газа NGC 7743, подробно описанные в статье Katkov et al. (2011b).

Здесь и далее принимается расстояние до галактики 19.2 Мпк (Jensen et al., 2003), что соответствует масштабу $93''/пк$.

2.4.1 Кинематика звезд и газа

Первые наблюдения галактики со SCORPIO/LS проводились в 2007 г. с целью изучения кинематики звездного населения, поэтому был выбран “зеленый” спектральный диапазон, 4800–5550 Å, включающий как контрастные абсорбционные линии звездного населения, так и эмиссионные линии H β и [OIII]. После того, как были обнаружены отличия в движениях газа и звезд, в 2008–2009 г. мы провели дополнительные наблюдения в диапазоне 6100–7100 Å, включающим наиболее яркие эмиссии ионизованного газа H α , [NII] и [SII]. В итоге были получены спектральные разрезы в четырех направлениях (рис. 2.8), а для подробного изучения центральной области использовались архивные спектры, полученные с на 4.2-м телескопе WHT с панорамным спектрографом SAURON. Галактика наблюдалась в двух положениях линзового раstra, так что итоговое поле зрения составило $35'' \times 50''$ при масштабе $0.94''$ на линзу.

Первичная обработка спектров проводилась по стандартным алгоритмам, но для вычитания спектра ночного неба И.Ю. Катков (ГАИШ МГУ) разработал более прецизионную методику, учитывающую вариации аппаратного профиля (LSF=Line Spread Function) вдоль щели спектрографа (Katkov & Chilingarian, 2011). Определение кинематических параметров (v , σ) и параметров звездного населения (возраст – T , металличность – $[Z/H]$) выполнялось методом прямой подгонки спектров моделями PEGASE.HR

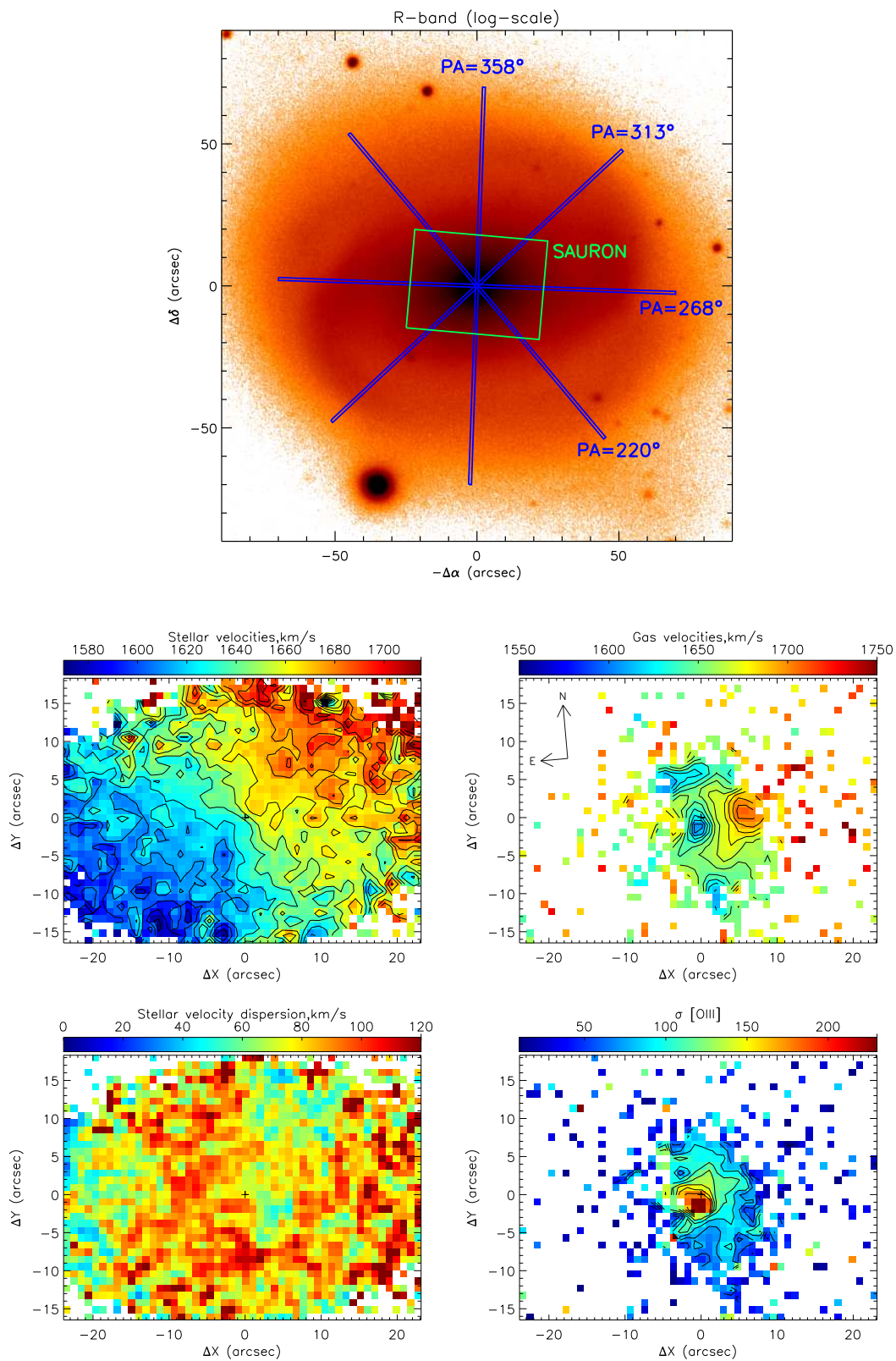


Рис. 2.8 Изображение NGC 7743 в полосе R, взятое из работы Moiseev et al. (2004). Показано расположение щелей спектрографа SCORPIO и мозаика полей SAURON. Ниже приведены карты построенные по данным SAURON: поля лучевых скоростей газа и звезд (средний ряд), соответствующая дисперсия скоростей (нижний ряд).

(Le Borgne et al., 2004) с помощью пакета ULySS (Koleva et al., 2009). После вычитания из спектров моделей ULySS измерялись лучевые скорости и потоки в эмиссионных линиях путем их аппроксимации гауссианами.

Кинематические профили звезд и газа, отношение потоков в линиях, а также профили параметров звездного населения представлены на рис. 2.9. Наши измерения v и σ звездного компонента по данным длиннощелевой спектроскопии (рис. 2.9) хорошо согласуются с данными SAURON для центральной части галактики (рис. 2.8). Профили дисперсии скоростей вдоль разных разрезов несколько различаются. Вдоль $PA = 313$ и 358° четко выражен пик, достигающий в центре 80 км/с, в то время как вдоль $PA = 268^\circ$, когда щель ориентирована вдоль бара, наблюдается центральное плато. Сложное распределение σ подтверждается картой SAURON, где в центральной области ($r < 5''$) дисперсия скоростей уменьшается (рис. 2.8). Wozniak et al. (2003) считают, что подобные особенности в распределении дисперсии скоростей (“sigma-drop”) в галактиках с перемычками связаны с околядерными дисками, состоящими из динамически холодного молодого звездного населения (см. также §2.2.2). Присутствие молодого населения в ядре NGC 7743 подтверждается нашими измерениями, которые дают для ядра $[Z/H] = +0.2$ и возраст 1.2 млрд лет, а для балджа — $[Z/H] = -0.33$ и возраст 2.2 млрд лет. Очевидно, речь идет о совсем недавней вспышке звездообразования в ядре.

Кинематические параметры ориентации звездного диска определялись в рамках модели чисто кругового вращения плоского диска. Одновременно аппроксимировались три профиля лучевых скоростей (наиболее протяженные измерения в “зеленом” диапазоне) и все поле скоростей SAURON. Наилучшая модель соответствует наклону диска к лучу зрения $i_{star} = 40 \pm 2^\circ$ и позиционному углу большой оси $PA_{star} = 310 \pm 5^\circ$. Крупномасштабный бар может вносить искажение в поле круговых скоростей звезд, но мы считаем, что эти искажения в случае NGC 7743 невелики. Это следует из того, что формальный расчет радиальных изменений позиционного угла кинематической оси дает очень небольшие вариации (в пределах $1-2$ градусов) от среднего значения для всего поля скоростей SAURON ($r < 25''$). Действительно, если бы бар вносил сильные искажения, то были бы заметны радиальные изменения PA_{kin} , связанные с переходом через резонанс ILR, кроме того, в самом центре доминировало бы вращение балджа с PA_{kin} равным PA диска. Мы попробовали при поиске параметров ориентации исключить область бара и использовать только точки на $r > 30''$. Такой расчет дает сходную с приведенной выше оценку PA_{star} , но i уверенно определить не удается.

Движения газа более сложные, чем движения звезд, и плохо с ними согласуются, за исключением разреза, проходящего через $PA = 268^\circ$. В то же время, вдоль $PA = 358^\circ$, проекции скоростей газового и звездного компонент на луч зрения направлены в разные стороны. По данным SAURON построено хорошо заполненное поле скоростей ионизованного газа только для самой внутренней части диска ($r < 8''$). В то же время, благодаря длительным многочасовым наблюдениям со SCORPIO, нам удалось выделить линии ионизованного газа на тех же расстояниях, где измерена и звездная кинематика — до $60''$ (5.6 кпк) от центра.

Вдоль малой оси звездного диска ($PA = 220^\circ$), где проекция скорости вращения почти нулевая, в газе наблюдаются значительные возмущения амплитудой $50 - 70$ км/с. Сравнивая поведение лучевых скоростей в разных разрезах, мы приходим к выводу, что характер движений ионизованного газа внутри центрального килопарсека заметно отличается от внешнего газового диска. Скорее всего, на $r < 10''$ работает как минимум два эффекта: во-первых, это воздействие активного ядра на окружающий газ, а во-вторых — некруговые движения газа, индуцированные околядерной спиральной структурой, расположенной вне плоскости звездного диска. Во внешнем газовом диске мы видим в той или иной степени регулярное вращение, но явно в другой относительно звезд плоскости.

Задача по восстановлению вращения внешнего газового диска значительно сложнее, чем для звездного, так как в поле зрения SAURON почти отсутствует эмиссия на $r > 8 - 10''$, а ошибка отдельных измерений по данным SCORPIO велика. Кроме того, есть значимые различия скоростей, оцениваемых по линиям с разным механизмом воз-

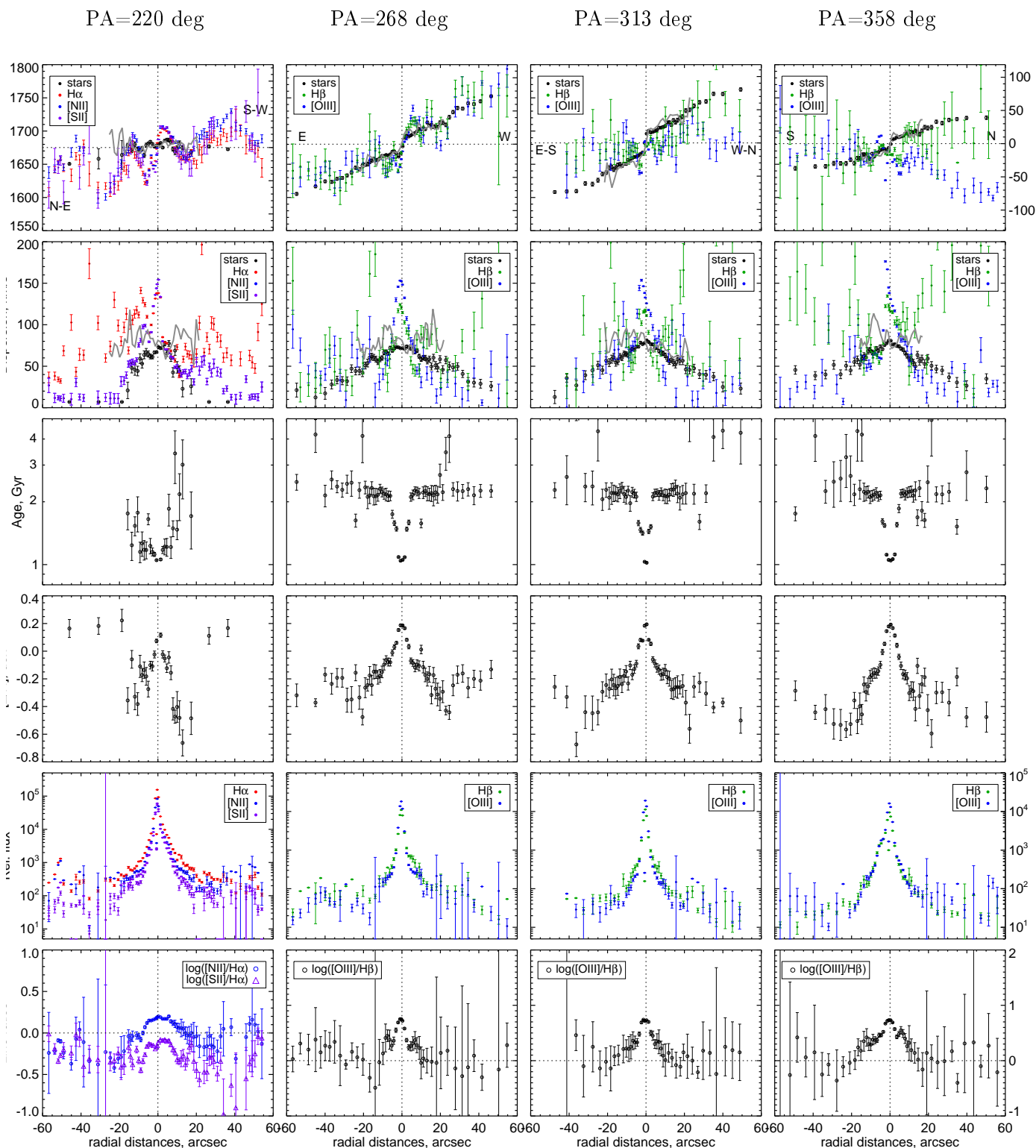


Рис. 2.9 Результаты длиннощелевых наблюдений. Каждый столбец соответствует позиционному углу, указанному сверху, для $PA = 220^\circ$ данные приведены для “красного” диапазона, в остальных случаях – для “зеленого”, в котором кинематика звезд измеряется лучше. Сверху вниз: радиальные профили лучевых скоростей, дисперсии скоростей, возраста, металличности звезд, интенсивностей эмиссионных линий (в условных единицах) и отношения потоков в линиях.

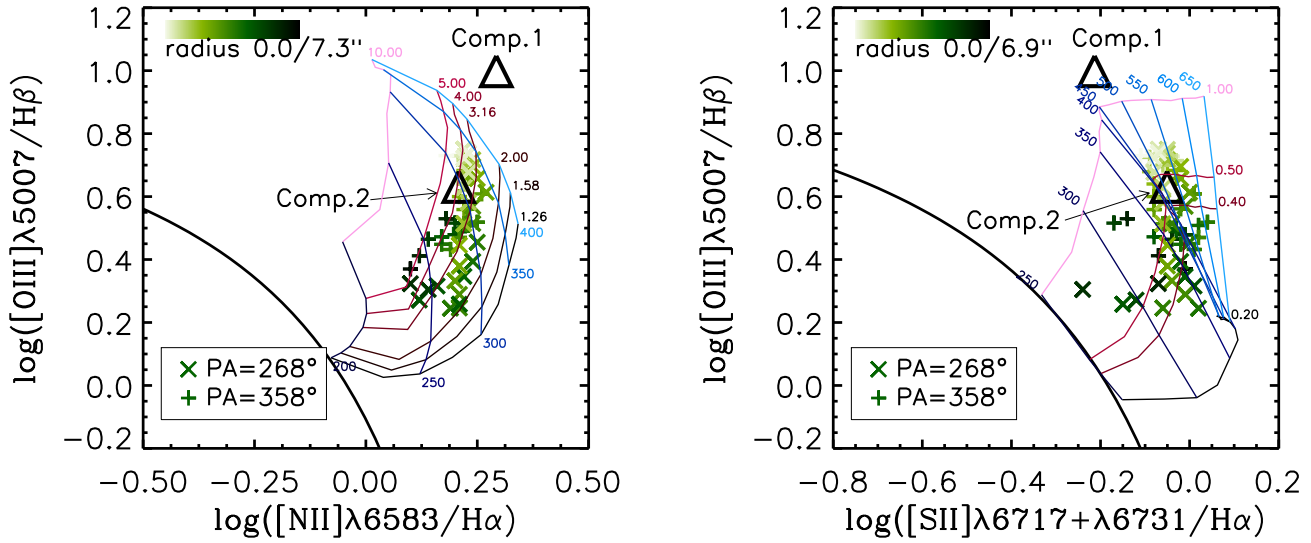


Рис. 2.10 Диагностические диаграммы отношений потоков в линиях $[OIII]/H\beta$, $[NII]/H\alpha$ и $[SII]/H\alpha$. Прямыми и наклонными крестиками обозначены разные спектральные разрезы. Уровень яркости зеленого цвета соответствует видимому расстоянию от центра в картинной плоскости. Жирная черная кривая, разделяющая области с механизмами ионизации AGN/HII, взята из Kewley et al. (2001). В областях на диаграмме выше этой линии доминирует ионизация ударными волнами и активным ядром, в областях ниже – фотоионизация молодыми звездами. На наблюдаемые точки наложена модель ударного возбуждения газа “shock+precursor” (Allen et al., 2008) для электронной плотности $n_e = 0.1$ и солнечного обилия тяжелых элементов. Красными линиями обозначены изолинии магнитного параметра (в $\mu\text{Gcm}^{3/2}$), синими – изолинии скорости ударных волн, указаны их величины в км/с. Черными треугольниками показаны отношения линий для отдельных компонент в области с двухкомпонентным профилем. Comp.1 соответствует “синему” компоненту, Comp.2 – основному компоненту.

буждения. В статье (Katkov et al., 2011b) мы приводим набор параметров ориентации для различных комбинаций выбранных линий и спектральных разрезов. Средние для внешнего газового диска ($r = 20 - 50''$) параметры: $i_{gas} = 46 \pm 9^\circ$, $PA_{gas} = 261 \pm 11^\circ$.

Угол между плоскостями звездного и газового дисков определяется скалярным произведением между их направляющими векторами и выражается соотношением:

$$\cos \delta = \pm \cos(PA_1 - PA_0) \sin i_0 \sin i_1 + \cos i_0 \cos i_1, \quad (2.1)$$

Здесь индексами “0” и “1” помечены наблюдаемые параметры ориентации обоих дисков. Неопределенность со знаком в первом слагаемом связана с тем, что позиционный угол большой оси PA и наклон i , определенные из анализа кинематики, не полностью характеризуют положение плоскости относительно наблюдателя - необходимо еще знать, какая сторона диска ближняя, а какая дальняя. Чтобы внести однозначность, формулу следует записать в виде:

$$\cos \delta = \cos(PA_1 - PA_0) \sin i_0 \sin i_1 + \cos i_0 \cos i_1, \quad (2.2)$$

уточнив правило отсчета наклона i , и учтя направление вращения дисков. Если вектор углового момента направлен на наблюдателя, то $i < 90^\circ$, если же направление углового момента противоположное, то наклон определяется как $180^\circ - i$. Считая крупномасштабные спирали в звездном диске отстающими, можно утверждать, что $i_0 = i_{star} = 40^\circ$, но для газового диска сказать что-то о направлении вектора углового момента затруднительно, поэтому из (2.1) получаем два решения: $\delta = 34 \pm 9^\circ$ и $77 \pm 9^\circ$.

2.4.2 Источники ионизации газа

С целью изучения причин ионизации газа в областях, где имеются измерения потоков сразу в нескольких эмиссионных линиях различной степени возбуждения, были построены классические ионизационные диаграммы (рис. 2.10). Мы пренебрегаем эффектом внутреннего поглощения, поскольку используем отношения близких по длинам волн линий. Видно, что все наблюдаемые точки лежат в области, соответствующей ионизации активным ядром. С ростом расстояния от ядра вклад нетеплового компонента в ионизацию уменьшается, что видно по уменьшению относительной светимости в запрещенных линиях. При этом положение точек на диаграммах хорошо согласуется с моделями ударной ионизации газа низкой плотности *shock + precursor* из работы Allen et al. (2008) для умеренных значений магнитного параметра B и скорости ударной волны более 250 км/с.

Таким образом, если вблизи самого центра ионизация газа в основном вызвана нетепловым излучением активного ядра, то уже на расстояниях 300–500 пк от центра основной вклад в ионизацию газа вносят ударные волны. Одним из локальных источников ударных волн, скорее всего, является джет из активного ядра. Так в $2''$ к югу от ядра профили эмиссионных линий в спектрах SAURON выглядят асимметрично, а на спектрах SCORPIO, имеющих лучшее спектральное разрешение, эмиссионные линии разделяются на два компонента. Более яркий компонент соответствует невозмущенному вращению газового диска, а более слабый, смещенный в синюю сторону на ~ 300 км/с, мы интерпретируем как излучение газа, сжатого за фронтом ударной волны, порожденной вторжением джета из активного ядра в межзвездную среду. Дополнительными аргументами в пользу данной интерпретации являются более высокое отношение $[O III]/H\beta$ для пеккулярного компонента, указывающее на ударную ионизацию, а также рост электронной плотности – следствие сжатия газа за фронтом ударной волны (подробнее см. Katkov et al., 2011b).

Для более удаленных областей газового диска разумно связать ударные волны с наклонными орбитами газовых облаков, так как должны наблюдаться столкновения между газом наклонного диска и межзвездной средой, находящейся в основном звездном диске (даже если плотность последней относительно мала). Более того, ударная волна может возникать и просто при пролете газовых облаков через потенциальную яму звездного диска. В пользу последнего механизма говорят и измерения вдоль $PA = 220^\circ$, где нам удалось измерить отношение линий на большом удалении от центра. Именно, на $r = 20'' - 55''$ относительная яркость линий азота превышает величину, характерную для фотоионизации молодыми звездами $\lg [N II]/H\alpha > -0.4$ (Stasińska et al., 2006). Т.е. и здесь ударные волны вносят основной вклад в ионизацию газа.

2.4.3 Выводы о структуре галактики

Большинство имевшихся ранее данных говорило о том, что NGC 7743 – ничем не примечательная спиральная галактика раннего типа со слабой активностью ядра. Выявленные следы вторжения околядерного джета (размер которого менее 200 пк) в межзвездную среду – ожидаемы для сейфертовских галактик (см. далее §3.4.3). Удивительнее другое – то, что большая часть ионизованного газа в галактике (вплоть до расстояний 4–5 кпк от центра) вращается на орбитах, сильно наклоненных к плоскости звездного диска. При этом кривые вращения звездного и газового дисков во внешних областях имеют одинаковую амплитуду. Это говорит либо о том, что на данных масштабах невелики отклонения формы распределения гравитационного потенциала галактики от сферической, либо о том, что из двух геометрически возможных углов наклона нам следует выбрать минимальное значение, т.е. $\delta = 34^\circ$, при котором отход газового диска от плоскости звездного не настолько заметен, чтобы почувствовать несферичность в распределении гравитационного потенциала.

В газовом диске отсутствуют заметные области HII, спектр его свечения указывает на ионизацию ударными волнами. Аналогичную ситуацию мы уже наблюдали в NGC 5631 (§2.3.1), где крупномасштабный газовый диск слегка наклонен к плоскости звездно-

го и при этом вращается в противоположном направлении. Выше мы уже предположили существование двух возможных источников ударных волн – столкновение с разреженным газом в плоскости звездного диска и столкновение с гравитационным потенциалом звездного диска, при его пересечении. В любом случае в звездном диске содержится в несколько раз меньше газа, чем в наклонном – иначе мы бы наблюдали в эмиссионных линиях два кинематических компонента на всем протяжении диска, а не только в области джета.

К сожалению, нам не удалось найти в литературе расчетов ударных волн, возникающих в наклонных газовых дисках. Исключение составляет статья Wakamatsu (1993), где в рамках достаточно общих предположений было показано, что ударные волны, возникающие при пересечении потенциальной ямы диска газовыми облаками на полярных орбитах, могут вносить существенный вклад в формирование наблюдаемой морфологии полярных колец. Мы считаем, что такой механизм, во многом аналогичный возникновению ударных волн в спиральных рукавах и на лидирующих кромках баров, отвечает и за ионизацию газа в диске NGC 7743. Также на $r < 20''$ на наклонный газовый диск существенное воздействие должен оказывать гравитационный потенциал бара. Ориентация орбит газовых облаков меняется, что мы и наблюдаем.

Среди галактик с полярными кольцами (рассматриваемых в главе 4) известно несколько случаев наклоненных колец. Прежде всего, это NGC 660, где угол между основным диском и внешним газопылевым кольцом составляет $\delta = 63^\circ$ (Arnaboldi & Galletta, 1993). Менее контрастный, поэтому более похожий на случай NGC 7743, наклонный газовый диск, найденный в Ayr 212, описан далее в главе 4. В Ayr 212 области III на расстоянии 2–6 кпк от центра располагаются внутри газового диска, наклоненного на $30 - 50^\circ$ к внутреннему диску галактики, причем в области их пересечения наблюдаются ударные фронты. В качестве наиболее вероятного механизма формирования наклонного диска предложена аккреция с богатого газом спутника. Скорее всего, похожий сценарий привел и к формированию газового диска в NGC 7743.

Duprie & Schneider (1996) показали, что в самом диске галактики (внутри $beam = 3'$) содержание нейтрального водорода мало, на пределе детектирования. Но в ее ближайшем окружении они обнаружили два облака нейтрального водорода, имеющие массу $M_{HI} = 6.4 \times 10^7 M_\odot$ и $4.5 \times 10^8 M_\odot$, а лучевые скорости 1610 км/с и 1509 км/с соответственно, что близко к лучевой скорости самой NGC 7743 (1680 км/с). В базе данных NED, эти облака ассоциируются с галактиками KUG 2341+097 и LSBC F750-04, находящимися на видимом расстоянии $8'.3$ (46 кпк) и $11'$ (61 кпк) от центра NGC 7743. Светимость самой яркой из них соответствует $M_B = -16$. Таким образом, окрестности NGC 7743 богаты газом, имеется как минимум два спутника, причем в них содержится на порядок больше нейтрального водорода, чем в диске основной галактики. Поэтому возможно, что наклонный диск образовался в результате аккреции газа с одного из этих компаньонов, либо в результате захвата и разрушения богатого газом – сценарий, предложенный выше для NGC 5631.

Кроме того, интересно, отмеченное в начале этого раздела, достаточно близкое соседство с NGC 7742 – галактикой с глобальным противовращающимся диском. Не могло ли их сближение породить наблюдаемые пекулярные структуры в кинематике газа? Если взять в качестве разумной характерной относительной скорости 200 км/с, то получим, что после их взаимодействия прошло 1.4 млрд. лет. Это сравнимо с возрастом вспышки звездообразования в ядре NGC 7743, которая могла быть инициирована таким сближением. Однако сомнительно, чтобы и наклонный газовый диск сформировался при их взаимодействии, так как вряд ли он останется стабильным на протяжении нескольких десятков оборотов. Скорее всего, он образовался в более позднее время.

Наклонный газовый диск в NGC 7743 является одной из самых малоконтрастных среди структур такого рода. Мы надеемся, что глубокая спектроскопия других бедных газом галактик ранних типов, позволит обнаружить схожие диски, образованные в результате внешней аккреции газа.

Основные результаты главы 2

- Обнаружено противовращение области центрального килопарсека: газовый диск NGC 3945 (по наблюдениям на 6-м телескопе САО РАН) и звездный диск в NGC 1316 (по данным 8.2-м телескопа VLT ESO). Этот феномен мы интерпретируем как результат относительно недавнего поглощения карликового спутника
- Показано, что весь ионизованный газ в дисках галактик NGC 2551 и NGC 5631 вращается в противоположном направлении относительно звездного компонента. Приведены доказательства в пользу ударной ионизации газа в этих дисках. Аналогичная структура – компланарный со звездным противовращающийся газовый диск обнаружен в кольцевой галактике NGC 7742. Предложен сценарий формирования кольца звездообразования в этой галактике в результате недавнего взаимодействия с компаньоном или захвата спутника.
- Показано, что в NGC 7743 весь ионизованный газ располагается в диске, значительно наклоненном к звездному диску галактики. Угол наклона может составлять 34° или 77° , в зависимости от принятой взаимной ориентации дисков. Наиболее вероятной причиной формирования такого диска мы считаем аккрецию из богатого газом окружения галактики. Основной вклад в ионизацию газа вносят ударные волны, возникающие при пересечении звездного диска газовыми облаками на наклонных орбитах.

Основные публикации, представляющие результаты этой главы:

- Moiseev A.V., Valdes J.R., Chavushyan V.H., “Structure and kinematics of candidate double-barred galaxies”, 2004, *Astronomy and Astrophysics*, v. 421, p. 433 (*Противовращение в NGC 3945*)
- Sil’chenko O.K., Moiseev A.V., “Nature of nuclear rings in unbarred galaxies: NGC 7742 and NGC 7217”, 2006, *Astronomical Journal*, v. 131, p. 1336
- Sil’chenko O.K., A.V. Moiseev, V.L. Afanasiev “Two more disk galaxies with global gas counterrotation”, 2009, *Astrophysical Journal*, v. 694, p. 1550 (*NGC 2551 и NGC 5631*)
- Beletsky Yu., Gadotti D.A., Moiseev A., Alves J., Kniazev A., “Looking inside the nest: the hidden structure of the merger galaxy NGC 1316 (Fornax A)”, 2011, *MNRAS*, v. 418, p. 6L
- Katkov I. Yu., Moiseev A.V., Sil’chenko O.K., “Stars and ionized gas in S0 galaxy NGC 7743: an inclined large-scale gaseous disk”, 2011, *Astrophysical Journal*, v. 740, p. 83

Глава 3

Лобовые столкновения галактик

“Лицо в лицо, ножи в ножи, глаза в глаза...”
(В.С. Высоцкий)

3.1 Введение: столкновительные кольца

Последствия взаимодействий галактик могут быть различны. Часто это либо поглощение маломассивного компаньона (“галактический каннибализм” – “малый мержинг”), или же, для близких по массе галактик – полная перестройка изначальной структуры с образованием, по сути, нового объекта¹. Но в редких случаях лобового столкновения, при осевом прохождении спутника через галактический диск, в нем образуется кольцевая волна плотности. Хрестоматийный пример — галактика “Тележное колесо” (VV 784, Cartwheel), красочные снимки которой широко известны даже людям, далеким от астрономии. Первые численные модели формирования таких колец появились в 70-х годах прошлого века (Lynds & Toomre, 1976) и с тех пор многократно совершенствовались (см. обзор Appleton & Struck-Marcell, 1996). Пролетая вблизи центра галактики, спутник своим притяжением воздействует на диск так, что орбиты звезд и газовых облаков испытывают радиальные и вертикальные смещения. Объемная плотность звезд в галактиках столь низка, что вероятность их прямого столкновения очень мала. Но возмущение гравитационного потенциала порождает сверхзвуковую волну плотности,двигающуюся из центра к периферии. Понятно, что такая картина появится только при выполнении целого ряда условий. Спутник должен быть массивным (0.2 – 1.0 от массы “галактики-мишени”), а скорость его пролета достаточно высокой, чтобы его воздействие на диск было одновременно и мощным, и кратковременным. Все это, вместе с относительно коротким временем жизни кольцевых волн и со специфическими требованиями к взаимной ориентации галактик, приводит к тому, что наблюдаемое число столкновительных колец составляет лишь сотые доли процента от общего числа ярких галактик (Madore et al., 2009).

Кольцевые столкновительные галактики представляют собой уникальную лабораторию для изучения распространения сверхзвуковой волны плотности по невозмущенному диску, а также для проверки различных теорий распространения звездообразования. Согласно наиболее популярной точке зрения, подтверждаемой рядом численных расчетов (Appleton & Struck-Marcell, 1996), волна, движущаяся из центра диска к периферии, динамически разогревает диск, а также, подобно спиральям галактик, сжимает газ, что приводит к массовому образованию звезд. Благодаря этому мы и видим гребень волны, на котором концентрируются молодые объекты — области H II, ультраяркие рентгеновские источники и т.п. Скорость кольцевой волны может достигать многих десятков км/с, что значительно выше, чем для галактических спиральных волн. Прохождение такой волны может заметно увеличить долю звездного населения в галактике, в зависимости от

¹Так через 5 млрд. лет в результате слияния Млечного Пути и Туманности Андромеды получится новая массивная галактика – “Milkomeda” (Dubinski, 2006).

имеющихся запасов газа в диске. Размеры кольцевых волн в отдельных галактиках впечатляют. Так, кольцо в UGC 7069 имеет диаметр около 115 кпк (Ghosh & Mapelli, 2008).

И хотя изучение таких волн ведется достаточно давно, множество вопросов остается невыясненным. Кроме представленной модели гидродинамической волны плотности всерьез рассматривается сценарий “самоподдерживающейся волны звездообразования” (Korchagin et al., 2001). Здесь прохождение спутника через диск дает лишь первый толчок к звездообразованию, которое затем само распространяется дальше по диску – вспышки сверхновых поджигают газ на внешнем обводе кольца, что приводит к рождению звезд на большем удалении от центра. Несмотря на некоторую искусственность такого предположения, модель удовлетворительно описывает радиальные градиенты цвета в кольцевых галактиках. В работе Higdon et al. (2011) этот сценарий получил поэтическое наименование “лесного пожара”.

Серьезную помощь в построении самосогласованных моделей столкновительных кольцевых галактик может оказать изучение кинематики газовых дисков, включая прямые измерения скорости распространения кольцевых волн. Оценки скорости распространения волны, сделанные разными наблюдательными способами, позволяют не только определить возраст и кинематическую структуру волны, но и уточнить параметры модели распространения волн в подобных галактиках, изучить крупномасштабную гравитационную устойчивость внешнего газового кольца. До недавнего времени такие измерения были крайне немногочисленны и касались в основном только самого изученного объекта – галактики “Тележное колесо”. И даже здесь оценки скорости распространения волны, не согласуются как друг с другом – 55 км/с у Higdon (1996), 25 км/с Amram et al. (1998), так и с радиальным распределением показателей цвета (Korchagin et al., 2001).

Именно такому исследованию распространения кольцевых волн в диске пекулярной галактики *Arp 10* и посвящена первая часть данной главы. Кроме всего прочего, галактика интересна еще и тем, что это один из немногих объектов (включая “Тележное колесо”), в котором нам повезло застать сразу два кольца, бегущих по диску. Далее кратко представлены результаты изучения прототипа галактик низкой поверхностной яркости *Malin 1*. Рассматриваются аргументы в пользу того, что ее уникальный по протяженности звездно-газовый диск является закономерным итогом эволюции кольцевой волны. В конце главы подробно описывается любопытный пример галактики *Mrk 334*. Здесь остатки разрушенного приливными силами спутника уже не могут породить волну плотности, но мы впервые смогли зафиксировать другое последствие лобового пролета через газовый диск – каверну низкой плотности с аномальными ионизационными характеристиками.

3.2 Кольцевые волны в *Arp 10*

Возмущения, вносимые кольцевыми волнами в кинематику дисков, должны быть весьма значительными. В то же время доступные наблюдательные свидетельства пока очень редки. Имеющиеся поля скоростей HI в линии 21 см обладают слишком низким угловым разрешением. Статья Amram et al. (1998), в которой было построено поле скоростей ионизованного водорода в “Тележном колесе”, оставалась до недавнего времени практически единственной работой с детальными измерениями возмущенных скоростей в кольце. Отсутствовали самосогласованные модели столкновительных кольцевых галактик, одновременно удовлетворяющие кинематическим, спектральным и фотометрическим данным. Поэтому по инициативе Д.В. Бизяева (ГАИШ МГУ) мы предприняли комплексное исследование выборки таких галактик на 6-м телескопе САО РАН с помощью прибора SCORPIO в различных режимах (прямые снимки, ИФП, длинная щель). Ниже представлены основные результаты изучения одной из галактик нашей выборки, подробно описанные в статье Bizyaev et al. (2007).

Arp 10 (VV 362) – пекулярная галактика, на изображениях которой выделяются два эмиссионных кольца с диаметрами около 7" (4.5 кпк) и 40" (25 кпк), ядро и внешние протяженные дуги с намеком на спирали (см. рис. 3.1). Принятое расстояние до галактики 130 Мпк, что дает масштаб 630 пк/".

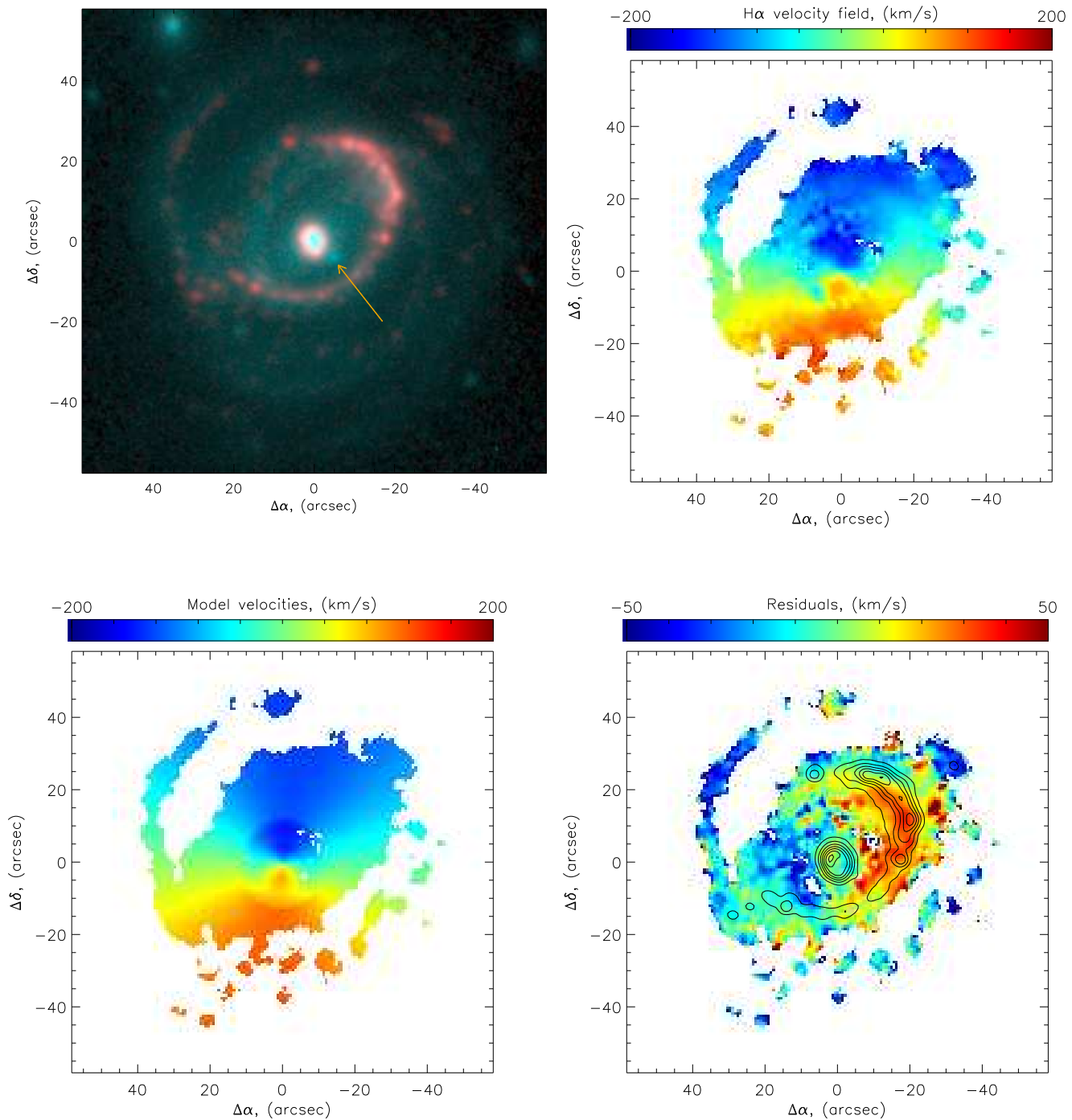


Рис. 3.1 Наблюдения Mrk 10 на 6-м телескопе со SCORPIO. Вверху: комбинация изображений галактики в фильтре B (зеленый цвет) и в линии $H\alpha$ (красный). Стрелочкой показан обнаруженный нами спутник. Справа – поля скоростей ионизованного газа в линии $H\alpha$. Нижний ряд – модельное поле скоростей и остаточные скорости (наблюдения минус модель). Показаны изофоты изображения в $H\alpha$.

Ранее были предложено две гипотезы, объясняющие наблюдаемую структуру галактики, причем обе связанные с недавним взаимодействием. Согласно Charmandaris et al. (1993) система колец и арок сформировалась в результате пролета сквозь диск галактики-компаньона, т.е. классический вариант столкновительной кольцевой галактики. Позже Charmandaris & Appleton (1996) выдвинули ряд аргументов в пользу того, что здесь мы наблюдаем разрушение и поглощение карликовой галактики, а кольца и дуги являются приливными образованиями. Одним из аргументов, поддерживающих такую интерпретацию, было то, что не удавалось обнаружить близкий компаньон, который мог бы инициировать кольцевую волну. Правда, был замечен звездообразного объекта в $5''$ к юго-западу от ядра (показан стрелочкой на рис. 3.1), но спектр этой детали оставался неизвестным.

3.2.1 Анализ поля скоростей

Хотя поле скоростей нейтрального водорода, представленное Charmandaris & Appleton (1996), демонстрирует ряд пекулярностей, ни одна из предложенных моделей не могла удовлетворительно объяснить наблюдаемое распределение лучевых скоростей HI. Главную проблему создавало низкое пространственное разрешение этих наблюдений – около $20''$, превышающее диаметр внутреннего кольца.

Построенное с помощью сканирующего ИФП поле скоростей в линии $\text{H}\alpha$ (рис. 3.1) имеет значительно лучшее пространственное разрешение (около $2''9$ после процедуры адаптивного сглаживания). Это позволило, во-первых, уверенно измерить параметры ориентации, в рамках модели регулярного вращения плоского диска: $PA_0 = 172 \pm 2^\circ$, $i = 22 \pm 4^\circ$. При этом маскировались области колец с наиболее заметными некруговыми движениями. Точное определение этих параметров в столь пекулярном объекте позволило разрешить противоречие, связанное с тем, что принимаемое ранее $i = 49^\circ$ приводило к слишком малой скорости вращений, так что галактика сильно отклонялась от соотношения Талли-Фишера (Решетников, 1999). Кроме того, так как большая ось внешнего кольца развернута почти на 45° относительно PA_0 , то это кольцо оказывается еще более сплюснутым в плоскости галактики, чем это следует из изображения в картинной плоскости.

Во-вторых, были определены параметры модели квазикругового вращения (§1.5.1), подразумевающей радиальные вариации не только скорости вращения, но и PA_{kin} с V_{sys} (рис. 3.2). Наклон диска к лучу зрения остается постоянным, т.е. изгиб диска мал в пределах $r < 30$ кпк. Анализ этих параметров вместе с рассмотрением карты остаточных скоростей (рис. 3.1) приводит к следующим выводам:

1. Во внутреннем кольце имеют место значительные, более 30 км/с по амплитуде, вертикальные движения ионизованного газа. На это указывают вариации системной скорости на $r < 10''$, так как формально здесь мы измеряем не V_{sys} , а $V_{sys} + V_z \cos i_0$ (см. рис. 3.2).
2. Распределение остаточных скоростей указывают на то, что внешнее кольцо расширяется², причем с неравномерной по азимуту скоростью, достигающей ~ 110 км/с вдоль $PA \approx -45^\circ$ (более яркая и далекая часть кольца) и всего-лишь около 30 км/с в диаметрально противоположной, менее яркой половине кольца. Т.е. более далекая от центра часть кольца действительно движется в три раза быстрее, чем более близкая к центру, в полном согласии с его эксцентрическим расположением. В рамках квазикругового приближения это расширение приводит к большим отклонениям PA_{kin} от PA_0 на $r = 12 - 25''$.

²Рассмотрение поля скоростей вместе с предположением об отстающих спиральных рукавов говорит о том, что восточная (левая) половина галактики – более близкая к нам, поэтому наблюдаемые в кольце некруговые скорости указывают на его расширение, а не сжатие. Оценка скоростей расширения дается с пересчетом в плоскость галактики.

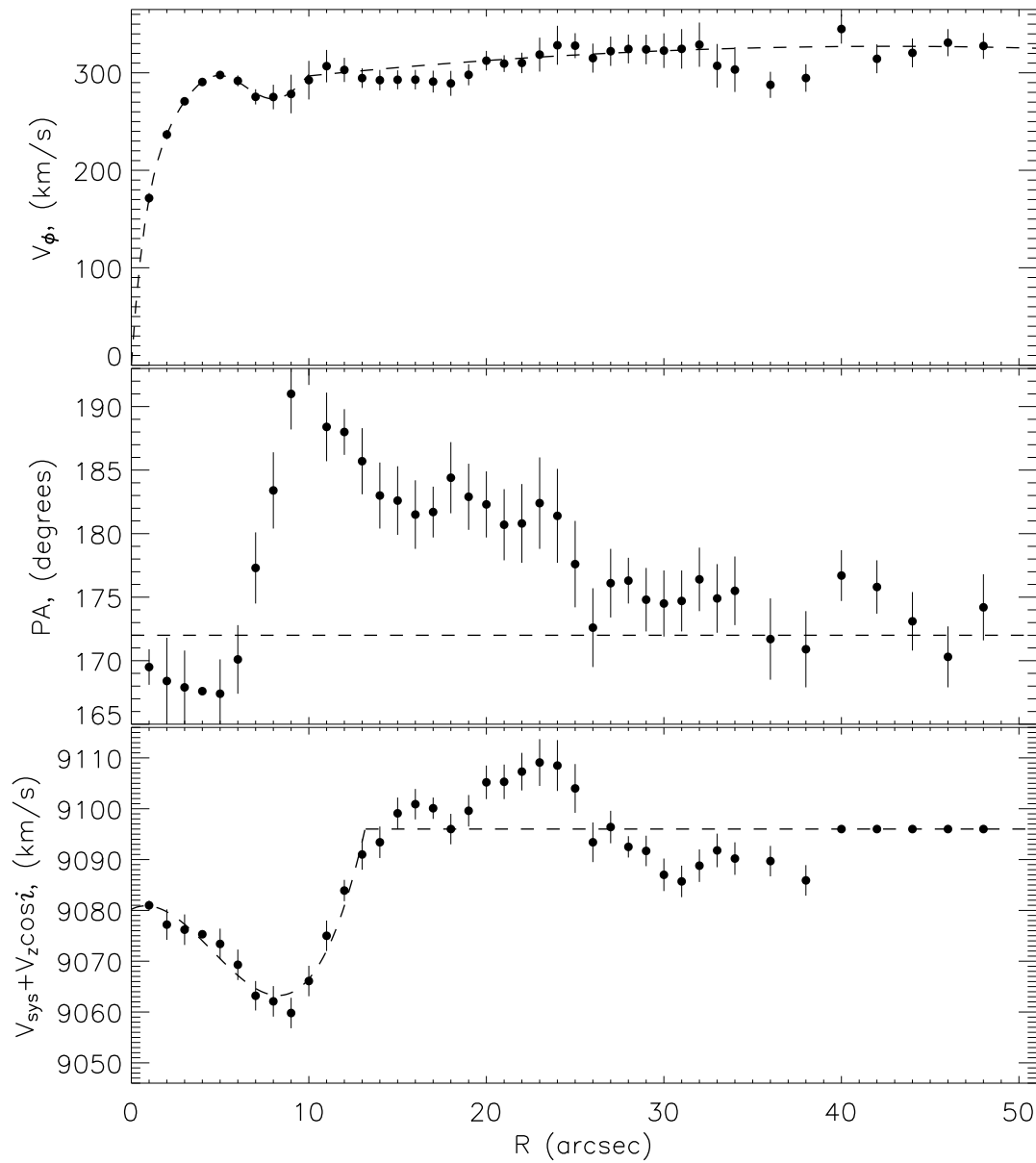


Рис. 3.2 Анализ поля скоростей Agr 10 в рамках модели квазикругового вращения. Сверху вниз: скорость вращения, позиционный угол, системная скорость. Пунктиром показана аппроксимация радиального изменения параметров, принятая для построения модельного поля скоростей, показанного на предыдущем рисунке.

Согласно нашим измерениям по спектрам SCORPIO/LS, отношения эмиссионных линий газа в диске галактики указывают на то, что, несмотря на столь высокие скорости расширения, основной вклад в ионизацию газа вносят молодые звезды, а не ударные волны, которые могут быть существенны только на самом гребне кольцевой волны (подробнее см. Vizuiev, Moiseev & Vorobyov, 2007).

3.2.2 Спутник - “возмутитель”

Итак, кинематика ионизованного газа диска однозначно указывает на столкновительную природу эмиссионных колец, проходящих по изначально спиральной галактике. Но где же спутник, породивший эти возмущения? Как уже отмечалось, наиболее вероятным кандидатом является звездообразная деталь вблизи ядра Ayr 10. С помощью SCORPIO было сделано несколько спектральных разрезов через ядро с целью измерений градиента металличности газа и состава звездного населения. В том числе, мы получили спектр этой детали. В нем заметны абсорбционные линии галактики, скорость которой в проекции на луч зрения на 480 км/с больше, чем системная скорость ядра Ayr 10. Дисперсия скоростей звезд в ядре спутника составляет ~ 240 км/с, что практически эквивалентно дисперсии скоростей в центре Ayr 10. Согласно нашим оценкам, если карликовый компаньон остается гравитационно связанным, то он в 4–10 раз меньше по массе, чем основная галактика-“мишень”. Несмотря на столь значительную массу, спутник плохо выделяется на оптических изображениях, так как, судя по всему, скрыт от нас диском Ayr 10. Кроме того, он может быть уже частично разрушен приливным воздействием “мишени”. Оценка возраста звездного населения по имеющемуся спектру, главным образом по индексу $H\beta$, дает средний возраст 4–5 млрд. лет, что более соответствует ядру спиральной галактики раннего типа (Sab), чем эллиптической.

3.2.3 Численное моделирование

Полученный наблюдательный материал лег в основу численной гидродинамической модели образования и эволюции колец в галактическом диске. Само моделирование выполнялось Э.И. Воробьевым (ЮФУ) и подробно описано в нашей статье. Рассматривалась эволюция тонкого самогравитирующего диска, находящегося в гравитационном потенциале основной галактики, и компаньона-“возмутителя”, для которого из наблюдений известна современная относительная скорость и прицельный параметр. Предполагалось, что пролет происходит почти точно перпендикулярно диску, а сам удар – в 2.7 кпк от центра. Возникающее при этом возмущение порождает серию расширяющихся волн. Параметры темного гало, балджа и звездного диска оценивались по кривой вращения и распределению яркости Ayr 10. На рис. 3.3 показано модельное распределение плотности газа через 85 млн. лет после столкновения, наиболее близкое к современной структуре галактики: диаметры колец составляют 3 и 14 кпк соответственно, скорость расширения внешнего кольца – 120 км/с. Стрелочки показывают остаточные скорости после вычитания среднего вращения (в отличие от наблюдаемых остаточных скоростей, это скорости в плоскости диска, а не в проекции на луч зрения). Показанный на том же рисунке разрез через поле скоростей (уже с учетом эффекта проекции) демонстрирует качественное согласие с наблюдениями.

Разумеется, в упрощенной двумерной модели не удастся полностью воспроизвести всю наблюдаемую картину. Чтобы создать эллиптическое кольцо, “возмутитель” должен лететь не точно по нормали к плоскости диска. Здесь требуется более детальный трехмерный расчет. Первые попытки такого моделирования с целью воспроизвести структуру другой кольцевой галактики – Ayr 147 представлены недавно Mapelli & Mayer (2012). Очевидна также необходимость учета спиральной структуры галактики – “мишени”. Тем не менее эта модель позволяет описать ряд наблюдаемых особенностей, например “серповидную” незамкнутую форму внешнего кольца – следствие того, что удар нецентральный.

Основные следствия сравнения модельных расчетов с наблюдениями следующие:

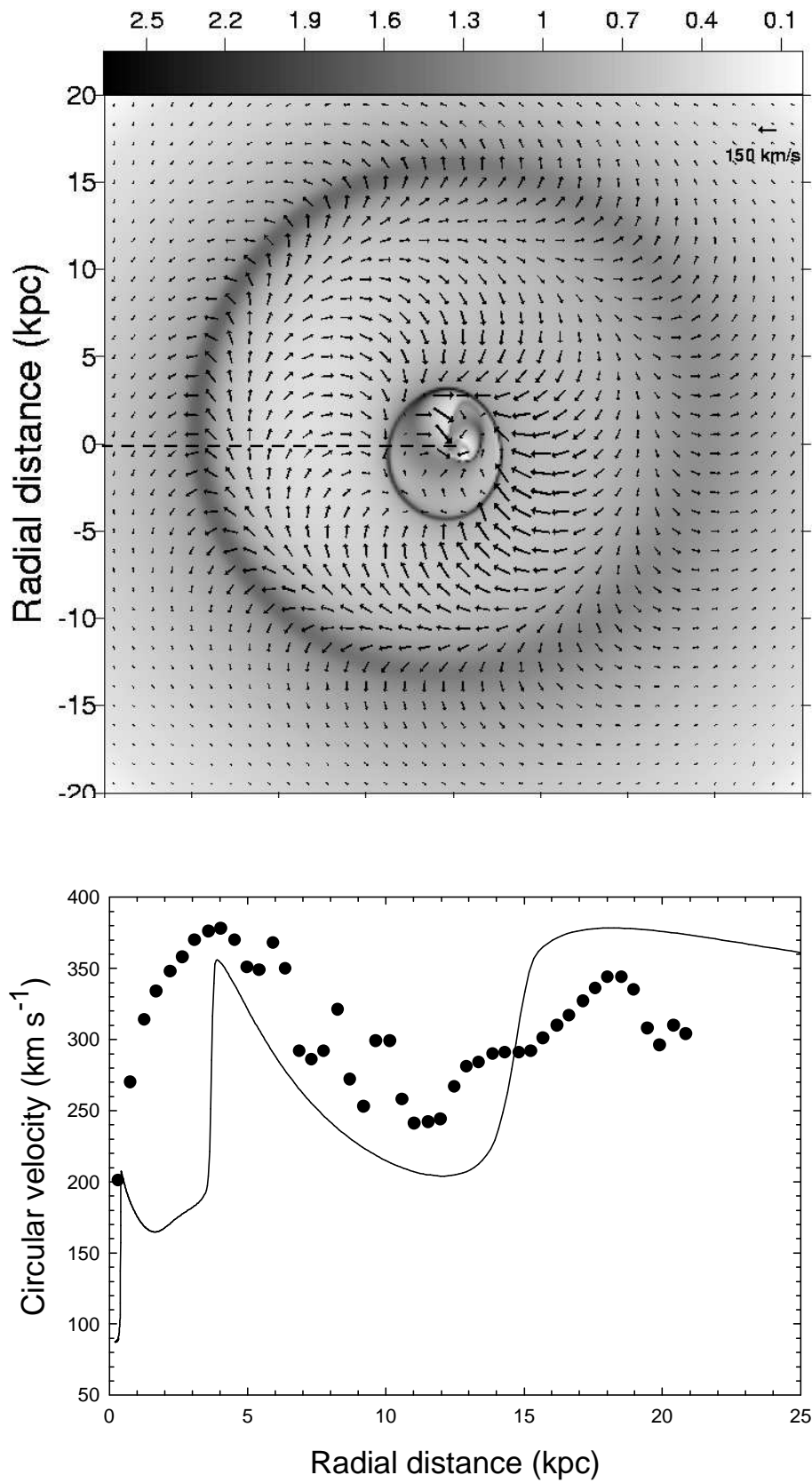


Рис. 3.3 Вверху – модельное распределение плотности газа ($t = 85$ млн.лет), стрелочки показывают направление вектора скорости за вычетом кругового вращения. Внизу – распределения лучевых скоростей газа вдоль одного из радиальных разрезов: наблюдения (точки) и результаты численного моделирования (сплошная линия)

- До столкновения Agr 10 представляла из себя большую дисковую галактику (предположительный тип – Sb) с протяженным (экспоненциальная шкала 7 кпк) звездным диском относительно низкой поверхностной яркости и развитой спиральной структурой.
- 85 млн. лет назад произошло лобовое столкновение с менее массивной спиральной галактикой раннего типа (Sab), пролетевшей сквозь диск Agr 10 примерно в 3 кпк от центра Agr 10, почти параллельно направлению ее оси вращения. В момент пересечения диска скорость галактики-возмутителя была около 800 км/с, а его масса составляла около 1/4 от массы галактики-мишени. Возникшие возмущения гравитационного потенциала сгенерировали две расширяющиеся наружу волны плотности, которые сейчас видны на изображениях галактики.
- Оценка, выполненная по имеющейся информации о кривой вращения и о распределении HI указывает, что параметр устойчивости Тоомре имел достаточно высокое значение $Q > 2.6$, т.е. звездообразование до момента столкновения было сильно подавлено. В то же время, оценки современного темпа звездообразования, сделанные по светимости в дальнем ИК дают $SFR = 10 - 21 M_{\odot}/\text{год}$, что в 2–4 раза выше, чем получается в нашей модели, предполагающей, что локальный темп звездообразования связан с поверхностной плотностью газа классическим соотношением Кенниката-Шмидта (Kennicutt, 1998b). Это указывает на рост эффективности звездообразования (отношения SFR к поверхностной плотности газа), индуцированного кольцами. Масса звезд, рожденных в кольцевых волнах после столкновения, составляет около 1% от массы всего звездного диска.

Согласно каталогу Madore et al. (2009) одновременно два кольца звездообразования встречаются весьма редко, только в $\sim 4\%$ от числа известных столкновительных кольцевых галактики. Ранее среди них более-менее изучено было лишь “Тележное колесо”. Agr 10 является второй галактикой такого типа, для которой удалось сделать ряд численных оценок параметров колец. Хотя двойные и даже тройные кольца и предсказываются в численных моделях, в реальных объектах требуется сочетание ряда факторов. Прежде всего необходимо наличие достаточно протяженного газового диска у галактики-мишени и “правильно выбранного” момента наблюдения, чтобы застать быстро расширяющиеся кольца в процессе их формирования. Действительно, после пролета компаньона-возмутителя прошло всего 85 млн. лет – в два раза меньше, чем время оборота диска на радиусе внешнего кольца. В дальнейшем кольца продолжают расширяться, волна плотности будет отходить на периферию. Возможно, что подобные процессы могут привести к образованию уникальных по протяженности дисков низкой поверхностной яркости, рассматриваемых в следующем разделе.

3.3 Malin 1 как столкновительная система

3.3.1 Malin 1 и Malin 1B

Галактика Malin 1 была обнаружена в ходе систематического обзора скопления в Деве с целью поиска галактик низкой поверхностной яркости (low surface brightness – LSB) и считается классическим прототипом LSB-галактики (Bothun et al., 1987). Вместе с тем ряд характеристик Malin 1 остаются уникальными среди уже известных спиральных галактик. Звездный диск Malin 1 имеет рекордную протяженность. Согласно Bothun et al. (1987) его размер в полосе V достигает $\sim 60''$ (90 кпк) при экспоненциальной шкале диска около $45''$ (68 кпк для принятого расстояния $D=366$ Мпк и масштабе 1.51 кпк/"). Глубокие изображения в полосе R (Moore & Parker, 2006) указывают даже на еще больший размер – 120 кпк, при шкале 50 кпк. Диск очень низкой яркости – экстраполированная центральная поверхностная яркость $\mu_0(V) \approx 25.5^m/\square''$ (Bothun et al., 1987),

$\mu_0(R) \approx 24.7^m/\square''$ (Moore & Parker, 2006). Но благодаря гигантским размерам суммарная светимость весьма велика: $M_V \approx -22.9^m$ (Pickering et al., 1997). При этом Malin 1 является одной из самых богатых газом галактик, известных на сегодняшний день, гигантский диск нейтрального водорода массой $\approx 7 \times 10^{10} M_\odot$ тянется до 110–120 кпк от центра и сильно искривлен (Pickering et al., 1997).

Недавний анализ оптических изображений галактики, полученных на космическом телескопе HST, позволил, благодаря высокому пространственному разрешению снимков, по-новому взглянуть на строение Malin 1 (Barth, 2007). То, что до этого считалось сферическим компонентом – балджем галактики, на самом деле оказалось экспоненциальным диском с параметрами, вполне соответствующими обычным дискам спиральных галактик: $\mu_0(I) = 20.1^m/\square''$, шкала – 4.8 кпк. А внутри уже находится компактный ($r_e = 0.6$ кпк) балдж Серсика. Т.е. оказалось, что внутри радиуса 10 кпк Malin 1 представляет собой самую типичную галактику типа SB0/a, с баром и слабоконтрастными спиральными рукавами. Но все это окружено огромным диффузным диском низкой яркости. Так что, по меткому выражению Н.Я. Сотниковой в докладе на конференции EWASS-2011 (в моем вольном пересказе с английского): “галактика похожа на огромную птицу в легких пушистых перьях, сидящую на маленьком гнездышке...”

Статья Barth (2007) вновь привлекла внимание к “прототицу гигантских галактик LSB”, поэтому по заявке В.П. Решетникова (СПбГУ) мы проверили предположение, не является ли внешняя диффузная структура гигантским полярным диском, ортогональным к плоскости внутреннего. Для этого надо было понять, как вращаются центральные области галактики, поскольку единственной имевшейся информацией о кинематике были данные HI, пространственное разрешение которых заметно превышало размер внутреннего диска. С помощью спектрографа MPFS на 6-м телескопе были получены спектры звездного населения и построено поле скоростей центральной области 15×15 кпк, показанное на рис. 3.4. Возможно, что показанное на рисунке поле скоростей выглядит и не так впечатляюще, как аналогичные карты других объектов, приведенные в диссертации. Но следует отметить, что кроме низкой яркости объекта был еще целый ряд методических трудностей. В частности, требовалось разработать новые методы вычитания из спектров эмиссий ночного неба, так как красное смещение галактики имеет как раз такую величину, что наиболее контрастные абсорбционные детали звездного населения – триплет MgIb и дублет NaD, попадали почти точно на ярчайшие эмиссии ночного неба [O I] λ 5577 и [O I] λ 6300. Тем не менее, благодаря почти пятичасовой (280 минут) суммарной экспозиции, собранной за две наблюдательные ночи, нам удалось изучить картину вращения звездного диска и убедиться, что его кинематическая большая ось ориентирована с $PA = 10 - 20^\circ$ (рис. 3.4). Это согласуется с ориентацией внутренних частей диска HI согласно Pickering et al. (1997). Таким образом, плоскости вращения звезд и газа совпадают.

К сожалению, эти результаты так и не были опубликованы, но они послужили мотивацией нашего дальнейшего изучения звездной кинематики галактики с помощью SCORPIO в режиме длинной щели. Это позволило сделать ряд предположений о том, как могла образоваться столь уникальная система. Ниже излагаются основные результаты нашей работы, представленные в статье Reshetnikov et al. (2010).

Было получено несколько спектральных разрезов, один из которых проходил не только через ядро Malin 1, но и через небольшую галактику, хорошо заметную на снимке HST в $9''$ от ядра. На рис. 3.5 показано распределение параметров звездной кинематики: лучевых скоростей и дисперсии скоростей вдоль щели. Оказалось, что эта галактика, названная нами Malin 1B, не просто случайно спроецировалась на картинную плоскость, но является реальным спутником, так как ее системная скорость $V_{sys} = 24840 \pm 12$ км/с лишь на 65 км/с больше, чем у Malin 1. Судя по всему, это небольшая галактика типа S0-Sa, светимость которой в пределах изофоты $\mu(I) = 23^m/\square''$ составляет примерно 1/10 от светимости основной галактики. Ее центральная дисперсия скоростей ($\sigma_0 = 97 \pm 20$ км/с), равно как и наблюдаемое отношение $V_{max}/\sigma_0 > 0.7$ типичны для дисковых галактик ранних типов.

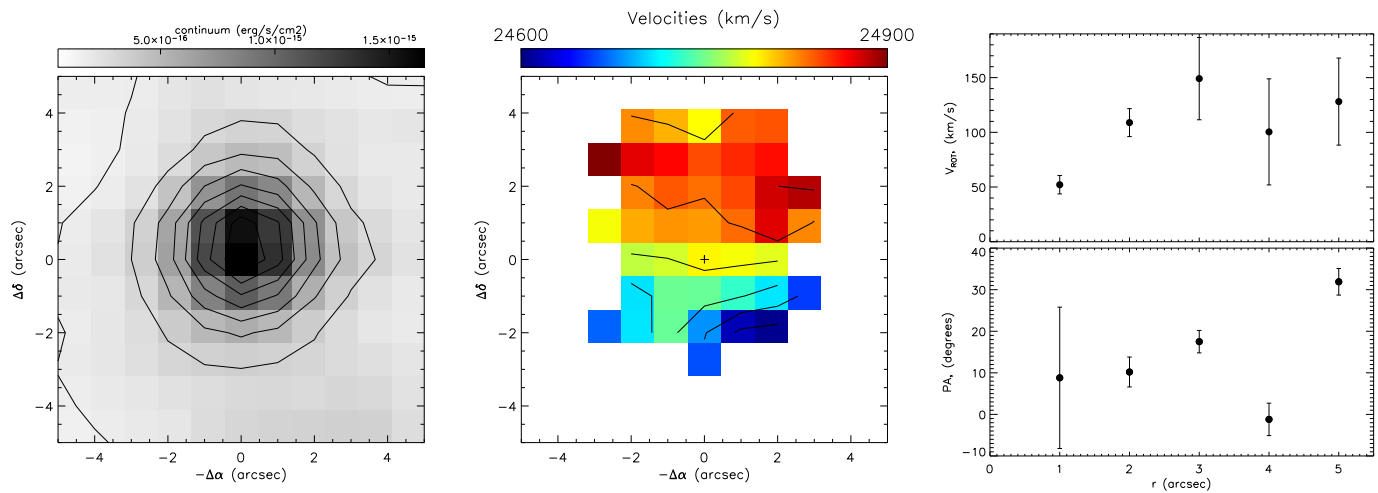


Рис. 3.4 Результаты наблюдений центральной части Malin 1 на 6-м телескопе с MPFS. Слева – изображение в континууме вблизи $\lambda 5800\text{\AA}$, в середине – поле лучевых скоростей звезд, справа – радиальные изменения скорости вращения и PA_{kin} .

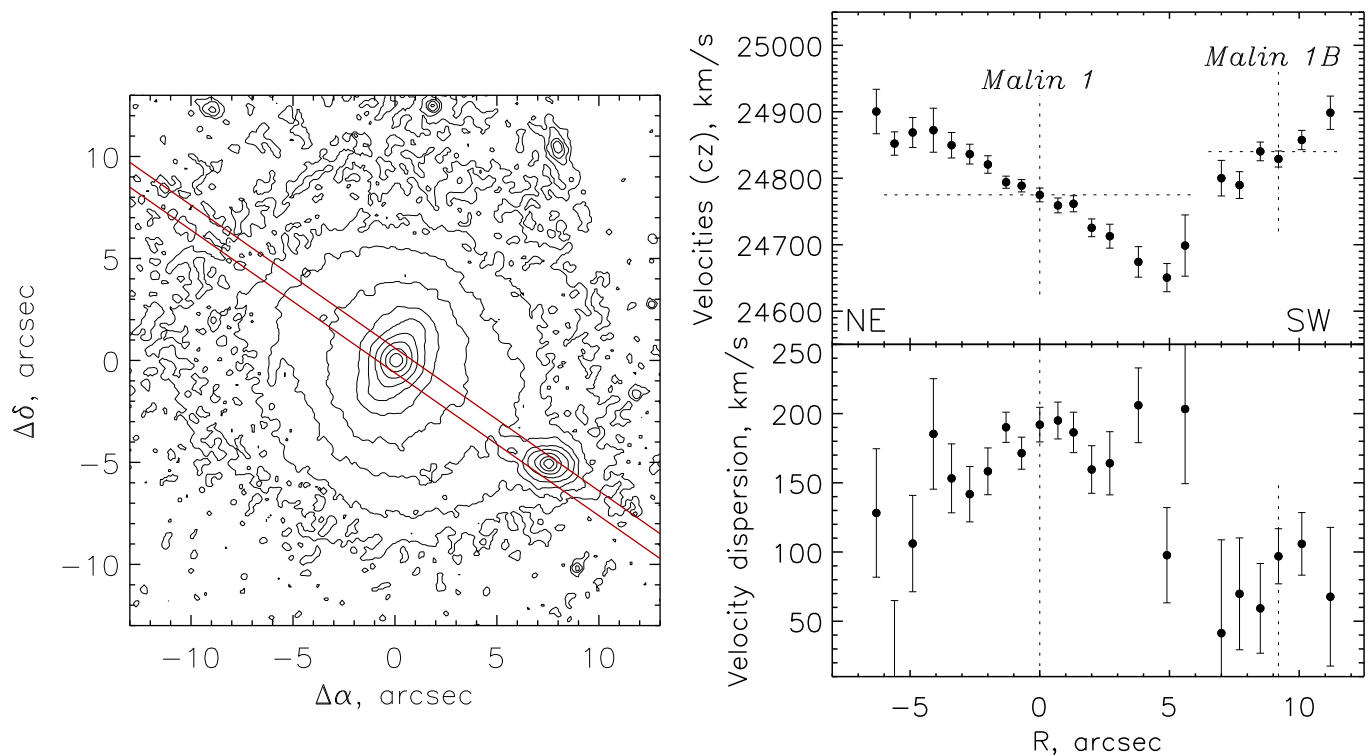


Рис. 3.5 Слева – изофоты центральной части галактики Malin 1 в полосе I , по данным WFPC2/HST. Показано положение щели спектрографа SCORPIO при наблюдениях на 6-м телескопе. Справа – распределение лучевой скорости и дисперсии скоростей звезд вдоль $PA = 55^\circ$. Отмечены центры Malin 1 и Malin 1B.

Обнаружение близкого спутника вдохновило нас рассмотреть возможный сценарий образования гигантского диска низкой яркости. Дело в том, что само по себе существование галактик подобных Malin 1 является серьезным вызовом современным космологическим моделям. Диски модельных галактик в численных расчетах в рамках Λ CDM-космологии обычно получаются более плотные и компактные, что связано с проблемой сохранения большого углового момента вращения при иерархических слияниях (см. обсуждение у Lelly et al., 2010). Поэтому интересны альтернативные предположения, например, то, что диск не был раньше столь большим, но “расплылся” в процессе эволюции. В работе Marcelli et al. (2008) на основании численных расчетов показано, что протяженные звездно-газовые диски могут являться конечной стадией эволюции кольцевых структур, возникающих в результате столкновения с достаточно массивным спутником. Кольца, расширяясь, переносят вещество и момент вращения наружу.

Столкновительный сценарий довольно привлекателен для Malin 1, поскольку здесь, кроме внешнего диска, имеется и нормальный внутренний звездный диск с балджем. Но модель Marcelli et al. (2008), хотя в целом описывает глобальную морфологию Malin 1, требует существования спутника, сравнимого по массе с галактикой-мишенью. Malin 1B выглядит слишком маленьким и недостаточно массивным для того, чтобы породить кольцевые волны. Взаимное положение галактики и их относительная скорость указывают на то, что спутник находится на близкой к круговой орбите, а не пролетает с гиперболической скоростью, как это требуют модели столкновительных кольцевых галактик.

Мы предполагаем, что текущее взаимодействие с Malin 1B может объяснить основные морфологические особенности центральной части Malin 1 — двухрукавную спиральную структуру, бар и внешнюю однурукавную, возможно — приливную, спираль. Но для сценария Marcelli et al. (2008) определенно нужен более массивный спутник. К счастью, для этой области неба имеются данные SDSS, позволяющие сделать ряд важных выводов об окружении галактики. Ближайшей достаточно яркой галактикой с известным красным смещением является SDSS J123708.91+142253.2. Ее системная скорость лишь на 132 ± 29 км/с отличается от Malin 1 при проекционном расстоянии $3'.9$ (350 кпк). А светимость в полосе g составляет около $1/2.5$ от Malin 1, что в рамках предположения о типичном отношении M/L достаточно для того, чтобы породить в прошлом кольцевые волны. Более того, взаимное положение галактик согласуется с предположением о том, что SDSS J123708.91+142253.2 примерно 1 млрд. лет назад пролетела через диск в согласии со сценарием Marcelli et al. (2008), т.е. под углом $\sim 15^\circ$ к нормали и начальной скоростью ~ 900 км/с (для расстояния $r \approx 33$ кпк).

Разумеется, для адекватного сравнения с наблюдениями требуется более сложная модель, включающая, как лобовое столкновение с массивной галактикой, так и последующее взаимодействие с обнаруженным нами спутником.

3.4 Mrk 334: прямое столкновение со спутником

Пекулярная галактика Mrk 334 изучалась в рамках более общего проекта, посвященного детальному анализу кинематики газовой и звездной составляющей галактик с активными ядрами. Ниже рассматриваются основные результаты нашей статьи (Smirnova & Moiseev, 2010), в которой основное внимание уделяется отклонению движения газа и звезд от кругового вращения, источникам ионизации газа, связи между кинематическими и морфологическими особенностями галактики как в околядерных областях так и на периферии.

Mrk 334 — галактика с активным ядром типа Sy1.8 (согласно базе данных NED) — достаточно давно привлекала внимание пекулярностью своего вида на оптических снимках, заключающейся в асимметричном рукаве к востоку и в яркой конденсации в $4''$ к западу от ядра, наиболее заметной в линии $H\alpha$ (Vorontsov-Vel'yaminov, 1977; Gonzalez Delgado et al., 1997). Галактика отличается бурным звездообразованием, в связи с чем обладает высокой светимостью в дальнем ИК диапазоне ($L_{FIR} = (4.8 - 6.9) \times 10^{10} M_\odot$). Принятое расстояние до галактики составляет 91.4 Мпк, что соответствует масштабу 443 пк/".

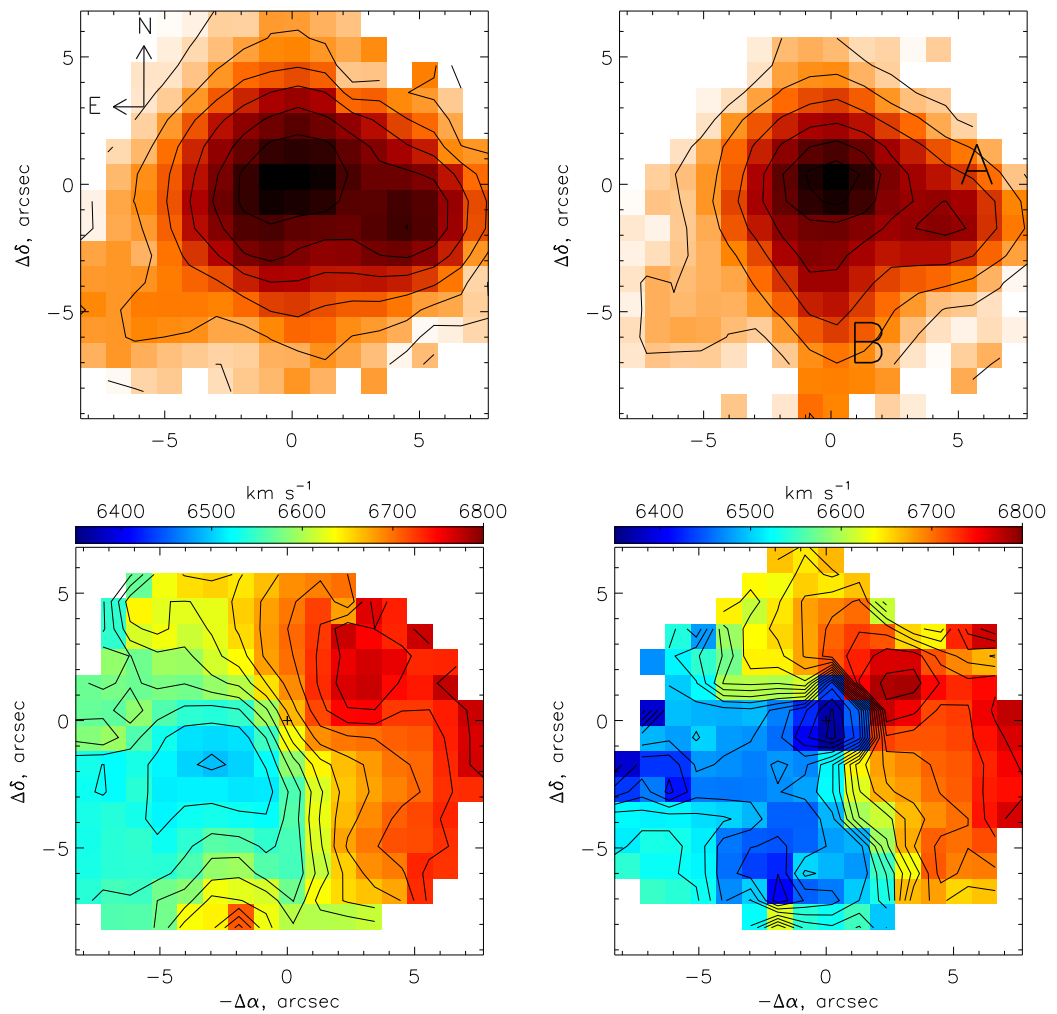


Рис. 3.6 Mrk 334. Изображения (вверху) и поля скоростей (внизу) в эмиссионных линиях по данным наблюдений с MPFS в линии $H\alpha$ (слева) и $[OIII]\lambda\lambda 4959, 5007$ (справа). Отмечены области “А” и “В”.

Наблюдательный материал был получен в прямом фокусе 6-м телескопа САО РАН. Центральная область наблюдалась с мультиспектральным волоконным спектрографом MPFS. Изучение внешних частей галактики выполнялось с помощью многорежимного редуктора светосилы SCORPIO в режимах сканирующего ИФП и прямых изображений в широкополосных фильтрах. Достигнутый предел поверхностной яркости на изображениях в фильтрах в V и R составляет около $25.5^m/\square''$, что значительно глубже, чем у ранее имевшихся снимков этой галактики.

3.4.1 Структура диска

С помощью MPFS мы построили карты в различных эмиссионных линиях для центрального региона Mrk 334 размером 7×7 кпк (рис. 3.6). На рисунках кроме яркого ядра выделяются еще несколько областей. Самая яркая из них (“А”) находится в $4''$ к западу от ядра. На наших картах она заметна как в других эмиссионных линиях, так и в континууме. Вторая, менее яркая область (“В”) лежит на $r = 3 - 4''$ к югу от ядра и заметна в основном только в линии дублета $[OIII]\lambda\lambda 4959, 5007 \text{ \AA}$. На изображении в континууме симметрично к “А” относительно ядра выделяется аморфная область, обозначенная нами как “С”.

Уже первый взгляд, брошенный на глубокие снимки галактики, позволяет заключить, что приливной рукав – всего лишь наиболее яркая часть грандиозной системы оболочек

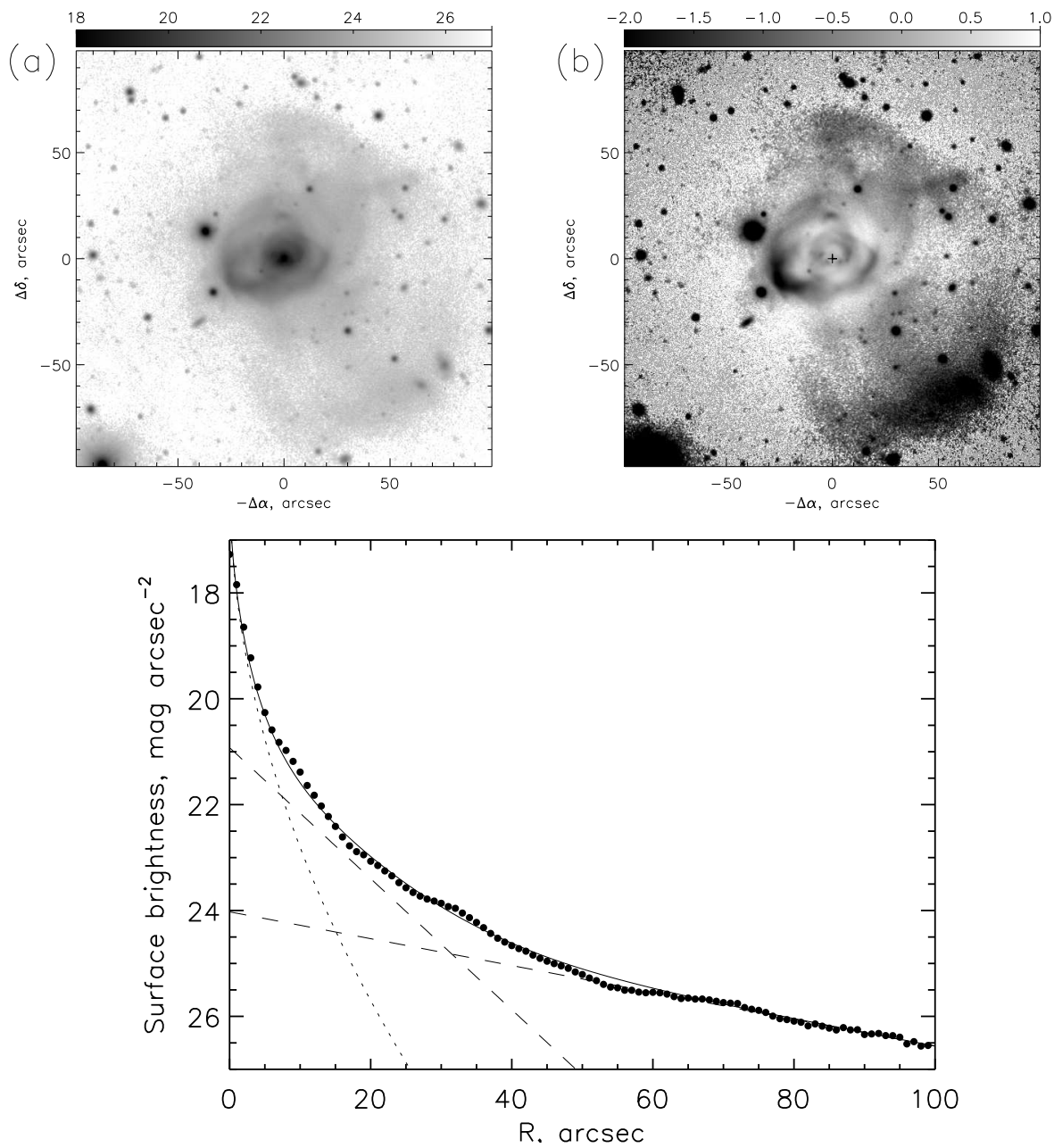


Рис. 3.7 Изображение галактики, полученное на 6-м телескопе в полосе R (a) и остаточное изображение после вычитания двумерной модели (b). Шкала поверхностной яркости в m/\square'' . Внизу – средний профиль яркости в полосе R (жирные точки) и его модельное представление (сплошная линия). Штриховыми линиями показан вклад каждого из дисков, пунктиром – вклад балджа.

и филаментов низкой поверхностной яркости (рис. 3.7). Внешние края оболочек резко очерчены и находятся на расстояниях около $70''$ к северо-западу и около $100''$ к юго-западу от ядра, что соответствует 31 и 44 кпк в картинной плоскости. Поверхностная яркость внешних областей в полосе R составляет около $24.5 - 25^m/\square''$. Сходные дугообразные структуры характерны для галактик, переживших взаимодействие со спутником (Schweizer & Seitzer, 1988).

Для более внимательного рассмотрения распределения яркости в филаментах необходимо убрать составляющую, связанную с осесимметричными компонентами галактики – балджем и диском. Применялся итерационный метод последовательного построения одномерных профилей и двумерных моделей (Moiseev et al., 2004). Наилучшую аппроксимацию удалось получить в рамках модели состоящей из балджа и двух экспоненциальных дисков (рис. 3.7) с радиальными шкалами 3.9 и 19 кпк в фильтре R . Согласно классификации Erwin et al. (2005) профиль поверхностной яркости в Mrk 334 является типичным профилем типа III (antitruncated). Среди галактик, рассмотренных Erwin et al. (2005), такой профиль характерен, в основном, для объектов, испытавших перераспределение массы в результате того или иного типа взаимодействия. В главе 2 мы уже встречались с примерами многоярусных дисков в NGC 5631 и NGC 7742.

Формирование многоярусной структуры в диске может идти различными путями. Так под воздействием неосесимметричных возмущений гравпотенциала часть вещества теряет угловой момент и перемещается к центру. Тогда образуется внутренний диск относительно высокой поверхностной яркости с короткой радиальной шкалой. Кроме того, остатки разрушенного приливными силами спутника прецессируют к плоскости галактики, так что во внешних областях может сформироваться диск с относительно длинной шкалой и низкой центральной поверхностной яркостью. Похоже, что именно эту картину мы и наблюдаем в Mrk 334. Действительно, параметры внутреннего диска типичны для спиральных галактик, в то время как внешний диск обладает относительно большой радиальной шкалой, с центральной яркостью $\mu_0(r) = 24.2^m/\square''$, что характерно для галактик LSB. Здесь мы застали LSB-диск (не столь протяженный, как в Malin 1) в процессе его формирования, когда усредненный профиль яркости уже близок к экспоненциальному, но в целом распределение массы по азимуту еще очень неоднородное.

На рис. 3.7b показано распределение яркости в полосе R , после вычитания модели, включающей два диска и балдж. Хорошо видна сложная система ярких петель – остатков от разрушенного компаньона. Мы оценили соотношение масс галактик до взаимодействия, просуммировав поток от филаментов в предположении, что балдж и внутренний диск образованы звездами основной галактики (Mrk 334), а внешний диск составлен из звезд обеих галактик. Относительная светимость разрушенного спутника составляет 13 – 19% в полосе V и достигает 25 – 35% в полосе R . Разброс оценок в основном связан с неопределенностью выделения границ филаментов. С учетом того, что это нижняя оценка массы компаньона, получаем отношение масс взаимодействующих галактик составляет $1/3 - 1/5$, близко к условной границе между малыми и большими слияниями.

На рис. 3.8 показана центральная часть Mrk 334. На карте остаточных яркостей четко видна система арок и петель, соответствующих орбите разрушаемого спутника. Отдельные фрагменты этих петель (например, яркая область в $30''$ к востоку от ядра и части околядерной структуры на $r < 10''$), согласно карте показателя цвета ($V-R$), отличаются более синими цветами, что указывает на присутствие молодого звездного населения, сформировавшегося уже в процессе взаимодействия галактик. Красный цвет области “А” очевидно связан с эмиссией в линии $H\alpha$, попадающей в фильтр R . Приливные структуры на $r > 5 - 10''$ скорее всего лежат вне плоскости галактики, как это следует из анализа поля скоростей газа в ее диске (см. далее). В то же время, околядерная спираль на $r < 5''$, заметная на снимках HST (рис. 3.8c) и содержащая области мощного звездообразования, в том числе и узел “А”, скорее всего, сформировалась в самом диске галактики. Здесь орбиты приливных филаментов уже свалились в плоскость Mrk 334.

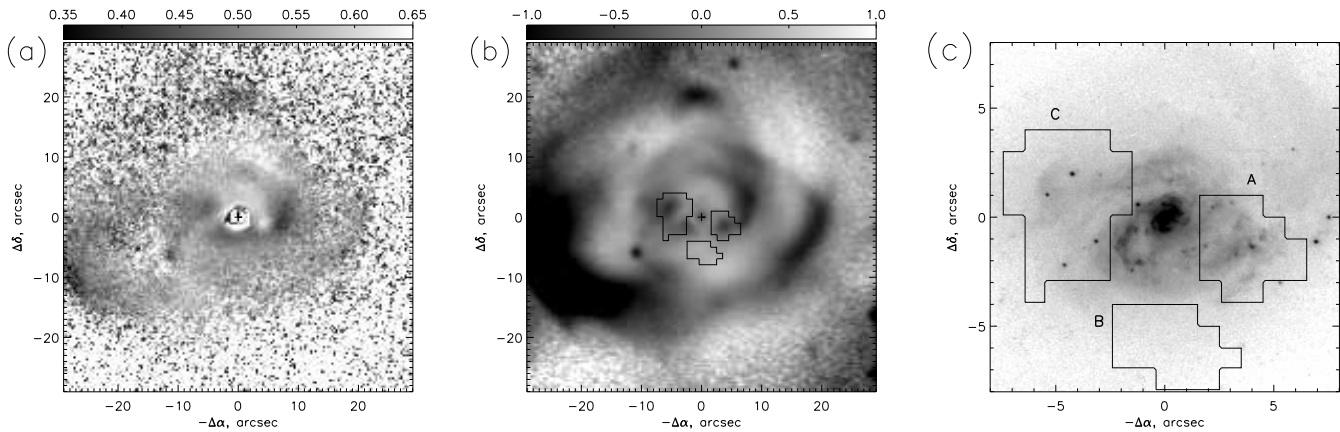


Рис. 3.8 Распределение показателя цвета (V-R) во внутренних областях галактики (a), остаточные яркости для этой же области (b) и изображение из архива HST (c), полученное камерой PC в фильтре F606W. На рисунках (b) и (c) контурами показаны границы конденсаций, выделенных по наблюдениям с MPFS.

3.4.2 Источники ионизации

На рис. 3.9 приведены спектры отмеченных выше характерных областей. Спектры ядра и конденсации “А” во многом схожи: сильные линии серии Бальмера и менее яркие запрещенные линии, прежде всего $[\text{OIII}]\lambda 4959, 5007\text{\AA}$ и $[\text{OII}]\lambda 3727$. Противоположная картина наблюдается в области “В”: наиболее заметной является $[\text{OIII}]\lambda 5007\text{\AA}$, которая даже ярче, чем $\text{H}\alpha$. Совершенно не похож на все предыдущие спектр “С”: наряду с очень слабой эмиссией $\text{H}\alpha$ здесь присутствуют контрастные абсорбции MgI, Fe, Ca – соответствующие старому звездному населению, а также абсорбции водородных линий серии Бальмера. Наша оценка с помощью подгонки спектра в пакете ULYSS (§2.4.1) дает средний возраст звездного населения 1.1 – 1.6 млрд.лет.

Области со столь разными спектрами должны различаться и по источнику ионизации. Для определения механизма ионизации центральных областей галактики строились диагностические диаграммы. Используя отношения линий с различным механизмом возбуждения, мы можем выделить регионы, в которых преобладает фотоионизация молодыми OB-звездами, нетепловая (активное ядро) или ударная ионизация (в согласии с общепринятой терминологией – AGN, NII и LINER). Наиболее характерные диаграммы показаны на рис. 3.10. Границы, разделяющие области с различным механизмом возбуждения, взяты из Veilleux & Osterbrock (1987).

Рис. 3.10 показывает отношение линий в каждом элементе поля MPFS. На всех диаграммах точки, соответствующие ядру, лежат на границе NII-LINER. Здесь основные механизмы ионизации – излучение молодых звезд и ударные волны, а не ультрафиолетовый нетепловой континуум, характерный для активного ядра. Соответствующие ядру точки на диаграммах настолько далеки от границы LINER-AGN, что ядро Mrk 334 скорее следует относить к типу LINER, нежели к Sy.

Наблюдаемые в ядре отношения эмиссионных линий можно объяснить в рамках следующего предположения. В области размером несколько сотен парсек вокруг ядра идет настолько бурное звездообразование, что суммарное излучение в линиях в основном определяется коллективным действием фотоионизирующего излучения молодых звезд и ударными волнами, порожденными взрывами сверхновых. А излучение активного ядра теряется на фоне околядерной вспышки звездообразования. И только слабый широкий компонент в профилях линий водорода с $FWHM \approx 2500$ км/с, а также присутствие в спектре ядра FeII-особенностей, указывают на то, что здесь работает аккреционная “машина” активного ядра.

На диаграммах точки, принадлежащие конденсации “А”, лежат глубоко в области, соответствующей ионизации ультрафиолетовым излучением молодых OB звезд. Таким

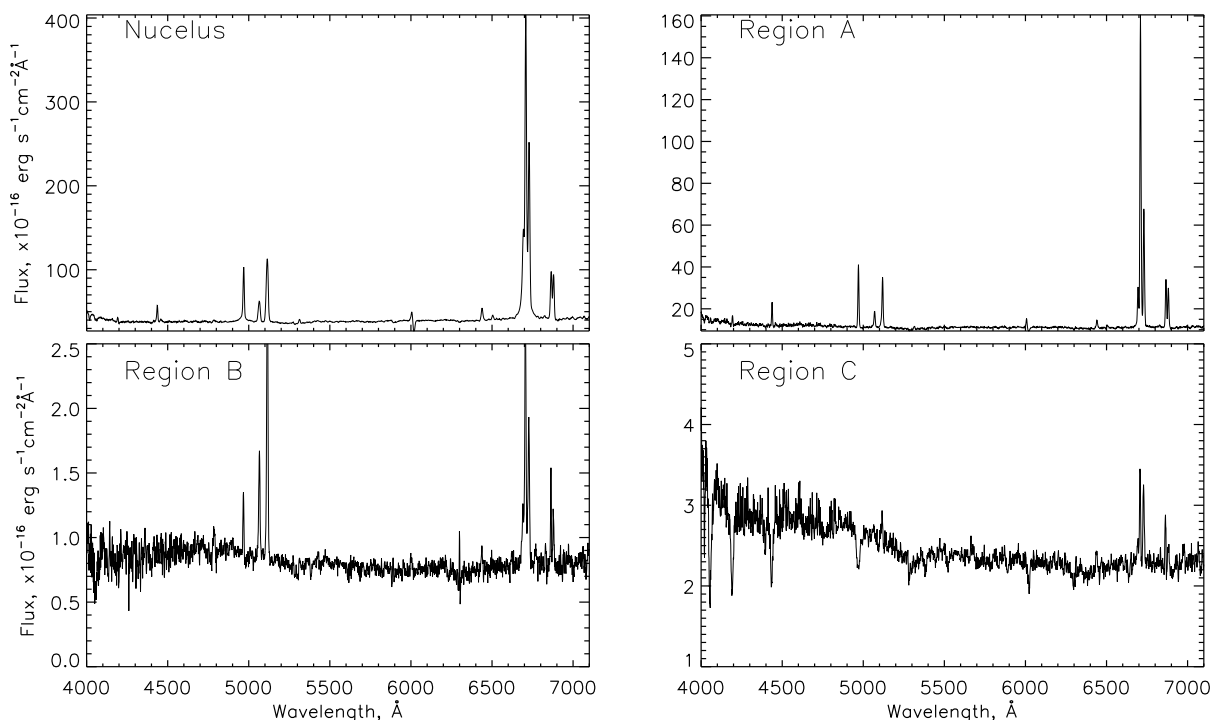


Рис. 3.9 Суммарные спектры отдельных областей Mrk 334.

образом, “А” — действительно область мощного современного звездообразования. Здесь сосредоточено от 15 до 20% всей светимости в линии $H\alpha$, что формально соответствует $SFR = 3M_{\odot}/\text{год}$. Столь большая величина (эквивалентная суммарному SFR в известной галактике M82) для относительно компактной области (размеры по уровню FWHM: 1.3×0.9 кпк) указывает на весьма бурное звездообразование.

Наиболее интригующей оказалась конденсация “В”: здесь необычно велико отношение линий $[OIII]/H\beta$ (см. карту на рис. 3.11), формально соответствующее ионизации активным ядром. Для объяснения можно предложить две гипотезы. Так, поскольку Mrk 334 — галактика претерпевающая слияние со спутником, то область “В” может быть активным ядром этого спутника. Похожая ситуация, наблюдается, например во взаимодействующей галактике NGC 3341 (Barth et al., 2008). Однако на изображении в оптическом континууме конденсация “В” почти не выделяется. Наблюдения на длине волны 6 см (Ulvestad, 1986) с угловым разрешением $0.4 - 0.6''$ также указывают на отсутствие в области “В” нетеплового радиоизлучения, характерного для активного ядра. Кроме того, именно в “главном” ядре галактики в профилях бальмеровских линий заметны слабая широкая подложка, соответствующая области образования широких линий вблизи сейфертовского ядра, а также эмиссионные линии FeII, которые традиционно связывают с “центральной машиной” активного ядра.

Второй сценарий учитывает, что область “В” располагается близко к приливным дугообразным структурам, выделенных нами на прямых снимках. Можно предположить, что здесь мы видим точку пересечения диска с остатками разрушенного спутника. В этом месте они пробивают диск Mrk 334, создав в области “В” каверну с пониженной плотностью газа. А высокая степень ионизации газа обусловлена мощной ударной волной. В пользу этого говорят и оценки электронной плотности по отношению потоков линий $[SII]\lambda 6730\text{\AA}/6716\text{\AA}$ с помощью соотношения из Osterbrock (1989) для $T_e = 10\,000\text{ K}$. В самом ядре плотность $n_e = 250 - 430\text{ cm}^{-3}$, а в регионе “А” она составляет $n_e = 200 - 350\text{ cm}^{-3}$ и достигает 500 cm^{-3} к северу от этой области III (рис. 3.11). В то же время, почти во всех точках конденсации “В” отношение линий серы меньше 0.7, что выходит за рамки простых фотоионизационных моделей и говорит о высокой температуре и низкой плотности газа ($n_e < 20\text{ cm}^{-3}$).

Мы попробовали сравнить наблюдаемые отношения линий в области “В” с предска-

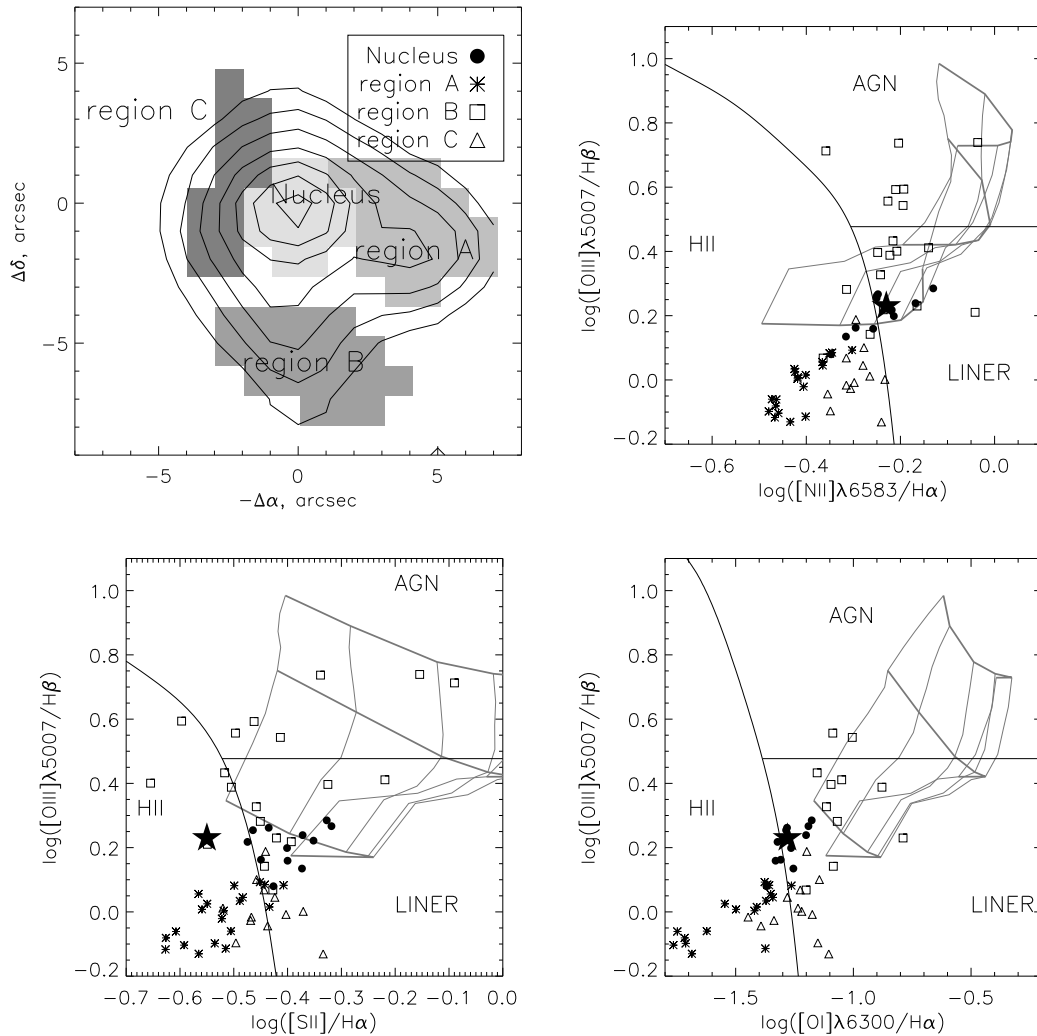


Рис. 3.10 Диагностические диаграммы для различных областей Mrk 334. Кружки соответствуют ядру, звездочки, квадратики и треугольники – областям “А”, “В” и “С”. Черная звезда - данные Lumsden et al. (2001) для ядра галактики. На левом верхнем рисунке показана маска, выделяющая изучаемые конденсации с изофотами в линии [OIII]. Серым цветом нанесена сетка моделей shock+precursor из работы Allen et al (2008) для $n = 0.1$ и солнечного обилия элементов. Тонкие серые линии – уровни постоянного магнитного параметра $B = 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 \mu\text{Gcm}^{3/2}$, жирные серые линии - уровни постоянной скорости $v = 250, 350, 450 \text{ км/с}$ (скорости растут снизу вверх).

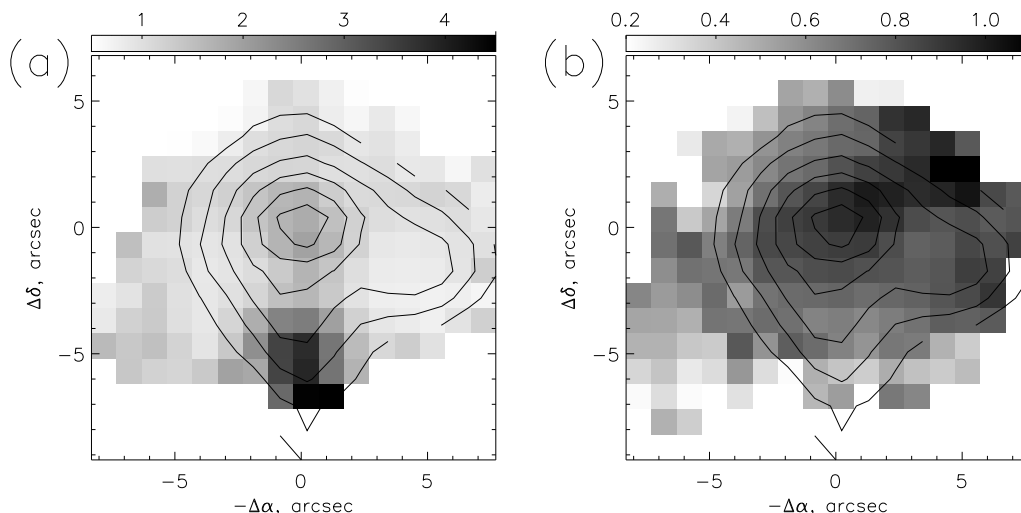


Рис. 3.11 Карта отношений линий [OIII] λ 5007/H β (слева) и [SII] λ 6731/6717Å (справа) в Mrk 334. Наложены изофоты в линии [OIII] λ 5007. Для линий серы более темные цвета соответствуют более высокой электронной плотности.

заниями моделей ударной ионизации Allen et al. (2008). Оказалось, что теоретические модели shock+precursor, в случае плотности $n = 0.1 \text{ cm}^{-3}$ и солнечного обилия элементов, неплохо описывают наблюдаемые в области “В” отношения линий (рис. 3.10). При этом величина магнитного параметра имеет разумный для межзвездной среды диапазон значений $B = 0.5 - 5 \mu\text{Gcm}^{3/2}$, а требуемая скорость ударной волны составляет 250–450 км/с.

Скорее всего, область “С” как раз и представляет собой плотную конденсацию, недавно пробившую дыру в газовом диске Mrk 334. Она расположена близко к области “В”, достаточно ярка на изображениях в континууме, спектр ее содержит наиболее контрастные линии молодого звездного населения. Эта область отличается синими показателем цвета (рис.3.8) и выглядит компактно в сравнении с другими близкими приливными филаментами. Возможно, это то, что осталось от ядра галактики-спутника. На диагностических диаграммах точки из области “С” располагаются в секторах III и LINER, т.е. здесь преобладает фотоионизация от процессов звездообразования. А в областях, близких к ядру, заметный вклад также вносит ударная ионизация. Информация об источниках ионизации в этом регионе довольно скудная и относится только к границе области “С” с ядром Mrk 334, так как в спектре “С” видны широкие звездные абсорбции, а эмиссия наблюдается только в H α . Если принять во внимание вид спектра в этом регионе, то с учетом высказанных в начале главы замечаний, понятно, что “С” – это область недавнего звездообразования, проецирующаяся на диск Mrk 334 близко к ядру.

3.4.3 Кинематика газа

Несмотря на следы взаимодействия, заметные на прямых снимках галактики, поле скоростей газа, построенное со сканирующим ИФП, хорошо описывается моделью чисто кругового вращения с параметрами: $i_0 = 34^\circ \pm 6^\circ$, $PA_0 = 297^\circ \pm 3^\circ$. Во всяком случае, это верно для области заполненной эмиссией H α (рис.3.12). Скорее всего, приливные структуры расположены вне плоскости галактики, не возмущают весь газовый диск и лишь пересекают его в отдельных местах.

На рис. 3.12 показано распределение лучевых скоростей после вычитания модели кругового вращения. В областях с наиболее яркой эмиссией H α отклонения от кругового вращения невелики, в пределах 15–20 км/с. Но к югу от ядра обнаруживается протяженная область, в которой остаточные скорости значительно выше и плавно меняются вдоль направления восток-запад от –70 до +60 км/с. На прямых снимках галактики в этой области нет каких-либо заметных особенностей. Т.е. пекулярные скорости не связаны ни с внутренней спиральной волной, ни с движениями газа внутри приливных структур.

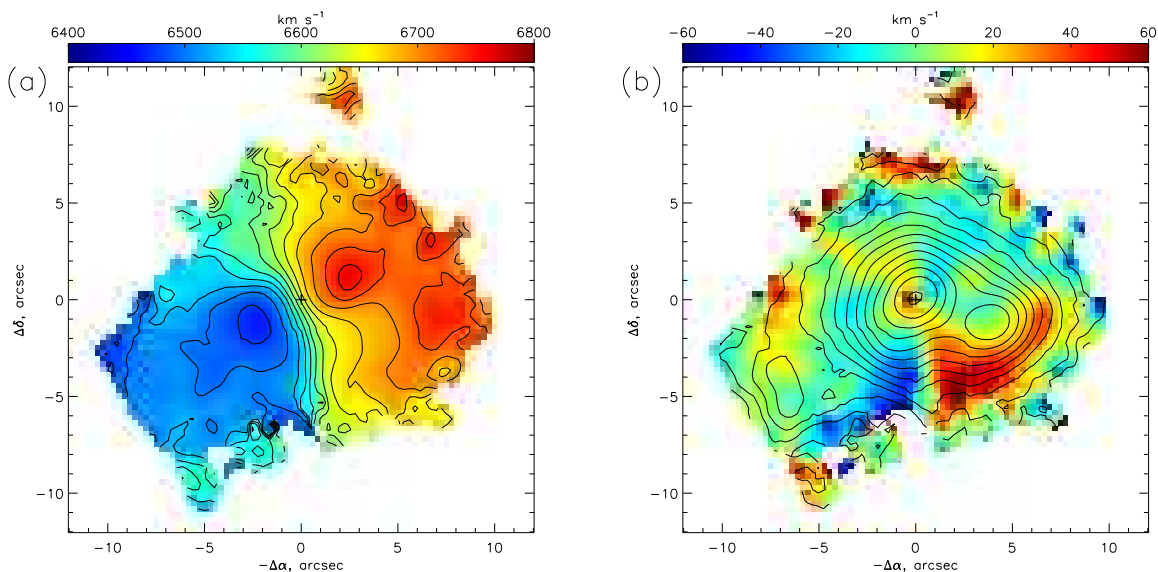


Рис. 3.12 Mrk 334. Кинематика ионизованного газа по данным ИФП в линии $H\alpha$. (а) – поле лучевых скоростей, (б) – остаточные скорости (наблюдения минус модель) с изофотами в линии $H\alpha$.

Именно здесь находится область “В”, выделенная ранее по своим спектрофотометрическим свойствам, прежде всего по высокому отношению линии $[OIII]/H\beta$. Таким образом, эта область отличается еще и пекулярной кинематикой ионизованного газа. Такое распределение скоростей подтверждает высказанное выше предположение о том, что область “В” – место пролета остатков разрушенного спутника через газовый диск галактики.

Альтернативным объяснением особенностей наблюдаемой кинематики газа является предположение о воздействии джета из активного ядра на межзвездную среду диска галактики, в качестве примера можно привести Mrk 3 (Capetti et al., 1999) или Mrk 533 (Smirnova et al., 2007). Но для Mrk 334 это маловероятно. Во-первых, как уже отмечалось, здесь нет протяженной радиоструктуры. Во-вторых, в случае джета из ядра ожидаемый градиент пекулярных скоростей должен быть направлен в радиальном направлении, а не в азимутальном, как на рис.3.12б.

Полученные на MPFS поля скоростей (рис. 3.6) позволили нам, хотя и с меньшей точностью и более грубой детализацией чем в линии $H\alpha$ по данным ИФП, изучить кинематику газа в линиях с разным механизмом возбуждения. Движения газа, наблюдаемые по большинству ярких эмиссионных линий низкого возбуждения ($[OI]$, $[OII]$, $[NII]$, $[SII]$), хорошо согласуются с вышеописанной картиной в линии $H\alpha$. Но в линии $[OIII]\lambda 5007$ наблюдается другая картина. Во-первых, остаточные скорости в области “В” составляют $-100.. -150$ км/с, что по амплитуде в несколько раз выше, чем в линиях низкого возбуждения. Во-вторых, в спектре ядра присутствует значительный избыток отрицательных скоростей, достигающий до -300 км/с. Похожие истечения газа из активного ядра (избыток “синих” скоростей, прежде всего в $[OIII]$) обнаруживаются при анализе данных панорамной спектроскопии в ряде активных галактик: Mrk 315 (Ciroi et al., 2005), NGC 2273 (Moiseev et al., 2004), NGC 6104 (Смирнова и др., 2006). Такое истечение, непосредственно связанное с центральной машиной активного ядра, интерпретируют либо как воздействие радиоджета на облака межзвездного газа, либо, в более общем случае, как проявление менее коллимированного горячего ветра, исходящий от активного ядра (см. обсуждение и ссылки в Komossa et al., 2008). Но в Mrk 334 ситуация, скорее всего, иная. Во-первых, на радиокартах с высоким угловым разрешением отсутствует радиоджет, во всяком случае, его возможный размер не превышает $0.5''$. Во-вторых, в самом ядре вклад нетеплового компонента в ионизацию газа меньше, чем от звездообразования. В-третьих, в отличие от приведенных выше примеров активных галактик, истечение наблюдается только в линии $[OIII]$ и отсутствует на картах в других эмиссионных линиях. Скорее

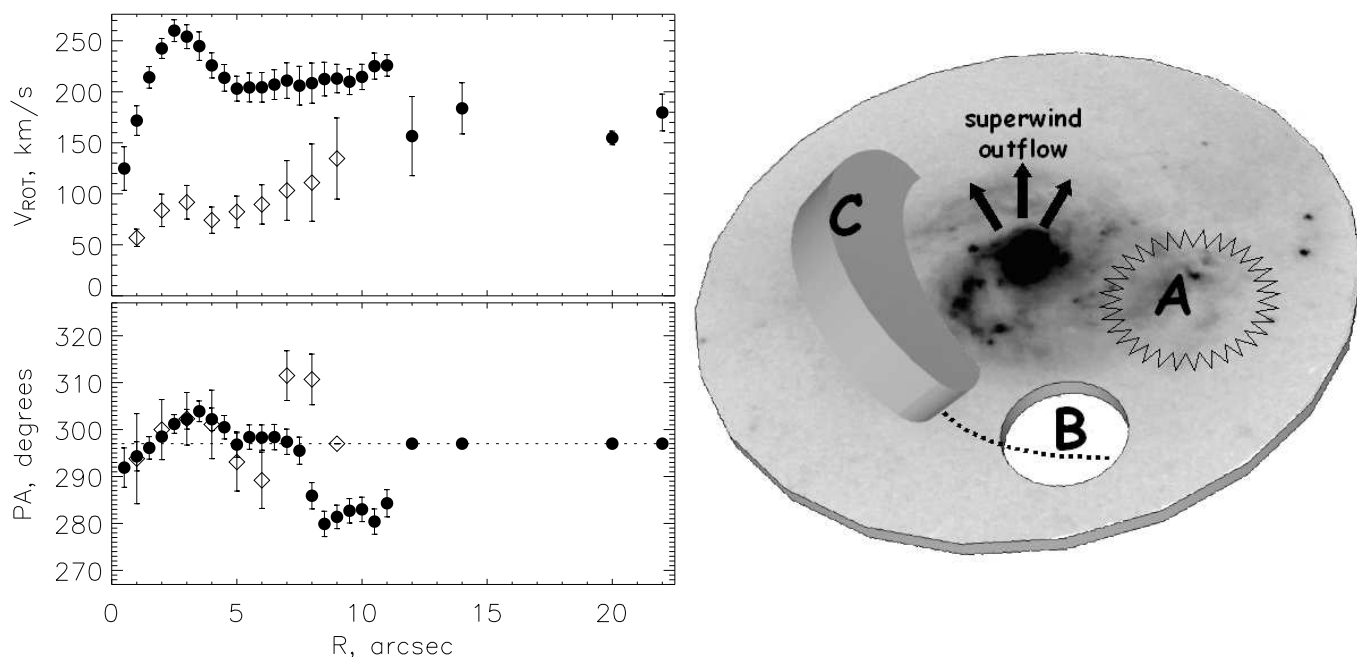


Рис. 3.13 Слева – кривая вращения M83 и вариации PA_{kin} с радиусом. Черные кружки – измерения по полю скоростей, полученным с ИФП в $H\alpha$, ромбы – измерения по полю скоростей звездного компонента. Справа – схема, поясняющая пространственную структуру внутренней ($r < 5$ кпк) области M83, пунктиром отмечена предполагаемая орбита ядра спутника.

всего, истечение в линии [OIII] связано не с активной центральной машиной как таковой, а с мощным звездообразованием в ядре. И в этой линии мы наблюдаем газ низкой плотности, выброшенный над плоскостью галактики в результате массовых взрывов сверхновых – так называемый “сверхветер” (см. §6.4). Здесь же в ядре единственное место в поле зрения MPFS, где присутствуют значительные (до -180 км/с) отклонения лучевых скоростей, измеренных в абсорбционной линии NaD, от скоростей измеренных по другим звездным линиям поглощения (MgI, Fe и т.д.). Линия NaD присутствует не только в спектре звезд поздних классов, но и в межзвездной среде. Поэтому естественно связать избыток скоростей в этой линии с тем же самым сверхветром.

3.4.4 Обсуждение структуры галактики

Итак, M83 находится в процессе слияния с компаньоном, который уже почти полностью разрушен приливными силами. Во внутренней части галактики ($r \leq 3$ кпк) присутствует четко выраженная спиральная структура. Яркая область HII “A” находящаяся на расстоянии около 2 кпк от центра, по своим размерам соответствует крупнейшим комплексам звездообразования в близких спиральных галактиках. Суммарный темп звездообразования в галактике, согласно оценкам по линии $H\alpha$ составляет $SFR=18 M_{\odot}/год$, при этом большая его часть сосредоточена в ядре. В связи со всем этим понятно, почему на ионизационных диаграммах часть точек, принадлежащих ядру лежит в области, соответствующей ионизации молодыми звездами. Бурное звездообразование в ядре вносит настолько заметный вклад в светимость в эмиссионных линиях, что на его фоне теряется излучение от активного ядра.

Столь мощная вспышка звездообразования в достаточно компактной области приводит к формированию сверхветра. Газ низкой плотности, разогретый частыми вспышками сверхновых, пробивается через плотный и холодный газ диска и формирует истечение в широком конусе перпендикулярно к плоскости галактики. Обычно сверхветер наиболее заметен в галактиках, ориентированных с ребра, где конус горячего газа полностью от-

крыт для наблюдателя. В качестве примера можно привести изображения галактик M 82, NGC 1482 и NGC 3079 (Veilleux et al., 2005). Однако у Mrk 334 ориентация менее “удобная” и здесь конус проецируется на яркий диск галактики, так что о присутствии сверхветра приходится судить по косвенным признакам. Во-первых, в направлении на ядро галактики (вершина конуса) наблюдаются отрицательные лучевые скорости в линии [OIII], что указывает на истечение высокоионизованного газа перпендикулярно к плоскости галактики со скоростями 200 – 300 км/с. Здесь же, вдоль луча зрения наблюдаются движения со сходными скоростями в линии поглощения NaD. Это указывает на то, что динамическое давление сверхветра увлекает с собой и часть холодной межзвездной среды. Вторым указанием на сверхветер является несимметричное относительно ядра распределение рентгеновского излучения, вызванное наклоном конуса сверхветра к картинной плоскости (подробнее см. Smirnova & Moiseev, 2010).

Уже на расстояниях 1 – 2 кпк от ядра заметную роль играют процессы, связанные со взаимодействием – области “B” и “C”, а также система приливных арок и оболочек, простирающаяся до расстояний 40 кпк от ядра. На рис. 3.13 схематично показана структура внутренней области галактики размером несколько кпк. Анализируя кинематику газа и звезд, мы пришли к выводу, что орбиты, по которым движутся остатки разрушенного компаньона, лежат вне диска Mrk 334 и пересекают его под значительным углом. Область такого недавнего пересечения мы наблюдаем в виде каверны пониженной плотности газа (область “B”), образовавшейся после пролета плотной звездной конденсации. Скорость вращения здесь составляет 200 – 250 км/с (см. кривую вращения на рис. 3.13), поэтому скорость фрагментов спутника относительно газового диска оказывается достаточно высокой. Она равна скорости вращения, если фрагменты спутника находились на полярной орбите, и может даже превышать ее в случае ретроградного движения фрагментов по наклонным орбитам. Косвенные свидетельства высокой скорости столкновения мы находим в данных о кинематике и ионизации газа. Поле скоростей в области размером около 3 кпк оказывается сильно возмущенным. Максимальная амплитуда возмущенных скоростей в линиях низкого возбуждения достигает 70 км/с в проекции на луч зрения. А в линии [OIII] эти скорости достигают 150 км/с, так как в этой линии мы видим газ низкой плотности, ионизованный сильной ударной волной. Состояние ионизации газа в области “B” может быть описано в рамках модели shock+precursor для ударной волны со скоростями 250 – 450 км/с. Согласие всех трех оценок скорости столкновения (по кривой вращения, по возмущению поля скоростей и по ионизационным моделям) свидетельствует в пользу предложенной интерпретации образования области “B”. Заметим, что если бы мы рассматривали не совокупность всех данных, а ограничивались лишь одним методом исследования (полями скоростей или только ионизационными диаграммами), то наблюдаемую картину можно было бы попытаться объяснить воздействием джета из активного ядра на межзвездную среду. Но такое предположение не проходит, если мы рассматриваем весь имеющийся набор данных об области “B”.

В качестве наиболее вероятного кандидата, пробившего диск Mrk334 и создавшего в нем каверну горячего газа, мы рассматриваем остаток галактики-спутника, который сейчас наблюдается в виде области “C”. Спектры MPFS показывают, что возраст и состав звездного населения в области “C” отличен от звездного диска Mrk 334, на который она проецируется. Более того, лучевые скорости молодого звездного населения, связанного с областью “C”, заметно (почти на 100 км/с) отличаются от скоростей старого звездного населения в диске. Как расположена область “C” относительно наблюдателя? Остаточные скорости ионизованного газа в каверне (область “B”) в основном имеют отрицательный знак. Это означает, что тело, создавшее каверну пролетало через плоскость диска в направлении к нам и сейчас должно находиться над диском галактики (относительно наблюдателя). Остаточные скорости в звездном поле скоростей в области “C” тоже отрицательны, следовательно ядро спутника после столкновения прошло менее четверти своей орбиты. Принимая радиус орбиты равным 2 кпк, а орбитальную скорость 250 км/с (в согласии с кривой вращения), получаем оценку возраста каверны в области “B” $t \approx 1.2 \times 10^7$ лет. Т.е. столкновение действительно произошло недавно и каверна еще

не успела охладиться.

Основные результаты главы 3

- Выполнено исследование кольцевой столкновительной галактики Arp 10. Измерены скорости расширения колец звездообразования, построена самосогласованная модель галактики, объясняющая ее пекулярную структуру. Показано, что кольцевая структура сформировалась в результате нецентрального столкновения с массивным спутником 85 млн. лет назад. Обнаружен сам спутник.
- Изучена кинематика звезд во внутренней части Malin 1 – уникальной галактики низкой поверхностной яркости, у которой обнаружен спутник (Malin 1B), взаимодействие с которым объясняет основные морфологические особенности центральной области Malin 1 – двухрукавную спиральную структуру, бар и внешнюю однорукавную спираль. А галактика SDSS J123708.91 + 142253.2, скорее всего, ответственна за формирование протяженной оболочки низкой поверхностной яркости, возникшей вследствие лобового столкновения с Malin 1.
- Выполнено детальное исследование структуры и кинематики сейфертовской галактики Mrk 334. На глубоких изображениях обнаружены протяженные приливные структуры в виде петель и арок, наблюдаемых на расстояниях от 2 до 40 кпк от центра – результат недавнего взаимодействия с достаточно большим компаньоном ($1/3 - 1/5$ от массы основной галактики). В диске Mrk 334 найдена каверна, заполненная ионизованным газом низкой плотности. Мы интерпретируем эту область как место недавнего (около 12 млн. лет назад) пролета остатков разрушенного спутника через газовый диск основной галактики.

Основные публикации, представляющие результаты этой главы:

- Bizyaev D.V., Moiseev A.V., Vorobyov E.I., “Propagating star formation in the collisional ring galaxy Arp 10”, 2007, *Astrophysical Journal*, v. 662, p. 304
- Smirnova A., Moiseev A. “3D spectroscopy of merger Seyfert galaxy Mrk 334: nuclear starburst, superwind and the circumnuclear cavern”, 2010, *MNRAS*, v. 401, p. 307
- Reshetnikov V.P., Moiseev A.V., Sotnikova N.Ya., “Malin1: interacting galaxy pair?”, 2010, *MNRAS*, v. 406, p. 90L
- Moiseev A.V., Bizyaev D.V., “3D spectroscopic study of galactic rings: formation and kinematics”, 2009, *New Astronomy Reviews*, v. 53, p. 169

Глава 4

Галактики с полярными кольцами и проблема внешней аккреции

Неправильная чёрная полоса рассекала пятно пополам, оттеняя сильно светящиеся огненные массы по обеим сторонам черноты, которая расширялась на концах и затемняла обширное поле горящего газа, кольцом охватывавшего яркое пятно... Так выглядел полученный невероятными ухищрениями техники снимок сталкивающихся галактик...

(И.А. Ефремов)

4.1 Введение: история изучения ГПК

Галактики с полярными кольцами (ГПК) представляют собой интересный случай перпендикулярных систем, в которых наблюдаются внешние кольца или диски из газа, пыли и звезд, вращающиеся в плоскости примерно перпендикулярной к диску основной галактики. Считается, что образование ГПК, вызвано либо слиянием галактик с соответствующим направлением момента вращения, либо аккрецией хозяйской галактикой вещества спутника или газовых филаментов из межгалактической среды (см. обзор, Combes, 2006, там же ссылки на более ранние работы). Согласно Bournaud & Combes (2003), большая часть полярных колец образуются именно в рамках аккреционного сценария. Показано, что в случае сплюснутого или трехосного гравитационного потенциала в полярной плоскости существуют устойчивые орбиты, поэтому захваченное вещество спутника будет вращаться здесь достаточно долго (Steiman-Cameron & Durisen, 1982). Если же плоскость орбиты заметно отличается от полярной, то образующееся кольцо относительно быстро прецессирует к плоскости галактики.

Детальное рассмотрение структуры и динамики ГПК позволяет не только уточнить роль взаимодействий и слияний в современной эволюции галактик, но и изучить особенности распределения гравитационного потенциала на больших радиусах. Так как здесь наблюдается круговое вращение в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, то появляется возможность изучить трехмерное распределение массы в галактике, в том числе определить форму темного гало: сплюснутость, вытянутость, отклонения от осевой симметрии (Sackett & Pogge, 1995; Iodice et al., 2003; Combes, 2006). Кроме того, в последнее время появляются указания на то, что некоторые относительно массивные полярные кольца сформировались в результате захвата газа, сосредоточенного в реликтовых филаментах межгалактической среды. В рамках такого сценария Macciò et al. (2006) и Brook et al. (2008) смогли, используя космологическое гидродинамическое моделирование, построить объект, весьма напоминающий известную ГПК NGC 4650A. Недавно дополнительные наблюдательные аргументы в пользу модели аккреции из филаментов были приведены в статьях Spravone et al. (2010) – указавших на пониженную металличность в кольце NGC

4650A и Stanonik et al. (2009) – обнаруживших полярный газовый диск нейтрального водорода в SDSS J102819+623502. Таким образом, дальнейшее изучение ГПК поможет лучше понять причины и источник аккреции газа из межгалактической среды, требующейся для решения ряда загадок галактической эволюции (Combes, 2008; Kauffmann et al., 2010).

Хотя первые достоверные подтверждения существования полярных колец были получены достаточно давно (Schechter & Gunn, 1978), их статистическое изучение началось только после того как Whitmore et al. (1990) опубликовали каталог кандидатов – Polar Rings Catalog (PRC). Он содержал 157 объектов, из них только 6 (PRC A) уже имели кинематическое подтверждение (обнаружено вращения в двух ортогональных плоскостях), а 27 галактик относились к категории “хороших кандидатов” (PRC B). Большую же часть списка составляли “возможные кандидаты” (PRC C) и “родственные объекты” (PRC D). В дальнейшем несколько групп занимались исследованием кинематики объектов каталога (в основном – в северной небесной полусфере) как методами оптической спектроскопии, так и радиоинтерферометрии. Однако число кинематически подтвержденных ГПК по-прежнему невелико. Подтверждены внешние полярные кольца примерно в 20 галактиках из PRC (Решетников и др., 2011), включая несколько “родственных систем”, где полярные структуры только формируются. Кроме того, еще 6 галактик содержат внутренние полярные диски радиусом менее 1-3 кпк.

Даже в самом простом случае, когда и центральная галактика и кольцо видны в положении “с ребра”, требуется получить как минимум два спектральных разреза с длинной щелью, чтобы определить характер вращения обеих подсистем. Если же пространственная ориентация такова, что одна из плоскостей вращения видна под умеренным наклоном к лучу зрения, то возникает ряд трудностей. Во-первых, используя только прямые снимки далеко не всегда удается понять, что объект может относиться к ГПК. Во-вторых, для детального изучения кинематики необходимо получить значительно большее число разрезов с различной ориентацией щели спектрографа. В этом случае лучше построить двумерное поле скоростей, используя методы панорамной спектроскопии в оптическом диапазоне или радиоинтерферометрии в линиях молекулярного или атомарного газа. Отметим, что в столь сложных объектах, иногда даже наличие большого набора как фотометрических, так и кинематических данных не всегда позволяет сделать однозначный вывод о структуре подсистем галактик, см. пример UGC 5600 (Шаляпина и др., 2007).

Несмотря на потенциальную возможность измерения формы темного гало с помощью изучения кинематики ГПК, однозначных результатов пока нет. С одной стороны, статистический анализ распределения интегральных параметров ГПК на диаграмме Талли-Фишера (Iodice et al., 2003; Reshetnikov, 2004) указывает на то, что внешнее гало сплюснуто к плоскости полярного кольца, что само по себе необычно. С другой стороны, изучение отдельных галактик с сильно изогнутыми внешними дисками HI, такими как NGC 2685 = PRC A-3 (Józsa et al., 2009), NGC 3718 = PRC D-18 (Sparke et al., 2009), NGC 4753 = PRC D-23 (Steiman-Cameron et al., 1992), указывает на более-менее сферическое гало. Сложность проблемы и необходимость детального анализа каждой галактики иллюстрирует случай NGC4650A, где ранее Whitmore et al. (1987) отмечали, что гравитационный потенциал галактики почти сферичен. Но недавний анализ кинематики более протяженных структур указывает на очень сильную сплюснутость гало, ориентированного в согласии с полярным кольцом (Iodice, 2010).

Среди возможных путей решения вопросов, связанных с формированием и эволюцией полярных колец, следует выделить два направления. Во-первых, это детальное исследование уже известных кандидатов с привлечением данных о морфологии и кинематике в различных диапазонах спектра. Во-вторых, расширение списка кандидатов как с целью уточнения функции светимости ГПК и продвижения в сторону больших красных смещений, так и с целью поиска объектов, в которых и кольцо и галактика “удобно” развернуты к лучу зрения ($i = 40 - 70^\circ$), что позволяет одновременно исследовать и кинематику и детали внутренней структуры. В этой главе представлены работы по обоим направлениям. В начале рассмотрены две галактики, в которых, используя данные наблюдений на

6-м телескопе, удалось достаточно подробно изучить строение полярных подсистем. На первом примере (Arp 212) используемые методы и подходы рассмотрены более подробно, так как здесь структура изогнутого газового диска заметно сложнее, чем в следующей галактике, относящейся к “классическим” ГПК. После представлены результаты изучения Объекта Хога, где уникальное газовое кольцо, скорее всего, сформировалась в результате процессов, сходных с аккреционным сценарием, предлагаемым для наиболее массивных ГПК. Далее представлен новый каталог кандидатов в ГПК, составленный по данным обзора SDSS, и результаты кинематического исследования отдельных объектов каталога.

4.2 Изогнутое полярное кольцо в Arp 212

Arp 212 (NGC 7625, III Zw 102) – пекулярная галактика, которую сперва по внешнему виду относили к раннему морфологическому типу (E-S0), но Cairós et al. (2001b) показали, что это скорее объект позднего типа Im, так как уже на небольших расстояниях от центра профиль поверхностной яркости хорошо описывается экспоненциальным законом, характерным для плоского диска без балджа. Кроме того, галактика богата газом и содержит многочисленные области HII, свидетельствующие о бурном звездообразовании с темпом $3 - 8 M_{\odot}/\text{год}$ (Yasuda et al., 1992; Li et al., 1993).

Во многом благодаря значительной светимости в эмиссионных линиях ионизованного газа Thuan & Martin (1981) отнесли Arp 212 к классу голубых компактных карликовых галактик (BCDG), хотя ее размеры ($D_{25} = 11$ кпк), масса и светимость весьма велики: $((3-8) \times 10^{10} M_{\odot}$ и $L_B = 1.3 \times 10^9 L_{\odot}$, согласно (Yasuda et al., 1992). Тем не менее, традиция сохраняется, объект продолжает фигурировать в выборках BCD галактик (Cairós et al., 2001b,a; García-Lorenzo et al., 2008). В согласии с Li et al. (1993) принято расстояние до галактики 23.5 Мпк, что дает масштаб 115 пк/”.

Характерная особенность Arp 212, заметная на оптических снимках – цепочка пылевых полос, образующих незамкнутое кольцо радиусом около $15 - 20''$, вытянутое вдоль $PA \approx 45^{\circ}$. Юго-западная часть кольца характеризуется наиболее мощными взаимно пересекающимися пылевыми прожилками. Благодаря этой детали галактика была не только внесена в список пекулярных галактик Арпа (Arp, 1966), но и отмечена в каталоге Whitmore et al. (1990), как объект “родственный галактикам с полярными кольцами”. Другая структурная особенность была обнаружена на снимках в эмиссионной линии H α – внешние области HII располагается в криволинейных филаментах, простирающихся до 4 кпк ($35 - 45''$) от центра (Cairós et al., 2001a).

Построенное в работе Li et al. (1993) поле скоростей внутренних ($r < 17''$) областей в линии CO показало, что молекулярный диск регулярно вращается в той же плоскости, что и звезды. В этой же статье представлено поле скоростей HI. Оказалось, что диаметр диска нейтрального водорода в 4 раза превышает оптический диаметр D_{25} . При этом газ за пределами звездного диска вращается в той же плоскости, но в противоположном направлении. Кинематика нейтрального водорода внутри оптического диска весьма сложна, изолинии лучевых скоростей разворачиваются почти на 90° . Авторы предположили, что здесь имеется либо сильный изгиб газового диска, либо наклоненное газовое кольцо. Низкое пространственное разрешение ($beam = 51''$) не позволяло изучить движения нейтрального газа внутри оптического диска.

Итак, то, что галактика несет в себе следы недавнего взаимодействия сомнений не вызывает, но при этом нет четкого ответа, на вопросы, с чем именно происходит взаимодействие, как движутся внешние эмиссионные области, принадлежат ли они вообще галактике и т.д. Ответ могло дать изучение поля скоростей ионизованного газа в переходной области между внутренним молекулярным диском и внешней структурой нейтрального водорода.

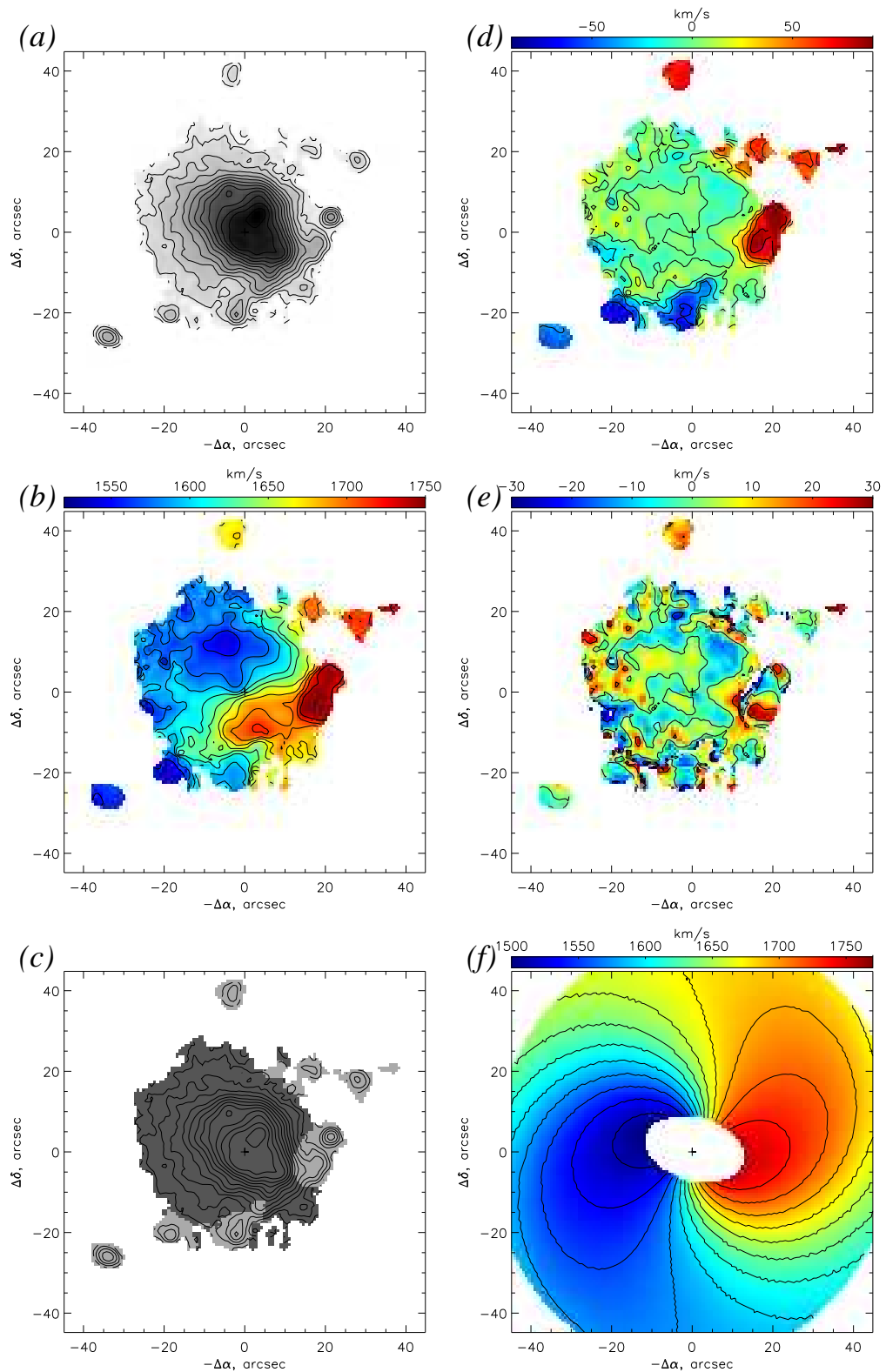


Рис. 4.1 M33: распределение интенсивности в линии $H\alpha$ в логарифмической шкале (a), поле лучевых скоростей (b), схема разделения галактики (c) на внутренний диск (темное) и внешние филаменты (светлое), с наложенными изофотами в линии $H\alpha$. Карты остаточных лучевых скоростей: для круговой модели вращения внутреннего диска (d), для раздельного учета вращения внутренних и внешних областей (e). Поле скоростей филаментов в двумерной модели изогнутого диска (f).

4.2.1 Анализ поля лучевых скоростей

На рис. 4.1 приведены изображение галактики в линии $\text{H}\alpha$ и поле лучевых скоростей ионизованного газа, построенные с помощью сканирующего ИФП (IFP501) с прибором SCORPIO. Нам удалось уверенно измерить скорости всех внешних эмиссионных областей, обнаруженных Cairós et al. (2001a). Видно, что форма изолиний поля скоростей соответствует регулярному вращению в области, ограниченной расстоянием от центра $r \approx 20''$, т.е. там, где сосредоточена большая часть эмиссии в $\text{H}\alpha$. Вид поля скоростей хорошо согласуется с данными панорамной спектроскопии для внутренней области, приведенными García-Lorenzo et al. (2008). Положение центра вращения в пределах ошибок совпадает с центром изофот изображений в линии $\text{H}\alpha$ и в континууме.

В поле скоростей можно выделить два типа движений: со скоростями близкими к модели кругового вращения на данном радиусе r и заметно отличающиеся от нее, более чем на некоторую пороговую величину (v_{lim}). Мы построили несколько вариантов моделей кругового вращения, подбирая v_{lim} так, что бы точки, принадлежащие каждой группе, сосредоточивались в пространственно связанных в картинной плоскости областях. Наилучший результат достигается для $v_{lim} = 36$ км/с, при этом поле скоростей четко разделяется на две части, показанные на рис. 4.1 (с): внутренний диск с примерно круговым вращением и отдельные компактные области. К последним относятся все внешние области III на расстоянии более $20''$ от центра, а также несколько областей звездообразования, проецирующиеся на юго-западный край диска галактики.

В Таблице 4.1 даны параметры ориентации внутреннего диска галактики, полученные из поля скоростей в рамках предположения о круговом вращении в одной плоскости, так что PA , i и V_{sys} не меняются вдоль радиуса. В пределах приведенных ошибок они совпадают с величинами, найденными в Li et al. (1993) для диска молекулярного газа на $r \leq 15''$.

Для уточнения модели использовалось квазикруговое приближение, предполагающее, что газ вращается по круговым орбитам, у которых V_{sys} и PA_{kin} меняются с радиусом (§1.5.1). Результаты анализа показаны на рис. 4.2. Вариации системной скорости не превышают ± 10 км/с от среднего значения. Кривая вращения внутренней части диска близка к данным по молекулярному газу, пересчитанным к принятому значению i_0 , а более резкий градиент скорости вращения ионизованного газа скорее всего обусловлен тем, что радионаблюдения Li et al. (1993) имели в 2.5 раза худшее пространственное разрешение.

На $r = 13 - 30''$ замечен систематический рост величины PA_{kin} , полная амплитуда изменений превышает 30° . Наиболее естественное объяснение – изгиб внешних областей диска. К сожалению, из-за сравнительно небольшой величины i_0 , применяемый метод анализа оказывается неустойчивым по параметру $i(r)$ – углу наклона диска к картинной плоскости внутри каждого узкого кольца. Поэтому, в рамках этой модели не удастся определить как меняется наклон изогнутой части диска к лучу зрения.

На рис. 4.1(d) показана карта остаточных скоростей (наблюдаемые минус модельные), модель экстраполировалась в область внешних филаментов. Остаточные скорости во внутреннем диске в основном не превышают ± 20 км/с. В то же время во внешних областях III они в несколько раз больше, причем демонстрируют явно систематический характер, плавно меняясь от $+100$ км/с на северо-западе до -75 км/с на юго-востоке. Картина распределения скоростей внешних филаментов напоминает вращение наклонного диска с параметрами ориентации, заметно отличающимися от параметров внутренней области.

Параметры модели вращения внешних областей определялись в рамках кругового приближения, аналогично тому, как это было сделано выше для внутреннего диска и приведены в последней колонке Таб. 4.1. Системные скорости обоих кинематических компонент совпадают, в то время как PA_0 и i_0 сильно различаются. Центры вращения внешних областей и внутреннего диска совпадают с точностью лучше $1''$.

Результаты анализа поля скоростей филаментов в квазикруговом приближении показаны ромбиками на рис. 4.2. Анализ проводился в предположении постоянного по радиусу угла i . Определить вариации $i(r)$ не удастся из-за сравнительно малого числа точек внут-

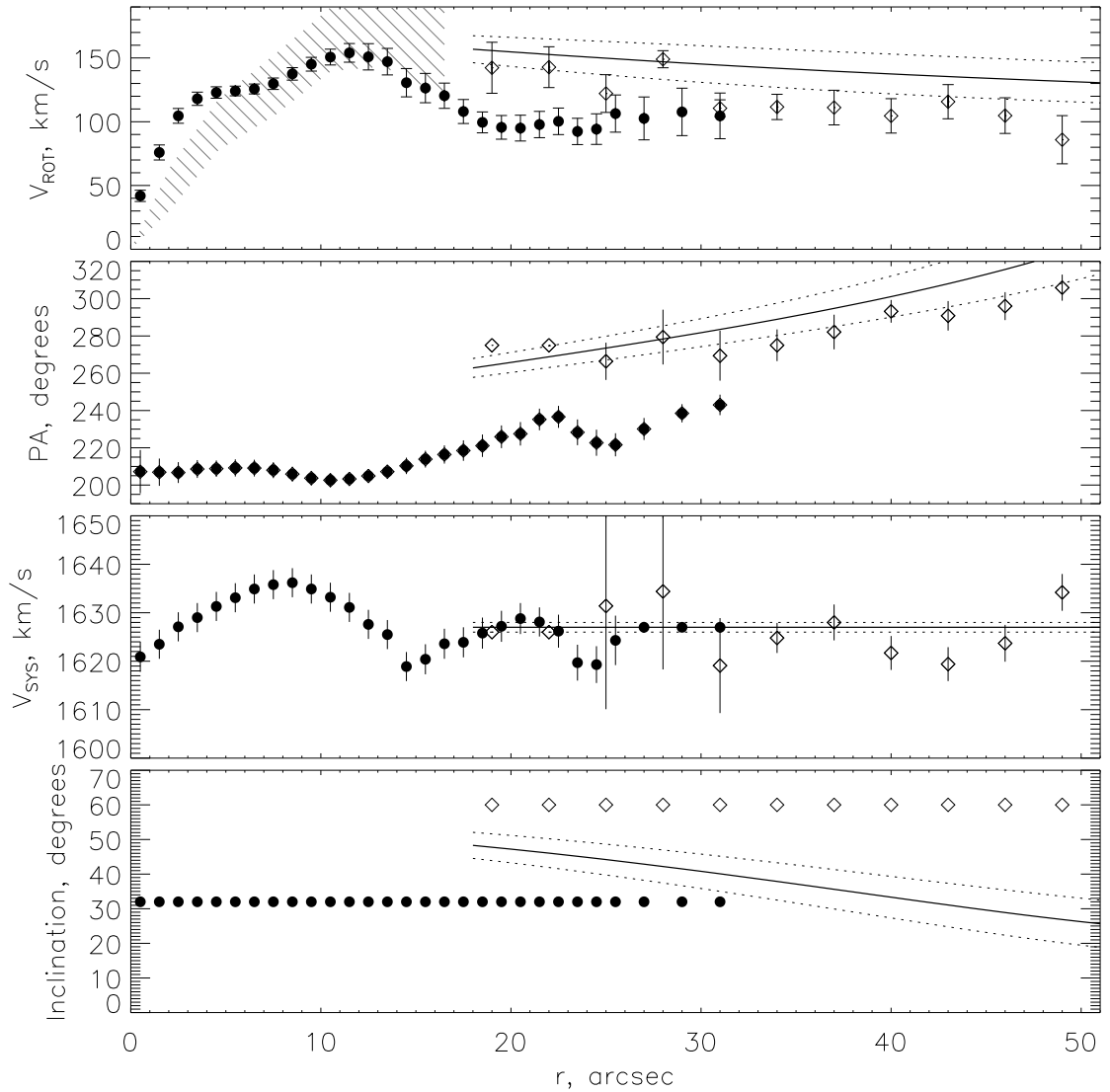


Рис. 4.2 Изменение вдоль радиуса кинематических параметров, характеризующих поле скоростей ионизованного газа. Сверху вниз: скорость кругового вращения, PA_{kin} , системная скорость, наклон к лучу зрения. Черные кружки соответствуют внутреннему диску, белые ромбы – внешним эмиссионным областям. Штриховкой на верхнем графике показана скорость вращения молекулярного газа из Li et al. (1993), с учетом ошибок измерения. Сплошными линиями показаны результаты расчета кинематических параметров в двумерной модели изогнутого диска. Пунктиром указан интервал 3σ , вычисленный по величинам ошибок модельных параметров из таб. 4.2.

Таблица 4.1 Средние кинематические параметры газовых подсистем Apr 212.

Внутренний диск ($r = 0 - 20''$)		Внешние филаменты ($r = 25 - 50''$)	
Параметр	Величина	Параметр	Величина
PA_0 ($^\circ$)	211 ± 6	PA_1 ($^\circ$)	275 ± 15
i_0 ($^\circ$)	32 ± 8	i_1 ($^\circ$)	60 ± 10
V_{sys} (км/с)	1627 ± 5	V_{sys} (км/с)	1626 ± 6

Таблица 4.2 Параметры двумерной модели.

Параметр	Величина	Параметр	Величина
δ_0 ($^\circ$)	29 ± 3	δ_1 ($^\circ''$)	0.40 ± 0.06
γ_0 ($^\circ$)	51 ± 5	γ_1 ($^\circ''$)	0.94 ± 0.15
V_{max} (км/с)	89.0 ± 7	V_{sys} (км/с)	1627 ± 1
R_h ($''$)	-46 ± 25		

ри каждого узкого кольца. Позиционный угол линии узлов для круговых орбит филаментов меняется с радиусом, так что во внешних частях разворот PA относительно внутреннего диска достигает 90° , заметно превышая величину PA_0 из таблицы 4.1. Обычно вариации PA_{kin} относительно среднего значения интерпретируют либо как некруговые движения в плоскости диска, либо же как изменение ориентации (изгиб) диска относительно луча зрения. Первое предположение представляется нам маловероятным, для наблюдаемого разворот PA_{kin} на десятки градусов в случае плоского диска требуется значительные радиальные и азимутальные движения, сравнимые со скоростью кругового вращения. Такая ситуация иногда наблюдается в галактиках с перемычками, но не характерна для внешних областей диска, поскольку требует значительной асимметричности в распределении гравитационного потенциала (спиральные волны плотности или бар). Второй вариант интерпретации (разворот плоскости круговых орбит) представляется более реалистичным.

4.2.2 Пространственная ориентация орбит

Существенные различия параметров ориентации внутренней и внешней газовых подсистем (таб. 4.1) указывают на то, что плоскость вращения внешних филаментов значительно наклонена к плоскости внутреннего диска.

Пылевые полосы, составляющие упоминавшееся выше пылевое кольцо, наиболее заметны в южной и юго-восточной сторонах диска. Карты показателей цвета из Cairós et al. (2001a) так же указывают на то, что юго-восточная половина галактики отличается более красным цветом, что связано с влиянием пылевого поглощения, как это подтверждается картами бальмеровского декремента, приведенным в García-Lorenzo et al. (2008). Из наблюдаемой асимметрии в распределении поглощения следует, что юго-восточная часть звездного диска Apr 212 является ближайшей к нам, а из вида его поля скоростей – что вектор углового момента вращения направлен в нашу сторону. На рис. 4.1(d) видно, что большинство внешних эмиссионных областей сосредоточено в юго-западной стороне галактики, а в диапазоне $PA \approx 0 - 130^\circ$ области III с аномальными (относительно внутреннего диска) скоростями вообще отсутствуют. Разумно предположить, что эта часть внешнего диска скрыта от наблюдателя звездным диском галактики. Тогда юго-западная часть орбит эмиссионных филаментов является ближайшей к нам, а вектор углового момента направлен к наблюдателю.

С учетом вышеприведенных соображений об ориентации дисков относительно наблюдателя, для $i_0 = 32^\circ$, $i_1 = 60^\circ$, $PA_0 = 211^\circ$ принимая изменения PA_1 с радиусом согласно рис. 4.2, получаем из (2.2) угол между плоскостями $\delta = 45 \pm 11^\circ$ для внутренней части изогнутого диска ($r = 20''$). С ростом расстояния от центра угол увеличивается и

достигает $68 \pm 10^\circ$ на $r = 50''$.

4.2.3 Двумерная модель

Из-за недостаточного заполнения поля скоростей нам пришлось предположить, что наклон к лучу зрения орбит во внешнем диске постоянен с радиусом. В то же время мы показали, что этот диск является заметно изогнутым, так что угол наклона орбит относительно внутренних областей, меняется с радиусом. В качестве более адекватной модели мы попробовали использовать двумерную модель изогнутого диска, в предположении линейного изменения углов, характеризующих пространственную ориентацию орбит с ростом галактоцентрического расстоянием R_n (см. обозначения в разделе 1.5.2):

$$\delta_n(r_n) = \delta_0 + \delta_1 R_n, \quad \gamma_n(r_n) = \gamma_0 + \gamma_1 R_n. \quad (4.1)$$

Для кривой вращения принята широко используемая аппроксимация (Coccatto et al., 2007):

$$V_{rot}(r_n) = \frac{2}{\pi} V_{max} \arctan \frac{R_n}{R_h}. \quad (4.2)$$

Отметим, что выражения (4.1) и (4.2) неплохо аппроксимируют результаты, полученные выше в рамках квазикругового приближения. Модельное поле скоростей свертывалось с двумерной гауссианой, имитирующей пространственное разрешение данных ИФП ($2.8''$). Результатом χ^2 -минимизации являются 7 параметров, полностью характеризующих изогнутый диск: δ_0 , δ_1 , γ_0 , γ_1 , V_{max} , R_h и V_{sys} (Таб. 4.2). Полученное решение устойчиво воспроизводится и слабо зависит от начальных условий.

Модельное поле скоростей для орбит филаментов показано на рис. 4.1 (f), а на рис. 4.2 приведены результаты расчета радиальных зависимостей кинематических параметров: кривая вращения, позиционный угол орбит в изогнутом диске и их наклон к картинной скорости, системная скорость (постоянная с радиусом). Видно, что V_{sys} и PA в пределах ошибок совпадают с результатами, полученными в приближении “наклонных колец”. Скорость вращения в двумерной модели мало меняется с радиусом, но примерно на 30% выше, чем получалось в приближении “наклонных колец”. Соответственно и наклон круговых орбит к картинной плоскости, в случае двумерной модели заметно уменьшается с радиусом. При этом угол между внутренним и изогнутым дисками, согласно параметрам из таб. 4.2, составляет $\delta = 37 \pm 3^\circ$ на $r = 20''$, и достигает $49 \pm 4^\circ$ для $r = 50''$. Таким образом, и в двумерной модели δ растет с расстоянием, хотя и несколько медленнее, чем в приближения “наклонных колец”. Но несомненным преимуществом двумерной модели является отказ от предположения о фиксированном i . Далее, говоря о кинематике внешнего газового диска мы будем обращаться к результатам именно двумерной модели, считая ее наиболее близкой к реальности.

4.2.4 Трехмерная структура газовой подсистемы Agr 212

Лучевые скорости внешнего диска хорошо согласуются с приближением круговой модели, учитывающей изгиб плоскости вращения, а системная скорость совпадает с таковой для внутреннего диска. Это указывает на стационарную картину вращения газа. Так не было бы, если эмиссионные области принадлежали бы приливному хвосту, как предполагали Cairós et al. (2001a). На рис. 4.3 показана проекция орбит на картинную плоскость как для внутреннего диска ($r < 25''$), так и для внешних областей ($r = 20 - 50''$). В диапазоне радиусов $r = 20 - 30''$ (2-3.5 кпк) сосуществуют оба типа подсистем - внутренний плоский диск и внешний изогнутый, а значит их орбиты должны пересекаться. Но в таком случае должны происходить столкновения газовых облаков в области пересечений. Как это хорошо видно на рис. 4.3, мощное пылевое кольцо на изображении галактики наблюдается как раз в этом диапазоне расстояний от центра. По-видимому, увеличение плотности газа за фронтом ударной волны приводит к образованию молекулярных и пылевых облаков, подобно тому, как это происходит в галактической спиральной волне.

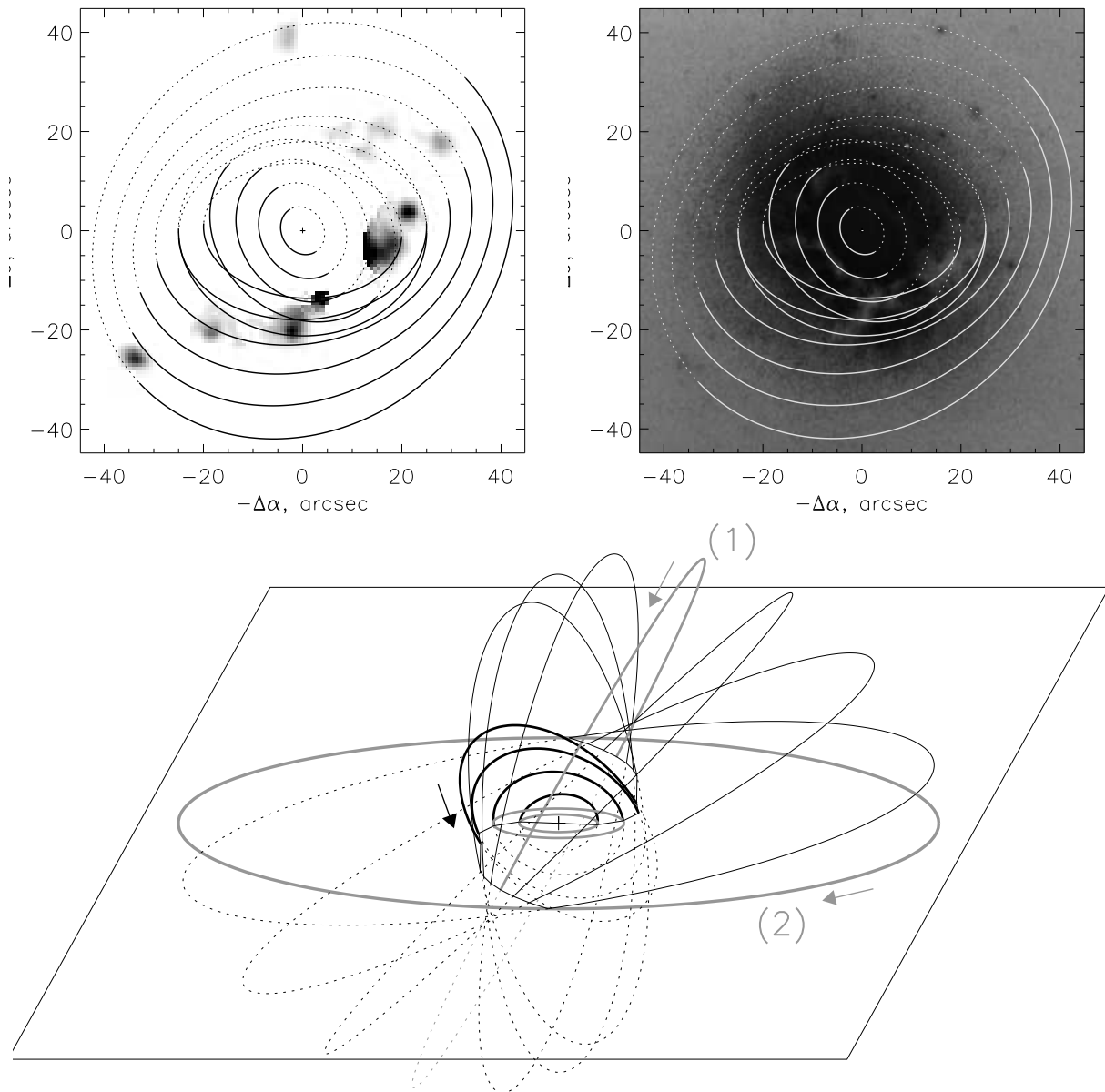


Рис. 4.3 Вверху: изображение в линии $H\alpha$ областей, располагающихся в изогнутом внешнем диске галактики (слева) и фотография галактики из Agr (1966) в красных лучах (справа). Эллипсами показаны проекции круговых орбит (с шагом по радиусу $5''$), пунктиром отмечены части орбит, находящиеся за картинной плоскостью. Показаны как орбиты во внутреннем диске (в плоскости галактики), так и во внешнем изогнутом диске (кольце). Внизу: схема ориентации круговых орбит в изогнутом газовом кольце относительно основной плоскости галактики. Жирными черными линиями выделены орбиты, рассчитанные с использованием двумерной модели поля скоростей. Тонкие черные линии – возможный изгиб диска на больших расстояниях. Серыми эллипсами показаны орбиты внутреннего диска ионизованного газа в плоскости галактики, а также предполагаемая ориентация внешних областей диска $H\text{I}$ (“1” и “2”). Стрелочки отмечают направление вращения. Пунктиром показаны части орбит ниже основной плоскости. Вращение внутренних областей основного диска происходит против часовой стрелки.

Анализ ионизационного состояния внутренних областей галактики также указывает на возможный вклад ударных волн в ионизацию газа на $r \geq 15''$, там где начинается пылевое кольцо (García-Lorenzo et al., 2008). Возможно, что речь идет не столько о столкновении, сколько о выпадении газа из внешнего изогнутого диска на основной диск галактики, поскольку угол между ними уменьшается с приближением к центру. В любом случае, Agr 212 оказывается первой известной нам ГПК, в которой удается непосредственно наблюдать взаимодействие между обеими газовыми подсистемами.

Рассматривая газовую подсистему, к которой принадлежат внешние эмиссионные области, мы обычно говорили “изогнутый диск”, но строго говоря, речь идет о “кольце”, т.е. о диске с дырой в центре, поскольку на $r < 2$ кпк наблюдается только газ, вращающийся в плоскости галактики. Таким образом, внешние области НII располагаются в широком и тонком газовом кольце, угол наклона которого к основному диску растет с радиусом и достигает 50° на расстоянии $50''$ (5.8) кпк от центра, что как раз соответствует оптическому радиусу R_{25} . Следовательно Agr 212 можно уверенно отнести к галактикам с полярными кольцами с учетом того, что кольца в ГПК не всегда являются строго полярными, часто встречаются и изогнутые наклонные кольца. Известный пример – галактик NGC 660 в которой внешнее кольцо наклонено на $\sim 60^\circ$ к основному диску Arnaboldi & Galletta (1993). В отличие от большинства “классических” ГПК, в Agr 212 полярное кольцо почти не заметно на оптических снимках (за исключением вышеупомянутых областей НII) и представлено в основном только в нейтральном водороде.

На рис. 4.3 внизу показано пространственное расположение изогнутого кольца относительно плоскости галактики. Хотя кинематическая модель строилась только для ионизованного газа, очевидно, что мы имеем дело с более глобальным газовым диском, в который вкраплены отдельные области современного звездообразования. Они отслеживают кинематику диска нейтрального водорода, поверхностная плотность которого внутри оптического радиуса достаточно высока. Наблюдения Li et al. (1993) в линии 21 см указывают на то, что от центра до самых внешних областей на $r \approx 20 - 22$ кпк мы видим единую газовую структуру. К сожалению, низкое угловое разрешение не позволяет детально рассмотреть движение газа за пределами оптического диска, а ионизованный газ здесь уже не наблюдается. Единственный более-менее уверенный вывод относительно кинематики газа во внешних областях, который можно сделать на основании данных Li et al. (1993), это то, что на $r \geq 15$ кпк вращение нейтрального диска водорода вновь происходит вокруг оси, близкой к оси вращения галактики, но в противоположном, относительно внутренних областей, направлении.

Попробуем экстраполировать поведение газового диска за пределы оптического радиуса. Разумно предположить, что внешний диск (кольцо) на $r > 50''$ продолжает изгибаться. В таком случае его плоскость достаточно быстро станет полярной к звездному диску галактики (положение “1” на рис. 4.3). Продолжение роста δ с r является не только экстраполяцией нашей кинематической модели, но и согласуется с известными наблюдательными данными о галактиках с сильно изогнутыми дисками. Считается, что подобное искажение формы полярного кольца вызывается прецессией орбит в несферическом гравитационном потенциале. В случае Agr 212, если изгибание будет продолжаться в том же направлении, то с дальнейшим ростом r угол между плоскостью орбиты и галактической плоскостью начнет уменьшаться, так что полярное кольцо возвращается в плоскость галактики (положение “2” на рис. 4.3). Направление вращения внешних областей при таком “опрокидывании” будет противоположно направлению вращения внутренней части диска, что согласуется с наблюдениями в НII.

Сценарий “2” сомнителен, так как если внешний газ вновь располагается близко к плоскости галактики, то получается, что в результате прецессии направление орбитального момента меняется на противоположное. Достаточно необычная картина, поскольку обычно прецессия является следствием отъема или перераспределения углового момента, а здесь необходимо придумать механизм, передающий газовым облакам значительный угловой момент, изменяющий направление вращения на противоположное. Такой механизм должен быть очень специфичен, так как обычно в ГПК столь сложный изгиб не наблю-

дается. Конечно, можно предположить, что в Aгр 212 мы наблюдаем две независимые системы нейтрального водорода – одна породила полярное кольцо, а другая – противорвращающийся внешний диск. Но представляется очень маловероятной гипотеза о том, что мы застали галактику в стадии захвата сразу двух различных газовых подсистем. Более того, имеющиеся наблюдения HI указывают на существование единой структуры в распределении нейтрального водорода.

Поэтому сценарий “1”, в котором внешние части кольца HI располагаются вблизи полярной плоскости, представляется более реальным, кроме того, он согласуется с данными наблюдений. Действительно, согласно Li et al. (1993), внешние изолинии плотности HI заметно вытянуты вдоль $PA_2 \approx 25^\circ$, с отношением полуосей $\sim 2/3$ (см. также рис. 4.4), что соответствует углу наклона $i_2 \approx 50^\circ$ в случае проекции тонкого диска. Считая западную часть HI-диска ближней к нам, помня о том, что в его северной половине наблюдается сдвиг скоростей в красную сторону, получим из формулы (2.1), что внешние части кольца нейтрального водорода находятся под углом $\delta = 82^\circ$. Что прекрасно согласуется с предположением о полярном диске.

Подобное поведение изогнутого полярного кольца может быть объяснено, если предположить, что распределение гравитационного потенциала в галактике отлично от сферического. Красивый пример сильного изгиба полярного кольца демонстрирует NGC 2685, в которой кинематика HI объясняется отклонением распределения потенциала от сферически-симметричного случая (Józsa et al., 2009). Неоднократно обсуждался вопрос об устойчивости газовых дисков в гравитационном потенциале трехосных галактик. Здесь устойчивыми являются диски, лежащие в плоскостях, перпендикулярных большой или малой осям системы. Рассмотренный в van Albada et al. (1982) пример газового диска в эллиптической галактике Cen A несколько напоминает ситуацию изогнутого диска в Aгр 212. А именно, во внутренней области газовый диск ортогонален звездному телу галактики, но на больших расстояниях газовый диск в Cen A изгибается так, что его внешние части стараются расположиться в плоскости вращения звездной подсистемы и вращаются при этом в противоположном направлении. Однако в Aгр 212 ситуация противоположная, в том смысле, что в полярной плоскости расположены внешние части диска, а с уменьшением радиуса орбиты прецессируют и приближаются к плоскости звездного диска. Тем не менее, предположение о том, что внешние части полярного кольца находятся в одной из основных плоскостей трехосного гало (вклад диска в потенциал на $2R_{25}$ мал) выглядит разумным, хотя мы и отдаем себе отчет в том, что данных для уверенного заключения о трехосном распределении потенциала пока недостаточно.

4.2.5 Происхождения внешней газовой подсистемы

В соответствии с опубликованными сценариями, образование полярных колец связано со взаимодействием галактик с их окружением. Тогда возможно найти в окрестностях галактики либо сам спутник, либо приливные структуры, оставшиеся после его разрушения. На полученном нами глубоком оптическом снимке Aгр 212 (Моисеев, 2008) какие либо приливные структуры с поверхностной яркостью выше $25.2^m/\square''$ отсутствуют. В такой ситуации полярное кольцо могло образоваться в результате захвата газа от компаньона, в согласии с известными численными моделями (Reshetnikov & Sotnikova, 1997; Bournaud & Combes, 2003). Согласно Bournaud & Combes (2003), большая часть полярных колец образуются именно в рамках аккреционного сценария. В базе данных NED, в области радиусом 1° (414 кпк) вокруг Aгр 212 в диапазоне лучевых скоростей $V_{sys} \pm 1000$ км/с указана только одна галактика – UGC 12549. Она относится к классу Im, практически совпадает с Aгр 212 по системной скорости (1634 км/с), но более чем на 3^m слабее по интегральной величине. Расстояние ее до Aгр 212 в проекции на картинную плоскость – $23'6$ (163 кпк), т.е. $15D_{25}$. Эта галактика очень богата газом: полный поток в линии 21 см у UGC 12549 всего лишь в два раза меньше, чем у Aгр 212 (Springob et al., 2005), т.е. масса HI в UGC 12549 достигает $10^9 M_\odot$, а отношение массы HI к полной массе галактики должно быть в несколько раз выше, чем в Aгр 212, где оно составляет около

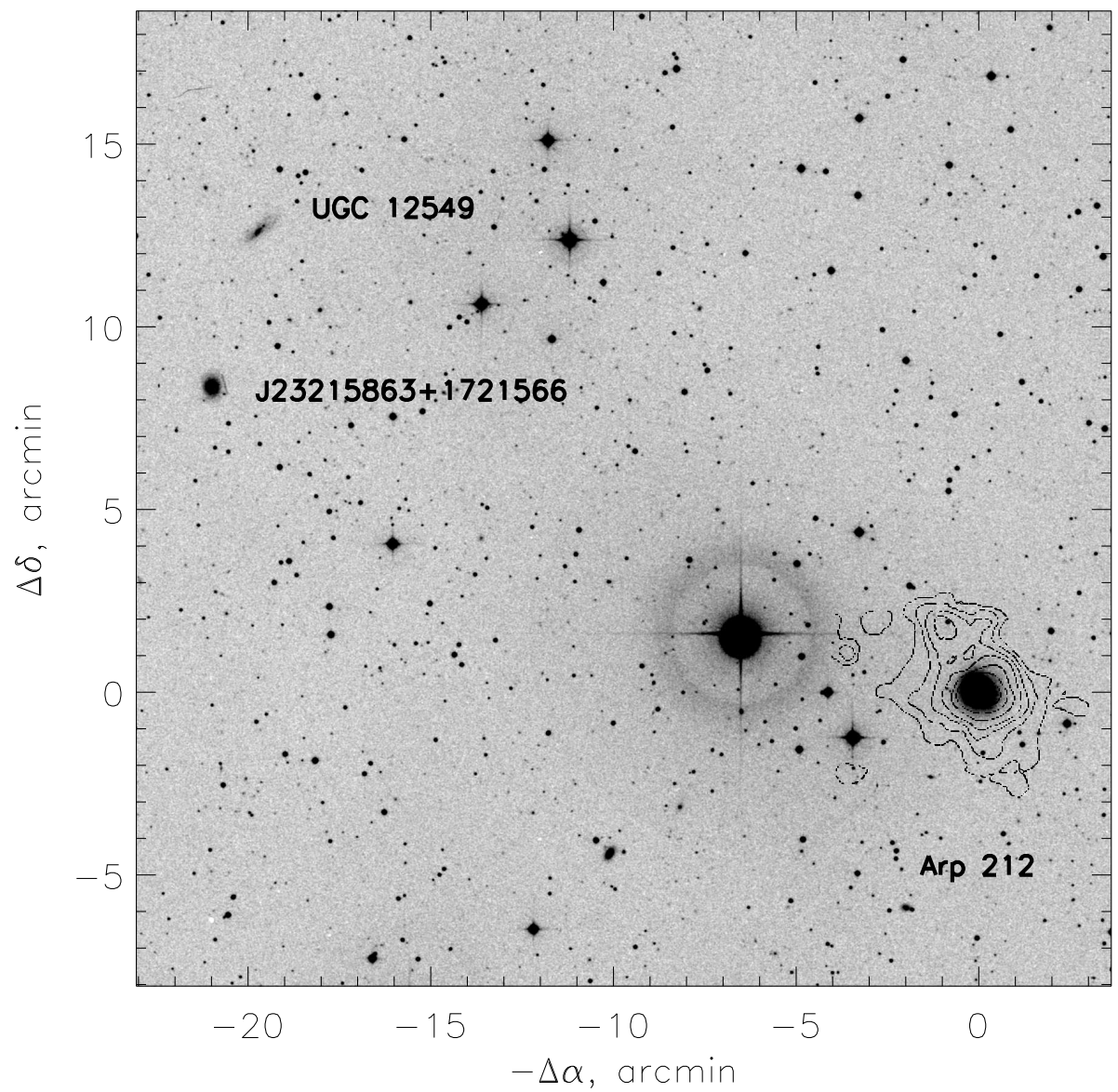


Рис. 4.4 Поле вокруг Arp 212 по данным POSS2 с изолиниями плотности HI из Li et al. (1993). Отмечены два возможных спутника.

10%. На рис. 4.4 показано изображение обеих галактик из цифрового Паломарского обзора неба. В 4'5 (31 кпк) к югу от UGC 12549 видна несколько более яркая галактика 2MASX J23215863+1721566 с неизвестным красным смещением, весьма вероятно, что они образуют пару. Из рис. 4.4 видно, что изоденсы распределения HI (т.е. проекция внешних области полярного кольца) в Agr 212 вытянуты именно в направлении этой пары галактик. Возможно, что между галактиками имеется слабый приливной газовых хвост. Но пока отсутствуют данные о распределении нейтрального водорода далее, чем 20-30 кпк от центра Agr 212. Здесь необходимы новые наблюдения с целью подтвердить или опровергнуть утверждением о том, что галактика UGC 12549 послужила донором при образовании изогнутого полярного кольца в Agr 212.

Согласно фотометрическим данным, возраст всех областей звездообразования в Agr 212 составляет 6.1 ± 0.6 млн. лет (Martínez-Delgado et al., 2007), т.е. последняя вспышка звездообразования началась по всей галактике практически одновременно. Характерное динамическое (время оборота) для эмиссионных филаментов составляет 0.2-0.3, а для внешних областей HI-диска 0.5-1 млрд. лет. Можно предложить, что внешняя газовая подсистема, после ее захвата основной галактикой, образовала полярный диск, газ из которого, в результате прецессии орбит, начал “выпадать” в плоскость звездного диска галактики. И после накопления достаточной массы газа, началась вспышка звездообразования. Поскольку возраст вспышки значительно меньше динамического возраста газового диска, возможно, такие вспышки происходили здесь уже неоднократно.

4.3 Далекое полярное кольцо SDSS J075234.33+292049.8

Галактика SDSS J075234.33+292049.8 была случайно обнаружена Eran Ofek (Caltech) при просмотре кандидатов в гравитационные линзы в цифровом обзоре неба SDSS. Объект действительно привлекает внимание – контрастное голубое кольцо окружающее относительно небольшой центральный сфероид, большая ось которого была почти перпендикулярна большой оси кольца¹. По внешнему виду эта система заметно отличается от кольцевых галактик, обычно встречающихся на снимках SDSS, большинство которых составляют кольца на резонансах баров. Но по оптическим снимкам не удавалось понять что это: пекулярный случай галактики с перемычкой, столкновительная система, вроде рассмотренных в главе 3 или же ГПК. В последнем случае это было бы одно из самых больших полярных колец, диаметр которого достигает 48 кпк (при принятом расстоянии 250 Мпк и масштабе $1'' = 1.2$ кпк в соответствии с красным смещением $z = 0.0602$ по данным SDSS). Ответ могли дать спектральные наблюдения, которые и были проведены нами на 6-м телескопе по заявке Noah Brosch (Tel Aviv University), в начале со спектрографом UAGS, а затем с прибором SCORPIO в режимах длинноцелевой спектроскопии и сканирующего ИФП. Ниже кратко представлены основные результаты работы, подробности которой можно найти в нашей статье (Brosch et al., 2010). Хотя в статье для краткости галактика именовалась как RG1 (=ring galaxy 1), но далее мы будем обозначать ее как SPRC-7, в соответствии с нашим каталогом, опубликованным позднее (Moiseev et al., 2011).

4.3.1 Морфология, химсостав, звездное население

Изображения галактики в широкополосном фильтре и в эмиссионной линии $H\beta$ показаны на рис. 4.5. Анализ распределения поверхностной яркости на основе архивных изображений SDSS показывает, что профиль яркости центральной галактики описывается профилем Серсика с $n \approx 1.3 - 2$, и эффективным радиусом $r_{eff} = 1.4''$ в фильтре r , что вместе с относительно красным интегральным показателем цвета $(g - r) = 0.87$ соответствует раннему морфологическому типу – E/S0. Наблюдается заметный радиальный градиент $(g - r)$: от 1.1 в ядре, до 0.8 на $r = 6$ кпк. Показатель цвета кольца, наоборот, почти не

¹См. цветное изображение на рис. 4.15, где галактика фигурирует под именем SPRC-7

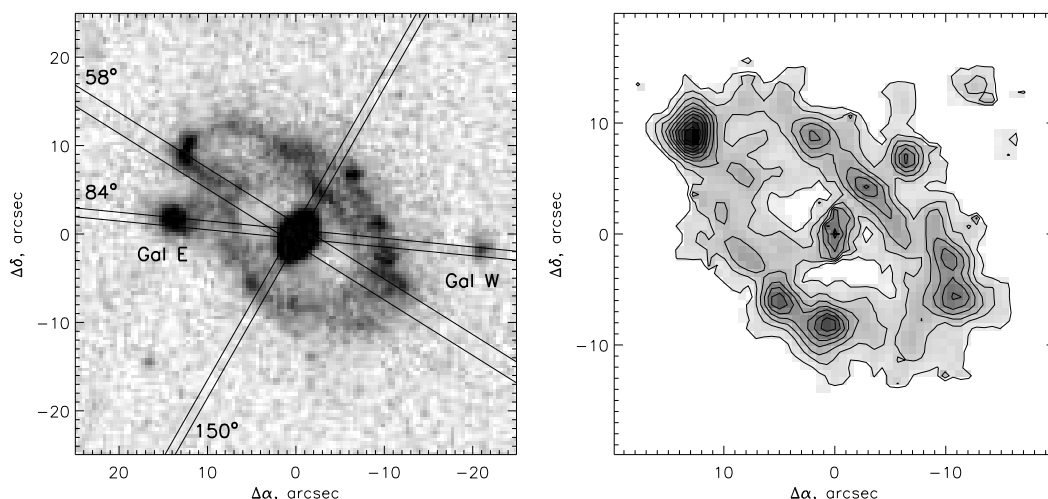


Рис. 4.5 Слева – Изображение SPRC-7 по данным SDSS (сумма фильтров $g+r+i$), указано положение щелей спектрографов и отмечены два кандидата в спутники (спектральные наблюдения показали, что это просто проекция сильно удаленных галактик). Справа – распределение яркости в линии $H\beta$ (SCORPIO/IFP)

меняется с радиусом и значительно голубее: $(g - r) \approx 0.15$. Полная светимости кольца в фильтре r даже несколько превосходит светимость центральной галактики: $M_r = -20.2$ и $M_r = -19.8$ соответственно. Т.е. звездные массы обоих компонент как минимум сравнимы, при том, что в кольце наблюдается заметная доля молодого звездного населения, в том числе и с возрастом менее 10 млн. лет, на что указывают яркие эмиссионные линии, соответствующие ионизации газа массивными O-звездами. Оценка химсостава кольца, выполненная по эмиссионному спектрам А.Ю. Князевым (SAAO), дает металличность $12 + \log(O/H) = 8.49 \pm 0.08 \text{ dex}$ (т.е. $Z = 0.68Z_{\odot}$ для $12 + \log(O/H)_{\odot} = 8.49$, согласно Asplund, 2004). Это не очень мало, но заметно ниже того, что следует ожидать для галактики такой светимости. При этом отсутствует значимый градиент металличности с радиусом, обычно наблюдаемый с дисках спиральных галактики.

4.3.2 Кинематика газа и звезд

На рис 4.6 приведены распределения лучевых скоростей вдоль трех направлений. Хорошо видно, что системные скорости центральной галактики и кольца совпадают, т.е. эта гравитационно связанная структура, а не проекция или пролет спутника через столкновительное кольцо. Звездный компонент центральной галактики и газ кольца вращаются в разных плоскостях, так что вдоль $PA = 84^\circ$ создается даже иллюзия противовращения. В рамках кругового приближения получаем для плоскости вращения звездного тела $PA_0 = -53 \pm 4^\circ$, $i_0 = 50 \pm 15^\circ$, в хорошем согласии с ориентацией внутренних изофот. Параметры ориентации внешнего газового кольца более надежно измеряются по полю лучевых скоростей ионизованного газа, показанного на рис. 4.7. Здесь же приведены радиальные измерения кинематических параметров в рамках модели квазикругового вращения. Скорость вращения достигает 300 км/с и выходит на плато во внешних областях кольца. Небольшие вариации позиционного угла могут быть вызваны как изгибом внутренней части диска, так и некруговыми движениями газа в спиральной волне. Последнее представляется более вероятным, из-за несимметричного распределения областей III в кольце, при наличии определенной фантазии здесь угадываются фрагменты спиральных рукавов. Согласно численным расчетам Theis et al. (2006) возможна генерация спиральных структур в массивных полярных дисках, так как гравитационный потенциал диска центральной галактики не осесимметричен относительно оси диска. Ситуация напоминает генерацию спиральных рукавов баром в галактиках с перемычками. Несколько

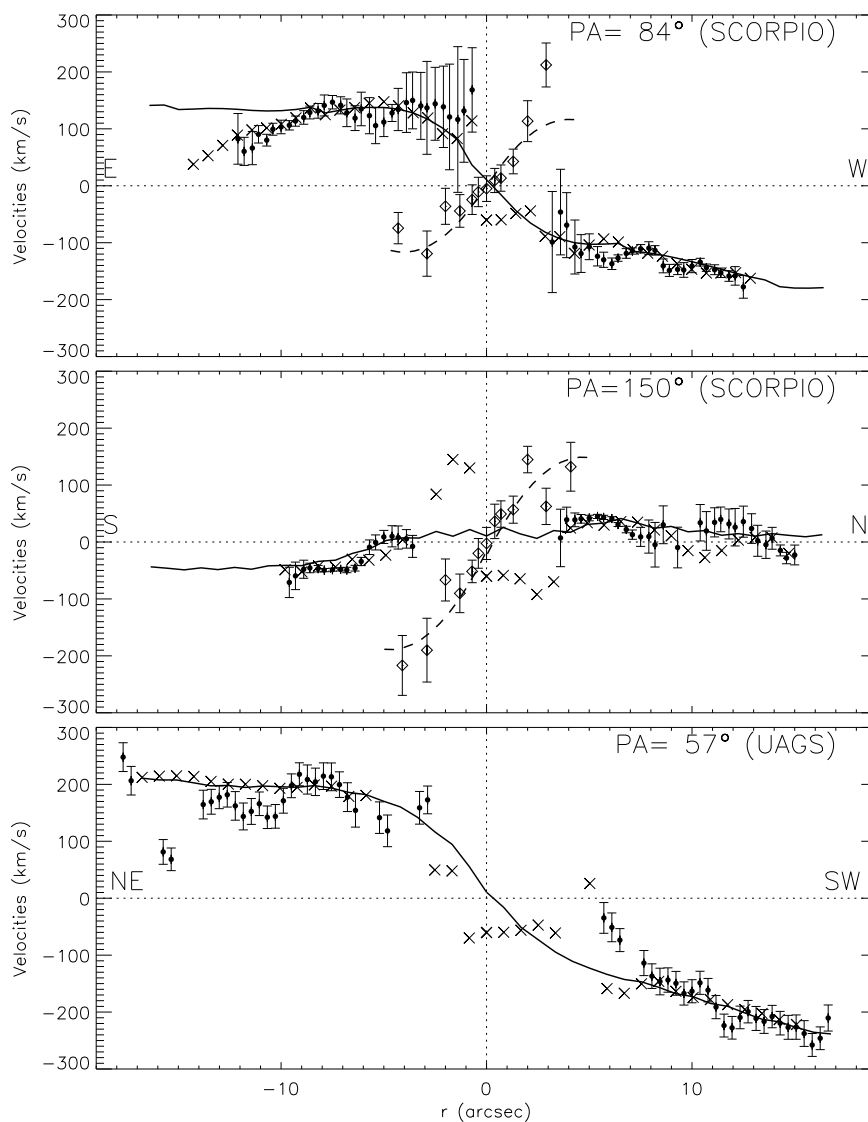


Рис. 4.6 Кривые лучевых скоростей газа и звезд вдоль трех спектральных разрезов для SPRC-7. Вычтена системная скорость центра. Заполненные кружки – измерения по эмиссии $H\alpha$, ромбики – лучевые скорости звездного компонента (с UAGS измерялись только скорости газа). Крестиками показаны разрезы через поле скоростей в линии $H\beta$. Сплошные линии – разрезы через модельное поле скоростей, пунктиром показана проекция кривой вращения звезд (аппроксимация полиномом 2-й степени).

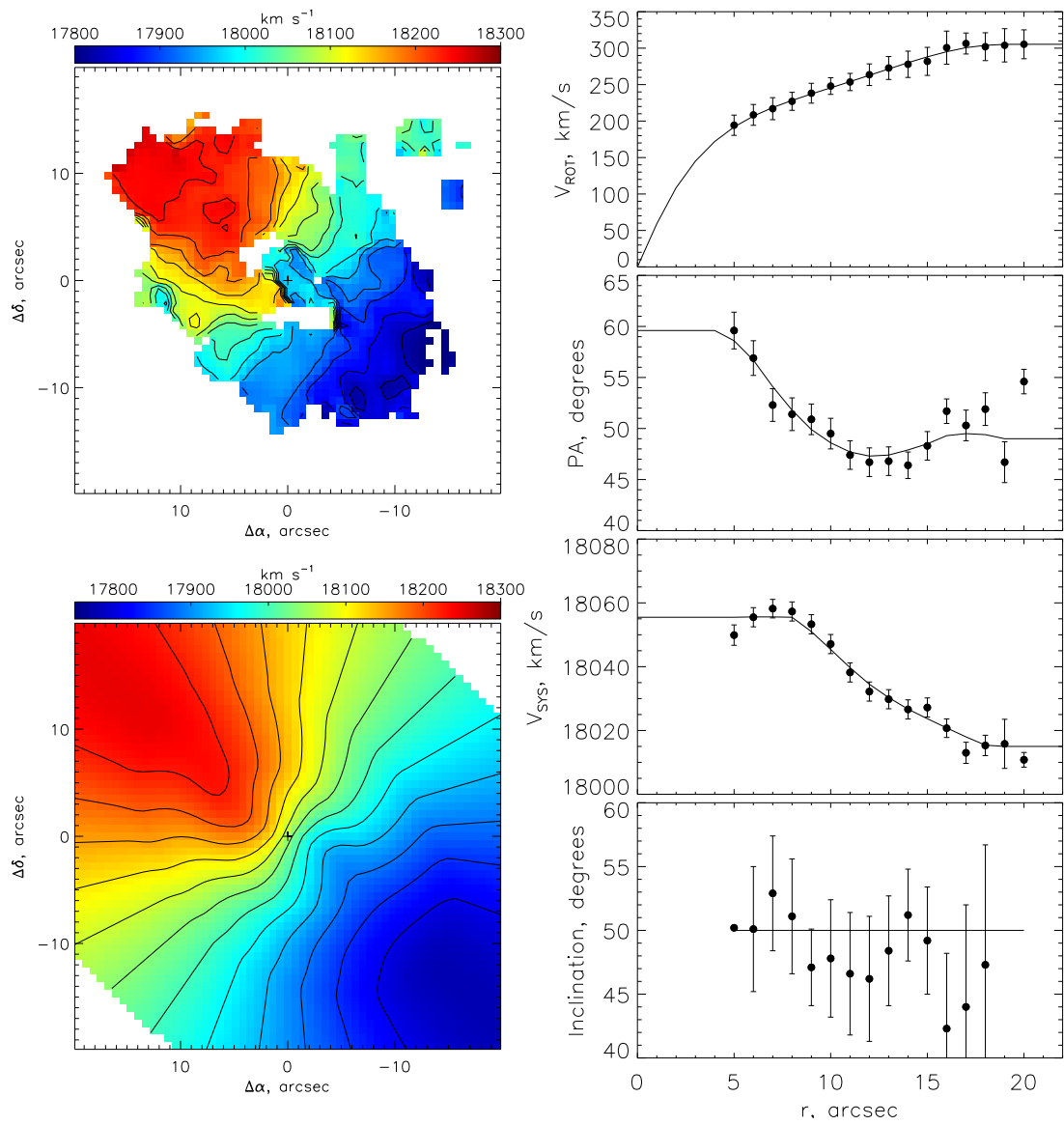


Рис. 4.7 Слева – поле скоростей ионизованного газа SPRC-7 (вверху) и его модельная аппроксимация (внизу). Справа – радиальное изменение модельных параметров.

необычно выглядит почти линейное изменение системной скорости с радиусом, более чем на 50 км/с. В работе Brosch et al. (2010) мы предположили, что такой вид поля скоростей может быть обусловлен динамическим давлением межгалактической среды, так как галактика располагается на периферии скопления Abell 602. Но появившиеся недавно результаты новых численных расчетов, инициированных автором (Хоперсков С.А., Моисеев А.В., частное сообщение), показывают, что подобная асимметрия (развитие азимутальной гармоники $m = 1$) является закономерным итогом эволюции спиральной структуры в полярном диске.

Область $r < 5''$ в поле скоростей исключалась из анализа, так как здесь эмиссионный профиль $H\alpha$ заметно искажен абсорбционными линиями звездного населения ядра, на которое проецируется диск. Из-за малого рабочего спектрального диапазона ИФП учесть этот эффект не представляется возможным. Средние параметры ориентации, полученные в рамках предположение о круговом вращении диска дают $PA_1 = 49 \pm 3^\circ$ и $i_1 = 50 \pm 10^\circ$. Из соотношения (2.1) получаем два решения для угла между плоскостями галактики и кольца: $\delta = 58 \pm 10^\circ$ и $73 \pm 11^\circ$. Оба указывают на сильно наклоненный диск, близкий к полярной плоскости, если верно второе решение.

4.3.3 Проблема формирования кольца

Несмотря на скромное, по космологическим меркам, красное смещение $z = 0.06$, в момент выхода нашей статьи SDSS J075234.33+292049.8 оказалась самой далекой из *кинематически подтвержденных ГПК*. Кроме того, среди прочих известных полярно-кольцевых галактики, SPRC-7 выделяется большим диаметром (~ 48 кпк) и массой ($\sim 4 \times 10^{11} M_\odot$ внутри 15 кпк). Отношение масса/светимость в пределах оптического диска составляет около 20 (оценка светимости в полосе g), что указывает на значительный вклад темного гало в суммарную массу. Сформировать столь протяженный и массивный полярный диск в рамках традиционных теоретических представлений оказывается весьма проблематичным. Считается, что большинство полярных колец образуется в результате аккреции материи с галактики-компаньона, или даже полного его приливного разрушения (Reshetnikov & Sotnikova, 1997; Bournaud & Combes, 2003). Однако в SPRC-7 центральной галактике требуется захватить извне массу газа и звезд равную собственной звездной массе. С учетом того, что компаньон содержит еще и темную материю, получаем случай взаимодействия двух галактик эквивалентной массы. Т.е. речь идет о “большом слиянии” и простой аккреционный сценарий уже не применим. В этом случае, если происходит центральное столкновение двух ортогонально ориентированных дисков возможна ситуация, когда остаток одного из взаимодействующих компонент образует центральную галактику, а вещество второго идет на формирование полярной подсистемы (Bournaud & Combes, 2003).

Но такому столкновительному сценарию противоречат наблюдаемые характеристики центральной галактики, так как слияние галактик эквивалентной массы обычно приводит к тому, что дисперсия скоростей звезд в образующемся объекте, “разогретом” взаимодействием, значительно превышает скорость вращения. На рис. 4.8 приводится “диаграмма Бинни” (Binney, 1978; Kormendy, 1993), где по одной оси отложена наблюдаемая эллиптичность, а по другой – отношение максимальной скорости вращения (V_{max}) звезд к дисперсии скоростей звезд σ , усредненное внутри эффективного радиуса. Из рисунка видно, что центральная галактика в SPRC-7 вращается намного быстрее, чем большинство галактик E-S0 – даже быстрее, чем подразумевает теоретическая модель звездного сфероида, поддерживаемого вращением. Такие “быстрые ротаторы” (термин, популярный в последнее время благодаря работам команды SAURON) очень тяжело сформировать слиянием галактик эквивалентной массы.

Интересно, что подобные же противоречия встречаются при обсуждении строения другой, хорошо известной близкой галактики с полярным кольцом NGC 4650A (Spravone et al., 2010), которую можно рассматривать как уменьшенный аналог SPRC-7. Здесь так же масса полярного диска сравнима с центральной галактикой, в самом диске есть

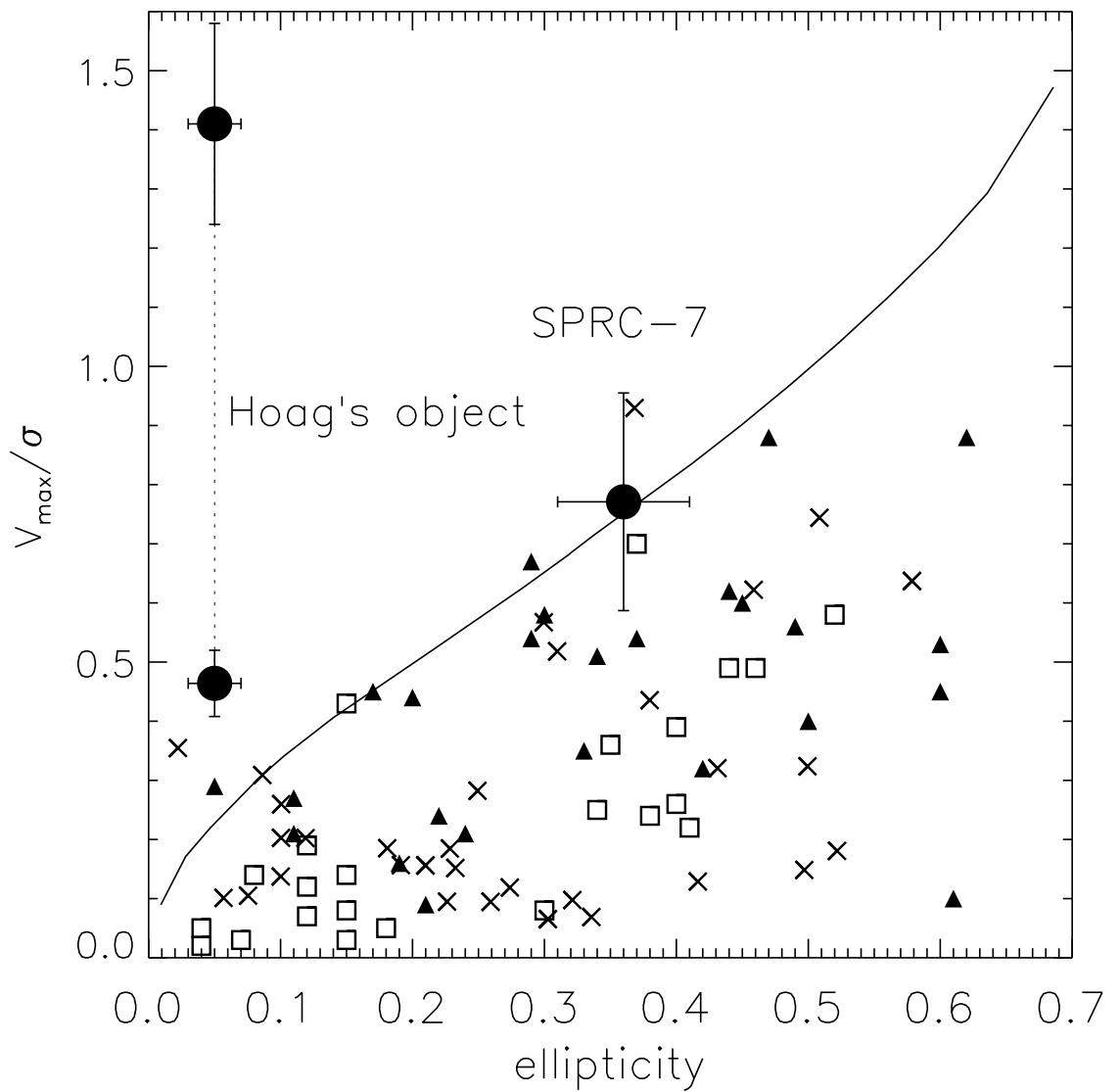


Рис. 4.8 Диагностическая диаграмма Бинни $v/\sigma, \epsilon$. Крестики – эллиптические галактики из Kormendy (1993), треугольниками и квадратиками отмечены S0 и E галактики из выборки SAURON (Cappellari et al., 2007). Жирными кружками с усами ошибок показаны результаты наших наблюдений галактик, рассмотренных в данной главе. Для Объекта Хога приведены два значения, соединенные пунктиром – до и после исправления за наклон. Сплошная линия – теоретическая кривая для сплюснутого сфероида, поддерживаемого вращением (Kormendy, 1993)

намек на спиральную волну. Центральное тело относительно быстро вращается, показатель степени в законе распределения яркости Серсика ближе к экспоненциальному диску ($n = 1$), чем к Вокулеровскому балджу ($n = 4$). В работе Macciò et al. (2006) показано, что массивные полярные диски могут формироваться в результате аккреции холодного газа из протяженных (до 1 Мпк) филаментов вириализованным темным гало. С помощью численных гидродинамических расчетов Brook et al. (2008) смогли достаточно неплохо воспроизвести ряд структурных особенностей NGC 4650A: показатели цвета, их градиент, спиральную структуру, относительный размер диска и содержание в нем газа. Дополнительным аргументом в пользу этого сценария являются указания на пониженную металличность в кольце NGC 4650A (Spravone et al., 2010). Напомним, что содержание тяжелых элементов в диске SPRC-7 также ниже, чем следует для галактики такой массы и светимости, хотя к подобным аргументам и следует относиться с осторожностью, поскольку не ясно, насколько общая зависимость масса-металличность применима к столь пекулярным объектам.

В любом случае, наблюдаемые характеристики гигантского полярного диска SPRC-7 являются серьезным вызовом современным теориям формирования дисков галактик, здесь требуется как дальнейший сбор наблюдательного материала, так и совершенствование модельных расчетов. Но еще больше противоречий с популярными моделями взаимодействия галактик мы встретили при изучении кольцевой системы, которой посвящен следующий раздел.

4.4 Объект Хога: доказательства космологической аккреции

В 1950 г. молодой американский астроном, будущий директор Ловелловской обсерватории, Arthur Allen Hoag опубликовал снимок интересного объекта, который, по его мнению мог "...стать прототипом нового вид патологических галактик.." (Hoag, 1950). "Патологичность" галактики PGC 054559, чаще называемой "Объект Хога", заключалась в необычной правильности почти точно круглого диффузного кольца, внутренний край которого не соприкасается со звездообразным ядром. Всерьез даже рассматривалось предположение о необычно массивной гравитационной линзе (O'Connell et al., 1974). Но спектры, полученные Schweizer et al. (1987) показали, что системные скорости звезд в ядре и ионизованного газа в кольце совпадают, т.е. это единая система и даже не столкновительное кольцо (в этом случае следовало бы ожидать разницы в несколько сотен км/с). В этой работе был построен профиль яркости ядра, который хорошо описывался законом Вокулера, характерным для эллиптических галактик. Светимости ядра и кольца в полосе B почти одинаковы ($M_B = -20.4$ и -20.6 соответственно). Schweizer et al. (1987) предположили, что кольцо сформировалось в результате захвата материи спутника, т.е. аналогично рассмотренным выше крупномасштабным полярным кольцам. Интригу добавляло и то, что попытки найти еще столь правильные и "обособленные" кольца вокруг эллиптических галактик успехом не увенчались, внимательное изучение предложенных кандидатов приводило к тому, что все они оказывались просто яркими резонансными кольцами в галактиках с перемычками. В результате, Объект Хога стал считаться прототипом редкого класса галактик с "аккреционными кольцами" (Buta & Combes, 1996). При этом имеющиеся наблюдательные данные практически исчерпывались перечисленными выше работами. Необычность ситуации усугублялась тем, что галактика наблюдалась на HST в рамках проекта "Наследие Хаббла", т.е. только с целью печати красочных постеров, на которых изображена впечатляющая комбинация красной эллиптической галактики и голубого кольца звездообразования (рис. 4.9). Научным анализом этих изображений никто не занимался. С целью понять природу столь уникальных объектами нами, совместно Noah Brosch, был начат проект по наблюдательному изучению Объекта Хога, включающий как анализ имеющихся архивных изображений (HST, SDSS, GALEX), так и получение новых данных о кинематике и звездном населении. Итоговое исследование представлено в нашей статье Finkelman et al. (2011b), далее описываются основные результаты этой работы. Принятое расстояние до галактики составляет 176 Мпк, что дает

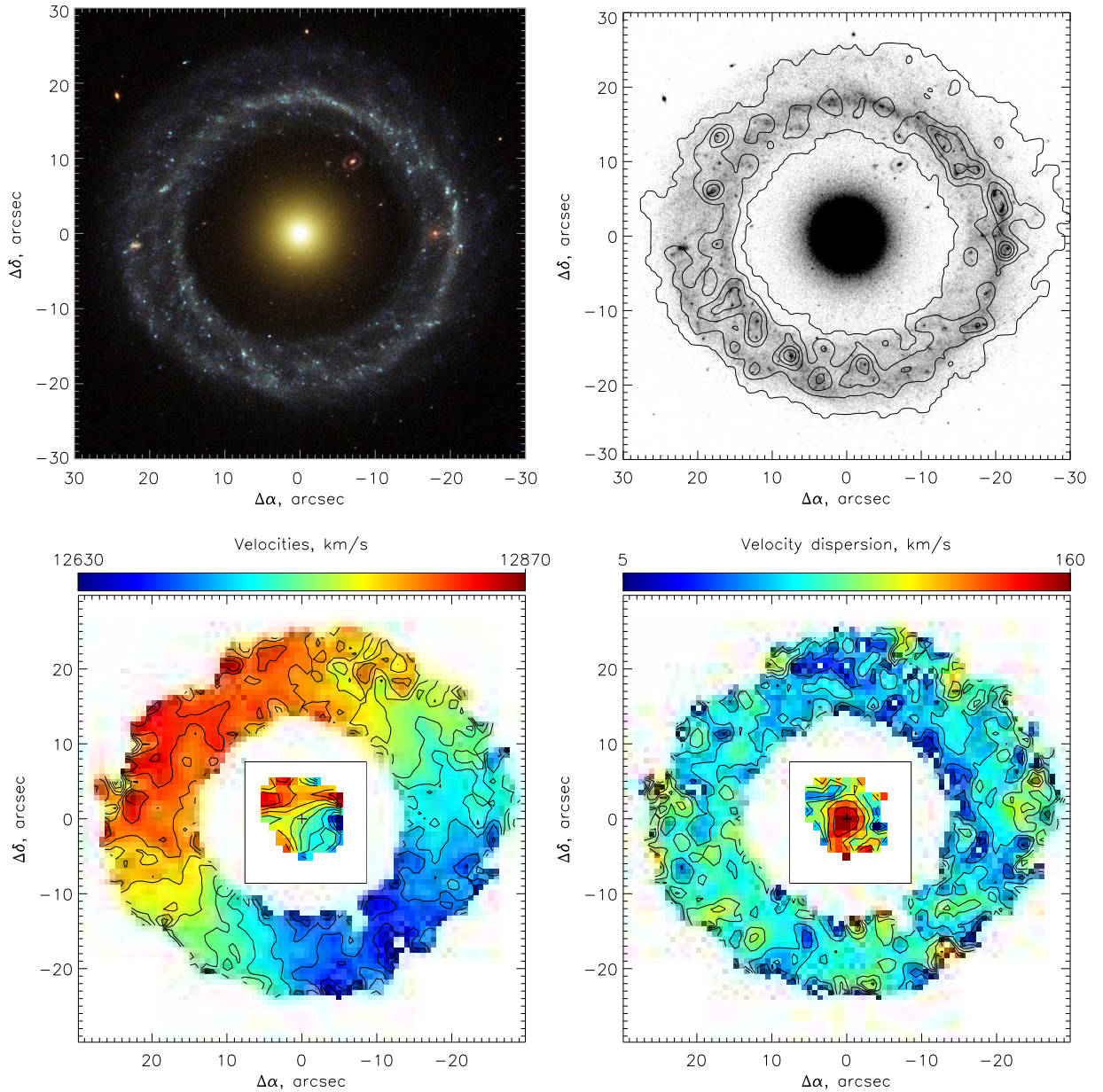


Рис. 4.9 Объект Хога. Верхний ряд – цветное изображение из Hubble Heritage (телескоп HST, камера WFPC2) и изохоты в линии $H\alpha$ (ИФП) нарисованные поверх изображения HST в фильтре F606W. Нижний ряд – кинематика звезд в центре (MPFS) и ионизованного газа в кольце (ИФП). Слева – поле лучевых скоростей, справа – дисперсия скоростей. Квадратом показано поле зрения спектрографа MPFS.

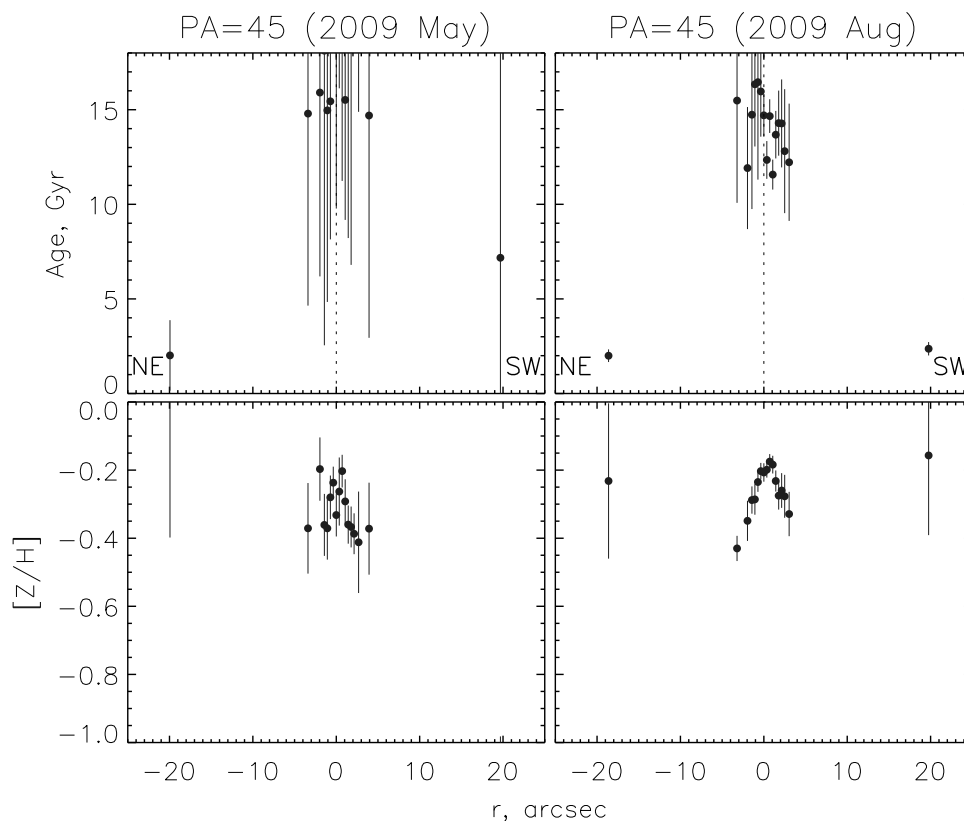


Рис. 4.10 Радиальные распределения возраста и металличности звездного населения вдоль $PA=45^\circ$ в Объекте Хога. Наблюдения в мае 2009 были с лучшим спектральным разрешением, но с меньшими экспозициями, чем в августе 2009.

масштаб $1'' = 851$ пк.

В 2009-2010 гг. были выполнены наблюдения на 6-м телескопе САО РАН с помощью различных приборов. Центральная галактика практически полностью помещалась в поле зрения $16 \times 16''$ спектрографа MPFS, с помощью которого было построено поле скоростей звездного компонента и определено положение кинематической большой оси, вдоль которой в дальнейшем устанавливалась щель спектрографа SCORPIO. Благодаря лучшей, по сравнению с MPFS, квантовой эффективности в режиме SCORPIO/LS нам удалось уточнить распределение лучевых скоростей и дисперсии скоростей звезд, а также оценить параметры звездного населения. Для изучения движений ионизованного газа кольца выполнялись наблюдения со сканирующим ИФП (SCORPIO/IFP) в линии $H\alpha$. На рис. 4.9 показаны поле скоростей и дисперсии скоростей. Сразу заметно, что в отличие от предыдущей галактики SPRC-7, в объекте Хога и центральная часть, и кольцо следуют единому закону вращения примерно в одной плоскости.

На рис. 4.10 показаны измерения распределения возраста и металличности звездного населения вдоль щели спектрографа по двум спектрограммам, дополняющим друг друга: наблюдения в мае 2009 выполнялись с лучшим спектральным разрешением ($FWHM = 2.2\text{\AA}$ против 5\AA), но с меньшим суммарным накоплением, чем в августе 2009. Оценка выполнялась в рамках приближения звездной популяции единого возраста в предположении салпитеровской функции масс с помощью пакета ULYSS, аналогично тому, как это делалось для NGC 7743 (§2.4.1).

4.4.1 Ядро

Для краткости центральную галактик будем называть “ядром”, но следует помнить, что речь идет об эллиптической галактике достаточно больших размеров, светимости и массы (средняя дисперсия скоростей звезд в внутри r_e составляет 151 ± 5 км/с). Анализ профи-

ля поверхностной яркости в фильтре F450W по данным HST подтвердил, что он хорошо описывается профилем Вокулера (индекс Серсика $n = 3.9 \pm 0.2$) с эффективным радиусом $r_e = 2.5 \pm 0.1$ кпк. Изофоты почти круглые с очень слабой эллиптичностью ($\epsilon < 0.05$ на $r < 9''$), большая ось заметно (на $20\text{--}40^\circ$) развернута относительно кинематической оси ядра, что может быть связано со слабой трехосностью галактики. Параметры ориентации, измеренные по полю лучевых скоростей звезд в рамках приближения кругового вращения, составили: $PA_0 = 41 \pm 5^\circ$, $i_0 = 19 \pm 5^\circ$, $V_{sys} = 12767 \pm 3$ км/с. Несмотря на ориентацию почти плашмя, в поле скоростей заметен значительный градиент лучевой скорости, который в проекции на луч зрения достигает 70 ± 8 км/с. Из рис. 4.10 видно, что параметры населения ядра характерны для эллиптических галактик: средний возраст $T = 13 - 15$ млрд. лет и низкая металличность $[Z/H] = -0.2.. - 0.4$, с заметным радиальным градиентом. Совместный анализ показателей цвета в оптике (по данным SDSS) и в заатмосферном ультрафиолете (GALEX) показал, что если в ядре и присутствует молодое звездное население возрастом ~ 1 млрд. лет, то его вклад не превышает 10% по массе (Finkelman et al., 2011b).

4.4.2 Кольцо

Прежде всего, отметим огромный диаметр кольцевой структуры – 50 кпк, даже больше, чем у рассмотренной выше SPRC-7. Эмиссия в линии $H\alpha$ прослеживается вдоль всего оптического изображения кольца. Средние параметры ориентации в рамках модели регулярно вращающегося плоского диска дают $PA_1 = 43 \pm 3^\circ$, $i = 18 \pm 4^\circ$ и $V_{sys} = 12761 \pm 4$ км/с, что с точностью до ошибок, совпадает с найденной выше ориентацией основной плоскости ядра. При поиске параметров мы ограничивались областью $18'' < r < 28''$, так как на меньших расстояниях поле скоростей слегка возмущено (см. далее). Рис. 4.11 демонстрирует, что эта, довольно простая модель, хорошо описывает наблюдаемое поле скоростей ионизованного газа с относительно малыми остаточными скоростями.

Радиальное поведение кинематических параметров в рамках квазикруговой модели показано на рис. 4.12, наклон i фиксировался из-за неустойчивости модели к индивидуальным измерениям наклона узких колец, видимых почти плашмя. Кривая вращения ионизованного газа выходит на плато с $V_{max} = 260$ км/с. Разворот PA_{kin} на $r = 14 - 18''$ может быть связан как с некруговыми (радиальными) движениями в плоскости кольца, так и с круговым вращением на наклонных орбитах. Для проверки последнего предположения использовалась модель изогнутого диска, аналогичная описанной выше для Agr 212, но вместо аналитической функции, радиальные распределения PA , i и V_{rot} фиксировались в четырех точках и интерполировались на весь диапазон радиусов (серая линия на рис. 4.12). Остаточные скорости (рис. 4.11) для всех описанных трех моделей, как правило, не превышают 20 км/с, при этом изогнутый диск лучше всего описывает наблюдаемые скорости на расстояниях $r < 18''$. К сожалению, параметры такого диска выглядят нереальными, прежде всего потому, что экстраполяция модельного поведения кривой вращения к центру дает слишком резкое падение скорости вращения, что расходится в любыми разумными допущениями о распределении массы в центральной части галактики, а также с кривой вращения звездного ядра. Более реалистичным выглядит предположение о некруговых движениях в кольце, вызванных трехосностью гравитационного потенциала ядра или, что более вероятно, с радиальными движениями газа в квазиспиральной структуре, заметной на оптических изображениях.

Несомненным успехом следует считать то, что, несмотря на низкий уровень сигнала, нам все-же удалось оценить параметры звездного населения по интегральному спектру кольца (рис. 4.10). Средний (взвешенный со светимостью) возраст звезд кольца составил около 1 – 2 млрд. лет, при металличности $[Z/H] \approx -0.2$. Принимая соответствующее этому звездному населению отношение масса-светимость $M/L = 1 - 3$ (Bruzual & Charlot, 2003), исходя из наблюдаемой светимости в полосе B получаем, что общая масса звезд кольца составляет $(3 - 9) \times 10^9 M_\odot$. Разумеется, в кольце присутствует и

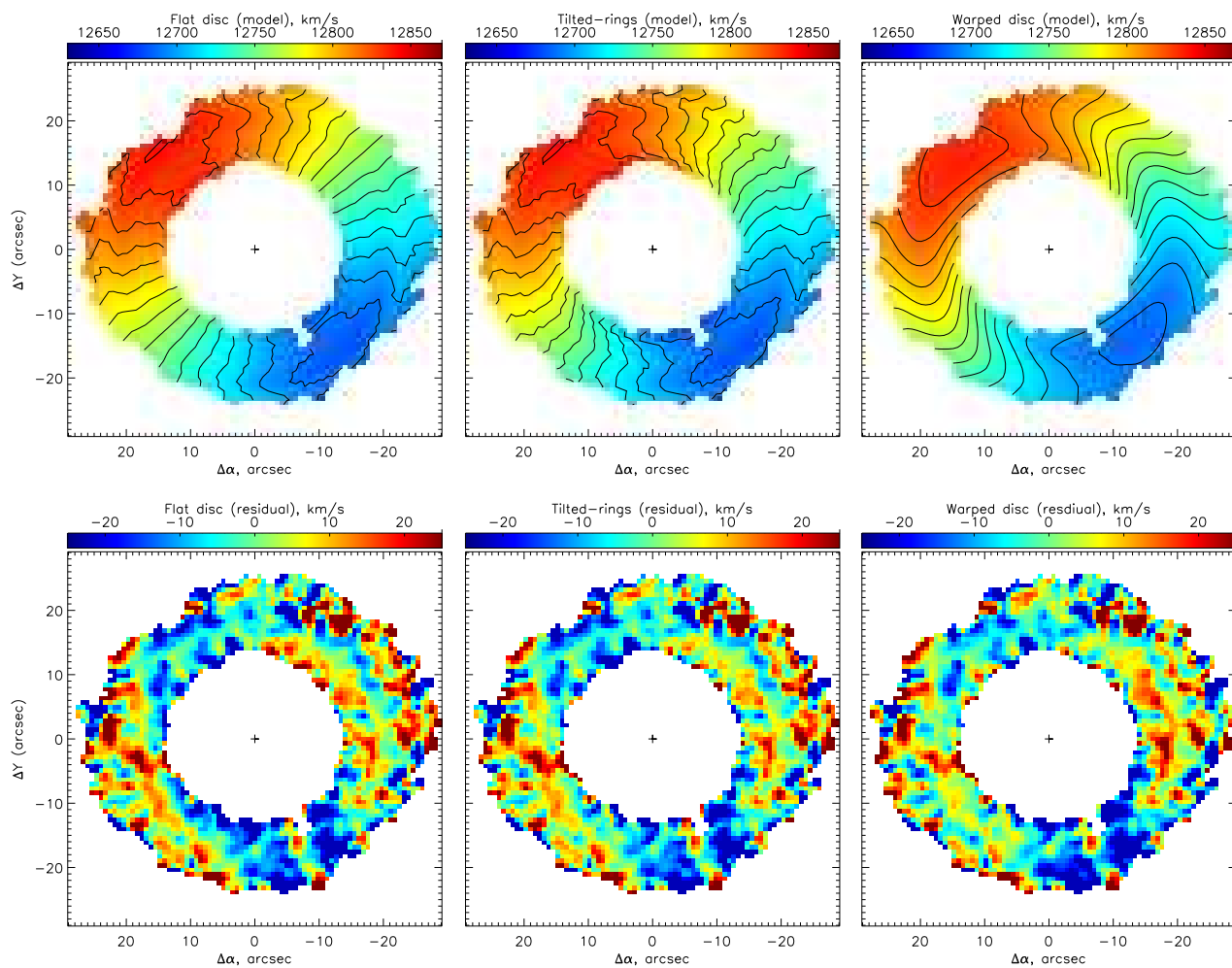


Рис. 4.11 Различные аппроксимации поля скоростей ионизованного газа Объекта Хога. Верхний рисунок представляет три различных модели (плоский диск, квазикруговое приближение – “наклонные кольца”, изогнутый диск). На нижних рисунках показаны карты остаточных скоростей (наблюдения минус модель).

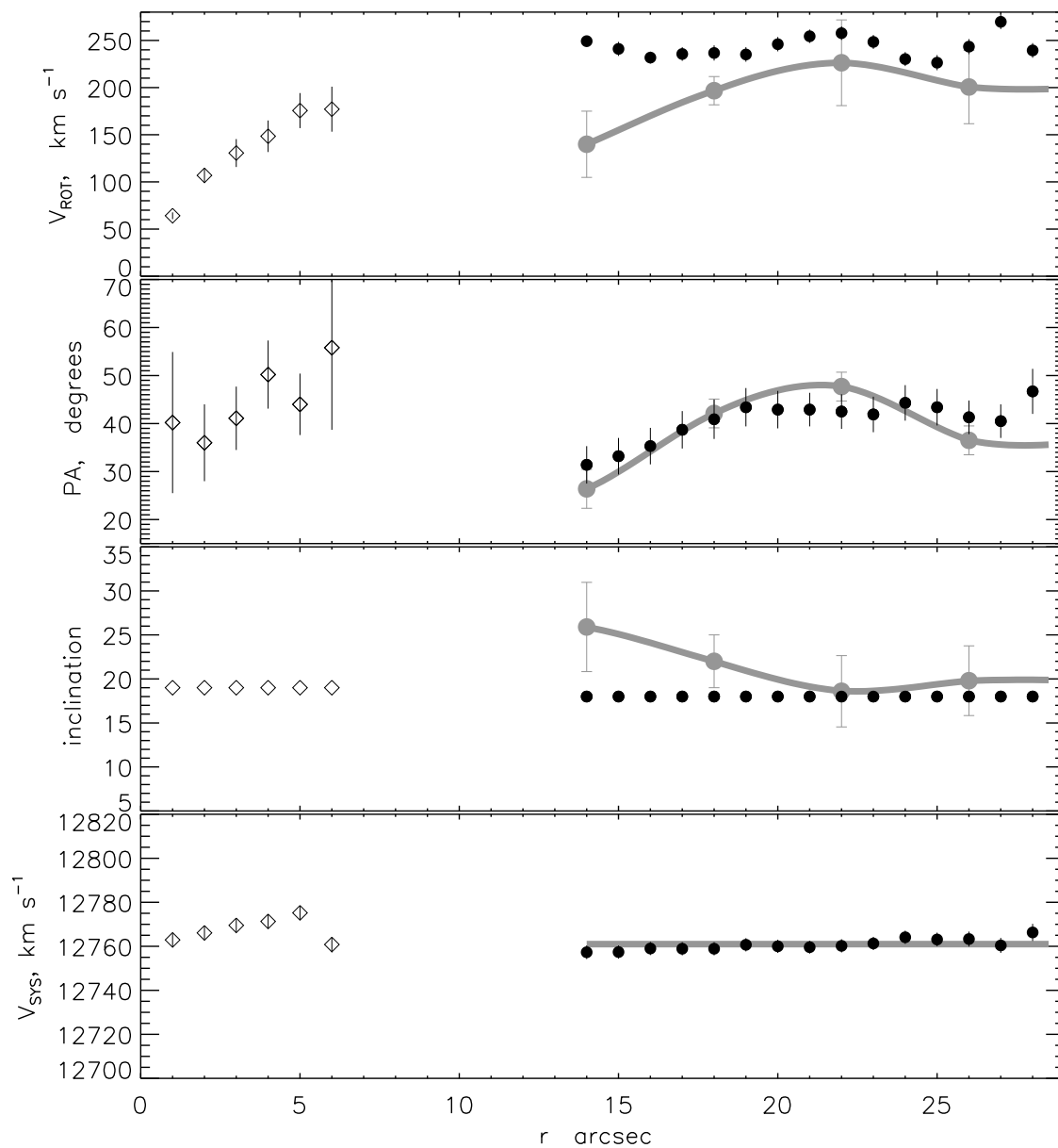


Рис. 4.12 Радиальные вариации кинематических параметров, характеризующих поле скоростей ионизованного газа в Объекте Хога. Сверху вниз: скорость вращения, позиционный угол, угол наклона, системная скорость. Закрашенные кружки и открытые ромбы представляют результаты аппроксимации методом “наклонных колец” полей скоростей ионизованного газа (данные ИФП) и звезд (данные MPFS) соответственно. Толстой серой линией показаны параметры модели изогнутого диска.

более молодое население, на что указывает заметная светимость в линии $H\alpha$. Используя дополнительные наблюдения на БТА с узкополосными фильтрами, мы выполнили калибровку карты распределения в линии $H\alpha$ (рис. 4.9) и получили интегральную светимость в этой линии $(7.7 \pm 0.8) \times 10^{40}$ эрг/с, что, согласно Kennicutt (1998a), дает темп звездообразования $0.7 \pm 0.1 M_{\odot}/\text{год}$. Оценка по ультрафиолетовым изображениям из архива GALEX с использованием соотношений из Salim et al. (2007) дает точно такую же величину, $\sim 0.7 \pm 0.1 M_{\odot}/\text{год}$. Кольцо богато газом – наблюдения в HI дают $8.2 \times 10^9 M_{\odot}$ для полной массы HI внутри поля 3'3 (Schweizer et al., 1987), распределение нейтрального водорода в первом приближении следует кольцевой морфологии, так как линия 21 см не обнаруживается при наблюдениях ядра галактики с $beam = 12''$ (Brosch, 1985).

4.4.3 Обсуждение

Полученный наблюдательный материал позволяет пересмотреть существующие сценарии происхождения объекта Хога. Аккреция с богатого газом компаньона представляется сомнительной, так как требуется захватить массу нейтрального водорода не менее $10^{10} M_{\odot}$. Это в несколько раз больше, чем содержится в диске нашей Галактике, не говоря уж о возможных карликовых спутниках. При этом газ должен быть захвачен в результате единственного события, аккреция большого числа малых спутников маловероятна, так как во-первых, их орбиты были бы не компланарны, а во вторых, объект Хога находится в очень бедном окружении, вдали от известных скоплений галактик. Самый близкий из относительно ярких компаньонов находится на расстоянии не менее 3 Мпк.

Слияние двух близких по массе богатых газом галактик может объяснить как высокое содержание HI так и образование центральной эллиптической галактики (Bournaud et al., 2007). При этом часть газа теряет угловой момент, падает к центру, где вызывает вспышку звездообразования. Газ, сохранивший момент вращения, остается на больших расстояниях от центра и, в принципе, может сформировать протяженный диск (см. Serra et al., 2008, и ссылки там же). Однако в спектре ядра отсутствуют значимые признаки недавней (на шкале нескольких млрд. лет) вспышки звездообразования. Кроме того, в случае большого слияния следует ожидать достаточно пологий радиальный градиент металличности. Наблюдаемая величина этого градиента в ядре $d([Z/H])/d \lg r = -0.4$ dex per dex соответствует пограничному случаю между сценариями образования эллиптической галактик в результате слияний и монолитного коллапса (см. Kobayashi et al., 2004; Baes et al., 2007, и ссылки в этих работах). При этом следует учитывать, что наши спектральные наблюдения выполнялись с пространственным разрешением $1.3 - 1.5''$, что приводит к сглаживанию градиента на масштабах сравнимых с r_e . Т.е. реальная величина $d([Z/H])/d \lg r$ еще хуже согласуется со сценарием большого слияния.

Кроме того, на диаграмме $v/\sigma, \epsilon$ звездное ядро объекта Хога отличается необычно быстрым вращением (рис. 4.8), являясь, в терминах работы Cappellari et al. (2007), “чрезвычайно быстрым ротатором”. При этом, в отличие от рассмотренной выше SPC-7, по остальным характеристикам объект Хога - типичная E-галактика. Такие быстровращающиеся сфероиды весьма трудно сформировать в рамках существующих моделей больших слияний (Jesseit, 2009).

Поэтому предложен сценарий, который лучше объясняет весь набор наблюдаемых свойств системы. Мы предполагаем, что ядро объекта Хога сформировалось в результате монолитного коллапса массивного газового облака – модель, впервые предложенная Larson (1974) и многократно улучшаемая в дальнейшем. Численные хемодинамические расчеты показывают, что часть эллиптических галактик формируется именно таким образом (Kobayashi et al., 2004). Такое предположение объясняет как резкий градиент $[Z/H]$, так и относительно быстрое вращение галактики. Альтернативное объяснение высокого отношения v/σ анизотропией скоростей сплюснутого (или трехосного) сфероида требует экстремально высокой (около 1) внутренней эллиптичности, что кажется неправдоподобным. В то же время, внешняя аккреция газовых облаков, приносящих угловой момент на раннем этапе формирования эллиптической галактики, может обеспечить до-

полнительное увеличение v/σ у образующегося звездного компонента (Emsellem et al., 2011). Дальнейшее существование изолированной эллиптической галактики в достаточно богатом газом окружении подразумевает медленную, так называемую “холодную” аккрецию облаков газа из межгалактической среды, когда максимальная температура газа не превышает 10^5 К, т.е. он не разогревается до вириальных температур, диктуемых гравитацией темного гало. Наблюдательные доказательства таких процессов пока не многочисленны, в то же время они требуются для объяснения многих аспектов эволюции галактик (Combes, 2008; Kauffmann et al., 2010). Уже обсуждаемые ранее космологические модели подразумевают, что газ должен накапливаться в протяженных филаментах, которые, с свою очередь, аккрецируются массивными гало галактик (Macciò et al., 2006; Brook et al., 2008). Холодная аккреция из космологического филамента позволяет сформировать вокруг эллиптического ядра достаточно массивный диск HI, обладающий заметным моментом вращения. По достижению необходимой плотности газа, несколько млрд. лет назад в диске началось звездообразование, продолжающееся, с примерно постоянной интенсивностью, в современную эпоху. Дополнительным фактором, запустившим звездообразование в диске могли являться спиральные волны, индуцированные слабой трехосностью гравитационного потенциала звездного ядра или даже темного гало.

Сама по себе аккреция газа из космологических филаментов не должна являться чем-то уникальным – это закономерный этап эволюции массивных галактик. Численные модели показывают, что типичная массивная галактика (дисковая или эллиптическая) набирает до 60% барионного вещества именно в результате аккреции газа (Sales et al., 2012). Редкость систем типа объекта Хога объясняется сочетанием сразу нескольких факторов, скорее всего – достаточно богатого газом окружения при отсутствии массивных галактик-компаньонов. Требуется объяснения и совпадения плоскости кольца с главной плоскостью звездного ядра. Возможно, что и описанная выше дополнительная “раскрутка” на раннем этапе формирования ядра и образование внешнего газового кольца имеют один источник – экстремально массивный газовый филамент. Поэтому особенно важными представляются как глубокое картирование окрестностей объекта Хога в линии 21 см нейтрального водорода, так и поиск и исследование аналогичных галактик в ближней и дальней Вселенной. Определенную помощь в этом дает каталог, описанный ниже.

4.5 Новый каталог кандидатов в галактики с полярными кольцами

4.5.1 Составление каталога

Прогресс в изучении ГПК сковывается малым числом известных объектов этого типа. К 2010 г. к ним можно было отнести лишь около двух десятков кинематически подтвержденных галактик, из которых лишь несколько не входили изначально в каталог кандидатов Whitmore et al. (1990), основанный на изучении фотографий отдельных галактик. В современную эпоху разумно использовать с этой целью цифровые обзоры неба, потенциальные возможности которых демонстрирует обнаружение гигантского полярного кольца SDSS J075234.33+292049.8 (§4.3).

Предварительный поиск

Цифровой обзор неба SDSS покрывает заметную часть небесной полусферы ($\sim 1/4$ для Data Release 7), содержит оптические изображения миллионов галактик в пяти фильтрах (Abazajian et al., 2009). К сожалению, пока отсутствуют достаточно устойчивые методы точной автоматической классификации изображений галактик по морфологическим типам. Хотя подобные алгоритмы разрабатываются, их надежность пока недостаточна для массового применения (см. обсуждение и ссылки в Lintott et al., 2011). Кроме того, изображения таких пекулярных галактик, как ГПК – весьма запутаны, во многих случаях

требуется выполнять анализ деталей низкой поверхностной яркости, что сложнее, чем просто различить спиральную и эллиптическую галактики.

К счастью, сейчас есть возможность воспользоваться результатами замечательного проекта Galaxy Zoo², в рамках которого сотни тысяч добровольцев по всему миру выполняют классификацию галактик SDSS. Разумеется, они не занимаются отдельно поиском галактик с полярными кольцами, но многие выразительные примеры выносятся ими на интернет-форум. Большинство приведенных там галактик относятся к столкновительным кольцам или кольцам на резонансах баров. Но просмотрев сотни изображений с интернет-форума, мы смогли отобрать 92 кандидата в ГПК, не входивших ранее в каталог PRC, руководствуясь следующими критериями:

1. Присутствие на изображении двух почти ортогональных дисков, с учетом их наклона к лучу зрения.
2. Фотометрические центры обеих подсистем совпадают с точностью около $1-2''$.
3. Видимый диаметр галактики составляет не менее $10''$ (иначе не разобрать детали структуры).

Часть галактик уже были отмечены участниками форума, как возможные кандидаты в ГПК. К полученному списку были добавлены кандидаты, имеющиеся в SDSS, но обнаруженные в других источниках: две галактики, найденные путем просмотра изображений пекулярных объектов и галактик с внешними кольцами из списков Nair & Abraham (2010), визуально классифицировавших 14 034 галактики в SDSS/DR4; 3 кандидата, найденных по примечаниям к каталогу MCG (Воронцов-Вельяминов и др., 1962); SDSS J132533.22+272246.7 (Finkelman et al., 2011); SDSS J000911.57-003654.7 (Решетников и др., 2011); SDSS J075234.33+292049.8 (глава 4.3) и еще 14 объектов, сведения о которых Ido Finkelman любезно предоставил еще до публикации своей статьи (Finkelman et al., 2012).

В итоге был составлен список из 122 галактик, который сам по себе уже значительно дополнял список ‘сильных’ кандидатов из PRC, но, очевидно страдал сильной неполнотой, так как лишь малая доля волонтеров Galaxy Zoo сообщает на форуме о необычных галактиках.

Анализ выборки Galaxy Zoo

Lintott et al. (2011) опубликовали результаты простой морфологической классификации почти для 900,000 галактик, выполненной волонтерами Galaxy Zoo: 667,944 галактик с известным спектральным красным смещением и 225,268 галактик без спектров из SDSS/DR7. Каталог содержит все протяженные объекты в SDSS DR6 ярче чем 17.77^m в полосе r , а также все галактики из спектральной части обзора. Классификация проводилась на следующие простые типы: EL – эллиптическая; CW/ACW – спиральная (с разным направлением закрутки); EDGE – спиральная, видимая с ребра; MG – взаимодействующая система; DK (don't know) – непонятно что. На первый взгляд кажется, что разбиение слишком грубое, но существенно помогает то, что для каждой галактики проведено большое количество (как правило – несколько десятков) независимых оценок. Поэтому объекты характеризуются не каким-то одним из выше перечисленных типов, а долей голосов отданных каждому которую можно, с оговоркой, назвать вероятностью принадлежности к тому или иному типу.

На рис. 4.13 приведены эти вероятности для всех галактик Galaxy Zoo и для “опорной выборки” состоящей из уже известных кандидатов в ГПК. В опорную выборку из 126 объектов вошли галактики отобранные на предварительном этапе (для 103 из них

² <http://www.galaxyzoo.org/>

в Galaxy Zoo проведена классификация) и все галактики каталога PRC, классифицированные в Galaxy Zoo³. Для обеих выборок эти распределения заметно различаются, за исключением вероятности принадлежности к спиральным галактикам (CW+ACW). Пекулярный вид кандидатов в ГПК не позволяет большинству респондентов причислять их к эллиптическим галактикам, поэтому $EL < 0.85$. По этой же причине, кандидаты в ГПК показывают значительно более широкое распределение по вероятности мерджинга, в то время как большинство галактик Galaxy Zoo концентрируются к $MG \approx 0$. Среди ГПК почти нет спиралей ориентированных плашмя, т.е. $EDGE \approx 0$. Поэтому соответствующее распределение не только шире, но и пик его заметно смещен в сторону ненулевых величин $EDGE$. Распределения по параметру DK различаются не столь сильно, но все равно заметно как пик распределения кандидатов в ГПК смещен от нуля к $DK \approx 0.07$. Мы объясняем это тем, что среди десятка волонтеров классифицирующих каждую ГПК, хотя бы 1–2 человека отмечали ее необычный вид принадлежностью к типу DK.

В итоге можно сформулировать критерии отбора галактик, схожих (в рамках представленных типов) с уже известными нам кандидатами в ГПК и этим сильно сократить число изображений для дальнейшего просмотра. Мы остановились на следующих критериях выделения пекулярных галактик:

$$EDGE \geq 0.1, MG \geq 0.05, DK \geq 0.05 \quad (4.3)$$

Ограничение по принадлежности к типу EL не вводилось, поскольку из (4.3) следует, что $EL < 0.8$. В полной выборке Galaxy Zoo критериям (4.3) удовлетворяет 30,084 галактики с известным красным смещением, и 11,874 объектов без спектральных данных. Из 126 кандидатов в ГПК, показанных на рис. 4.13 этим критериям удовлетворяет только 47 галактик, т.е. 37 % выборки. Таким образом, если мы найдем ВСЕ потенциальные ГПК среди отобранных 41,958 галактик, их реальное число во всем каталоге Galaxy Zoo будет занижено в $1/0.37 \approx 2.7$ раза. Но мы вынуждены на это пойти, так как применение менее строгих критериев резко увеличивает число галактик, которые необходимо просмотреть. Так, если все критерии в (4.3) уменьшить всего на 0.015, то им будет удовлетворять уже 68,412 объектов в общей выборке, в то время как число объектов в опорной выборке ГПК, попадающих под критерии вырастет лишь до 48%.

Мы просмотрели изображения всех галактик, отобранных согласно (4.3). Использовался интерфейс SDSS Image Tool, позволяющий отображать на одной странице сразу 25 цветных изображения скомбинированные из снимков в фильтрах g, r, i SDSS DR7. Просматривая изображения, мы отбирали кандидаты в ГПК, руководствуясь в основном критериями, перечисленными выше, а также общей схожестью с объектами каталога PRC. Просмотрев почти 42 тысячи изображений, мы отобрали около 400, которые в дальнейшем исследовались более детально для включения в окончательный список.

4.5.2 Описание каталога

В итоговый список кандидатов в ГПК вошли 275 галактик, так что нам удалось в три раза увеличить первоначальный список, который был большей частью основан на том, что было найдено на форуме кольцевых галактик Galaxy Zoo. На рис. 4.14 показано распределение объектов каталога по небесной сфере. Видно, что они равномерно заполняют область, охваченную Galaxy Zoo, за исключением небольшого пустого фрагмента вокруг ($\alpha = 140^\circ$, $\delta = 7^\circ$), близкого к галактической плоскости⁴.

По аналогии с PRC мы назвали наш список SPRC = Sloan-based Polar Rings Catalog. Каталог разбит на четыре неравные группы (лучшие и хорошие кандидаты, родственные объекты и кольца, видимые плашмя). Поскольку разделение на эти типы часто неоднозначное, то мы не стали, в отличие от Whitmore et al. (1990), давать для каждой из групп

³Из 157 галактик PRC только для 27 имеются изображения SDSS DR7, из них 23 классифицированы в Galaxy Zoo.

⁴Единственная точка вне области Galaxy Zoo на рис. 4.14 принадлежит галактике, найденной волонтерами Galaxy Zoo в данных SDSS/SEGUE

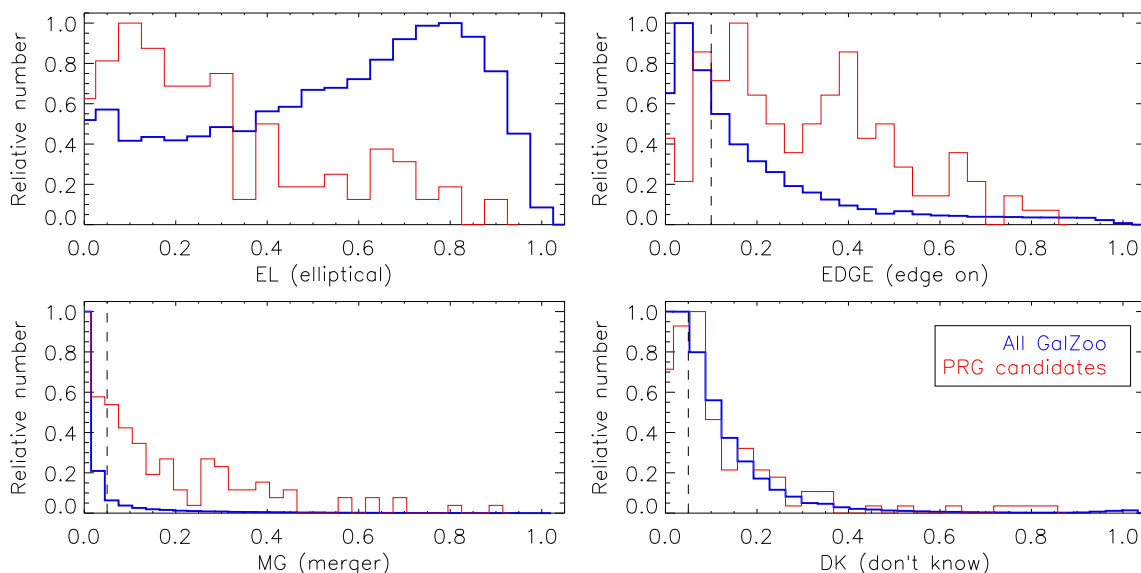


Рис. 4.13 Гистограммы распределения числа галактик внутри каждого из типов. Синяя линия – для всех 893,212 галактик Galaxy Zoo, красная – для 126 кандидатов в ГПК из опорной выборки. Штриховые линии показывают критерии отбора.

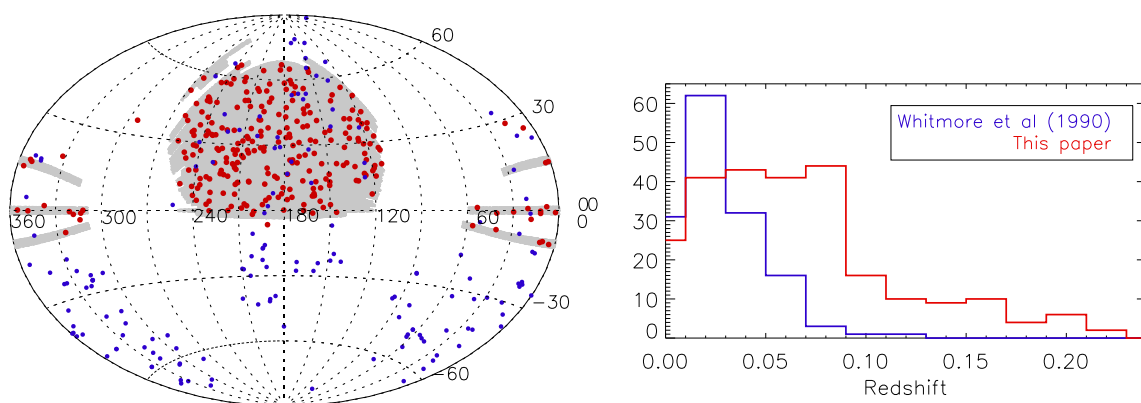


Рис. 4.14 Слева – видимое распределения кандидатов в ГПК на небе в экваториальных координатах. Серой штриховкой отмечена область Galaxy Zoo. Синие точки – объекты из Whitmore et al. (1990), красные точки – галактики из нового каталога. Справа – гистограммы распределения кандидатов в ГПК по красным смещениям для каталога Whitmore et al. (1990) и нового списка.

свой индекс, применив сплошную нумерацию объектов. Для удобства, объекты в каждой из групп упорядочены по RA. В таблице 4.3 приводится начало списка, где кроме номера по нашему каталогу и экваториальных координат дается полная видимая величина в фильтре r , красное смещение и имя по известным каталогам (NGC, UGC, CGCG, etc.). Красные смещения даны согласно базе NED, а если данные NED отсутствуют, то по SDSS DR8.

На рис. 4.15 показаны несколько наиболее характерных примеров для различных типов объектов каталога. Изображения всех галактик представлены в электронной версии нашей статьи (Moiseev et al., 2011).

Разделение кандидатов на типы в определенной степени субъективно, так как базируется на внешнем виде галактик, без привлечения четких численных критериев. При этом мы старались не отбрасывать некоторые “подозрительные” объекты, которые казались нам родственными ГПК. Тем не менее, как и в старом каталоге PRC, введение нескольких категорий полезно с точки зрения отбора объектов для дальнейшего детального изучения. Следует помнить, что уверенно подтвердить присутствие в галактике некомпланарных динамических компонент может только рассмотрение их внутренней

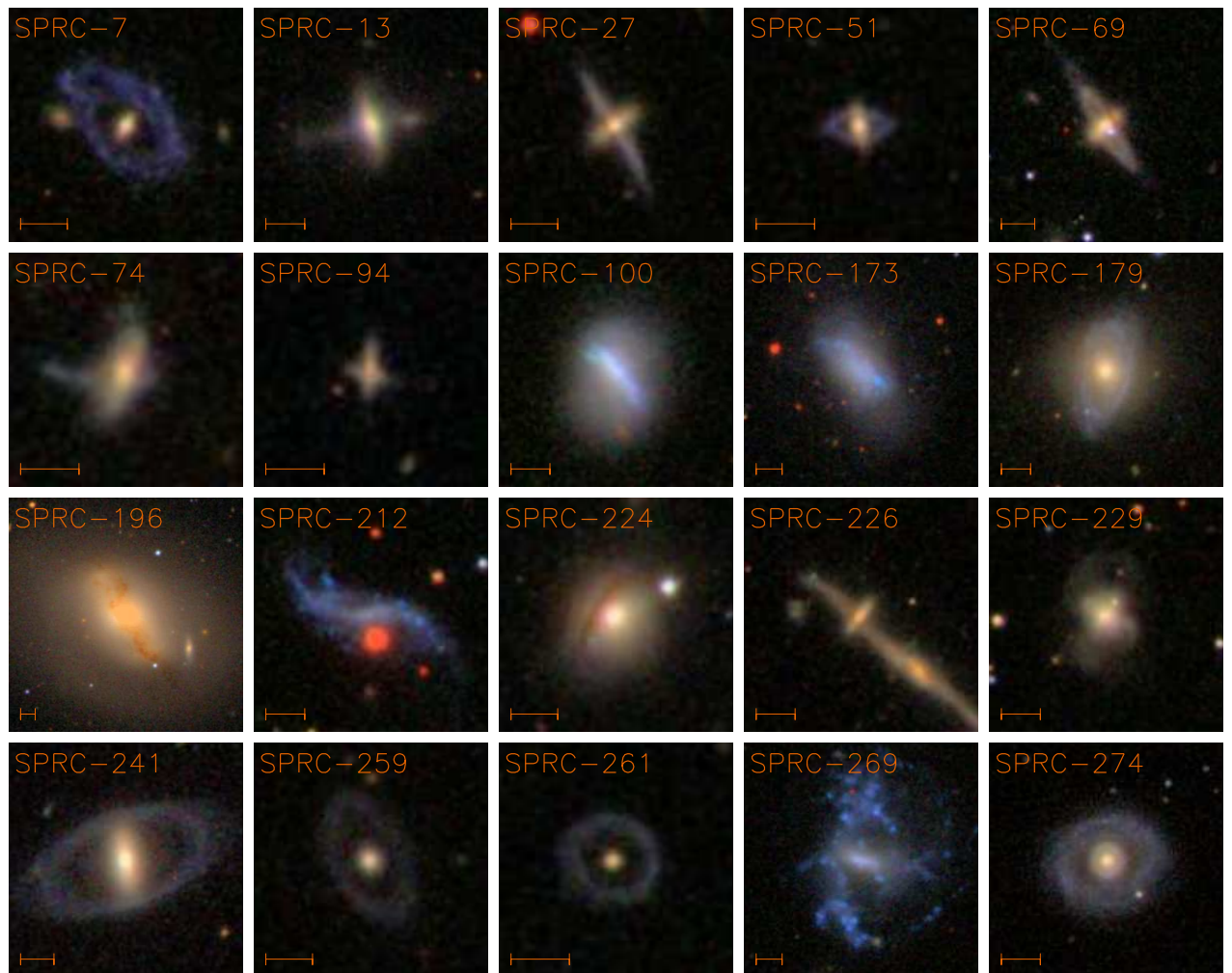


Рис. 4.15 Характерные изображения кандидатов в ГПК – комбинация изображений в фильтрах g, r, i по данным SDSS DR8. Представлены разные типы объектов (сверху вниз – лучшие кандидаты, хорошие, родственные объекты и кольца видимые плашмя). Мерная линейка соответствует угловому размеру $10''$.

Таблица 4.3 Фрагмент каталога кандидатов в галактики с полярными кольцами. Полная версия приведена в статье Moiseev et al. (2011).

Best candidates					
SPRC	R.A. (2000.0)	Dec (2000.0)	r (mag)	cz, км/с	catalogue names
1	00 09 11.58	-00 36 54.7	15.59	21960	
2	00 26 41.51	+25 51 01.7	14.37	-	
3	00 41 03.44	-09 56 28.1	16.11	11063	
4	02 42 58.43	-00 57 09.2	16.96	12888	
5	03 44 26.15	-05 42 09.6	16.93	8364	
6	07 50 41.63	+50 57 40.1	16.94	5586	
7	07 52 34.32	+29 20 49.7	16.95	18032	
8	07 55 39.63	+18 35 27.3	17.10	-	
9	08 12 57.83	+22 25 30.0	17.18	43402	
10	08 20 38.19	+15 36 59.8	16.29	12736	
11	08 48 32.01	+32 20 12.5	15.68	19733	
12	09 01 50.14	+52 12 22.6	17.16	-	
13	09 14 53.66	+49 38 24.0	15.37	9521	
14	09 18 15.97	+20 22 05.3	14.73	9548	CGCG 121-053
15	09 36 34.63	+21 13 57.8	14.43	10281	
16	09 42 07.35	+36 24 17.2	16.95	18028	
17	09 59 11.85	+16 28 41.5	14.92	7914	
18	10 08 42.82	+14 22 02.1	17.25	24538	
19	10 17 17.50	+41 05 57.7	17.39	31524	
20	10 26 00.41	+04 14 33.0	17.84	22287	
21	10 28 58.56	+31 33 42.2	17.15	24353	
22	10 41 55.66	+07 45 13.9	17.02	47932	
23	10 46 23.65	+06 37 10.1	15.64	8330	
24	11 16 25.11	+56 50 17.0	14.98	14133	
25	11 24 53.65	+21 53 48.9	17.16	21836	
26	11 40 05.50	+06 04 43.7	18.70	-	
27	11 44 44.02	+23 09 45.0	16.28	14508	
28	11 52 28.30	+05 00 44.7	16.80	23188	
29	11 53 33.56	+47 19 07.3	15.25	14208	
30	12 07 12.69	+07 39 44.5	17.48	22527	
31	12 17 11.51	+31 30 37.8	15.08	14913	
32	12 19 24.16	+64 37 54.0	16.65	10480	
33	12 19 30.57	+14 52 39.5	11.24	1358	NGC 4262

кинематики. Для некоторых такое подтверждение уже имеется.

Лучшие кандидаты

Сюда отнесены 70 галактик, принадлежность которых к ГПК почти не вызывает сомнений, а их изображения близки к тому, что наблюдается в хорошо известных ГПК, вроде NGC4650A, NGC 2685 или UGC 7576: внешний компонент протяженный, однородный, часто выделяется более синим цветом, в сравнении с центральной галактикой, что указывает на присутствие молодого звездного населения. Иногда кольцо сопровождается пылевой полосой, пересекающей центральную галактику вдоль малой оси. В большинстве кандидатов внешнее кольцо близко к положению “с ребра”, что, очевидно, связано с эффектом селекции при визуальном отборе объектов. Иногда хорошо заметно, как внешнее, наклоненное к лучу зрения, кольцо охватывает центральную галактику.

Детальное фотометрическое исследование галактик SPRC-1 и SPRC-36, в которых аргументируется их принадлежность к ГПК представлено в работах Решетников и др. (2011) и Finkelman et al. (2011) соответственно. В последнем случае авторы используют глубокие изображения SUBARU Deep Field, на которых внешний компонент выглядит значительно более протяженным, чем на снимках SDSS.

Хорошие кандидаты

В эту самую многочисленную группу (115 объектов) включены галактики, которые с большой вероятностью обладают полярным компонентом, однако их вид несколько отличается от классических ГПК:

- Внешний компонент неравномерен по яркости, иногда он представляет собой незамкнутую дугу или отдельные фрагменты кольца.
- Голубое кольцо теряется на фоне центральной галактики, уступая ей по размерам. Не исключено, что в дисках некоторых из отобранных галактик просто прихотливо распределены области HII.
- Оба компонента видны почти с ребра, но не всегда пересекаются точно по центру: возможная случайная проекция двух дисковых галактик. К сожалению, небольшой угловой размер объектов не позволяет сделать уверенное заключение. Для проверки требуются точные измерения системной скорости каждого компонента.

Мы оставили в каталоге галактику SPRC-178, представляющую собой хорошую иллюстрацию трудностей отбора кандидатов по изображениям. По морфологии она казалась хорошим кандидатом в ГПК, но спектральные наблюдения показали, что это просто пара взаимодействующих галактик (§4.5.3).

Родственные объекты

В эту группу вошли 53 галактики, изображения которых указывают на то, что часть материи во внешних областях хотя и не собрана точно в одной плоскости, но, скорее всего, вращается вне плоскости основного диска. Как правило, это системы, пережившие взаимодействие или поглощение спутника.

- Галактики с сильными внешними изгибами дисков (warps).
- Галактики, в которых звездный диск близок к положению плашмя, а его центр пересекает пылевая полоса, часто изогнутая. Близкий аналог среди объектов каталога PRC – NGC 5128 (Cen A).
- Взаимодействующие системы, в которых вещество разрушенного компаньона распределено вдали от плоскости основной галактики.

Галактика SPRC-174 (NGC 2968) уже рассматривалась ранее Sarzi et al. (2000), которые отметили, что она родственна ГПК, так как изофоты балджа вытянуты перпендикулярно диску.

Кольца, ориентированные плашмя

Предполагается, что среди ГПК должно быть много объектов с развернутыми к лучу зрения полярными образованиями, маскирующиеся под “обычные” кольцевые галактики с барами (Whitmore et al., 1990; Решетников и др., 2011). Сейчас известно уже две галактики с полярными кольцами, умеренно наклоненными к лучу зрения: ESO 235-58 (Buita & Crocker, 1993) и SPRC-7 (§4.3). В последнюю категорию каталога включены 37 галактик, с кольцами ориентированными близко к положению “плашмя”, чьи изображения несколько отличаются, от того, что обычно ожидается для внешних колец в галактиках с перемычками (см, к примеру, Buita & Combes, 1996). Здесь, как правило, мы не видим дискового компонента между ‘баром’ и кольцом, а иногда ‘бар’ имеет неожиданно малую эллиптичность. Некоторые галактики очень напоминают описанный выше объект Хога, например SPRC-250 (Finkelman & Brosch, 2011), SPRC-261 и SPRC-265.

Особо отметим SPRC-269, компаньон которой также входит в наши каталог – SPRC-136. Возможно, что эта первая система из двух ГПК!

Галактики с ранее изученной кинематикой

SPRC-7 Описана выше в главе 4.3.

SPRC-33 (NGC 4262). Bettoni et al. (2010) показали, что как ионизованный газ во внутренней области, так и нейтральный водород на больших расстояниях от центра вращаются в плоскости, сильно наклоненной к звездному диску этой галактики с перемычкой. При этом ультрафиолетовые изображения демонстрируют присутствие молодого звездного населения в кольце нейтрального водорода, имеющего внешний диаметр около 18-20 кпк. В этой статье авторы предпочитали говорить о наклонном кольце, но формальный расчет взаимного угла наклона дает два решения: $\delta = 39^\circ$ и 89° . Второе соответствует полярному кольцу, что было отмечено в их последующей работе (Buson, et al., 2011).

SPRC-40 (NGC 5014). На фоне яркого линзовидного тела галактики заметно небольшое голубое кольцо диаметром около $45''$ (~ 3.9 кпк), наклоненное к плоскости галактики. Согласно Noordermeer et al. (2005), вращение HI происходит в диске, кинематическая ось которого совпадает с этим кольцом, а диаметр достигает 15 кпк. В распределении HI заметен приливной хвост, тянущийся минимум на 20 кпк. Галактика принадлежит к группе, богатой облаками HI.

SPRC-67 (CGCG 225-097, PGC 060020). Полярное кольцо было случайно обнаружено И. Д. Караченцевым (САО РАН) при просмотре снимков SDSS, кинематика и фотометрия изучались на 6-м телескопе. Доказано, что внешнее кольцо действительно вращается под большим углом к плоскости диска центральной галактики (Каратаева Г.М., частное сообщение).

SPRC-201 (NGC 3656). Известная взаимодействующая галактика. Согласно Young (2002) молекулярный газ здесь вращается в изогнутом наклонном диске диаметром не менее 8–9 кпк. Кроме того, Balcells & Stanford (1990) обнаружили на $r < 1$ кпк кинематически выделенное ядро, вращающиеся перпендикулярно к диску галактики.

4.5.3 Подтверждение кандидатов

Спектральные наблюдения выполнялись в августе-декабре 2010 г. в прямом фокусе 6-м телескопа с приборами SCORPIO и SCORPIO-2. Для четырех кандидатов мы получили спектры в двух позиционных углах, ориентированных вдоль большей оси внутреннего тела и возможного полярного кольца, еще для двух – только в одном разрезе. На

рис. 4.16–4.17 приведены распределения лучевых скоростей звезд и ионизованного газа (по наиболее ярким эмиссионным линиям) вдоль каждого из разрезов. На рисунках также выделены кинематические компоненты, соответствующие центральной галактике и внешней структуре. Ниже будем называть их “центральный диск” и “полярное кольцо”.

SPRC-10

Четко выделяются два кинематических компонента. Распределение лучевых скоростей соответствует ожидаемому для галактики, в которой весь ионизованный газ вращается в плоскости, сильно наклоненной к центральному диску. Вдоль разреза с $PA(1) = 39^\circ$ (большая ось кольца) наблюдается значительный градиент лучевых скоростей ионизованного газа, в то время как лучевая скорость звезд во внутренней области ($r < 3''$) почти не меняется. В разрезе вдоль большой оси центральной галактики ($PA(2) = 138^\circ$) ситуация обратная – нулевой градиент лучевых скоростей газа и значительный – для звездного компонента, в котором четко прослеживается симметричная кривая вращения. Интересно, что в разрезе с $PA(1) = 39^\circ$ на $r > 3-4''$ по обе стороны от ядра наблюдается симметричное увеличение лучевых скоростей звезд, которые следуют за газом кольца. Судя по всему, здесь мы видим движение звезд полярного кольца.

SPRC-14

Также видны два кинематических компонента, но наблюдаемая картина более сложная. Разброс лучевых скоростей газа максимален вдоль большой оси кольца $PA(1) = 35^\circ$, причем в NE-половине эмиссия ионизованного газа тянется почти в два раза дальше, чем в противоположную сторону от центра. Этот разрез проходит почти точно по малой оси центрального диска, но лучевые скорости звезд остаются постоянными только на $r < 4''$, а на больших расстояниях они почти совпадают со скоростями газа в кольце, за исключением самой внешней области в SW-части разреза. Т.е. как и в SPRC-10, вдали от центра мы видим движение звезд, принадлежащих кольцу. В то же время, лучевые скорости ионизованного газа на $r = 4-12''$ к NE от центра почти совпадают с V_{sys} . Такое поведение может быть объяснено тем, что часть ионизованного газа находится не только в кольце, но и вращается в центральном диске галактики. Столкновения с газовыми облаками кольца сильно запутывают наблюдаемую картину. Лучевые скорости газа вдоль малой оси кольца ($PA(2) = 130^\circ$) заметно отличаются от системной, а вблизи ядра наблюдается даже противовращение относительно внешней области. Скорее всего это указывает на изгиб полярного кольца.

SPRC-39

Здесь удалось построить только один разрез – вдоль большой оси кольца, при этом наблюдаемая картина очень похожа на то, что мы уже видели в SPRC-10 и SPRC-14. Именно, лучевые скорости звезд почти не меняются в центре ($r < 6-8''$), так как щель проходит вблизи малой оси центрального диска. На больших расстояниях мы видим движение звезд в кольце. Заметна сильная асимметрия кривых вращения газа по разные стороны от центра – в SW-половине она продолжает расти, в то время как к NE от центра – выходит на плато.

SPRC-60

Здесь тоже имеется всего один разрез, показывающий картину близкую к той, что описана выше для SPRC-39. В центральной части градиент лучевых скоростей звезд отсутствует, с ростом расстояния от ядра мы видим звезды принадлежащие кольцу. В отличие от SPRC-39 здесь кривая вращения газа в кольце – симметрична по обе стороны от центра. На данный момент, это самое далекое из известных подтвержденных ГПК ($z = 0.078$).

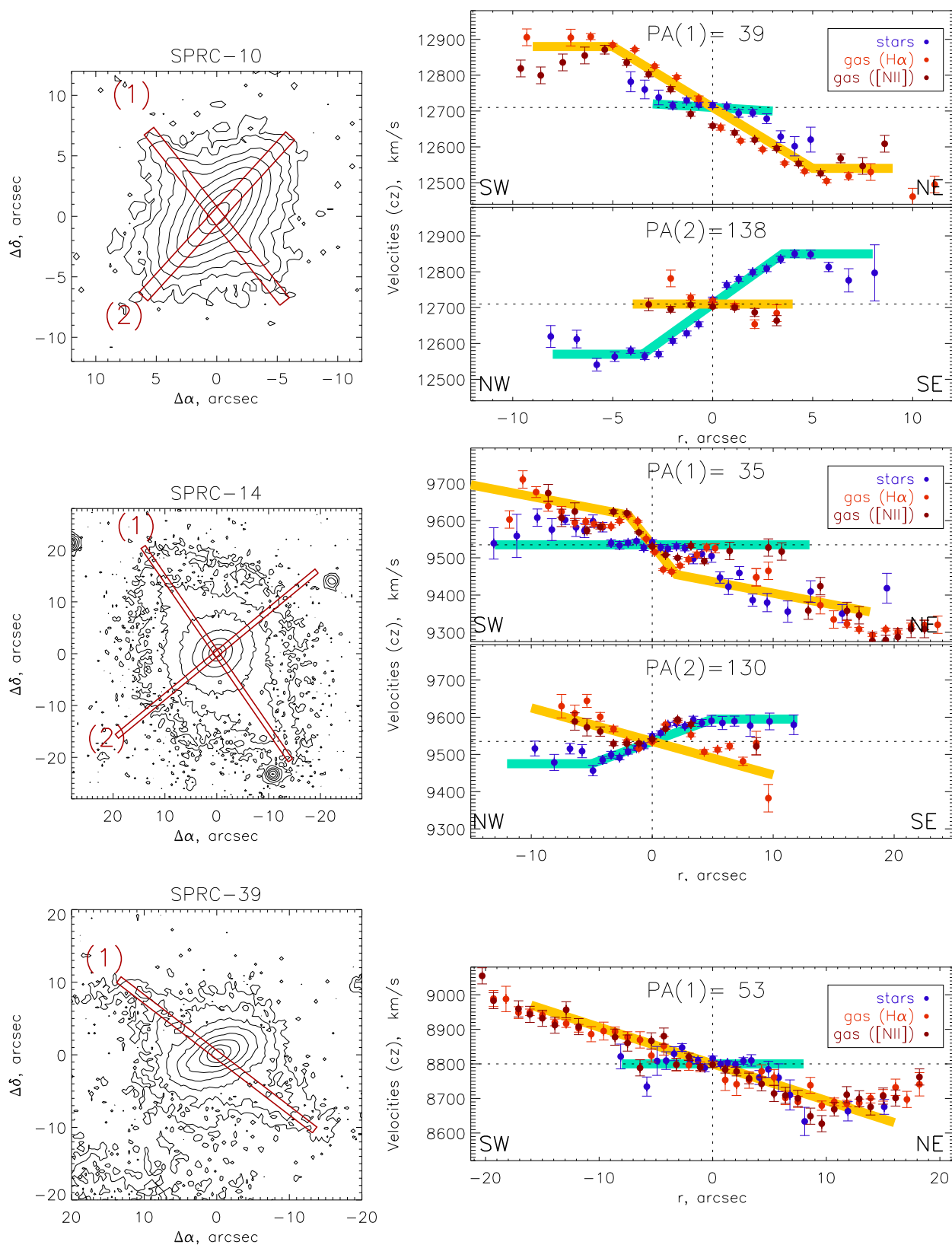


Рис. 4.16 Слева – сумма изображения в *ugriz* фильтрах SDSS для галактик SPRC-10, SPRC-14 и SPRC-39, показано положение щелей спектрографа. Справа – распределение лучевых скоростей газа и звезд в соответствующих разрезах. Пунктиром отмечен центр галактики и значение системной скорости. Жирными цветными линиями схематично отмечены кинематические компоненты вращающиеся в разных плоскостях (голубой – центральный диск, оранжевый – внешнее кольцо).

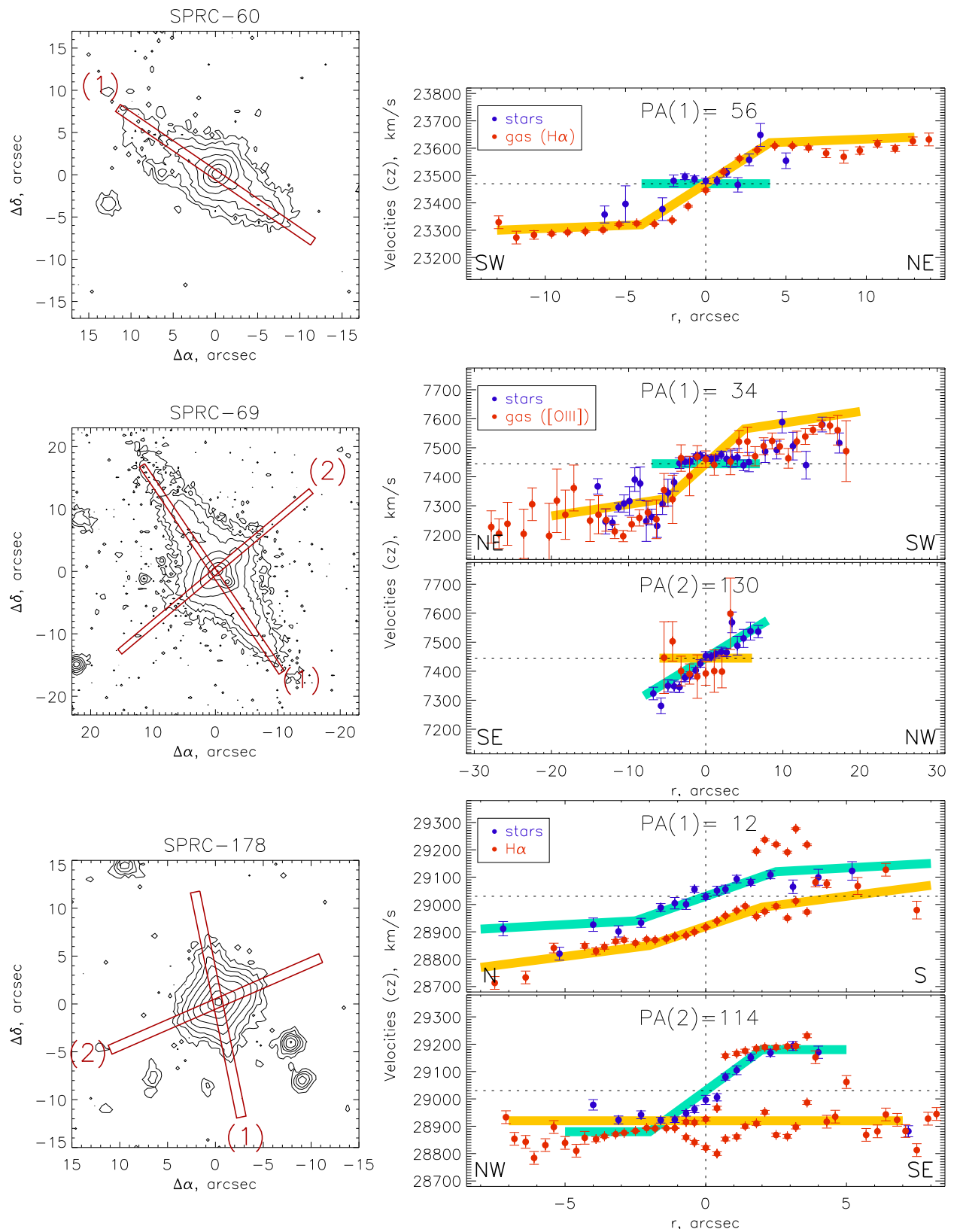


Рис. 4.17 Аналогично рис. 4.16 для галактик SPRC-60, SPRC-69 и SPRC-178.

SPRC-69=II Zw 92

В примечаниях к каталогу Zwicky & Zwicky (1971) отмечено, что объект “выглядит как Сатурн”. На цветном SDSS-изображении хорошо видно, как внешнее сильно наклоненное кольцо окружает центральную галактику (рис. 4.15). Спектральные наблюдения подтверждают присутствие полярного кольца, в котором виден как ионизованный газ, так и звезды (см. разрез вдоль $PA(1) = 34^\circ$). Кривая лучевых скоростей газа вдоль большой оси кольца асимметрична и заметно более протяженная в NE сторону от ядра, что может быть вызвано особенностями распределения областей HII в кольце. Вдоль большой оси центрального тела $PA(2) = 130^\circ$ наблюдается линейный рост скорости вращения звезд, в то время как ионизованный газ заметен только в самом центре.

SPRC-178

Судя по рис. 4.17, здесь мы видим две галактики с близкими лучевыми скоростями. Звездные абсорбции заметны в более развернутом диске с системной скоростью $V_{sys} = 29030$ км/с и большой осью с $PA(2) = 114^\circ$. Вдоль этого направления максимален градиент лучевых скоростей звезд, но и вдоль $PA = 12^\circ$ градиент отличен от нуля, поскольку щель не совпадает с малой осью диска. Линии ионизованного газа ярче во второй галактике с $V_{sys} = 28920$ км/с, видимой почти с ребра. Ее кривая вращения хорошо заметна в разрезе вдоль большой оси с $PA(1) = 12^\circ$. Линии ионизованного газа в SE-части системы заметно раздваиваются, здесь вдоль луча зрения мы отдельно видим вращение обеих галактик, что особенно заметно вдоль $PA(2) = 114^\circ$. В NW-половине скорости обоих дисков в проекции на луч зрения почти совпадают. Разрез с $PA(2) = 114^\circ$ идет близко к малой оси галактики, видимой с ребра. При этом ионизованный газ с соответствующей системной скоростью прослеживается относительно далеко от плоскости галактики, до $8''$ (14 кпк) в SW-направлении. Возможно, здесь наблюдается общая газовая оболочка или приливной поток, в таком случае мы имеем дело с парой взаимодействующих галактик.

4.5.4 Статистика ГПК

В результате первых спектральных наблюдений галактик каталога SPRC удалось подтвердить наличие полярных колец в 5 галактиках. Шестой объект – SPRC-178 – оказался парой галактик. Во всех подтвержденных кандидатах на полярных орбитах наблюдается как ионизованный газ, так и звезды. Ранее изучить движения звезд в полярных кольцах удалось только в трех объектах: NGC 4650A (Swaters & Rubin, 2003), UGC 5119 (Меркулова и др., 2008) и UGC 2748 (Меркулова и др., 2009).

Вместе с уже имеющимися в литературе данными, кинематические подтверждения наличия внешнего полярного компонента имеются для 10 галактик из нашего каталога, что уже является заметной добавкой к числу известных ГПК. Добавив к галактикам из PRC объекты SPRC, мы в 3 раза увеличили число известных объектов так или иначе связанных с феноменом полярных колец. При этом число уверенных кандидатов в ГПК также увеличилось почти в три раза, после того как к 33 объектам PRC-A и PRC-B добавились 70 “лучших кандидатов” SPRC.

На правом рис. 4.14 сравниваются распределения по красному смещению галактик из Whitmore et al. (1990) и из SPRC. Видно, что новый каталог содержит большее количество далеких объектов, начиная с $z > 0.05$. Резкое снижение числа кандидатов на $z > 0.1$ очевидно связано с селекцией – для таких расстояний на снимках полученных с $seeing \approx 1''$ удается различить только достаточно крупные полярные структуры. В тоже время обнаружены десятки новых близких ($z < 0.03$) кандидатов.

Таким образом, даже среди близких галактик ГПК встречаются в несколько раз чаще, чем это считалось ранее. По грубой оценке Whitmore et al. (1990), только 0.5% близких S0 галактик обладают полярными кольцами, причем эта оценка может возрасти на порядок с учетом колец, видимых плашмя. Более точные недавние оценки Решетников и др.

(2011), основанные на построении функции светимости, показывают, что доля встречаемости ГПК среди близких галактики в диапазоне $M_B = -17^m \dots -22^m$ составляет 0.13%, а с поправкой на эффект проекции достигает 0.4%. Привлечение объектов нового каталога может заметно увеличить эту цифру, так как, согласно описанным выше критериям, реальное число ГПК среди всех галактик Galaxy Zoo в ~ 3 раза больше, чем в нашем каталоге.

Дальнейшее углубленное спектральное изучение объектов SPRC позволит нам лучше разобраться со звездным составом полярных колец, их возрастом, металличностью и кинематикой. Особый интерес представляют галактики с массивными внешними полярными кольцами, исследование которых важно для понимания процессов аккреции газа при образовании галактик на космологических масштабах.

Основные результаты главы 4

- В Apg 212 обнаружены две кинематически различные подсистемы вращающегося газа – внутренний диск и внешние эмиссионные филаменты. Вращение внешней подсистемы происходит в плоскости, находящейся под значительным углом к звездному диску, достигающим 50° на $r \approx 6$ кпк. Свидетельством взаимодействия между газом полярного кольца и внутреннего диска являются ударные фронты в центральных областях галактики. На больших расстояниях от центра ионизованный газ уже не обнаруживается, но мы предполагаем, что диск нейтрального водорода продолжает изгибаться и приближается к плоскости, полярной относительно внутреннего диска галактики. Наиболее вероятной причиной образования полярного кольца в Apg 212 является аккреция газа с UGC 12549
- Подтверждена и изучена новая далекая галактика с полярным кольцом – SDSS J075234.33+292049.8. Анализ поля скоростей ионизованного газа показал, что это гигантское (48 кпк диаметром) кольцо вращается под заметным углом ($58 \pm 10^\circ$ или $73 \pm 11^\circ$) к плоскости центральной галактики. Измеренное отношение массы к светимости $M/L \approx 20$ указывает на значительный вклад темной материи в общую массу системы
- Представлено исследование морфологии и кинематики уникальной кольцевой галактики - объекта Хога. Предложено объяснение пекулярной структуры этой галактики холодной аккрецией газа из межгалактической среды на прародительницу – эллиптическую галактику.
- Составлен новый каталог, существенно увеличивающий число известных кандидатов в галактики с полярными кольцами. На 6-м телескопе САО РАН выполнены спектральные наблюдения 6 галактик из SPRC. В пяти галактиках подтверждено существование полярных колец, один объект оказался проекцией пары галактик. Вместе с имеющимися в литературе данными к кинематически-подтвержденным ГПК можно отнести уже 10 галактик из нашего каталога.

Основные публикации, представляющие результаты этой главы:

- Моисеев А.В., “Изогнутое полярное кольцо в галактике Apg 212”, 2008, Астрофизический Бюллетень, т. 63, с. 215
- Moiseev A. V., Bizyaev D.V. “3D spectroscopic study of galactic rings: formation and kinematics”, 2009, proceeding of 7th SCSLSA, New Astronomy Reviews, v 53., p. 169
- Brosch N., Kniazev A., Moiseev A., Pustilnik S., “On the Nature of the Apparent Ring Galaxy SDSS J075234.33+292049.8”, 2010, MNRAS, v. 401, p. 2067

- Moiseev A.V., Smirnova K.I., Smirnova A.A., Reshetnikov V.P., “A new catalogue of polar-ring galaxies selected from the SDSS.”, 2011, MNRAS, v. 418, p. 244
- Finkelman I., Moiseev A., Brosch N., Katkov I., “Hoag’s Object: Evidence for Cold Accretion onto an Elliptical Galaxy”, 2011, MNRAS, v. 418, p. 1834

Глава 5

Внутренние полярные кольца и диски

“ - Внутре! - прошелестел старичок. - Внутре смотрите...”

(А.Н. и Б.Н. Стругацкие)

5.1 Введение: внутренние полярные структуры

Несмотря на относительно редкую встречаемость среди близких галактик, внешние полярные кольца являются достаточно известным феноменом. И хотя, как это упоминалось в предыдущей главе, нам не хватает детальной информации об их динамике, эволюции, истории звездообразования, все-таки основные ключевые вопросы можно считать решенными. Опубликованы оценки стабильности таких структур, моделируется их образование в результате тех или иных внешних событий.

Иначе обстоят дела с полярными образованиями на меньших пространственных масштабах, несмотря на то, что внутренние¹ полярные структуры (ВПС) были известны еще до того, как феномен ГПК получил признание и подтверждение. Так, при спектральных наблюдениях Sc-галактики NGC 3672 Rubin et al. (1977) обнаружили значительный градиент лучевых скоростей вдоль малой оси, что, по их мнению, указывало на вращения околядерного ($r < 350$ пк) газа под значительным углом к плоскости галактики. Позже Bettoni et al. (1990), по результатам длинноцелевой спектроскопии галактики NGC 2217 показали, что внутри центрального килопарсека диск ионизованного газа изгибается так, что вращение происходит в плоскости, перпендикулярной звездному диску галактики, причем ось вращения этого полярного диска практически совпадает с большой осью звездного бара NGC 2217. В последующее десятилетие сходные кинематически выделенные структуры были обнаружены рядом авторов при рассмотрении внутренней кинематики других близких галактик ранних типов. Отметим, прежде всего, работы О.К. Сильченко с коллегами, выполненные на 6-м телескопе САО РАН с помощью панорамной спектроскопии (Sil'chenko et al., 1997; Sil'chenko & Afanasiev, 2000; Сильченко, 2002), а также публикации группы из университета Падуи (Bertola & Corsini, 2000; Pizzella et al., 2001). Первый опубликованный список галактик с подтвержденными ВПС содержал уже 17 объектов (Corsini et al., 2003). В последующее время разные авторы представили довольно обширный наблюдательный материал, посвященный обнаружению и исследованию таких структур. Этому во много способствовал обзор кинематики и звездного населения близких галактик ранних типов, проводимый на 4.2-м телескопе WHT, а также исследование химически выделенных ядер галактик на 6-м телескопе САО РАН, выполняемые с помощью интегральных полевых спектрографов SAURON и MPFS соответственно.

В работе Soccato et al. (2004) показано, что в 50 – 60% ярких галактик без переминок наблюдается градиент лучевой скорости вдоль малой оси, что частично может

¹Под внутренними структурами здесь и далее мы имеем в виду масштабы меньше или сравнимые с характерными размерами балджа или внешнего диска.

быть объяснено присутствием ВПС. Несмотря на то, что число таких объектов даже превышает число кинематически подтвержденных внешних полярных колец, природа их остается неясной. До сих пор нет внятного самосогласованного сценария их формирования, вопросы устойчивости подобных структур не решены. Противоречивы взгляды на связь ВПС с барами галактик и их внешним окружением: наличием спутников, следов взаимодействия и т.д. (Corsini et al., 2003; Moiseev et al., 2010c).

В этой главе в начале представлено несколько примеров внутренних полярных дисков, обнаруженных автором с коллегами в галактиках различных морфологических типов. В большинстве случаев, найденные нами ВПС являются побочным продуктом наблюдательных программ, имевших другие основные цели, такие как исследование галактик с двойными барами (NGC 3368 и NGC 5850), эволюция членов групп (NGC 3599, NGC 3626) или изучение воздействия молодых звездных группировок на межзвездную среду (Mrk 33 и Mrk 370). Далее, с привлечением литературных данных, рассматриваются общие характеристики ВПС.

5.2 Новые околядерные полярные диски

5.2.1 NGC 5850

Внутренние области этой SBb галактики изучались со спектрографом MPFS в рамках исследования кинематики галактик с перемычками (Moiseev et al., 2004). Исходя из имеющихся фотометрических данных, параметры ориентации внешнего диска определены как $PA_0 = 335 \pm 10^\circ$, $i_0 = 37 \pm 5^\circ$, что согласуется с данными по кинематике нейтрального водорода (Higdon, et al., 1998). Резкий поворот изофот на $r < 10''$ Friedli et al. (1996) интерпретировали как проявление второго бара.

По данным MPFS, позиционный угол кинематической оси звездного компонента близок к линии узлов диска, а в ионизованном газе отличается от линии узлов более чем на $50-60^\circ$ (рис. 5.1). При этом PA_{kin} практически совпадает с позиционным углом центральных изофот. Такое поведение характерно для диска, наклоненного к плоскости галактики. Кроме того, если все же принять, что движения газа происходят в плоскости галактик, то они должны соответствовать радиальному истечению из ядра со скоростями около $50-70$ км/с (здесь использовано утверждение Higdon, et al. (1998) о том, что наиболее вероятно ориентация диска галактики, при которой ее западная половина – ближайшая к наблюдателю). Подобные особенности характерны для галактик Сейферта, но оптический спектр галактики не содержит эмиссионных линий, указывающих на активное ядро, не наблюдается здесь и вспышки звездообразования. Более естественным является предположение о том, что движения газа на $r < 6-7''$ (1.1–1.3 кпк, при принятом расстоянии до галактики 38.7 Мпк) происходят в полярной к диску галактики плоскости.

Каков наклон этого диска к картинной плоскости? К сожалению, по полю скоростей угол наклона оценивается с большой неопределенностью: $i_1 = 40-60^\circ$, в то время как позиционный угол измеряется более уверенно: $PA_1 = 35 \pm 5^\circ$. Подставив имеющиеся значения в соотношение (2.1), получаем два решения для угла между дисками: $\delta = 60-82^\circ$ и $36-49^\circ$, первое из которых соответствует случаю почти полярных орбит. При этом скорости вращения газа и звезд согласуются как между собой, так и с кривой вращения HI на больших расстояниях от центра. Неопределенность в угле наклона может быть связана с изгибом диска.

Согласно Higdon, et al. (1998) NGC 5850 пережила недавнее столкновение с близкой галактикой NGC 5846. Возможно, что в процессе взаимодействия часть газа перешла на полярные орбиты. Далее мы подробнее обсудим такой сценарий формирования ВПС.

5.2.2 Группа Leo I: NGC 3368

Особенности морфологии, кинематики и звездного населения NGC 3368 описаны в наших статьях (Sil'chenko et al., 2003; Moiseev et al., 2004), поэтому здесь остановимся только на

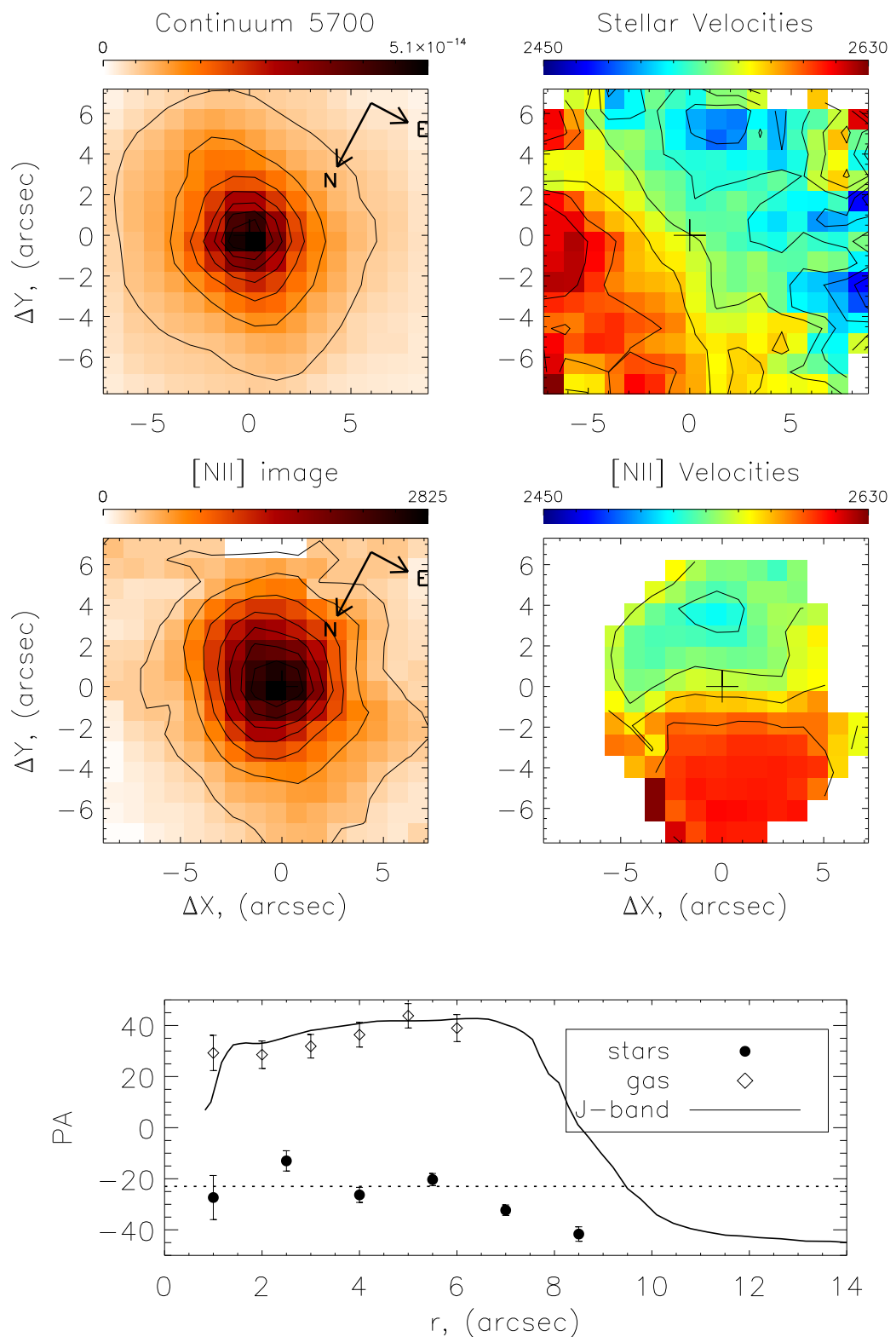


Рис. 5.1 Результаты наблюдений NGC 5850 со спектрографом MPFS (Moiseev et al., 2004). Вверху – изображение в континууме и поле скоростей звезд. В середине – изображение и поле скоростей в линии [NII] $\lambda\lambda 6548, 6883$, внизу – радиальные изменения позиционного угла в полях скоростей в сравнении изофотами в фильтре J .

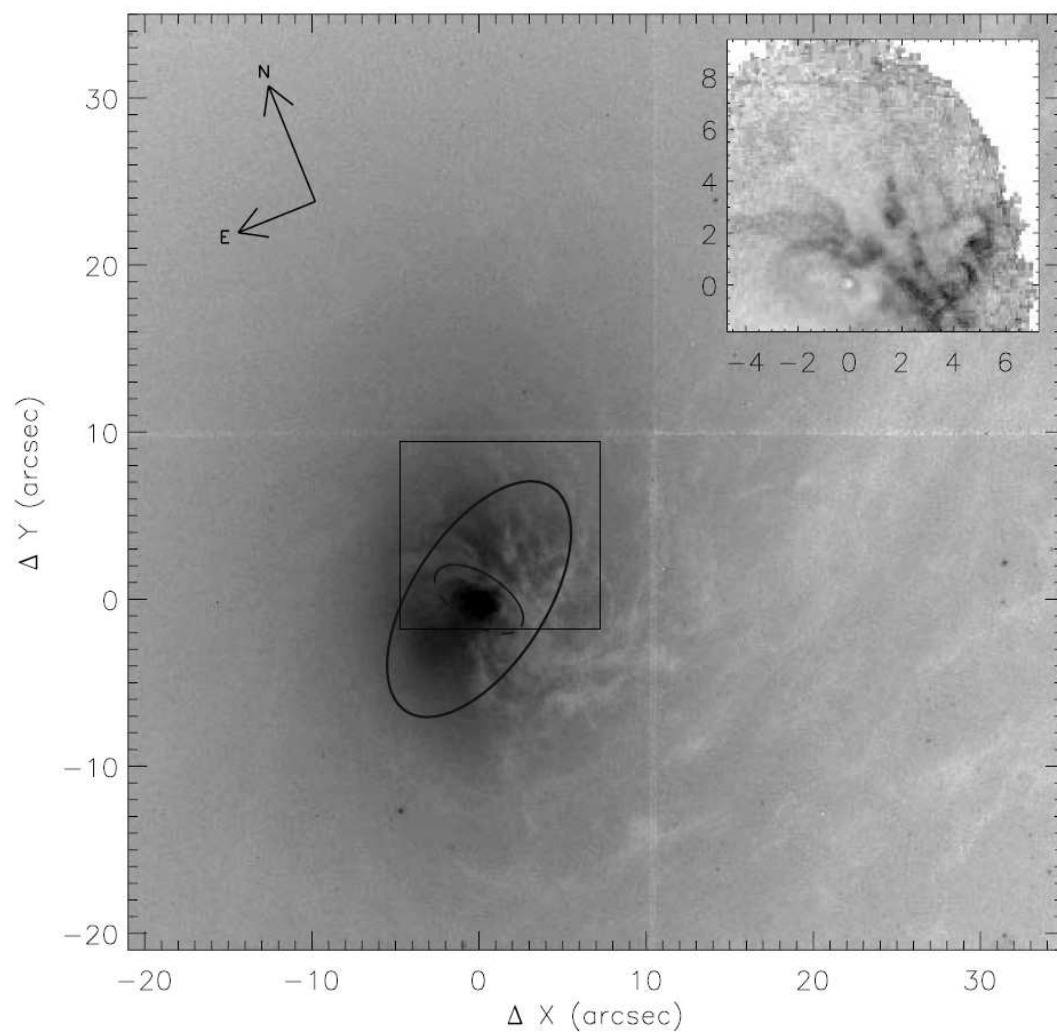


Рис. 5.2 Оптическое изображение NGC 3368 (WFPC2/HST), скомбинированное из нескольких фильтров для повышения контраста пылевой полосы. Два эллипса показывают расположение ядерного бара и внутреннего пылевого полярного кольца. На врезке показана карта показателя цвета ($J - H$), составленная по данным NICMOS/HST, более темные градации соответствуют красному показателю цвета. Квадратом выделена область, наблюдавшаяся с MPFS (Sil'chenko et al., 2003).

моментах, являющихся предметом рассмотрения данной главы. Согласно наблюдениям с ИФП газовый диск в этой галактике – члене группы Leo I, сильно искривлен. Позиционный угол внешних областей диска ионизованного водорода $PA_{kin} = 170^\circ$ заметно отличается от линии узлов звездного диска ($PA_0 = 135^\circ$). Кроме того, обнаружена систематическая разница между скоростями вращения, измеренными в линиях H α и [NII]. Меньшая скорость вращения в запрещенных линиях азота интерпретируется как результат действия ударных волн, образующихся при выпадении облаков нейтрального водорода на звездный диск галактики. Газ, прошедший через ударный фронт, замедляется в диске, но при этом излучает в запрещенных линиях (см. обсуждение аналогичных ударных фронтов в Apg212, §4.2). Отметим, что в согласии с радионаблюдениями Schneider (1989), большая часть нейтрального водорода в группе Leo I содержится в гигантском кольце, вне ярких членов группы².

На основе анализа снимков в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах мы показали, что в галактике присутствует небольшой мини-бар размером около $5''$, вытянутый вдоль $PA = 120^\circ - 125^\circ$. А на изображениях с космического телескопа HST (см. рис5.2) здесь виден газопылевой диск радиусом менее $2''$ (~ 200 пк), расположенный вдоль малой оси бара. К сожалению, спектральные данные MPFS имеют слишком низкое пространственное разрешение и не позволяют выделить эту структуру по ее кинематическим проявлениям. Но наблюдаемая картина является хорошей иллюстрацией тезиса о преимущественной ориентации ВПС перпендикулярно к большой оси бара в галактиках с перемычками (§5.5.5).

5.2.3 Группа Leo II: NGC 3599 и NGC 3626

Кинематика, морфология и состав звездного населения этих двух линзовидных галактик – членов группы Leo II – рассмотрена в нашей статье (Sil'chenko, Moiseev & Shulga, 2010). Далее мы остановимся в основном только на особенностях внутренней кинематики галактик. Принятое расстояние до NGC 3599 и NGC 3626 составляет около 20 кпк, что дает масштаб 97 пк/ $''$.

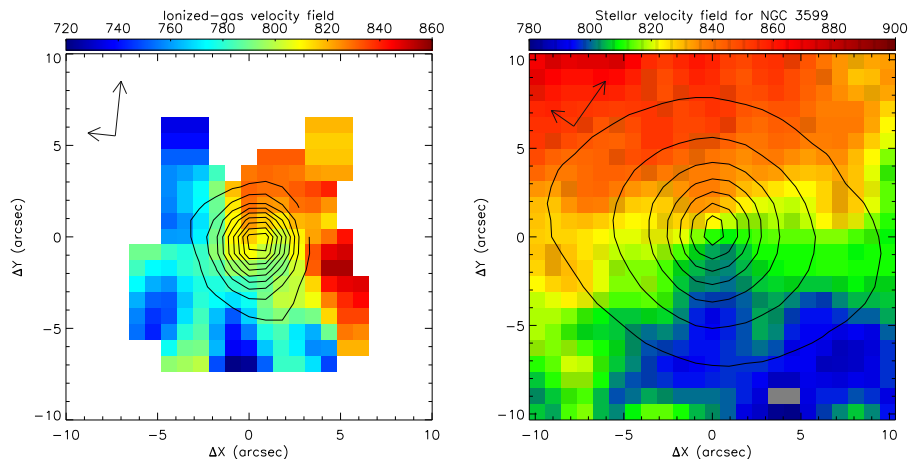
Даже беглого взгляда, брошенного на поля лучевых скоростей звезд и ионизованного газа в NGC 3599 (рис. 5.3), достаточно, чтобы обнаружить картину, похожую на описанный выше случай NGC 5850: за исключением самой центральной области ($r < 1 - 2''$) весь газ в пределах поля зрения MPFS ($\pm 7 - 8''$ от центра) вращается вокруг оси, примерно ортогональной к оси вращения звездного компонента. Приближение кругового вращения дает для ориентации звездного диска $i_0 = 28 \pm 6^\circ$ и $PA_0 = 55 \pm 10^\circ$ в согласии с ориентацией внешних изофот галактики. Небольшие отклонения PA_{kin} от среднего положения линии узлов, заметные на рис. 5.4, происходящие в противоположную сторону в сравнении с PA фотометрической оси изофот, обусловлены, скорее всего, неосесимметричностью (овальностью) внутреннего звездного диска NGC 3599.

Радиальное поведение PA_{kin} в ионизованном газе более сложное (рис. 5.4): на $r \approx 1''$ газ вращается в той же плоскости, что и звезды, а на больших расстояниях от центра орбиты газовых облаков выходят из плоскости галактики, составляя с ней на $r \geq 6''$ угол $\delta = 50^\circ \pm 10^\circ$ (здесь диапазоны обоих решений в (2.1) пересекаются). Т.е. речь идет об изогнутом газовом кольце или диске, внешние части которого сильно наклонены к плоскости галактики. Картина похожая на то, что наблюдается в Apg 212 (глава 4.2), и отличается от нее только размером газовой структуры, которая в NGC 3599 составляет около 700 пк ($\sim 7''$), что заметно меньше радиальной шкалы внутреннего звездного диска (1.3–1.4 кпк).

В NGC 3626 ситуация иная. Известно, что крупномасштабный газовый диск в этой галактике противовращается относительно звездного (Ciri et al., 1995). Поля скоростей ионизованного газа в линиях [NII] и [OIII] (рис. 5.3) подтверждают, что противовращение

²Происхождение этого кольца долгое время считалось загадочным, но Michel-Dansac et al. (2010) показали, что оно могло образоваться в результате лобового столкновения NGC 3384 и NGC 3368, являясь, таким образом, предельным случаем столкновительных колец, рассмотренных в главе 3

NGC 3599:



NGC 3626:

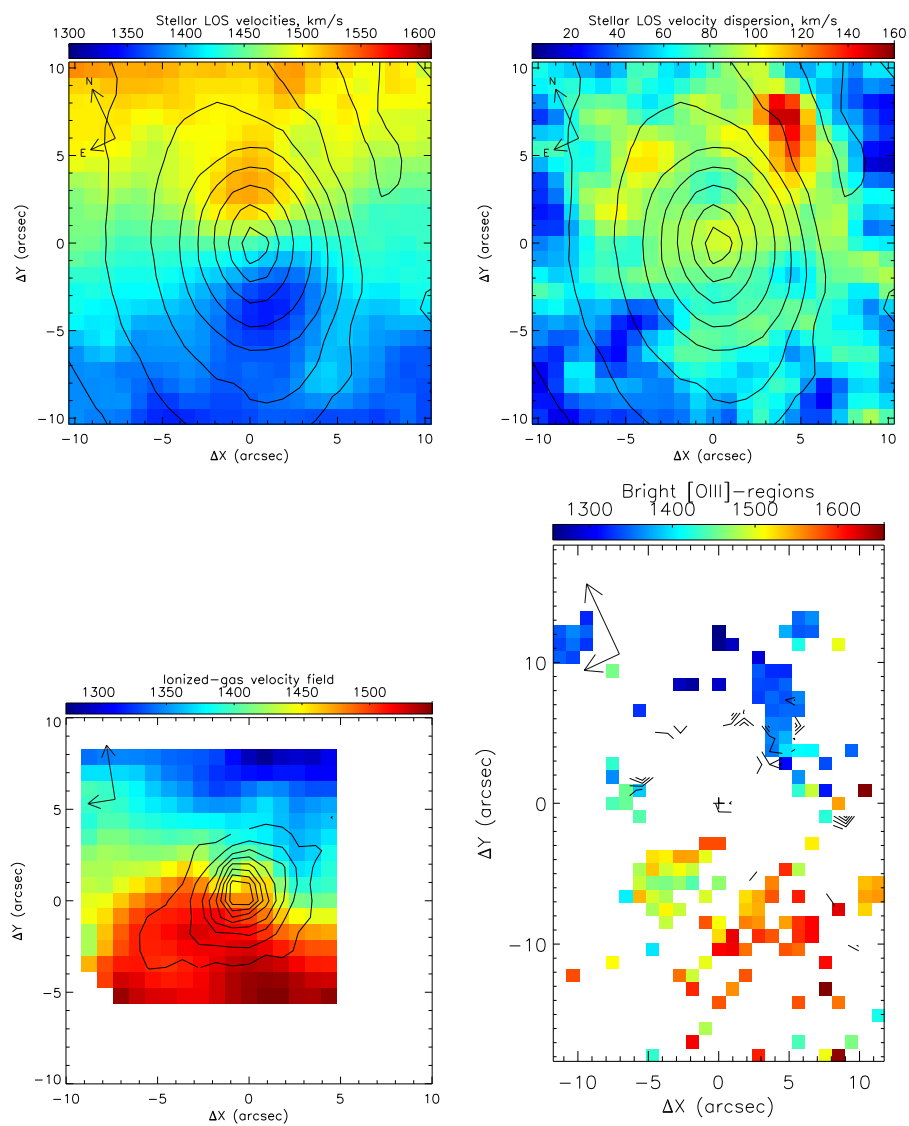


Рис. 5.3 Верхний ряд: поля скоростей NGC 3599: ионизованный газ по данным MPFS (слева), и звезды по данным SAURON (справа). Средний ряд – поля скоростей и дисперсии скоростей звезд в NGC 3626 по данным SAURON. Нижний ряд – поля скоростей ионизованного газа в NGC 3626: в линии [NII] (MPFS, слева) и в линии [OIII] (SAURON, справа).

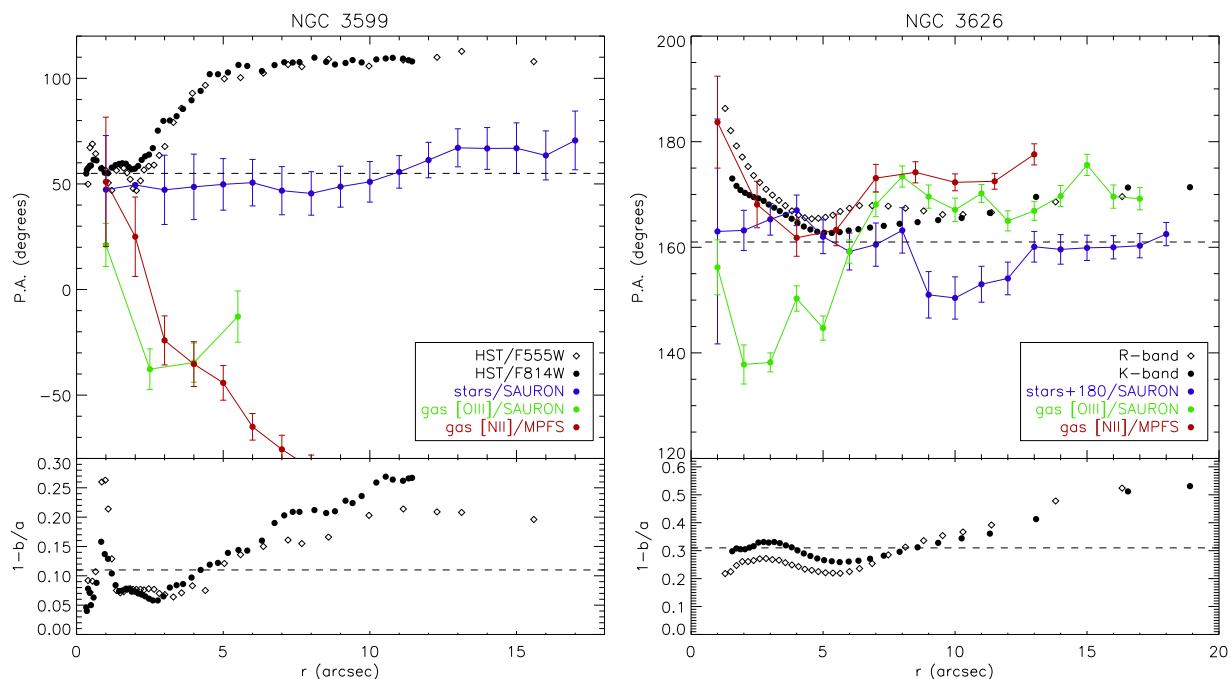


Рис. 5.4 Радиальные изменения PA_{kin} и позиционного угла большой оси изофот (вверху) и эллиптичность изофот (внизу) для NGC 3599 и NGC 3626. Пунктиром отмечены величины, соответствующие принятой ориентации внешних дисков галактик.

имеет место и во внутренних областях, на $r < 17''$ (1.7 кпк). Данные с двух панорамных спектрографов хорошо дополняют друг друга: SAURON позволяет рассмотреть кинематику газа с большим полем зрения, но только в отдельных областях, где линия дублета [OIII] достаточно яркая (в основном, в кольце звездообразования радиусом около $10''$). А MPFS позволяет более уверенно изучить движения ионизованного газа в околоядерной области в линиях азота. Анализ полей скоростей методом наклонных колец показывает, что ось вращения околоядерного звездного компонента согласуется с принятой ориентацией внешнего диска галактики (рис. 5.4). Небольшие отклонения PA_{kin} от линии узлов на $r = 8 - 12''$ вызваны двумя пекулярными “пятнами” в поле скоростей звезд, совпадающими с областями высокой дисперсией скоростей (рис. 5.3), возможно, что здесь звезды захваченного спутника, газ которого пошел на формирование глобального противорвращающегося диска, накладывающегося на основной звездный компонент.

Поведение газа во внутренней области NGC 3626 еще более запутанное. Кинематическая ось в линиях [NII] поворачивается вместе с большой осью изофот континуума, так что в самом центре они обе достигают $PA_1 \approx 190^\circ$. Формальный расчет по (2.1) дает два решения для угла δ между плоскостями звездного и газового дисков: 58° или 87° . Второе решение соответствует полярному диску радиусом $r < 4 - 5''$ (400–500 пк).

Возле самого центра в NGC 3599 и за пределами 500 пк в NGC 3626, плоскость вращения газа подходит достаточно близко к основной галактической плоскости. Поэтому наличие колец звездообразования в этих галактиках можно объяснить взаимодействием материи, захваченной из внешнего окружения, с собственным изначальным газовым диском галактик. Напомним, что схожее объяснение было предложено нами для Agr 212, где наблюдается прямое столкновение газа на наклонных орбитах с основным диском (§4.2). Ранее похожий механизм предложили Corsini et al. (1998), объясняя происхождение кольца звездообразования в NGC 3593.

5.3 Полярные диски в карликовых галактиках

Принято считать, что полярные структуры (как внешние, так и внутренние), в основном наблюдаются только в галактиках ранних типов, где собственные запасы газа невелики,

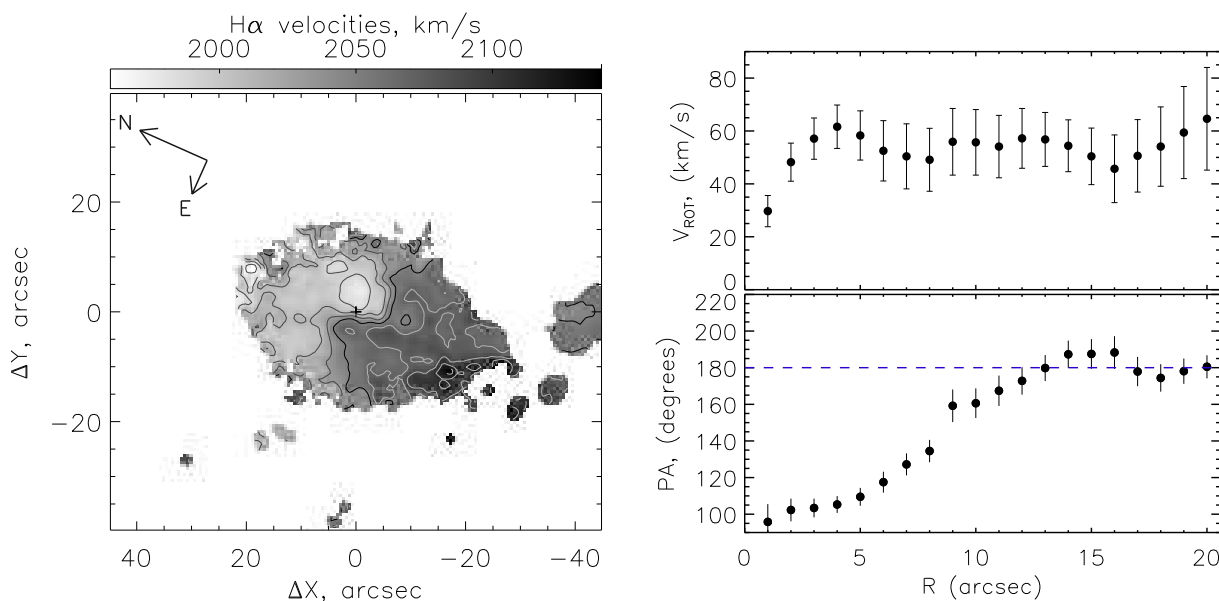


Рис. 5.5 NGC 7458. Слева – поле лучевых скоростей в линии H α (Шаляпина и др., 2004), справа – радиальные изменения скорости вращения (вверху) и PA_{kin} (внизу).

так что газовые облака на полярных орбитах не испытывают столкновения с газом в основной галактической плоскости. Но возможно, что касательно ВПС это мнение обусловлено в основном тем, что наиболее массовые и детальные исследования околоядерной кинематики проводились среди линзовидных и эллиптических галактик. В то же время, нами были обнаружены внутренние полярные (или сильно наклоненные) газовые диски в некоторых богатых газом голубых компактных галактиках. Морфологически, это, как правило, системы поздних типов – dIrr и Im.

5.3.1 NGC 7468 (Mrk 314)

Галактика изначально была включена в каталог кандидатов в полярные кольца Whitmore et al. (1990), благодаря присутствию во внешних областях структуры, напоминающей приливной хвост или часть кольца. Детальное фотометрическое исследование NGC 7468 в полосах (Evstigneeva, 2000) показало, что по своим интегральным характеристикам NGC 7468 относится к галактикам позднего типа – Im.

Проведенный нами (Шаляпина и др., 2004) анализ морфологии и кинематики этой галактики не выявил особенно заметных peculiarностей во внешних областях, однако внутренняя кинематика оказалось весьма запутанной. С помощью сканирующего ИФП было построено крупномасштабное поле скоростей ионизованного газа в линии H α (рис. 5.5). Применение метода “наклонных колец” в предположении вращения газа по круговым орбитам показывает, что ориентация кинематической оси изменяется от $PA_{kin} = 60^\circ$ в центре до $PA_{kin} \approx 0^\circ$ на периферии (рис. 5.5, справа). Такую картину в поле скоростей мы объясняем наличием двух кинематически различных подсистем газа – внутренней, расположенной в центральной области ($r < 6''$, т.е. 900 пк), и внешней. Согласно нашим оценкам, угол наклона внешнего диска галактики к лучу зрения составляет около 45° , а для внутренних областей – около 60° . Для принятых величин i соответствующие участки кривой вращения газа хорошо согласуются между собой (рис. 5.5).

Используя выражение (2.1), получаем для угла между диском галактики и плоскостью внутреннего диска два значения $\delta = 50^\circ$ и 86° , в зависимости от ориентации дисков относительно наблюдателя. Второе из них точно соответствует случаю полярного диска.

Отметим явные следы взаимодействия, наблюдаемые в галактике: вытянутая по дуге цепочка областей III, вероятно отражает траекторию прохождения спутника и является приливным хвостом, который образовался в результате разрушения спутника в гравитационном поле NGC 7468.

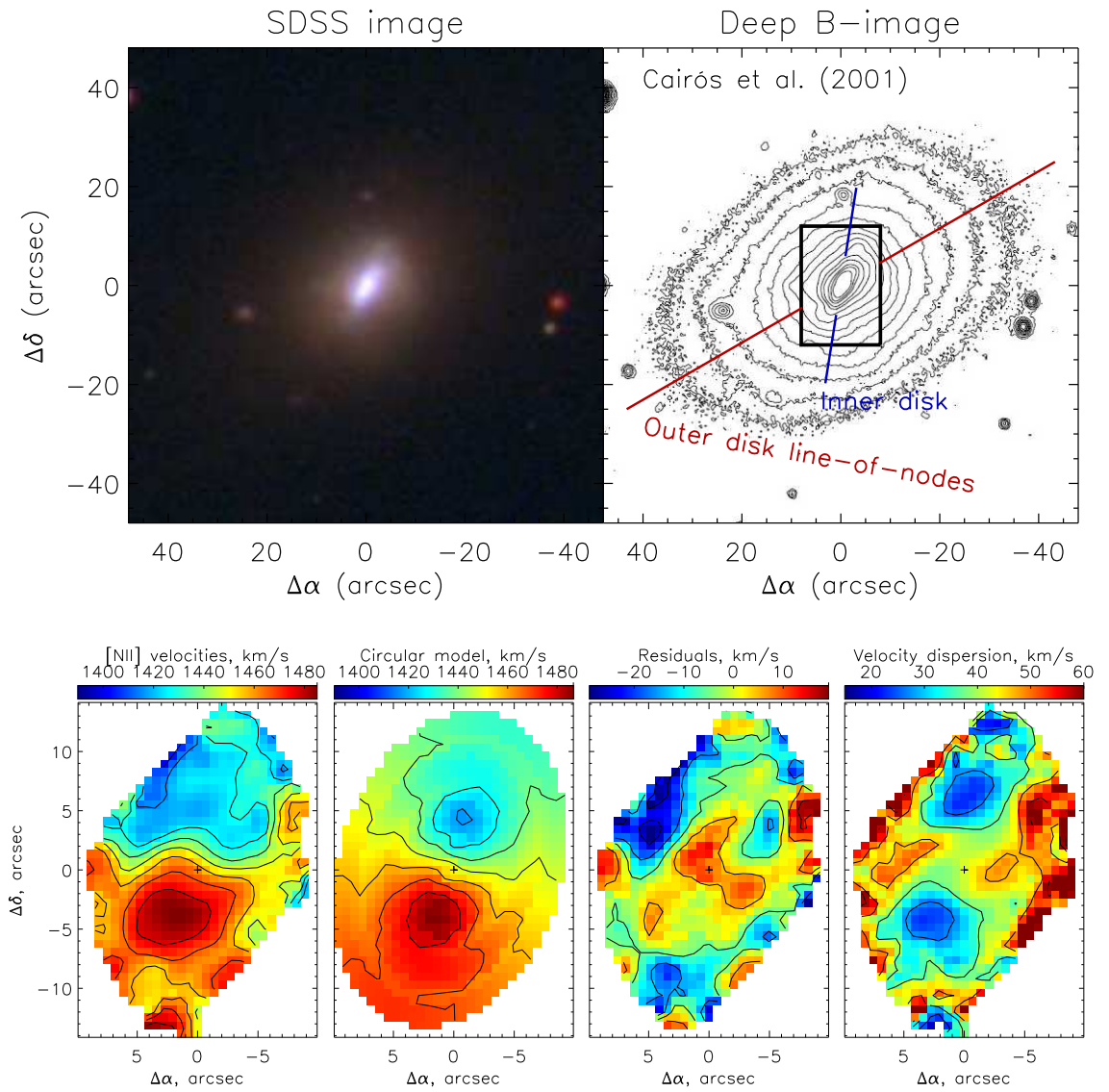


Рис. 5.6 Mrk 33. Сверху – цветное изображение SDSS и изофоты глубокого снимка в полосе B (Cairós et al., 2001b). Нижний ряд – результаты наблюдения с ИФП в линии $[\text{NII}]\lambda 6583$, слева направо: поле лучевых скоростей, модель кругового вращения, остатки после вычитания модели, карта дисперсии скоростей (Moiseev, 2011).

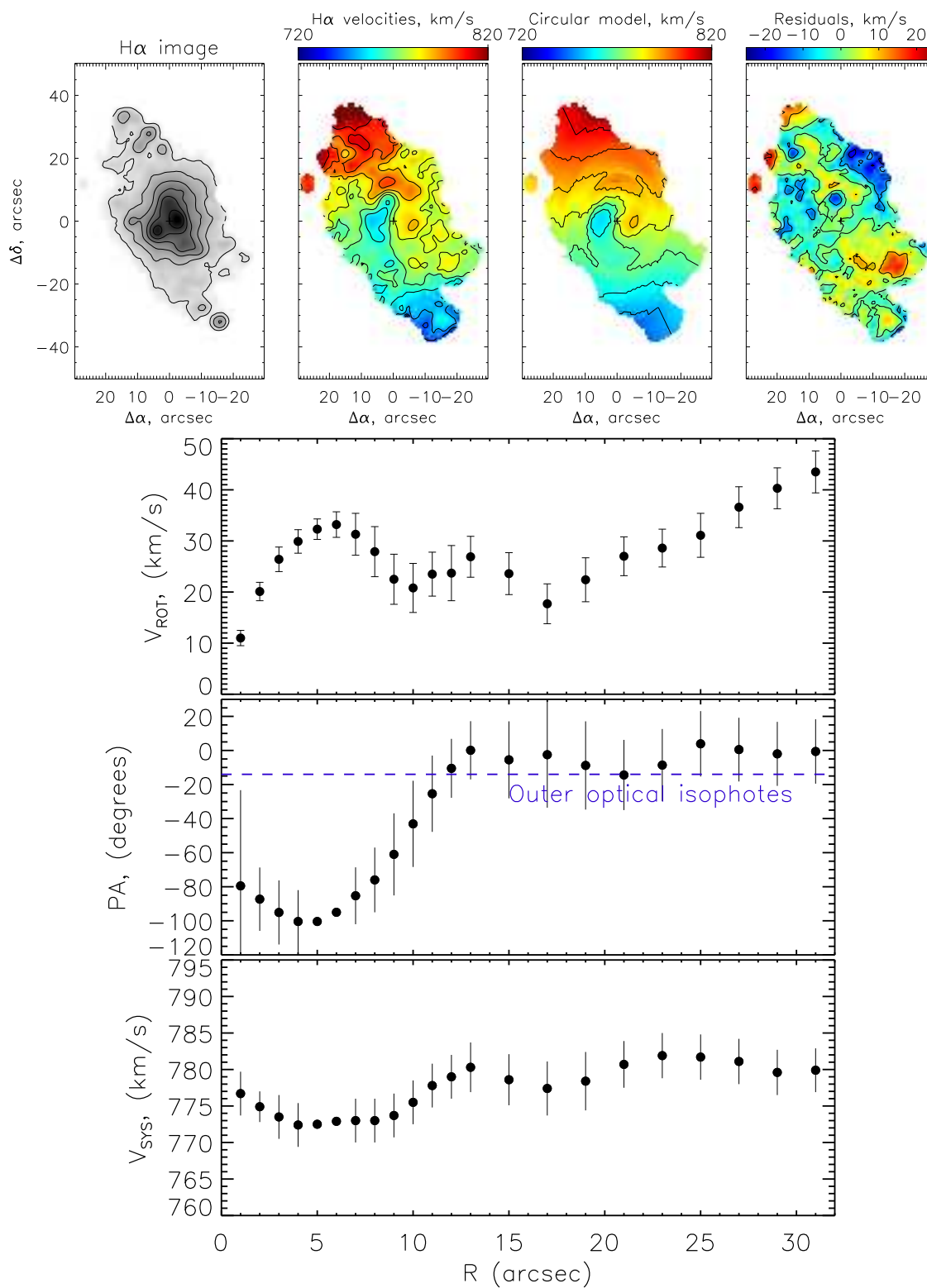


Рис. 5.7 Mrk 370. Верхний ряд – результаты наблюдения с ИФП в линии H α , слева направо: изображение в эмиссионной линии, поле лучевых скоростей, модель кругового вращения, остатки после вычитания модели. Внизу – радиальные изменения параметров модели вращения.

5.3.2 Mrk 33

Mrk 33 – хорошо известная голубая компактная галактика, по морфологии ее относят к dE с пылевыми полосами (Bravo-Alfaro et al., 2004). Впервые поле скоростей газа во внутренней области ($r < 5''$) было построено в работе Petrosian et al. (2002) с помощью старой версии прибора MPFS. Авторы обратили внимание на то, что PA_{kin} здесь заметно отличается от позиционного угла фотометрической оси галактики. Наши наблюдения со сканирующим ИФП позволили изучить кинематику ионизованного газа на несколько больших расстояниях от ядра – эмиссия в линии [NII] λ 6583 обнаруживается вплоть до $r = 12 - 14''$ (1.4-1.6 кпк) от центра. Поле скоростей ионизованного газа хорошо аппроксимируется моделью тонкого диска с круговым вращением (рис. 5.6), ориентированным согласно $PA_1 = 163 \pm 4^\circ$ и $i_1 = 47 \pm 5^\circ$. Для ориентации основной плоскости сплюснутого звездного сфероида галактики мы приняли параметры, полученные Amorin et al. (2009) на основании 2D-декомпозиции оптического изображения: $PA_0 = 116^\circ$, $i_0 = 59^\circ$. В таком случае, опять получаем два формальных решения для угла наклона между диском ионизованного газа и плоскостью самой галактики: $\delta = 85 \pm 6^\circ$ и $39 \pm 6^\circ$. Первое решение, соответствующее полярному диску, представляется наиболее вероятным, по аналогии с внешними полярными кольцами, если предположить, что она стабилизируется трехосностью звездного “тела” галактики. На длительное время существования полярной структуры указывает ориентация внутренних ($r < 10''$) оптических изофот, находящаяся в хорошем согласии с положением диска ионизованного газа. Т.е. значительная часть молодых звезд (на рис. 5.6 диск выделяется своим голубым цветом) уже сформировалась из газа на полярных орбитах, которые оставались стабильным в течение многих оборотов диска.

Основываясь на данных радионаблюдений в нейтральном водороде, Bravo-Alfaro et al. (2004) предположили, что галактика недавно захватила газ в результате тесного взаимодействия или слияния с изначально богатым газом спутником. Наши наблюдения показывают, что внутренний полярный диск ионизованного газа вращается в согласии с градиентом лучевых скоростей внешней структуры в HI. К сожалению, пространственное разрешение данных HI составляет около $15''$, т.е. слишком грубое, чтобы сказать – наблюдаем ли мы единую газовую полярную структуру, в центре которой происходит звездообразование, либо же речь идет о внешнем газовом кольце и внутреннем диске из газа, уже упавшего к центру галактики.

На картах остаточных скоростей на $r < 4 - 5''$ вдоль малой оси диска заметен избыток “красных” скоростей, также вдоль малой оси наблюдается повышенная дисперсия скоростей газа (рис. 5.6). Мы считаем, что эти детали связаны с расширяющимся пузырем горячего газа, окружающим область мощного звездообразования, существование которого было уже заподозрено по спектральным наблюдениям Legrand et al. (1997).

5.3.3 Mrk 370

Яркая ($M_B = -17.20$) голубая компактная галактика, детальному спектрофотометрическому исследованию которой посвящена большая статья Cairós et al. (2002). Там авторы, используя данные широко и узкополосной фотометрии и оптической спектроскопии оценили ряд параметров, характеризующих многочисленные области HII в диске галактики, в том числе и возраст последней вспышки звездообразования, составивший 3-6 млн. лет. С помощью панорамного спектрографа INTEGRAL/WHT для центральной области, размером $16'' \times 12''$, ими было построено поле скоростей ионизованного газа и отмечено, что в нем наблюдается более-менее упорядоченное вращение с $PA_{kin} \approx 90^\circ$, т.е. “вокруг большой оси галактики”. Но то, что кинематическая ось практически перпендикулярна фотометрической, больше никак не комментировалось. Наблюдения со сканирующим ИФП (Moiseev, 2011) позволили получить поле скоростей в большом поле зрения, включающем все области HII, изученные Cairós et al. (2002). Оказалось, что внешние эмиссионные области вращаются в плоскости примерно совпадающей со звездным диском галактики ($PA_0 = 346^\circ$, $i_0 = 45^\circ$). Но на меньших радиусах ($r < 11''$, т.е. 600 пк), ориентация круго-

вых орбит в диске ионизованного газа резко меняется (рис. 5.7), так что наклон орбит к основной плоскости должен составлять $\delta = 55 - 70^\circ$ (в зависимости от принятой величины i для околоядерного диска). Такая геометрия газового диска напоминает искривленный диск нейтрального водорода в прототипе галактик с полярными кольцами – NGC 2685, где за внешними пределами полярного кольца газовая структура вновь возвращается в плоскость звездного диска (Józsa et al., 2009). С тем отличием, что в Mrk 370 диаметры дисков (и звездного, и газового) почти в 10 раз меньше. Скорее всего, сходен и механизм формирования таких изогнутых структур.

5.4 Наблюдаемые свойства внутренних полярных структур

5.4.1 Список подтвержденных полярных структур

В таб. 5.1 собраны основные параметры внутренних полярных структур, описанных в литературе. В колонках под соответствующими номерами даются:

(1) – имя галактики

(2), (3) – морфологический тип согласно NED/RC3 и его цифровой код, согласно базе данных HyperLeda³ ($T = -2$ соответствует S0, $T = 0$ – S0a и т.д.). Для NGC 7468, которая явно не является эллиптической (как указано в LEDA), было принято $T = 9$, в согласии с §5.3.1.

(4) – принятое расстояние (D) в Мпк, согласно HyperLeda

(5), (6) – внешний радиус полярной структуры в угловой и линейной мере (r). Во многих статьях его приводят сами авторы. В остальных случаях оценка выполнялась нами на основании данных, приводимых в оригинальных статьях – графиков радиальных изменений позиционного угла кинематической оси (PA_{kin}) или опубликованных полей скоростей. Для некоторых галактик известен только нижний предел этого параметра, ограниченный полем зрения спектрографа.

(7), (8) – параметры ориентации основного диска галактики: позиционный угол (PA_0) и наклон к лучу зрения (i_0) в градусах. В большинстве случаев взяты из оригинальных статей, в остальных – согласно базе данных HyperLeda.

(9) – позиционный угол большой оси бара (PA_{bar}), указанный в оригинальных статьях, в градусах. Иногда речь идет о “трехосном балдже”, а не о контрастном баре. В NGC 4548 указана ориентация внутренней трехосной структуры, а не внешнего бара (Сильченко, 2002). Иногда авторы оригинальных работ подозревали “скрытую трехосность” внутренних областей по косвенным признакам, но не могли указать точный PA .

(10) – большая ось околоядерной структуры (PA_1) в градусах. Давалась авторами, либо оценивалась нами по приводимым ими графикам радиальных изменений PA_{kin} . Не приводится для галактик, данные о внутренней кинематике которых основаны только на длиннощелевой спектроскопии или для которых авторами строилась пространственная модель внутренней структуры. Для NGC 3368 и NGC 4111 принятый PA_1 заметно отличается от оценки по PA_{kin} и определялся по ориентации внутреннего пылевого кольца. Возможно, что здесь наблюдается суперпозиция двух газовых подсистем, либо наклонная структура нестационарна. Для NGC 5014 (SPRC-40) параметры ориентации определялись по SDSS-снимку, на котором заметно узкое голубое кольцо.

(11) – наклон внутренней структуры к лучу зрения (i_1), в градусах. Оценивался так же как и PA_1 , с теми же замечаниями по поводу отдельных галактик. К сожалению, во многих случаях измерить этот параметр не удастся, поэтому приводится либо предполагаемый диапазон значений, либо нижний предел, когда ясно, что внутренний диск заметно наклонен. Для NGC 2787 и NGC 2911 приводится наша оценка по ориентации пылевой структуры.

(12) – угол наклона δ внутренней структуры к плоскости диска. Знаком * отмечены оценки из литературы, в остальных случаях он вычислялся нами (см. далее, раздел 5.5.4). Для NGC 1068 и NGC 3227 указано $\delta > 90$, это означает, что самые внутренние части

³<http://leda.univ-lyon1.fr>

околоядерных газовых дисков изогнуты столь сильно, что орбиты вновь приближаются к основной плоскости галактики.

(13) – комментарий, указывающий на наблюдаемый состав структуры (НП – ионизованный газ, НН – нейтральный, СО – молекулярный, s – звезды) и на ее строение: w – сильный изгиб (warp), r – кольцо (ring), т.е. имеется дыра в центре.

(14) – ссылки на использованную литературу

Всего в таблице 5.1 перечислено 47 галактик, для которых имеются веские аргументы в пользу того, что в их внутренних областях заметная часть излучающей материи стационарно вращается в плоскости, сильно наклоненной к плоскости основного диска. Как правило, о такой динамической конфигурации напрямую говорят авторы статей, указанных в последней колонке таб. 5.1. В случае остальных объектов мы считаем, что наличие полярных (или сильно наклоненных) орбит является наиболее разумным объяснением наблюдаемой околоядерной кинематики. Для такого заключения необходимо иметь поле скоростей с достаточным пространственным разрешением. Исторически первым методом решения данной задачи было получение нескольких спектральных разрезов с длинной щелью. Более надежные результаты можно получить с помощью панорамной спектроскопии в оптическом диапазоне, либо с помощью радиоинтерферметрии при наблюдениях в линиях молекулярного газа.

В работе Krajnović et al. (2008) терминами “кинематический разворот” и “кинематически выделенный компонент” обозначено значительное (более чем на $10 - 20^\circ$) изменение PA_{kin} с ростом расстояния от центра в наблюдаемом поле лучевых скоростей. Но не всегда такое рассогласование должно быть связано с вращением вне плоскости диска галактики. Поворот PA_{kin} может также быть вызван движениями в плоскости галактики, если кроме вращения присутствуют еще и радиальные движения в гравитационном поле центрального бара или трехосного балджа. Как это уже неоднократно нами отмечалось, сравнивая поле скоростей с результатами изофотного анализа изображений галактик, можно понять какой именно тип движений имеет место. Более того, трехосный потенциал и наклонный диск должны по разному проявлять себя в распределении лучевых скоростей вдоль большой и малой осей галактики (Corsini et al., 2003). Однако само по себе отсутствие градиента лучевых скоростей вдоль малой оси не является достаточным критерием присутствия ВПС, поэтому в нашем списке отсутствуют многие кандидаты из работы Soccato et al. (2004). С другой стороны, наша выборка включает большинство галактик раннего типа из обзора SAURON, для которых различие между PA_{kin} , определяемого по полям скоростей газа и звезд, превышает 30° . Исключение составили объекты, в которых диск ионизованного газа простирается за край поля зрения спектрографа, очевидно, являясь внутренней частью полярных структур, наблюдаемых в нейтральном водороде далеко за пределами звездного диска галактики. Это относится к NGC 2685 – прототипу классических ГПК и галактике с внешним ультрафиолетовым кольцом NGC 4262.

Кроме возмущающего действия трехосного потенциала, резкое изменение направления градиента лучевой скорости может быть вызвано радиальными потоками газа, обусловленными центральной вспышкой звездообразования или джетом из активного ядра. Так, Soccato et al. (2004), основываясь на данных щелевой спектроскопии, предположили существование ВПС в NGC 6810. Но последующие исследования показали, что здесь центральная кинематика газа определяется сверхветром от вспышки звездообразования (Sharp & Bland-Hawthorn, 2010). По сходной причине мы исключаем из рассмотрения ряд известных галактик с ионизационными конусами, в которых движения ионизованного газа в области центрального килопарсека, скорее всего, вызваны активностью ядра, несмотря на то, что ряд авторов находят здесь наклонные диски: Mrk 3 (Afanasiev & Sil'chenko, 1991), NGC 5252 (Morse et al., 1998) и т.п.

Само по себе наличие разворота PA_{kin} не является строго обязательным. К примеру, в NGC 3607 и NGC 7742, видимых практически плашмя, их кинематические позиционные углы для внешних и внутренних областей почти совпадают ($PA_1 \approx PA_0$). Однако наблюдаемая в центре амплитуда лучевых скоростей газа столь велика, что наиболее

разумное объяснение — вращение диска, сильно наклоненного к лучу зрения. Интересен случай эллиптической галактики NGC 5198, где, судя по полям скоростей, присутствуют две полярные структуры — внутренняя звездная ($r < 2''$) и более протяженная газовая ($r < 5''$), не совпадающие друг с другом (Sarzi et al., 2006; Krajnović et al., 2008). Причем позиционный угол газового диска отличается от PA_{kin} внешних областей звездного поля скоростей почти точно на 180° , т.е. газ выглядит противовращающимся относительно звезд. Наблюдаемая амплитуда кривой вращения газа очень велика, т.е. газ явно находится вне основной плоскости звездного сфероида, в которой вращается более внешний газ.

5.4.2 Галактики, не вошедшие в список

При составлении списка мы старались просмотреть максимально возможное число наблюдательных работ, посвященных этой теме. К сожалению, далеко не всегда о присутствии полярной структуры говорится в аннотациях и выводах статей, так что часть работ, возможно, пропущена. В то же время в нашу выборку не включены некоторые известные кандидаты на наличие ВПС. Именно, кроме уже перечисленных галактик с протяженными полярными дисками и активными ядрами с конусами ионизации, это объекты, для которых, на наш взгляд, недостаточно информации, или она слишком противоречива: упомянутая выше NGC 3672, а многие другие объекты с градиентом лучевой скорости вдоль малой оси из списка Soccato et al. (2004); кинематически выделенное ядро в NGC 4150 (McDermid et al., 2006); NGC 7332, в которой хотя и есть указания на наличие наклонного диска (Сильченко, 2005), но поле скоростей имеет слишком иррегулярный вид; NGC 524 в которой заподозрили ВПС (Sil'chenko, 2000), но новые данные обнаруживают здесь более сложную структуру из двух противовращающихся дисков (Katkov et al., 2011a); NGC 3367, в которой, согласно Gabbasov et al. (2009), наблюдается разворот внутренних изовел на поле лучевых скоростей, но интерпретация затруднена; M83, в которой по морфологии пылевых полос предположили наличие ВПС (Sofue & Wakamatsu, 1994), но это не подтвердили последующие исследования окооядерной кинематики

В недавней работе Davis et al. (2011) приводятся сведения о кинематических параметрах в галактиках ранних типов в рамках обзора ATLAS^{3D}. В их списках обнаруживается еще дюжина галактик, в которых различие позиционных углов, измеряемых по полям скоростей газа и звезд, превышает $40 - 50^\circ$. Однако мы не можем быть уверены, что речь идет именно о внутренних полярных дисках, так как авторы не приводят ни зависимостей $PA_{kin}(r)$, ни полей скоростей ионизованного газа. Также вне нашего рассмотрения оказываются объекты, в которых PA_{kin} совпадает с фотометрической большой осью во внутренних областях, и с малой — во внешних (NGC 4365, NGC 4406 и др.), что, вызвано трехосностью этих эллиптических галактик (deZeeuw & Franx, 1991).

5.5 Статистические свойства

5.5.1 Общие замечания

Составленный список подтверждает точку зрения Soccato et al. (2004) о том, что внутренние полярные структуры — весьма распространенный феномен. Действительно, число известных нам галактик, содержащих ВПС, в полтора раза превосходит количество кинематически подтвержденных внешних полярных колец (глава 4). При этом, в отличие от “классических” ГПК, среди ВПС детальным наблюдениям пока доступны только относительно близкие объекты: подавляющее большинство галактик из таб. 5.1 лежит от нас на расстоянии менее $30 - 40$ Мпк, включая три, принадлежащих Местному Объему ($D < 10$ Мпк). И если, имея в виду ГПК, корректно говорить о кольцах, пусть и достаточно широких, то при рассмотрении ВПС, как правило (в 39 из 47, т.е. в 83% случаев), речь идет о геометрических дисках, в которых внутренний диаметр незначителен в сравнении с внешним. К сожалению, для выяснения их детального строения пока не хватает наблюдательных данных с высоким пространственным разрешением.

Таблица 5.1 Список галактик с внутренними полярными структурами

Name (1)	Type (2)	T (3)	D, Мпк (4)	r'' (5)	r , кпк (6)	PA_0, \circ (7)	i_0, \circ (8)	PA_{50r} (9)	PA_1, \circ (10)	i_1, \circ (11)	δ, \circ (12)	Comm. (13)	Ref (14)
Arp 220	S?	9.3	81.3	0.3	0.12	40	40	-	-	-	90*	CO, w	Eckart & Downes (2001)
IC 1548	S0	-4.0	85.1	1.5	0.62	78	59	-	349	-	-	HII	Сильченко и Афанасьев (2008)
IC 1689	S0?	-2.0	67.6	10	3.28	164	90	-	74	30	90	HII+s, r	Hagen-Thorn & Reshetnikov (1995)
M 31	SA(s)b	3.0	0.78	180	0.70	35	77	-	325	40	88	CO+HII, r	Melchior & Combes (2011)
Mrk 33	Im pec?	9.9	24.2	12	1.41	116	59	-	163	47	39, 86	HII+s	Moiseev (2011)
Mrk 370	pec?	0.0	12.0	11	0.61	346	45	-	260	-	55-70*	HII, w	Moiseev (2011)
NGC 253	SAB(s)c	5.1	3.4	5	0.083	230	79	-	324	> 60	78-90	HII, r	Anantharamaiah & Gross (1996)
NGC 474	SA0 ⁰ (s)	-2.0	32.7	> 10	> 1.65	330	26	-	256	-	-	HII, r?	Sarzi et al. (2006), Krajinović et al. (2008)
NGC 1068	(R)SA(rs)b	3.0	16.1	2	0.16	278	40	48	-	-	> 90*	CO, w	Schinnerer et al. (2000b)
NGC 2217	(R)SB0 ⁺ (rs)	-0.6	20.7	3	0.30	6	21	111	20	-	90*	HII, w	Bettoni et al. (1990)
NGC 2655	SAB0/a(s)	0.1	24.2	> 15	> 1.76	85	54	90	20	-	-	HII+HII, r	Sil'chenko & Afanasiev (2004)
NGC 2681	(R')SAB0/a(rs)	0.4	13.2	5	0.32	148	25	25	90	-	-	HII+s	Dumas et al. (2007)
NGC 2732	S0	-2.0	32.4	5	0.78	67	90	-	351	30-70	77-83	HII	Moiseev et al. (2004)
NGC 2768	E6?	-4.5	23.6	16	1.83	95	90	-	347	30-60	74-81	HII+CO	Sil'chenko & Afanasiev (2004)
NGC 2787	SB0 ⁺ (r)	-1.0	7.5	6	0.22	109	62	149	72	50	32,76	HII	Crocker et al. (2008)
NGC 2841	SA(r)b?	3.0	12.6	5	0.31	150	65	154	68	-	-	HII	Sil'chenko & Afanasiev (2004)
NGC 2855	(R)SA0/a(rs)	-0.2	26.5	4	0.51	117	42	-	-	-	73*	HII, w	Afanasiev & Sil'chenko (1999)
NGC 2911	SA0(s)? pec	-2.0	47.0	4	0.91	140	56	-	63	75	71,88	HII+s	Coccaro et al. (2007)
NGC 3227	SAB(s)a pec	1.5	18.3	0.9	0.08	158	56	138	-	-	> 90*	CO, w	Sil'chenko & Afanasiev (2004)
NGC 3368	SAB(rs)ab	2.2	13.7	3	0.20	135	48	125	35	-	-	HII	Schinnerer et al. (2000a)
NGC 3379	E1	-4.8	14.3	3	0.21	253	40	-	296	-	-	HII+s	Sil'chenko et al. (2003)
NGC 3384	SB0 ⁻ (s)?	-2.7	13.7	5	0.33	55	57	132	226	-	-	s	Sarzi et al. (2006)
NGC 3414	S0 pec	-2.0	25.2	9	1.10	179	52	-	68	> 60	56, 86	HII	Krajinović et al. (2008) Sil'chenko et al. (2003) Sil'chenko & Afanasiev (2004)

Таблица 5.1 (продолжение)

Name (1)	Type (2)	T (3)	r, Мпк (4)	r'', (5)	r, кпк (6)	PA ₀ , ° (7)	i ₀ , ° (8)	PA _{bar} , ° (9)	PA ₁ , ° (10)	i ₁ , ° (11)	δ, ° (12)	Comm. (13)	Ref (14)
NGC 3599	SA0?	-2.0	20.3	> 7	0.69	47	28	-	335 - 290	-	40 - 60*	НП, w, r	Sil'chenko et al. (2010)
NGC 3607	SA0 ⁰ (s)?	-3.2	22.8	2	0.22	300	34	-	320	-	-	НП	Afanasiev & Sil'chenko (2007)
NGC 3608	E2	-4.8	22.9	4	0.44	255	47	-	195	-	-	НП	Afanasiev & Sil'chenko (2007)
NGC 3626	(R)SA0 ⁺ (rs)	-0.9	20.0	4	0.39	341	32	-	190	-	58, 87*	НП	Sil'chenko et al. (2010)
NGC 4100	(R')SA(rs)bc	4.1	19.7	12	1.14	346	73	-	358	60	25, 55*	НП	Fridman et al. (2005)
NGC 4111	SA0 ⁺ (r)?	-1.3	14.9	> 8	> 0.59	150	84	-	60	90	84 - 90	НП	Sil'chenko & Afanasiev (2004)
NGC 4233	S0 ⁰	-2.0	35.1	7	1.19	176	87	200	76	-	- 80	НП	Sil'chenko & Afanasiev (2004)
NGC 4424	SB(s)a?	1.0	16.8	3	0.21	95	63	-	-	-	-	НП	Coccatto et al. (2005)
NGC 4548	SB(rs)b	3.1	15.6	3	0.23	145	37	110	236	-	-	НП	Сильченко (2002)
NGC 4552	E0-1	-4.6	15.6	5	0.38	110	14	-	32	-	-	НП	Sarzi et al. (2006), Krajinović et al. (2008)
NGC 4579	SAB(rs)b	2.9	23.6	18	2.06	96	39	58	154	-	-	НП	Dumas et al. (2007)
NGC 4672	SA(s)a pec	1.1	45.7	6	1.32	46	90	-	134	-	88 - 90	s	Bertola & Corsini (2000)
NGC 4698	SA(s)ab	1.7	16.1	5	0.39	170	74	-	-	-	-	НП+s	Pizzella et al. (2001)
NGC 4941	(R)SAB(r)ab?	2.1	21.2	2	0.21	15	37	0	-	-	-	НП	Bertola & Corsini (2000)
NGC 5014	Sa?	1.4	19.5	22	2.08	100	81	-	47	80	52 - 56	НП,r	Coccatto et al. (2005) Noordmeester et al. (2005)
NGC 5198	E1-2?	-4.8	39.3	4	0.76	14	49	-	32	-	-	НП+s	Moiseev et al. (2011) Sarzi et al. (2006)
NGC 5850	SB(r)b	3.1	38.7	6	1.13	335	37	115	35	-	-	НП	Krajinović et al. (2008)
NGC 6340	SA0/a(s)	0.4	22.4	12	1.30	70	20	85	330	40 - 60	40, 65*	НП, w	Moiseev et al. (2004) Sil'chenko (2000)
NGC 7049	SA0 ⁰ (s)	-1.9	29.9	5	0.73	58	60	-	329	-	89*	НП	Chilingarian et al. (2009)
NGC 7217	(R)SA(r)ab	2.5	16.7	3	0.24	268	30	60	-	-	-	НП+s	Coccatto et al. (2007) Sil'chenko & Afanasiev (2000)
NGC 7280	SAB0 ⁺ (r)	-1.3	28.2	2	0.27	258	52	60	9	> 80	68-80	НП	Sil'chenko & Moiseev (2006) Sil'chenko et al. (2011)
NGC 7468	E3? pec	9.0	31.8	6	0.92	180	45	-	120	60	49, 87	НП	Афанасьев и др. (2004)
NGC 7742	SA(r)b	2.8	24.7	10	0.36	128	9	-	130	> 35	> 26	НП	Sil'chenko & Moiseev (2006)
UGC 5600	S0?	-1.8	44.7	10	2.17	182	50	-	260	60	65, 80*	НП, w, r	Шалапина и др. (2002, 2007)

Как следует из таб. 5.1, в основном встречаются только газовые диски и кольца, в списке всего одна галактика (NGC 3384) с чисто звездным полярным диском, еще 6 структур отмечены как звездно-газовые. Здесь работает эффект селекции, так как методически значительно проще выделить эмиссионные линии ионизованного или молекулярного газа, чем разделить наблюдаемый по лучу зрения абсорбционный спектр на звезды, принадлежащие балджу, полярному диску и основному диску галактики. Очевидно, что многие из описанных ВПС реально являются звездно-газовыми, просто заметить кинематическое проявление звезд проблематично. Например, выделяемый по своим кинематическим свойствам звездный полярный диск в NGC 7217 заметно компактнее, чем газовый (Sil'chenko & Moiseev, 2006).

5.5.2 Размеры

На рис. 5.8 приведена гистограмма распределения размеров внутренних полярных структур. Видно, что по отношению к ним справедливо использование термина “центральный килопарсек”: средний медианный радиус составляет ~ 600 пк, 85% всех ВПС имеет размер менее 1.5 кпк. Такая компактность скорее всего связана с тем, что для устойчивого существования полярных орбит, относительно основного диска, необходим стабилизирующий фактор – сфероидальный или трехосный потенциал. Для классических ГПК это гравитационный потенциал темного гало, а для внутренних структур – потенциал балджа или бара (см. далее §5.5.5). Это может объяснять редкую встречаемость полярных структур промежуточного размера, с $r = 2 - 10$ кпк. На этих масштабах дифференциальная прецессия, возникающая под воздействием гравитационного потенциала звездного диска, приводит к катастрофически быстрому уменьшению наклона орбит и их выпадению в диск. Возможно, что именно такая картина сейчас наблюдается в NGC 7743 (глава 2). Отметим, что даже у ВПС в IC 1689 – самой большой в нашем списке – радиус меньше, чем эффективный радиус балджа ($r_e = 4$ кпк согласно Reshetnikov et al., 1995).

Провал в распределении для $r < 200$ пк, очевидно, вызван ограниченным пространственным разрешением наземных наблюдений, так как этот масштаб на $D = 30$ Мпк соответствует угловому размеру около $2''$.

5.5.3 Морфологические типы

Известно, что внешние полярные кольца наблюдаются, как правило, вокруг галактик ранних типов – E/S0 (Whitmore, 1991; Решетников и др., 2011). Основное объяснение в том, что в здесь собственные внутренние запасы газа невелики, так что газовые облака на полярных орбитах не испытывают столкновения с газом в галактической плоскости. Насколько это верно для внутренних полярных структур? Оценки, выполненные Soccato et al. (2004) показали, что градиент лучевых скоростей газа вдоль малых осей галактик наблюдается преимущественно в галактиках S0 и спиральных ранних типов, что, возможно, указывает на связь этого феномена с присутствием мощного балджа. Однако сами авторы отмечали, что далеко не всегда градиенты скорости вдоль малой оси вызваны вращением в полярной плоскости. Если же рассмотреть только галактики с подтвержденными ВПС, то распределение по морфологическим типам оказывается более широким (рис. 5.8). Медианное среднее здесь $T = 0$, т.е. только половина галактик относится к типу S0a и более ранним. А почти треть – объекты типа Sb и более поздние, включая даже несколько галактики Im и Irr, в которых балдж обычно мал. Реальное число галактик поздних типов должно быть занижено эффектом селекции, так как массовые обзоры кинематики околядерных областей с приборами MPFS и SAURON были нацелены прежде всего на объекты типов E–S0. Таким образом, для существования околядерного полярного или наклонного диска морфологический тип галактики оказывается менее существенным, чем для ГПК. По-видимому, эффект столкновения газа на полярных орбитах с газом основного диска не является критичным при образования этих структур. Возможно, формирующийся внутренний полярный диск успевает предварительно “расчистить” область центрального килопарсека. Во всяком случае, известны примеры сильно изогнутых ВПС,

Таблица 5.2 Признаки воздействия окружения

Name	Optical	HI	counter-rotation
(1)	(2)	(3)	(4)
Arp220	Arp (1966)		
IC 1548			Сильченко и Афанасьев (2008)
IC 1689	Reshetnikov et al. (1995)		
M 31	Ibata et al. (2004)	Braun et al. (2009)	
Mrk 33		Bravo-Alfaro et al. (2004)	
NGC 253	Davidge (2010)		Anantharamaiah & Goss (1996)
NGC 474	Arp (1966)		
NGC 2655	Sparke et al. (2008)	Sparke et al. (2008)	
NGC 2681	Cappellari et al. (2001)		
NGC 2768		Morganti et al. (2006)	
NGC 2787		Shostak (1987)	
NGC 2841			Afanasiev & Sil'chenko (1999)
NGC 2855	Corsini et al. (2002)		
NGC 3227	Arp (1966)		
NGC 3368		Schneider (1989)	
NGC 3379		Schneider (1989)	
NGC 3384		Schneider (1989)	
NGC 3414		Morganti et al. (2006)	Sil'chenko & Afanasiev (2004)
NGC 3607		Oosterloo et al. (2010)	
NGC 3608		Oosterloo et al. (2010)	Jedrzejewski & Schechter (1988)
NGC 3626			Ciri et al. (1995)
NGC 4111		Serra et al. (2012)	
NGC 4424	Cortés et al. (2006)	Chung et al. (2007)	
NGC 4672	deGrijs & Peletier (2000)		
NGC 4698		Chung et al. (2009)	
NGC 5014		Noordermeer et al. (2005)	
NGC 5850	Higdon, et al. (1998)		
NGC 6340	Засов и др. (2008)		
NGC 7217			Merrifield & KuijkenK (1994)
NGC 7280			Afanasiev & Sil'chenko (2000)
NGC 7468	Evstigneeva (2000)		
NGC 7742			Sil'chenko & Moiseev (2006)
UGC 5600	Шаляпина и др. (2007)		

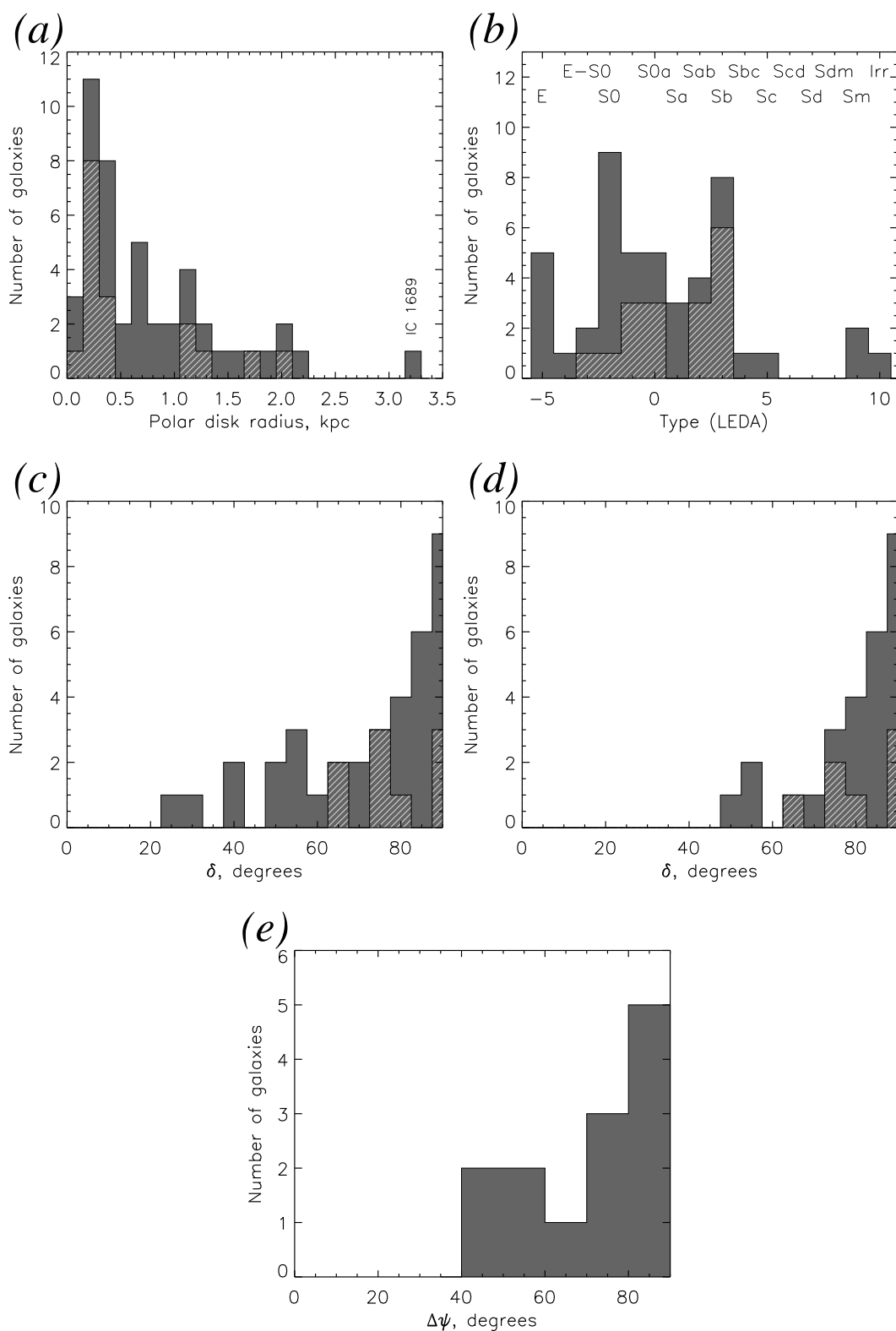


Рис. 5.8 Гистограммы распределения внутренних полярных структур по размерам (a) и морфологическим типам галактики (b). Серым цветом показаны все галактики, штриховкой – только с барами и трехосными балджами. Ниже показаны распределения по углу наклона ВПС к основному диску галактики: (c) – весь возможный диапазон решений для δ из (2.1), (d) – в случае двух решений – бралось большее. (e) – распределение по углу между большей осью полярного диска и бара (трехосного балджа).

когда газ вблизи ядра вращается в полярной плоскости, а с ростом расстояний от центра орбиты укладываются в плоскость галактики (см. следующий §5.5.4). Возможно, что в некоторых случаях на наклонные орбиты переходит газ из основной плоскости галактики под действием гравитационного потенциала перемычки (§5.5.5). Но этот эффект не может быть существенным, так как гистограммы на рис. 5.8 не показывают каких-либо достоверных отличий в распределении галактик с перемычками.

5.5.4 Наклонный или полярный?

Употребляя термин “полярный” по отношению к ВПС, следует помнить о том, что далеко не всегда удастся точно измерить наклон плоскости внутреннего диска к внешнему определяемому соотношением (2.1). Обычно известны только параметры ориентации внешнего диска (PA_0, i_0) и направление большой оси внутренней структуры PA_1 . Но чтобы в рамках модели кругового вращения определить по наблюдаемой кинематике угол наклона i_1 орбит к лучу зрения, требуется детальное поле скоростей с большим числом независимых точек. Кроме того, устойчивое решение обычно удается получить только для заметного наклона диска к лучу зрения ($i_1 > 30 - 40^\circ$). Исключение – случай чисто полярного диска в галактике, видимой с ребра ($PA_0 = PA_1 + 90^\circ, i_0 = 90^\circ$). Напомним, что неопределенность со знаком в первом слагаемом в (2.1) вызвана тем, что PA и i не полностью характеризуют положение плоскости относительно наблюдателя – требуется еще знать направление момента вращения, т.е. какая сторона диска – ближняя, а какая – дальняя. Поэтому для ряда галактик с $i_0 < 90^\circ$ в таблице 5.1 даны оба возможных варианта решения (2.1). Одно из немногих исключений – полярное кольцо в Туманности Андромеды (M 31). Его относительно большой угловой размер позволил Melchior & Combes (2011) точно понять, как именно оно ориентированно относительно диска галактики.

Оценить δ удалось для 27 объектов, что чуть больше половины всей выборки. Показанные на рис. 5.8 гистограммы очень напоминают распределение по этому же параметру внешних полярных колец из работы Whitmore (1991). Несмотря на неопределенность в оценках δ , внутренние наклонные структуры в большинстве оказываются действительно полярными, т.е. перпендикулярными к внешнему диску галактик. Так, $\delta > 70^\circ$ в 23 из 27 (т.е. 85%) случаев.

С другой стороны, даже если из двух решений для δ отбирать вариант наиболее близкий к 90° (рис. 5.8,d), все равно существуют ВПС, расположенные под умеренными углами $\delta = 50 - 60^\circ$: NGC 3599, NGC 5014 и NGC 6340. Такие диски вряд ли будут устойчивыми: они должны достаточно быстро сваливаться в галактическую плоскость под действием дифференциальной прецессии. Косвенным указанием на это является наблюдаемый изгиб газовых дисков в NGC 3599 и NGC 6340. Похожие изгибы (warp) обнаруживаются еще в семи галактиках выборки. Во многих случаях удается построить детальную пространственную модель изогнутого диска, воспроизводящую не только кинематику, но и распределения яркости ионизованного (NGC 2855 и NGC 7049) или молекулярного (Arp 220, NGC 1068, NGC 3227) газа (см. ссылки в таблице 5.1).

5.5.5 Бары и трехосные балджи

Связь внутренних полярных структур с неосесимметричным гравитационным потенциалом широко обсуждается в литературе, начиная с работы Bettoni et al. (1990), впервые описывающей случай околюядерного полярного диска в галактике с перемычкой NGC 2217, ориентированного практически перпендикулярно к большой оси бара. В дальнейшем сходная конфигурация было обнаружена и во многих других галактиках с перемычками, перечисленными в таблице 5.1. Многократно отмечалось, что такое расположение полярного диска вдоль наименьшего сечения бара, т.е. в одной из главных плоскостей трехосного потенциала – должно быть устойчивым. Причем вместо крупномасштабного бара достаточно, если в галактике присутствует несферический (трехосный) балдж (Sil'chenko, 2000; Afanasiev & Sil'chenko, 1999; Corsini et al., 2003).

На рис. 5.8 приводится распределение по углу $\Delta\psi$ между большой осью неосесимметричной звездной структуры (бара или трехосного балджа) и большой осью ВПС (в проекции на галактическую плоскость):

$$\Delta\psi = \arctan \frac{\sin(PA_{bar} - PA_0) \cos i_0}{\cos(PA_{bar} - PA_0)} - \arctan \frac{\sin(PA_1 - PA_0) \cos i_0}{\cos(PA_1 - PA_0)}.$$

Несмотря на относительно скромную статистику, видна тенденция полярных структур выстраиваться ортогонально к большой оси бара ($\Delta\psi = 90^\circ$). Пока в литературе отсутствуют детальные расчеты процесса формирования таких внутренних дисков, например в результате захвата внешних газовых облаков с соответствующим направлением момента вращения. Обычно в статьях используют звездно-динамическую аналогию с полярными или изогнутыми дисками, наблюдаемыми в трехосном потенциале эллиптических галактик. Скорее всего, именно трехосность потенциала отвечает за стабилизацию внутренних полярных дисков в околоядерных областях эллиптических галактик (NGC 3608, NGC 4552 и др). Кроме сценария с захватом газовых облаков с соответствующим орбитальным моментом, часто цитируют работы Sofue & Wakamatsu (1994) и Friedli & Benz (1993). В первой из них высказывалось предположение об образовании внутреннего полярного диска в результате воздействия гравитационного потенциала бара на изогнутый газовый диск галактики. Это приводит к потере углового момента в азимутальной и сохранении его в полярной плоскости. В работе Friedli & Benz (1993) с помощью трехмерной численной модели показано, что если часть газа в диске галактики изначально вращалась в противоположном направлении относительно остального диска, то в процессе вековой (секулярной) эволюции бара газовые облака занимают стабильные орбиты, сильно наклоненные к плоскости галактики. В многочисленных работах О. К. Сильченко с коллегами неоднократно отмечались случаи одновременного наблюдения полярного диска во внутренних областях галактик и противовращения газ-звезды или звезды-звезды – во внешних. Такая особенность обнаруживается в 9 галактиках нашего списка (§5.5.6). “Затравочный” противовращающийся компонент скорее всего является результатом поглощения карликового спутника. Отметим, однако, два момента. Во-первых, в моделировании Friedli & Benz (1993) диск получается не полярный, а наклоненный примерно под 45° к плоскости галактики. Во-вторых, предложенные механизмы явно не могут быть основным способом формирования полярных дисков, так как в этом случае следует ожидать повышенное число баров в галактиках с ВПС. Но на 40 дисковых галактик (тип S0 и более поздний) из нашей выборки приходится только 17 с подтвержденными барами или трехосными балджами⁴, что составляет $43 \pm 8\%$ или $33 \pm 7\%$, если не учитывать несферичные балджи⁵. Это хорошо согласуется с частотой встречаемости баров среди близких галактик, составляющей около 45% (Aguerri et al., 2009).

Таким образом, хотя бары и влияют на ориентацию полярных дисков, само по себе наличие трехосного потенциала не является абсолютно необходимым для существования ВПС. Конечно, в галактиках может иметься некоторая внутренняя трехосность, малозаметная для стороннего наблюдателя. Но обычно самые центральные области обычно выглядят более симметрично, чем внешние не только в галактиках без баров, но и в галактиках с перемижками (внутри Линдбладовских резонансов бара). В статье Sil'chenko et al. (2010) мы показываем, что NGC 3599 и NGC 3626 обладают внутренней “овальной дисторсией диска”, которая может указывать на когда-то существовавшие бары, разрушенные в процессе секулярной эволюции или под влиянием внешнего воздействия. Но вряд ли такой сценарий годится для большинства остальных галактик без перемижек.

⁴В таблице 5.1 угол PA_{bar} указан для всех галактик, где нам удалось найти упоминание о наличии внутренней трехосной структуры. В основном мы ориентировались на работы, посвященные детальному анализу морфологии галактик (в том числе с использованием изображений в ближнем ИК-диапазоне, оптимальном для поиска баров). Такой подход представляется более корректным, чем использование морфологической классификации из RC3/NED.

⁵Здесь и далее в качестве ошибки указана дисперсия биномиального распределения

5.5.6 Внешнее окружение

Часто поднимается вопрос о связи ВПС с внешним окружением галактик и процессами их взаимодействия. По аналогии с внешними полярными кольцами естественно ожидать, что и околядерные полярные структуры могут формироваться в результате захвата материи (газовых облаков или карликового спутника) с орбитальным моментом ортогональным моменту вращения диска галактики. Обычно при таком обсуждении рассматриваются индивидуальные случаи, когда либо есть явные следы недавнего взаимодействия, либо наоборот – галактика изолирована и выглядят невозмущенной внешним воздействием. Примером явной связи ВПС с окружением может служить NGC 2655 (Sparke et al., 2008), где полярный диск ионизованного газа является внутренней частью сильно изогнутого протяженного диска нейтрального водорода с явными приливными структурами во внешних областях.

В таб. 5.2 собраны сведения о тех галактиках нашей выборки, для которых имеются доказательства недавнего (на шкале менее 1–2 млрд лет) взаимодействия. В столбце (1) дано имя галактики, в (2) — ссылки на работы, указывающие на взаимодействие с компаньоном или на поглощение спутника по данным оптической фотометрии, в (3) — указание на приливные структуры или близкие облака, наблюдаемые в HI, в (4) — указание на наличие противовращающихся компонент в диске галактики. Всего подобные свидетельства удалось собрать для 33 галактик, что составляет $70 \pm 7\%$ всей выборки ВПС. Такая высокая доля галактик с признаками недавнего взаимодействия позволяет нам заключить, что именно эффекты внешнего окружения играют основную роль при формировании внутренних полярных колец и дисков.

5.6 Обсуждение

Пока сложно оценить частоту встречаемости околядерных полярных дисков, так как наша выборка составлена из очень разнородных источников. Можно лишь утверждать, что поскольку число таких галактик в полтора раза превосходит число кинематически подтвержденных ГПК, а расположены они в среднем значительно ближе, то их доля среди достаточно ярких галактик должна заметно превышать известные оценки встречаемости ГПК (см. §4.5.4) и составлять не менее 3 – 5%. Возможно, тщательный анализ кинематики всех галактик из обзора ATLAS^{3D}, а не только ранних типов (как в работе (Davis et al., 2011)), позволит точнее оценить долю галактик с ВПС.

В отличие от внешних протяженных полярных колец, основные этапы формирования которых удастся воспроизвести в численных моделях, для внутренних структур такое моделирование пока не проводилось. Представленная статистика свойств ВПС указывает на то, что, как и классические ГПК, подавляющее большинство внутренних полярных колец и дисков сформировалось в результате захвата материи из внешнего окружения галактик. В недавней работе Sil'chenko et al. (2011) авторы, используя сетку моделей базы данных GalMer, продемонстрировали, что в результате взаимодействия гигантской S0-галактики с богатым газом карликовым спутником, в области балджа образуется кольцо звездообразования, сильно наклоненное к плоскости галактики. Отношение масс компаньонов 1 : 10, т.е. речь идет о малом слиянии. Требуются специфические условия взаимодействия – спутник должен изначально находится на орбите с обратным (ретроградным) движением, в то время как плоскости дисков обоих компаньонов должны быть почти ортогональны. Мы надеемся, что развитие подобных моделей позволит в дальнейшем лучше понять процесс формирования ВПС в конкретных галактиках и воспроизвести их наблюдаемые параметры.

Нас не должно смущать отсутствие заметных свидетельств недавнего взаимодействия у примерно 1/3 галактик списка. Во-первых, не для всех галактик имеются достаточно глубокие оптические изображения и распределения HI. Во-вторых, возможно, что по прошествии некоторого времени после взаимодействия с карликовым компаньоном, наличие материи на полярных орбитах во внутренней области галактики может оказаться *един-*

ственным свидетельством этого события. Поэтому актуально провести исследование устойчивости внутренних полярных орбит в реальном гравитационном поле галактик, включающем вклад диска, балджа, бара и гало. В том числе, проверить предположение об отсутствии устойчивых структур промежуточного размера между областью центрального килопарсека и внешней границей звездного диска (§5.5.2).

В отдельных случаях возможно сформировать ВПС и без взаимодействия с окружением. Так компактные (~ 100 пк) диски молекулярного газа в околядерных областях NGC 1068 и NGC 3227 могли сильно изогнуться под воздействием ионизационного конуса и радиационного давления от активного ядра (Schinnerer et al., 2000b,a). Но этот сценарий явно не подходит для большинства галактик с более протяженными полярными дисками и кольцами.

Основные результаты главы 5

- В результате наблюдений на 6-м телескопе САО РАН обнаружены околядерные газовые полярные или сильно наклоненные диски в ряде галактик как ранних, так и поздних морфологических типов: Mrk 33, Mrk 370, NGC 3368, NGC 3599, NGC 3626, NGC 5850, NGC 7468.
- Составлен список галактик, во внутренних областях которых найдены полярные (или сильно наклоненные к основной галактической плоскости) диски и кольца. Показано, что такие структуры встречаются в галактиках всех морфологических типов – от E до Irr. Радиус большинства из них не превышает 1.5 кпк. Возможно, что это ограничение связано со стабилизирующей ролью балджа.
- Внутренние полярные структуры одинаково часто встречаются как в галактиках с перемычками, так и без них. В тоже время, если галактика обладает баром (или трехосным балджем), то это приводит к стабилизации полярного диска так, что его ось вращения совпадает с большой осью бара.
- Более чем у 2/3 рассмотренных галактик заметны те или иные следы недавнего взаимодействия, что указывает на важную роль внешнего окружения в формировании этих пекулярных структур в результате поглощения галактик-спутников или газовых облаков межзвездной среды.

Основные публикации, представляющие результаты этой главы:

- O.K. Sil'chenko, A.V. Moiseev, V.L. Afanasiev, V.H. Chavushyan, J.R. Valdes "The Leo I Cloud: Secular nuclear evolution of NGC 3379, NGC 3384, and NGC 3368?", 2003, *Astrophysical Journal*, v. 591, p.185
- Moiseev A.V., Valdes J.R., Chavushyan V.H., "Structure and kinematics of candidate double-barred galaxies", 2004, *Astronomy and Astrophysics*, v. 421, p. 433 (*– полярные диски в NGC 3368 и NGC 5850*)
- Шаляпина Л.В., Моисеев А.В., Яковлева В.А., Гаген-Торн В.А., Барсунова О.Ю., "NGC 7468: галактика с внутренним полярным диском", 2004, *Письма в Астрономический журнал*, т. 30, с. 643
- Засов А.В., Моисеев А.В., Хоперсков А.В., Сидорова Е.А., "Дисковые галактики ранних типов: структура и кинематика", 2008, *Астрономический Журнал*, т. 85, с. 99 – *первое обнаружение следов взаимодействия в NGC 6340*
- Sil'chenko, O. K., Moiseev, A. V., Shulga, A. P. "Lenticular galaxies at the outskirts of the Leo II group: NGC 3599 and NGC 3626", 2010, *AJ*, 140, 1462

- Moiseev A.V. “Kinematically detected polar rings/disks in blue compact dwarf galaxies”, 2011, EAS Publications Series, v. 48, p. 115 – *полярные диски в Mrk 33 и Mrk 370*
- Моисеев А.В., “Внутренние полярные кольца и диски: наблюдаемые свойства”, 2012, *Астрофизический Бюллетень*, т. 67, с. 154

Глава 6

Истечения и оболочки в областях звездообразования

“В жёлтом, слегка искривлённом пространстве медленно поворачивались гигантскими пузырями осесимметричные полости, материя обтекала их, пыталась проникнуть внутрь, но не могла, на границе материя сжималась до невероятных плотностей, и пузыри начинали светиться...”
(А.Н. и Б.Н. Стругацкие)

6.1 Введение: звездные группировки и межзвездная среда

Процесс звездообразования является наиболее выразительной иллюстрацией круговорота барионного вещества в галактиках, взаимного влияния друг на друга различных галактических подсистем. Действительно, гравитационная неустойчивость, уплотнение и фрагментация газовых облаков приводят к формированию звезд. С другой стороны, ионизирующее излучение, ударные волны, вызванные сверхновыми и звездным ветром, меняют физическое состояние основных компонент межзвездной среды: ионизованного и нейтрального газа, пыли, молекулярных облаков, релятивистских частиц и магнитного поля. Меняется и химический состав межзвездной среды, обогащенный продуктами нуклеосинтеза. Взаимодействие звезд и газа наблюдается на огромных пространственных и временных масштабах, от туманностей вокруг отдельных массивных звезд, до гигантских многооболочечных комплексов. Столкновение таких оболочек, динамическое давление на окружающую среду может вновь приводить к уплотнению газа и формированию новых очагов рождения звезд.

Структура, кинематика, химсостав межзвездной среды в областях звездообразования, их связь с последующими актами рождения новых звездных группировок, интенсивно исследуются во всем мире, этому вопросу посвящено множество работ. Перечислить даже основные из них не представляется возможным, ряд полезных указаний можно найти в монографиях, ставших классическими (Лозинская, 1986; Ефремов, 1989). Разумеется, наиболее детально все эти процессы можно изучать вблизи, внутри нашей Галактики. Однако селективное пылевое поглощение, проблема шкалы расстояний, и невозможность выйти из плоскости диска, чтобы “одним взглядом окинуть Галактику”, затрудняют вынесение глобальных суждений. Даже вопрос о числе и структуре спиральных рукавов Млечного Пути не решен окончательно.

Поэтому изучение комплексов звездообразования и особенностей распределения газа в соседних галактиках оказывается чрезвычайно полезным, сразу можно рассматривать целостную картину. Перефразируя известное высказывание, здесь “удается увидеть лес, отвлекшись от изучения отдельных листьев”.:) Наблюдательные и теоретические исследования в этом направлении интенсивно ведутся во всем мире, есть как успехи в объяснении общих закономерностей звездообразования (Ефремов и Чернин, 2003; Kennicutt

& Evans, 2012), так и ряд нерешенных вопросов, когда наблюдения плохо согласуются с модельными оценками, либо же ощущается нехватка достаточно детальной наблюдательной информации. Среди таких направлений, можно выделить следующие:

- В близких галактиках известны гигантские оболочечные комплексы, диаметр “дыр” в распределении нейтрального водорода может составлять от 100 пк до 1 кпк. При этом размеры, скорость расширения, масса такой оболочки часто противоречат возрасту центрального звездного скопления, а во многих гигантских оболочках и кольцевых газовых структурах вообще не найдено скоплений подходящего возраста (Silich et al., 2006; Efremov et al., 2007). Поэтому, кроме предположения о формировании полостей в распределении газа в результате эффектов коллективного звездообразования, или даже вспышек отдельных сверхмассивных звезд (Гиперновых), предлагаются и другие гипотезы, например пролет через диск массивных облаков молекулярного газа или даже темных мини-гало (см. ссылки и обсуждение в работе Ефремова и др., 2011). Сходный сценарий был нами предложен для случая Mrk 334 (§3.4).
- Достаточно мощное звездообразование в ограниченном объеме приводит к тому, что горячий газ ускоряется и выбрасывается над галактическим диском, – туда, где давление меньше. Остывая, газовые облака могут вновь выпадать на плоскость галактики и принимать участие в образовании звезд. Это явление – “галактические фонтаны”, оказывается чрезвычайно важным при обсуждении взаимодействия между диском и внешним газовым гало, а также может частично объяснить происхождение “экстрапланарного” газа – облаков, наблюдаемых на расстояниях более килопарсека от галактической плоскости. Моделирование распределения нейтрального водорода в Млечном Пути и в некоторых близких галактиках требует обязательного учета таких фонтанов (Binney & Fraternali, 2011; Marasco et al., 2011). В то же время, прямые наблюдения выброса газа над областями звездообразования в других галактиках достаточно редки. Не всегда из наблюдений ясно, вернется ли остывший газ обратно, или рассеется в межгалактическом пространстве. Последнее особенно актуально для карликовых галактик, в которых скорость убегания мала (van Eumeren et al., 2009a,b).
- В случае же, если звездообразование концентрируется в околоядерной области, может возникнуть “галактический ветер” – явление, с которым мы уже сталкивались в §3.4. По обе стороны диска раздуваются “пузыри”, наполненный горячим газом, которые затем прорываются и формируется коническое истечение, со скоростями достигающими многих сотен км/с. Остывая, обогащенный металлами газ может как вернуться в галактику, так и остаться в межгалактическом пространстве. Такой ветер (часто употребляют термин “сверхветер”) сопровождает вспышки звездообразования в некоторых близких галактиках. В то же время, он может оказаться важным фактором космологической эволюции, о чем говорят наблюдения галактик с мощным звездообразованием на больших красных смещениях (Veilleux et al., 2005).

В этой главе представлены наблюдательные проявления явлений, перечисленных выше. В начале рассматривается карликовая галактика IC 1613, содержащая как уникальную звезду Вольфа-Райе (WR), окруженную гигантской расширяющейся туманностью, так и целый комплекс оболочек в нейтральном, и ионизованном газе. Далее описывается галактика IC 10, в которой нам удалось объяснить происхождение странной “синхротронной сверхоболочки”. Исследование этих двух галактик Местной Группы проводилось по инициативе и в тесном взаимодействии с Т.А. Лозинской (ГАИШ МГУ). Здесь лишь кратко излагаются основные результаты наших работ, представленных в более чем десятке совместных публикаций. После рассматриваются особенности галактического ветра, выдуваемого околоядерной вспышкой звездообразования в NGC 4460. В конце главы

рассмотрены примеры обнаруженных автором крупномасштабных движений ионизованного газа вблизи областей звездообразования некоторых спиральных галактик, возможно связанные с галактическими фонтанами.

6.2 Звезды и межзвездная среда в IC1613

6.2.1 Гигантская биполярная туманность вокруг звезды WO

Карликовая неправильная галактика Местной Группы IC1613 является прекрасным объектом для изучения особенностей взаимодействия звезд с окружающей газовой средой. Удобства для наблюдателя составляет как близкое расположение (принятое расстояние 730 кпк, масштаб 3.5 пк/"), так и ориентация диска почти плашмя. Здесь содержатся как молодые OB-ассоциации и связанный с ними оболочечный комплекс, так и отдельные уникальные объекты: остаток сверхновой S8¹ с аномальной рентгеновской светимостью (Lozinskaya et al., 1998) и выразительная туманность S3, в центре которой скрывается звезда WO.

Среди пяти с лишним сотен звезд WR в галактиках Местной Группы всего только семь² принадлежат редкому типу "кислородных" звезд Вольфа-Райе (WO). Их рассматривают как отдельную последовательность в цепочке $WN \rightarrow WC \rightarrow WO \rightarrow SNIc$, представляющую очень короткую финальную стадию эволюции массивных звезд, предшествующую взрыву Сверхновой. Такие звезды характеризуются чрезвычайно высоким темпом потери массы, со скоростью ветра достигающей 5000 – 6000 км/с (Barlow & Hummer, 1982), которому предшествует ветер на стадиях главной последовательности и WN-WC. Из-за короткого времени жизни число WO не должно превышать $\approx 1\%$ населения WR, но при этом WO/S3 – единственная звезда WR, отождествленная в IC 1613.

История изучения биполярной туманности S3 представлена в нашей статье, первой в цикле, посвященном IC1613 (Афанасьев и др., 2000). В ней же описываются наблюдения со сканирующим ИФП в линии H α , благодаря которым мы впервые обнаружили гигантскую оболочечную структуру за пределами ранее известной яркой части туманности. Изофоты на уровне яркости $3 - 4 \times 10^{-15}$ эрг/см²/с" выявили два замкнутых гигантских газовых пузыря (рис. 6.1). Размеры оболочки на юго-востоке от WO составляют 112×77 пк, северо-западная оболочка вдвое больше: $(186 - 192) \times (214 - 224)$ пк.

Кроме того, нам впервые удалось изучить кинематику S3. Несмотря на то, что используемый интерферометр IFP235 имел относительно низкое спектральное разрешение (таб. 1.1), удалось четко зафиксировать расширение оболочек, проявляющееся как в увеличении *FWHM*, так и в росте разброса скоростей отдельных филаментов с удалением от звезды (см. разрезы на рис. 6.1). На основании этих данных были оценены скорости расширения $v_1 \geq 50$ км/с для юго-восточной и $v_2 \geq 70$ км/с для северо-западной оболочек. Приняв радиусы "пузырей" $R_1 \simeq 56$ пк и $R_2 \simeq 110$ пк соответственно, в рамках стандартной модели расширяющихся оболочек удалось оценить как возраст структуры, так и начальную плотность межзвездной среды, в предположении о том, что обе оболочки образовались одновременно (подробнее см. Афанасьев и др., 2000). Найденный возраст биполярной оболочечной структуры $t \simeq (0.3 - 1)$ млн. лет оказывается близким к времени жизни массивной звезды в стадии WR и существенно превышает продолжительность финальной стадии WO. Таким образом, уникальная биполярная структура образовалась под действием ветра центральной звезды на стадии, предшествующей WO. Сверхветер WO, включающийся внутри уже сформированной ранее структуры, является дополнительным источником энергии.

Скорости и радиусы оболочек удается согласовать друг с другом, только если начальные плотности газа различаются почти в 20 раз. Такой высокий контраст плотности, действительно имеет место. Более того, он объясняет и уникальную форму, и даже ориен-

¹Здесь и далее нумерация туманностей согласно списку Sandage (1971).

²В работе Афанасьев и др. (2000) мы писали о шести WO, после в нашей Галактике была найдена еще одна (Drew et al., 2004)

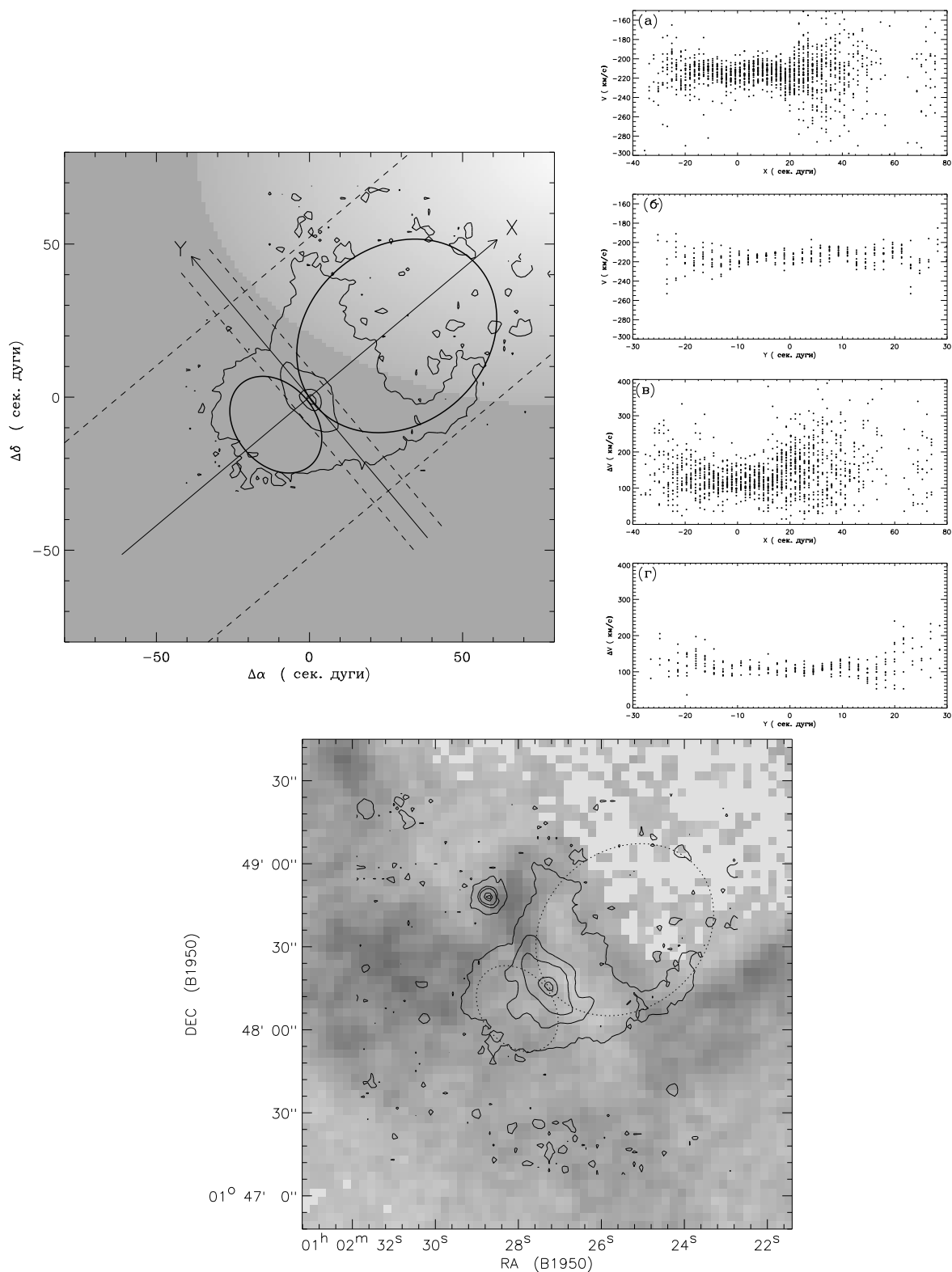


Рис. 6.1 Вверху слева — общая схема туманности S3, связанной со звездой WO. Биполярная оболочка обозначена двумя эллипсами. Штриховые линии показывают границы разрезов вдоль осей X и Y. Показаны изофоты в линии $H\alpha$, согласно наблюдениям на БТА с ИФП. Градациями серого отмечено распределение поверхностной плотности HI по данным низкого разрешения (Lake & Skillman, 1989). Справа — результаты измерений скоростей (а, б) и FWHM (в, г) в линии $H\alpha$ вдоль осей X и Y. Внизу — туманность S3 и распределение HI по новым данным (Лозинская и др., 2001).

тацию биполярной структуры. Согласно карте распределения HI (Lake & Skillman, 1989), туманность располагается на краю протяженной области дефицита нейтрального водорода, при этом большая ось биполярной структуры почти перпендикулярна границе этой “суперкаверны” (более детально рассмотренной ниже). Поэтому естественным выглядит предположение, ранее высказанной Лозинской (Lozinskaya, 1997), о том, что звезда WO образовалась в плотной газовой “стенке” на краю суперкаверны, так что звездный ветер прорывался в двух направлениях из плотного слоя газа (“модель блистера”). Так что ориентация юго-восточной оболочки в области более плотного газа, а протяженной слабой северо-западной оболочки – в среде низкой плотности находят естественное объяснение, как это схематично показано на рис 6.1 вверху.

К сожалению, имевшиеся наблюдения HI имели очень низкое пространственное разрешение ($\sim 1'$ т.е. около 212 пк), поэтому у нас не было четких доказательств существования плотной стенки нейтрального газа. Но почти сразу по выходу первой статьи М. Goss (NRAO) любезно предложил нам для анализа куб данных, полученный на радиотелескопе VLA в линии 21 см со значительно лучшим разрешением ($7.4'' \times 7''$, ~ 23 пк). Новая карта распределения HI (рис. 6.1 внизу) подтвердила наше предположение – звезда WO действительно окружена облаками HI, плотность которых понижается вдоль оси туманности. При этом яркая юго-западная часть туманности располагается внутри оболочки HI, расширяющейся со скоростью около 10 км/с. Кинематический возраст оболочки HI составляет около (6–8) млн. лет, что существенно превышает продолжительность стадии WR и соответствует времени жизни массивной ($M \leq (30-40) M_{\odot}$) звезды на главной последовательности. Таким образом, это локальная оболочка HI образована ветром звезды еще на стадии главной последовательности, а уже позже на стадии WR начала формироваться туманность S3. Эти новые результаты, включая также оценки физических параметров отдельных сгустков туманности и измерение скорости ветра звезды WO по спектральным наблюдениям с MPFS подробно описаны в статье Лозинская и др. (2001). В этой же работе впервые была обнаружена сложная система оболочек HI в IC1613, к обсуждению которой мы и переходим.

6.2.2 Система оболочек нейтрального и ионизованного газа

В северо-восточном секторе IC 1613 выделяется гигантский комплекс ионизованных оболочек и сверхоболочек вокруг двух десятков молодых звездных ассоциаций и скоплений, который представляет собой единственный очаг современного звездообразования³ в галактике. В оптическом диапазоне комплекс исследовался довольно интенсивно (Georgiev et al., 1999; Valdez-Gutierrez et al., 2001, и ссылки в этих работах), но наблюдения комплекса в радиолинии 21 см, показавшие, что с множественными ионизованными оболочками связаны протяженные оболочки нейтрального газа, впервые были представлены в наших статьях (Лозинская и др., 2002, 2003). Эта система ионизованных и нейтральных оболочек показана разными цветами на рис. 6.2. Оболочки HI и HII смыкаются и частично перекрываются, и, если принять, что их размеры вдоль луча зрения и в картинной плоскости сопоставимы, то они должны находится в физическом контакте друг с другом. Это предположение выглядит естественно, с учетом того, что наклон диска к лучу зрения составляет $i \approx 30^\circ$, а характерная толщина газового диска, согласно нашим оценкам составляет 200–500 пк (Silich et al., 2006).

Комплекс звездообразования наблюдался на 6-м телескопе со SCORPIO в режиме сканирующего ИФП. Использовались два интерферометра: IFP235 и IFP501 (таб. 1.1), что позволило исследовать как области низкой поверхностной яркости и высокоскоростные детали, так и рассмотреть профили эмиссионных линий в ярких оболочках с более высоким спектральным разрешением. Существенно то, что пространственное разрешение наблюдений на радиотелескопе VLA составляло $\sim 7''$, что сравнимо с угловым разрешением наших наблюдений в линии $H\alpha$ (2–2.5''). Поэтому мы смогли одновременно анали-

³“Я просто не мог понять,— пишет Бааде,— как господин ухитрился загнать все голубые звезды высокой светимости в один угол” (цитируется по Ю.Н. Ефремову, “Земля и Вселенная”, 1972, N 3)

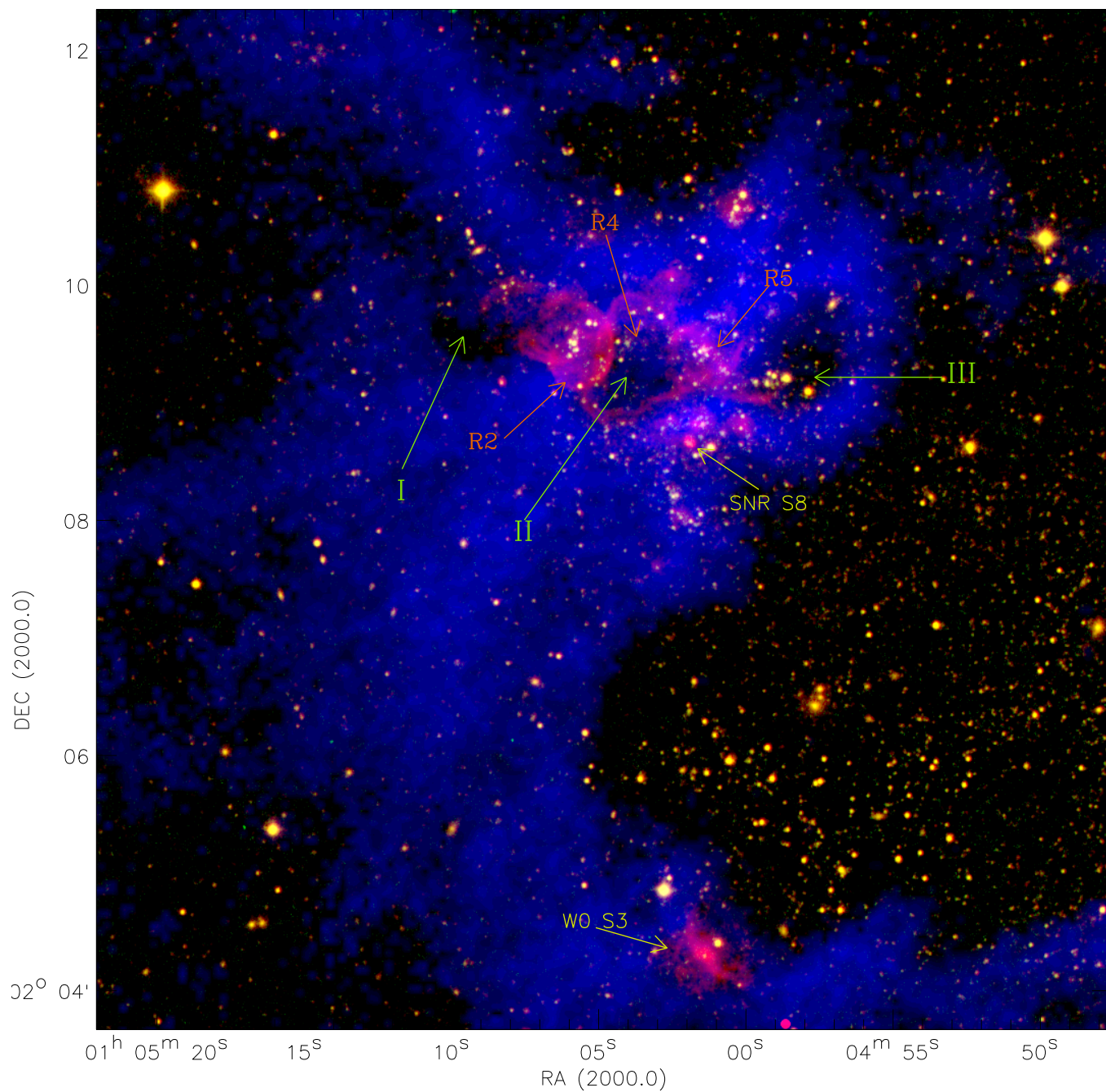


Рис. 6.2 Композитное изображение восточной половины IC 1613. Синим показано распределение HI (VLA), красным и золотистым – изображение в эмиссионной линии $H\alpha$ и в континууме (1-м телескоп “Пейсс-1000” САО РАН с редуктором SCORPIO). Стрелочками отмечены упомянутые в тексте объекты. Желтым – туманность вокруг звезды WO и остаток сверхновой S8, зеленым – три оболочки нейтрального газа (нумерация согласно Лозинской и др., 2003), красным – некоторые из оболочек ионизованного газа (нумерация согласно Valdez-Gutierrez et al., 2001).

зировать и сравнивать кинематику как нейтрального, так ионизованного газа по всему полю, используя соответствующие кубы данных. Профили линий часто имеют сложную форму, и при построении поля скоростей (подобных приведенным в предыдущих главах) мы теряем часть полезной информации о движениях газа. Поэтому основным инструментом анализа стало построение диаграмм позиция–скорость (PV-диаграмм), позволяющие посмотреть, как меняется форма профиля линии, показанной в разных грациях интенсивности, вдоль определенного направления. Метод популярен у радиоастрономов, изучающих распределения молекулярного и нейтрального газа, однако мы были одними из первых, кто стал массово применять PV-диаграммы к данным оптической 3D-спектроскопии. Вообще, следует отметить, что пока опубликовано очень немного работ, в которых для одной галактики сравнивается двумерная кинематика и нейтрального, и ионизованного газа.

На рис. 6.3 показаны примеры PV-диаграмм в HI и HII. Полностью все диаграммы для указанных на верхних рисунках разрезов приводятся в статье Лозинской и др. (2003). В ионизованном газе на разрезах N 5 и 6d в области $r = 100 - 150''$ хорошо заметны характерные “эллипсы скоростей”, указывающие на то, что здесь мы видим и приближающуюся, и удаляющуюся стороны расширяющейся оболочки (лучевые скорости передней и дальней сторон расширяющейся оболочки уменьшаются по абсолютной величине вдоль радиуса в картинной плоскости). По максимальной протяженности этого эллипса вдоль вертикальной оси можно оценить скорость расширения. К сожалению, столь четкая картина наблюдается далеко не всегда. Во многих случаях оценки выполнялись только по одной половине эллипса (особенно это относится к данным HI).

Цепочки ярких ионизованных оболочек окружены тремя четко выраженными нейтральными оболочками диаметром 300–350 пк (на рис. 6.2 они обозначены как I, II и III). У оболочек II и III зафиксировано расширение со скоростями 12 – 17 и 16 – 18 км/с соответственно, что дает кинематический возраст 5.3–5.6 млн. лет. Кроме этих оболочек в распределении HI выделены кольцевые и дугообразные структуры значительно большего размера. Особенно впечатляет гигантская каверна размером 1-1.5 кпк, о которой мы уже упоминали, обсуждая расположение туманности вокруг звезды WO.

Следует отметить, что однозначное соответствие нейтральных и ионизованных структур по размеру и локализации наблюдается только в одном случае: ионизованная оболочка R4 хорошо “вписывается” в окружающую оболочку II (рис. 6.2). Остальные яркие оболочки HII имеют меньший, чем нейтральные оболочки, размер и расположены иррегулярным образом: как в центре каверн HI, так и в их плотных стенках. Это отражает разные эволюционные стадии звездообразования в регионе – картина, описанная ранее в БМО (Kim et al., 1999).

На изображении в линии $H\alpha$ на границе между оболочками R2 и R4 наблюдается характерная чечевицеобразная структура, скорее всего являющаяся проявлением плотного газового кольца, образованного в области лобового столкновения этих оболочек. Формирование такого кольца следует из трехмерных численных расчетов столкновения двух расширяющихся сферических фронтов (см. обсуждение и ссылки на оригинальные расчеты в обзоре Ефремова и Чернина, 2003). Мы провели панорамную спектроскопию отдельных звездных площадок в звездном комплексе, в том числе и в области пересечения оболочек R2 и R4. Большинство ярких звезд здесь – молодые сверхгиганты и гиганты класса O, рожденные при столкновении оболочек (Лозинская и др., 2002).

Нами были уточнены скорости расширения и, соответственно, кинематический возраст, основных эмиссионных оболочек, составивший 0.6–2.2 млн. лет. Полная таблица полученных параметров дается в статье (Лозинская и др., 2003). Мы считаем наши измерения более надежными, в сравнении с оценками (Valdez-Gutierrez et al., 2001), так же использовавших данные с ИФП, правда, менее глубокие. Действительно, их выводы о расширении сделаны по раздвоению профилей интегральных линий, но проводимое усреднение замыкает наблюдаемую картину и занижает оценки скорости. В то же время, метод PV-диаграмм позволяет оценивать скорость расширения, даже если наблюдается одна половина эллипса скоростей.

Полученные кинематические возраста оболочек II и III в целом согласуются с возрастом звездных ассоциаций в комплексе звездообразования (5-20 млн. лет согласно Georgiev et al., 1999). Следует, отметить, что несмотря на “подходящие” возраста и приток механической энергии, реальная ситуация выглядит сложнее, прежде всего из-за неодновременности звездообразования в комплексе. Более того, гидродинамические расчеты процесса формирования оболочек, представленные в работе Silich et al. (2006), основанные на описанном выше наблюдательном материале, показали, что требуемый для образования сверхоболочки III источник энергии соответствует темпу звездообразования почти в 20 раз превосходящему наблюдаемый внутри этой суперкаверны ($SFR_{obs} = (3 - 4) \times 10^{-4} M_{\odot}/\text{год}$). О проблеме поиска источников энергии при образовании столь протяженных оболочек уже упоминалось в §6.1. Недавние исследования звездного населения в ряде близких карликовых галактиках со сходными сверхоболочками (Holmberg I, DDO181 и др.) показали, что проблема решается при учете последовательного воздействия на межзвездную нескольких поколений звезд (McQuinn et al., 2010; Warren et al., 2011). Скорее всего, более подробное изучение недавней истории звездообразования IC 1613 поможет объяснить кажущуюся нехватку источников энергии, необходимых для образования сверхоболочки.

6.3 IC 10: синхротронная сверхоболочка как остаток гиперновой

Карликовая иррегулярная галактика Местной Группы IC 10 – популярный объект для исследований структуры, кинематики и спектра свечения межзвездной среды в областях бурного звездообразования. От рассмотренной выше IC 1613 она отличается на порядок большим темпом звездообразования, здесь наблюдаются множественные ионизованные и нейтральные оболочки и сверхоболочки, дуговые и кольцевые структуры размером от 50 до 1000 пк. Звездное население галактики свидетельствует о недавней вспышке звездообразования ($t = 4 - 10$ млн. лет) и о более старой с $t > 350$ млн.лет (см. Massey et al., 2007; Wilcots & Miller, 1998, и ссылки в этих работах). Два момента выделяют галактику IC 10 среди других карликовых галактик с бурным звездообразованием и делают ее исследования особенно интересными.

Первый – аномально большое число звезд WR, в 20 раз больше, чем в Большом Магеллановом Облаке. Пространственная плотность WR достигает 11 звезд на квадратный кпк (Royer et al., 2001; Massey & Holmes, 2002). Это самая высокая плотность WR среди карликовых галактик, сопоставимая с массивными спиральными галактиками. При нормальной начальной функции масс (IMF) столь высокая плотность звезд WR говорит о практически одновременной вспышке современного звездообразования, охватившей большую часть галактики.

Второй интригующий момент – так называемая “синхротронная сверхоболочка”, открытая в радионаблюдениях Yang & Skillman (1993). Авторы связали этот протяженный источник нетеплового радиоизлучения со вспышкой десятка сверхновых. Учитывая характерное время обнаружимости синхротронного радиоизлучения остатка сверхновой около 10^5 лет, эти вспышки также должны были произойти практически одновременно. В более поздних работах также принимается модель множественных вспышек сверхновых (Thurrow & Wilcots, 2005; Bulles & Rosado, 2002).

На 6-м телескопе САО РАН нами было выполнено комплексное исследование кинематики и химсостава ионизованного газа в областях звездообразования IC 10. С помощью SCORPIO были получены глубокие изображения в эмиссионных линиях [SII] и $H\alpha$, в этих же линиях были построены кубы данных со сканирующим ИФП. Избранные области наблюдались в режиме длинной щели и с панорамным спектрографом MPFS. Результаты были представлены в ряде статей (см., к примеру, Лозинская и др., 2008; Егоров и др., 2010; Архипова и др., 2011), тематика которых уходит за пределы данной диссертационной работы. Поэтому ниже кратко описывается наиболее яркий, по мнению автора, результат, касающийся природы синхротронной сверхоболочки, опубликованный в статье Lozinskaya & Moiseev (2007). Здесь и далее принятое расстояние до галактики 790

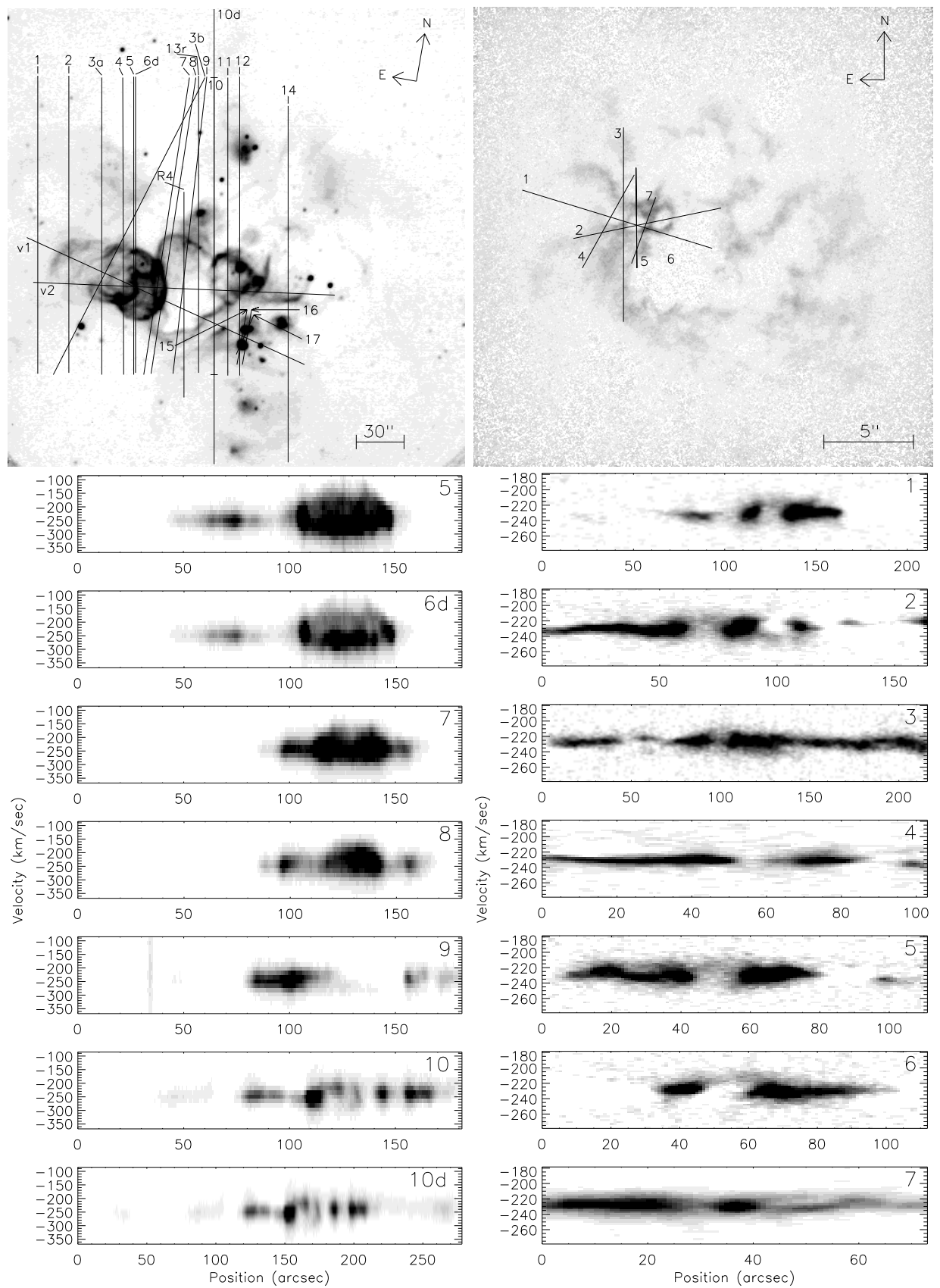


Рис. 6.3 Примеры PV-диаграмм в оболочечном комплексе IC 1613 (Лозинская и др., 2003). Слева – ионизованный газ ($H\alpha$, ИФП), справа – HI (VLA). Вверху показано расположение разрезов, вдоль которых строились диаграммы, нанесенных поверх соответствующих распределений яркости.

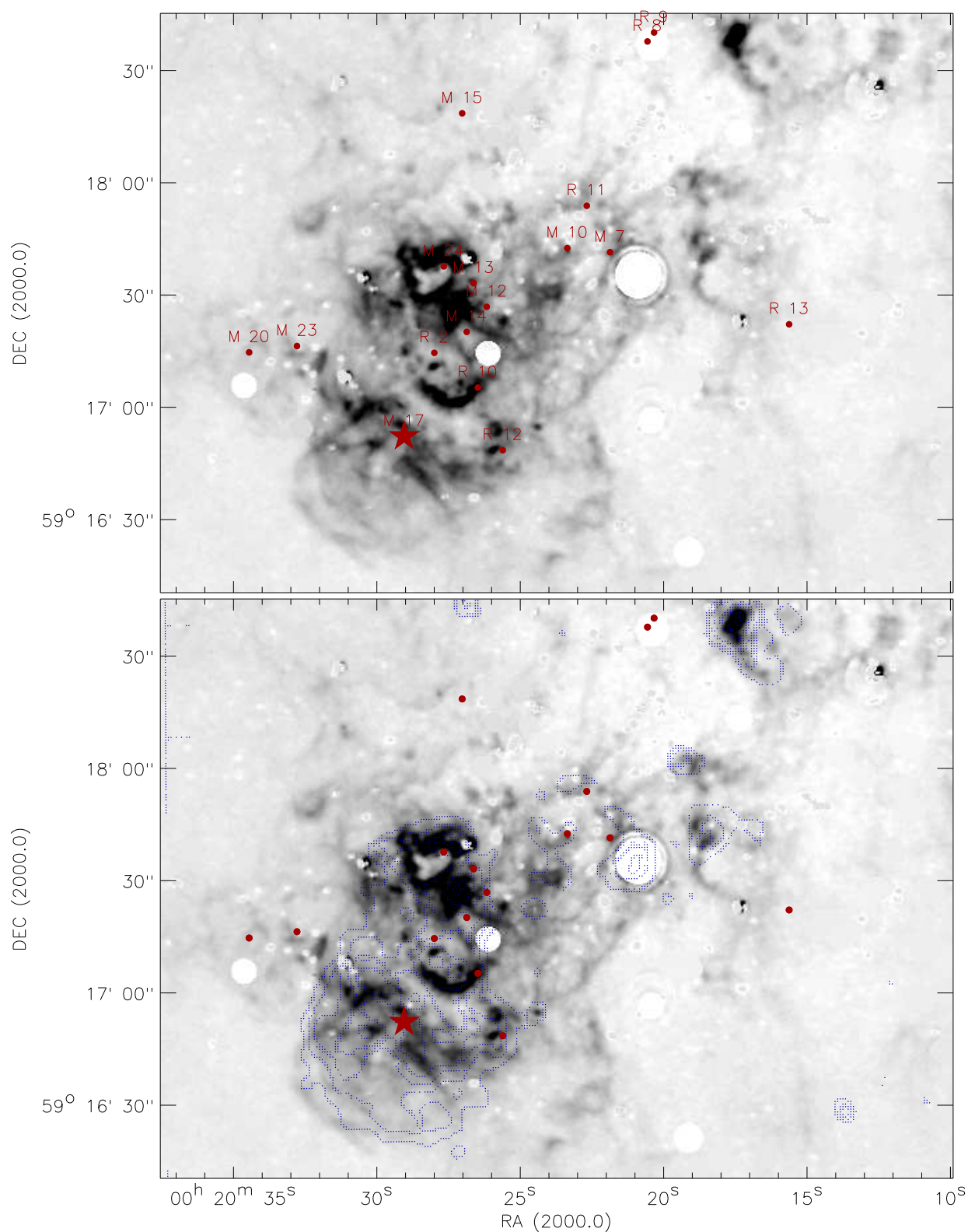


Рис. 6.4 Вверху: изображение комплекса звездообразования в IC 10 в эмиссионном дублете $[SII]\lambda 6717, 6731$, полученное на 6-м телескопе со SCORPIO. Красными кружками отмечены спектрально-подтвержденные звезды WR из списков Royer et al. (2001) и Massey & Holmes (2002). Компактный рентгеновский источник X-1 (черная дыра в паре со звездой WR M17) показан звездочкой. Внизу: то же самое, совмещенное с радиоизотопами на 20 см (Yang & Skillman, 1993), отмечающих синхротронную сверхоболочку.

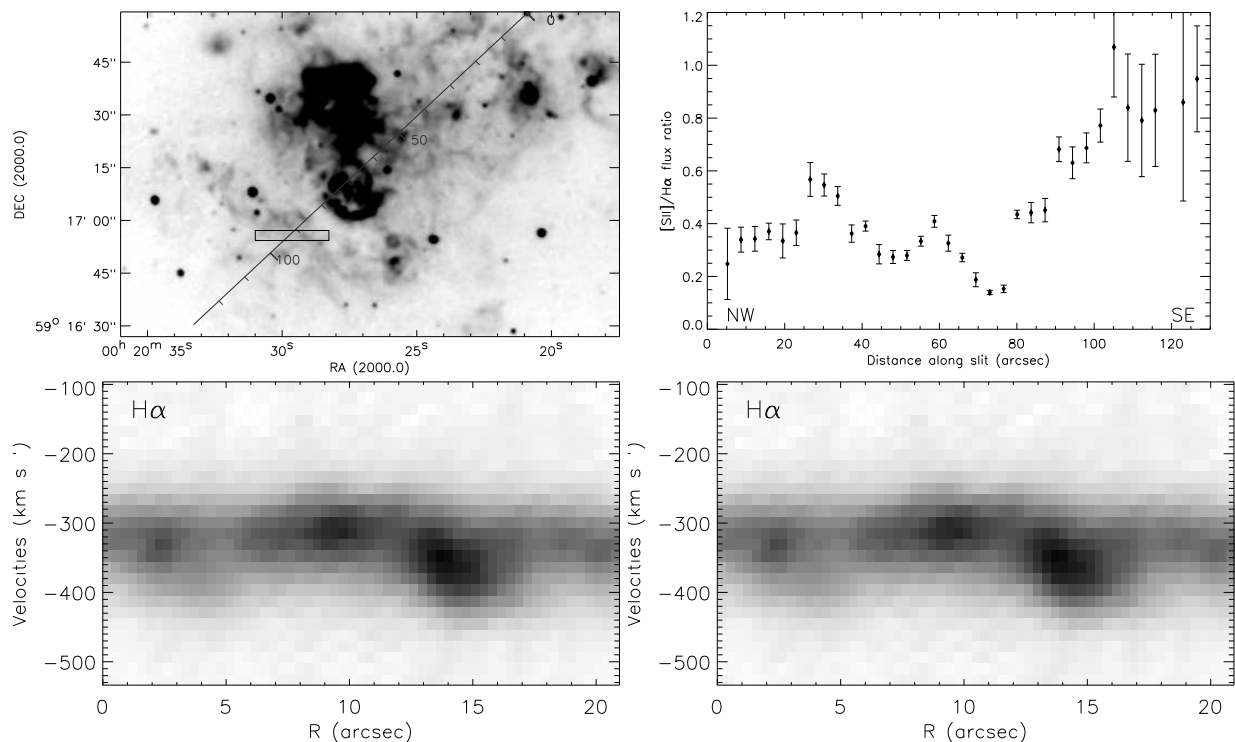


Рис. 6.5 Наблюдения сверхоболочки на БТА. Вверху слева – на изображении в $H\alpha$ + континуум (ИФП, SCORPIO) отмечено положение щели спектрографа, пересекающей синхротронную сверхоболочку вдоль $PA = 133^\circ$ и разрез, в котором строились PV-диаграммы (прямоугольник). Вверху справа изменение отношения линий $[SII]/H\alpha$ вдоль щели спектрографа. Оболочка располагается в области $r = 90 - 130$. Внизу – диаграммы позиция-скорость в линиях $H\alpha$ и $[SII]\lambda 6717$. Здесь на $r \approx 15''$ диаграммы пересекают источник IC10 X-1.

кпк соответствует угловому масштабу $4 \text{ пк}''$.

Представленное на рис. 6.4 глубокое изображение в линии $[SII]$, значительно отчетливее, чем в линии $H\alpha$, выявляет волокнистую оболочечную структуру. Ее размер $40 - 44''$ (около 170 пк) и координаты центра ($RA_{(2000)} = 0^h 20^m 29^s$, $D_{(2000)} = 59^\circ 16' 40''$) согласуются с синхротронной сверхоболочкой, наблюдаемой в радиоконтинууме.

Данные спектральных наблюдений указывают на значительный рост относительной эмиссии дублета $[SII]\lambda 6717, 6731$ в области сверхоболочки, значительно большей, чем это наблюдается в областях звездообразования. Действительно, отношение потоков $[SII]/H\alpha$ здесь резко возрастает и лежит в интервале $0.6 - 1.0$ (рис. 6.5), что соответствует остаткам сверхновых (SNR).

По кубам данных, построенных со сканирующим ИФП, строились PV-диаграммы, пересекающие оболочку. Характерную скорость разлета ярких сгустков оптической оболочки мы оценили в $50 - 80 \text{ км/с}$. Примеры PV-диаграмм для обеих эмиссионных линий показаны на рис. 6.5, более подробный анализ дается в статье Лозинская и др. (2008). Отметим, что классический эллипс лучевых скоростей наши PV-диаграммы не обнаруживают. Это естественно объясняется неоднородностью сверхоболочки, которая фактически представлена отдельными сгустками и волокнами в эмиссионных линиях.

По найденной скорости расширения, оценив из отношения интенсивностей линий $[SII]$, электронную плотность $n_e \simeq 80 \text{ см}^{-3}$, получаем массу оптической оболочки около $1.3 \times 10^6 M_\odot$ и кинетическую энергию $E_{kin} \simeq (3 - 10) \times 10^{52} \text{ эрг}$. Последняя величина находится между двумя более грубыми ранними оценками $(5 - 6) \times 10^{52} \text{ эрг}$ (Thurrow & Wilcots, 2005) и $(0.06 - 0.1) \times 10^{52} \text{ эрг}$ (Bullejos & Rosado, 2002). Такая энергия соответствует суммарному действию десятка сверхновых (плюс звездный ветер их родительской ассоциации) или вспышке Гиперновой, т.е. экстремально массивной звезды, выход энергии при вспышке которой превышает 10^{51} эрг (Asvarov, 2006).

Анализ синхротронного радиоизлучения сверхоболочки свидетельствует, что вспышка Гиперновой лучше объясняет ее природу, чем модель множественных вспышек сверхновых. Во-первых, поверхностная радиояркость (Σ) и размер (D) сверхоболочки идеально ложатся на имеющиеся теоретическую $\Sigma(D)$ -зависимость, для остатка вспышки Гиперновой с начальной энергией $E_o = 5 \times 10^{52}$ эрг в среде с плотностью $n_o = 0.01 \text{ см}^{-3}$ (см график и ссылки в Lozinskaya & Moiseev, 2007). Во-вторых, необходимо учитывать тот факт, что вспышки последних из серии десятка сверхновых в модели Yang & Skillman (1993) происходят в разреженной каверне, газ из которой уже выметен первыми сверхновыми.

Именно, первые вспышки сверхновых действительно могут дать в несколько раз более сильное радиоизлучение, чем одна сверхновая. Однако по мере того, как эти первые вспышки сформируют общую выметенную сверхоболочку, ситуация существенно меняется. Остатки последующих вспышек сверхновых расширяются в среде низкой плотности внутри каверны и их радиоизлучение быстро ослабевает из-за адиабатического расширения облака релятивистских частиц с магнитным полем. Легко убедиться (подробнее, см. нашу статью), что яркость остатка сверхновых в каверне, плотность в которой в 10 или в 100 раз ниже, чем невозмущенная, ослабевает в 5 или в 20 раз, соответственно.

Таким образом, последующие вспышки сверхновых в модели Yang & Skillman (1993) мало добавляют к радиояркости синхротронной сверхоболочки, сформированной первыми вспышками, и, соответственно, необходимое число сверхновых еще увеличивается. Поэтому вспышка Гиперновой представляется более правдоподобным механизмом образования синхротронной сверхоболочки, чем вспышки множественных сверхновых.

Аномально большое число звезд WR в IC10 означает практически одновременную вспышку современного звездообразования, охватившую большую часть галактики (при нормальной IMF). Т.е. нам повезло застать IC10 в редкой стадии, когда массивные звезды – предшественники WR еще живут, но сверхмассивная звезда — пред-Гиперновая уже кончила жизнь, и остаток этой вспышки мы наблюдаем как гигантскую синхротронную сверхоболочку. Возраст этого остатка, определяемый размером и найденной здесь скоростью расширения 80 км/с при условии, что он находится на стадии адиабатического расширения, соответствует $(4 - 7) \times 10^5$ лет.

Вблизи геометрического центра сверхоболочки находится звезда WR M17 (рис. 6.4), с которой совпадает ярчайший в галактике рентгеновский источник IC 10 X-I (Brandt et al., 1997) – аккрецирующая двойная система. Когда мы сдавали нашу статью о предполагаемой Гиперновой в печать, масса темного компонента в X-I оценивалась очень грубо, как не меньшая чем $4 M_{\odot}$. Но сразу после выхода нашей статьи появилась работа (Prestwich et al., 2007), в которой, на основании оценок кривой лучевых скоростей, был сделан вывод, что масса темного компонента составляет $23 - 34 M_{\odot}$, что является рекордом для черных дыр звездных масс. Последующие, более продолжительные наблюдения на телескопе Кека подтвердили первоначальную оценку. Столь внушительный “темный остаток” указывает на очень большую (более $100 M_{\odot}$) массу изначальной звезды, что является дополнительным и очень сильным аргументом в пользу недавнего взрыва Гиперновой. По сравнению с другими предполагаемыми остатками подобных вспышек (W49B, S26-N7793, NGC 5471B) синхротронная сверхоболочка в IC 10 оказывается наименее противоречивым объектом (Lozinskaya & Moiseev, 2007).

6.4 Сверхветер в NGC 4460

В ходе массового обзора галактик Местного Объемы (т.е. находящихся на расстояниях менее 10 Мпк) в линии H α И.Д. Караченцев и С.С. Кайсин (Kaisin & Karachentsev, 2008) обнаружили, что окологерновая область галактики NGC 4460 выделяется яркой эмиссией в линии H α (см рис. 6.6), свидетельствующей об активном звездообразовании, что обычно считается не типичным для изолированной E или S0 галактики. Ниже приводятся основные результаты последующих наблюдений NGC 4460 на 6-м телескопе с приборами SCORPIO и MPFS, опубликованные в статье Moiseev et al. (2010a). Принятое расстояние

до галактики – 9.59 Мпк соответствует масштабу 46.5 pc/".

6.4.1 Структура околядерной области

Сравнение изображения галактики в $H\alpha + [NII]$ с широкополосными снимками SDSS (рис. 6.6) наглядно показывает, что большая часть излучения в эмиссионных линиях идет от компактной области в центре диска ($r < 20''$). Именно здесь расположены все области HII, в то время как диффузное излучение $H\alpha + [NII]$ простирается вдоль малой оси галактики по обе стороны от ядра. Анализ снимков в оптическом и УФ диапазонах так же подтверждает, что все текущее звездообразование в NGC 4460 происходит в центральном килопарсеке. По данным спутника GALEX здесь сконцентрировано все излучение в дальнем ультрафиолете ($\lambda\lambda 1344 - 1786\text{\AA}$), распределение которого точно совпадает с областями HII (рис. 6.6). Молодое звездное население выделяется своим более синим показателем цвета на снимках SDSS (см рис. 6.6). Области звездообразования образуют почти полностью замкнутое кольцо в диске галактики. В то время как в фильтре r выделяется компактное ядро с $(g - r) \approx 0.65$, в синих фильтрах более яркой становится конденсация в $\sim 2''$ к северу от ядра с $(g - r) \approx 0.45$. На оптическом снимке HST (рис. 6.6) заметны отдельные яркие звезды и неразрешаемое компактное скопление, светимость которого лишь в два раза меньше светимости “главного” ядра. Но о двойном ядре, речи скорее всего не идет, так как динамический центр поля скоростей газа совпадает с основным ядром галактики (см. ниже).

Ориентация внешних изофот в фильтрах r и i соответствует $PA = 39.5 \pm 0.4$ и эллиптичности $\epsilon = 0.71 \pm 0.02$. С помощью эмпирического соотношения из работы Hubble (1926) получаем наклон диска $i = 77 \pm 1^\circ$. С этими параметрами строились азимутально усредненные профили поверхностной яркости $ubvri$ изображений SDSS. Распределение яркости во всех фильтрах на $r > 30 - 40''$ почти точно экспоненциальное, а избыток яркости на $r < 20''$ более заметен в синих фильтрах – это области звездообразования. Рис. 6.7 показывает разложение профиля яркости в фильтре r на компоненты. После вычитания внешнего диска ($\mu_0 = 19.4^m$, $h = 29.5''$) остается избыток яркости на $r < 30 - 40''$. Но это не балдж, так как после вычитания двумерной модели диска изофоты остаточного изображения имеют ту же сплюснутость, что и внешний диск. Профиль яркости в центре неплохо описывается второй экспонентой с почти той же центральной яркостью ($\mu_0 = 19.2^m$), но в три раза меньшей шкалой $h = 11.5''$.

Таким образом, NGC 4460 лишь по некоторым признакам (гладкие внешние изофоты, отсутствие спиральных рукавов и внешних областей HII) можно считать линзовидной. В то же время, по соотношению балдж/диск галактика соответствует более позднему морфологическому типу, так как сферический компонент в распределении яркости почти не заметен. В последнее время внутренние экспоненциальные диски часто называют “псевдобалджами” (Kormendy & Kennicutt, 2004), но в NGC 4460 это именно диск, толщина которого, судя по фотометрии, совпадает с внешним.

Такие многоярусные диски все чаще находят в спиральных и S0 галактиках и связывают с медленной внутренней (“секулярной”) эволюцией (Kormendy & Kennicutt, 2004). Она обусловлена либо развитием бар и спиральной структуры, либо недавним взаимодействием (малый мерджинг), в ходе которого часть газа потеряла угловой момент и переместилась к центру, где и происходит вспышка звездообразования, а вновь родившиеся звезды образуют внутренний диск с короткой шкалой (см. примеры в §2.3.1, §2.3.2, §3.4). В пользу того, что внутренний диск NGC 4460 только недавно начал формироваться, говорит и то, что его вклад в общий профиль яркости почти везде меньше, чем у основного диска.

6.4.2 Параметры ионизованного газа

На рис. 6.7 показаны карты центра галактики, построенные по данным наблюдений с панорамным спектрографом MPFS. В поле зрения MPFS попали три ярких области HII. Карты отношения потоков $[NII]/H\alpha$, $[SII]/H\alpha$ указывают на слабое усиление свечения

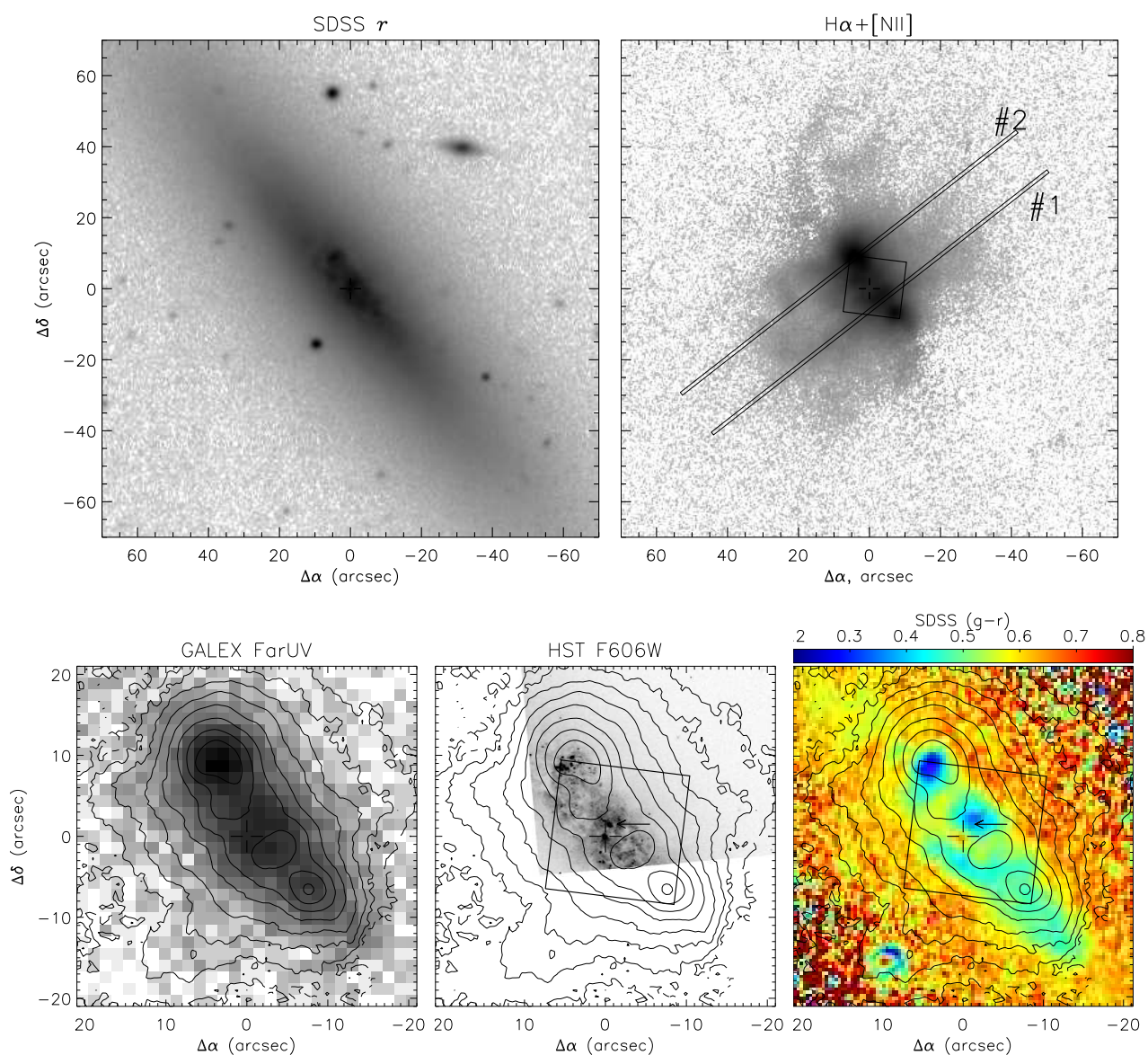


Рис. 6.6 Изображения NGC 4460 в логарифмической шкале яркостей. Верхний ряд – данные SDSS в фильтре r (слева) и изображение в $H\alpha + [NII]$ (справа), полученное на 6-м телескопе (Kaisin & Karachentsev, 2008). Показано расположение щелей спектрографа и квадратного раstra MPFS. Нижний ряд – изображение центра галактики с наложенными изофотами в линии $H\alpha$: данные космических телескопов GALEX (слева) и HST WFPC2/F606W (в центре). Справа – показатель цвета $(g-r)$ по данным SDSS. Крестиком показан динамический центр, стрелочкой – околоядерное звездное скопление.

в запрещенных линиях вокруг областей звездообразования⁴, в то время как в центрах областей НII эти отношения минимальны (см рис. 6.7). Скорее всего, между областями звездообразования мы видим выброшенный из них горячий газ, в ионизации которого участвуют ударные волны. Существование ударных фронтов вокруг областей НII подтверждается и наличием здесь пылевых прожилок. На снимке HST хорошо видно, как они обрамляют области НII. Отношение $[SII]/H\alpha$ здесь достигает 0.45, что близко к условной границе между ударным возбуждением и фотоионизацией (см. далее).

Со SCORPIO в режиме щелевого спектрографа было получено два спектральных разреза, перпендикулярно диску, к югу и северу от ядра (далее – “разрезы 1” и “2”, рис. 6.6). Рис. 6.8 показывает вариации параметров эмиссионных линий (поток, лучевая скорость, $FWHM$ после коррекции за аппаратное уширение) вдоль щели для обоих разрезов. Здесь $r = 0$ соответствует пику излучения в континууме. За пределами диска поверхностная яркость туманности убывает почти по экспоненциальному закону. При этом эмиссионные линии видны даже на большем удалении от диска, чем на снимке в $H\alpha + [NII]$. С удалением от большой оси диска растет относительная интенсивность $[SII]/H\alpha$, для $[NII]/H\alpha$ этот рост не столь заметный.

Чтобы разобраться с источником ионизации газа мы построили диагностическую диаграмму, на которой приводятся отношения потоков в линиях с различными механизмами возбуждения и близкими длинами волн, так что результат не зависит от пылевого поглощения. К сожалению, в данном спектральном диапазоне удается построить только одну диаграмму: $[NII]/H\alpha - [SII]/H\alpha$ (рис. 6.9). Пунктирные линии разделяют области с различными механизмами ионизации, обозначенные как ‘Photoionization’ и ‘Shock’. В качестве критериев, в согласии с Stasińska et al. (2006), мы приняли, что для ионизации молодыми звездами выполняются соотношения: $\lg [SII]/H\alpha < -0.4$, $\lg [NII]/H\alpha < -0.4$. Если же относительная интенсивность запрещенных линий больше, то это означает, что заметный вклад в ионизацию вносят ударные волны или даже нетепловой источник (AGN). При интерпретации положения точек на диаграмме важно помнить два момента. Во-первых, границы области фотоионизации несколько условны и определяются не только конкретными моделями, но и статистикой наблюдений разных выборок галактик. Кроме того, в реальных объектах далеко не всегда можно выделить единственный источник ионизации, часто они действуют совместно. Так, согласно Stasińska et al. (2006), область $-0.2 < \lg [NII]/H\alpha < -0.4$ соответствует композитному источнику ионизации в галактиках типа LINER: фотоионизация звездами плюс действие ударных волн, для $\lg [NII]/H\alpha > -0.4$ доминирует вклад от удара. Иногда используют еще более жесткий критерий $\lg [NII]/H\alpha > 0$ (Veilleux et al., 2005).

Рис. 6.9 показывает, что в области наблюдавшейся с MPFS, равно как и для $r < 5''$ в разрезе 1 и $r < 10''$ в разрезе 2 (т.е. в диске галактики) газ ионизован молодыми звездами. Во внешних филаментах, согласно критерию $[SII]/H\alpha$, с удалением от диска начинает доминировать ионизация ударными волнами. В то же время, если формально следовать критерию $[NII]/H\alpha$ то все филаменты лежат в области фотоионизации, за исключением нескольких точек с $r \approx 30''$ в разрезе 2. Но в данном случае мы считаем, этот критерий менее важным, поскольку наблюдаемое отношение линий хорошо согласуется с результатами модельных расчетов Allen et al. (2008) для ударной ионизации (shock only), плотности $n = 1 \text{ cm}^{-3}$ и солнечной металличности. Сетка параметров моделей ударной ионизации приведена на рис. 6.9. Видно, что с ростом r наблюдаемые точки располагаются вдоль линий увеличения скорости ударной волны от 150 до 250 км/с при малых значениях магнитного параметра $B = 0 - 1 \mu G \text{ cm}^{2/3}$. Отметим, что приближение солнечной металличности вполне применимо к NGC 4460. Для оценки мы использовали данные разреза 2, проходящего через центр ярчайшей области НII, где отношение $[NII]\lambda 6583/H\alpha$ минимально и составляет 0.16 ± 0.03 . Если принять, что здесь вклад ударных волн мал, то согласно аппроксимации из Stasińska et al. (2006) металличность газа составляет $(0.74 \pm 0.04) Z_{\odot}$, т.е. близка к солнечной.

⁴Здесь и далее, под отношением $[NII]/H\alpha$ и $[SII]/H\alpha$ подразумевается отношение потоков в линиях $[NII]\lambda 6583/H\alpha$ и $[SII](\lambda 6717 + \lambda 6731)/H\alpha$ соответственно.

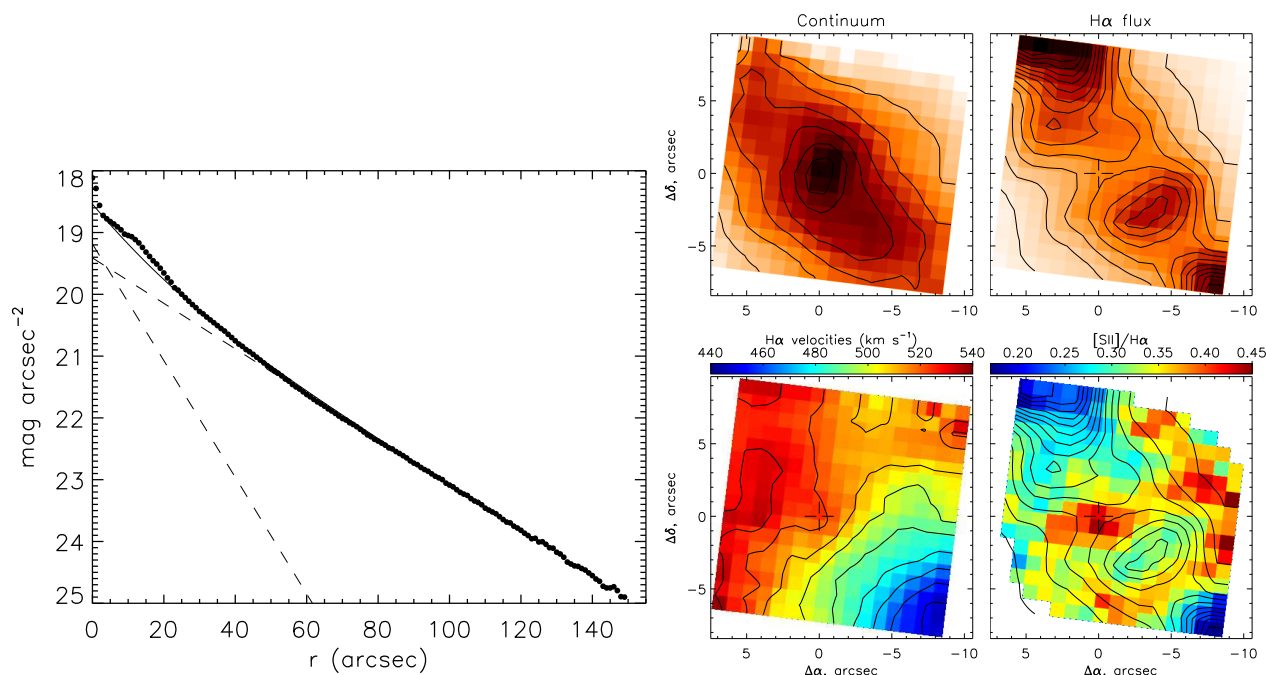


Рис. 6.7 Слева – разложение профиля яркости в фильтре r (точки) на два диска (пунктир). Сплошная линия – сумма модельных компонентов. Справа – результаты наблюдения с MPFS: карты в континууме вблизи $\lambda 6400\text{\AA}$ и в линии $H\alpha$, поле скоростей в $H\alpha$ и отношение потоков $[SII]/H\alpha$ с наложенными изофотами $H\alpha$. Динамический центр отмечен крестом.

Таким образом, ионизация газа в протяженной туманности объясняется совместным действием ударных волн и фотоионизации молодыми звездами, причем последняя доминирует во внутренних областях. Поскольку в галактике нет активного ядра, то наиболее вероятным источником ударных волн тоже является звездообразование, так, что газ выбрасывается над плоскостью галактики в результате совместного действия сверхновых и звездного ветра от молодых массивных звезд. Это явление известно как “галактический ветер”, уже обсуждавшийся в §3.4.

Для сравнения на рис. 6.9 приведены отношение линий для трех хорошо изученных галактик, в которых давно доказано существование галактического ветра: M82, NGC 253 и NGC 1569. Для M82 отдельно приведены средние измерения, полученные Westmoquette et al. (2009) с приборами DensePak и GMOS. Для галактического ветра в NGC 253 данные взяты с рис. 5 из Matsubayashi et al. (2009), а для NGC 1569 мы приводим несколько оценок для внешних эмиссионных областей (рис. 7 в Heckman et al., 1995). На диагностической диаграмме точки NCC 4460 располагаются примерно посередине между взятыми из литературы значениями. При этом в филаментах NCC 4460 вклад ударных волн в ионизации газа сравним или даже превосходит таковой для всех трех галактик с “классическим” ветром. Высокое отношение $[NII]/H\alpha$ в NGC253 скорее всего обусловлено переобогащением межзвездной среды азотом (Matsubayashi et al., 2009).

Используя отношение линий дублета $[SII]$, мы оценили электронную плотность газа n_e , согласно соотношению из Osterbrock (1989) для $T_e = 10\,000\text{ K}$. Вариации n_e вдоль обоих разрезов показаны на рис. 6.10. К сожалению, это соотношение уверенно работает, только для $n_e > 80\text{ cm}^{-3}$, а для низких плотностей наклон зависимости ($[SII]\lambda 6717/\lambda 6731 - n_e$) мал, что порождает неопределенность. Хотя наблюдаемое отношение линий часто находится в этом ‘неудобном’ диапазоне, можно утверждать, что в диске галактики плотность излучающего газа невелика, около $30 - 100\text{ cm}^{-3}$. Во внешних филаментах наблюдается большой разброс значений от 20 до 300 cm^{-3} . Здесь щель спектрографа пересекает отдельные сгустки с сильно неоднородной плотностью. Видно, что n_e в среднем растет с расстоянием от ядра, что особенно заметно для яркого филамента в разрезе 2. Скорее всего, это вызвано уплотнением газа на краях расширяющегося ‘пузыря’, выметаемо-

го галактическим ветром. Относительно низкая электронная плотность, наблюдаемая в самом диске, может быть обусловлена как внутренним поглощением в областях звездообразования, в результате которого мы не видим излучения более плотного газа в центрах III областей, так и более низкой степенью его ионизации. Либо же значительная часть плотного газа уже выметена из областей звездообразования.

6.4.3 Кинематика газа

Поле скоростей в линии $\text{H}\alpha$, построенное по данным MPFS (рис. 6.7), хорошо описывается моделью кругового вращения тонкого диска. Лучевые скорости, измеренные по [NII] и [SII], не показывают заметных отклонений от скорости в линии $\text{H}\alpha$. Центр вращения совпадает с центром изображения в континууме. PA_{kin} , измеряемый по полю скоростей, с точностью до ошибок совпадает с фотометрическим PA . Системная скорость центра $V_{sys} = 508 \pm 5$ км/с. Кривая вращения показывает твердотельный рост до $v_{max} = 67$ км/с на $r = 20''$, что близко к максимальной скорости вращения в HI (Sage & Welch, 2006). Дальше от центра ее измерить не удастся. Отклонения наблюдаемых скоростей от модельных достигают 20 км/с вдоль малой оси галактики, что, скорее всего, указывает на выброс газа над плоскостью диска, но может быть связано и с недостатками самой модели: при $i = 77^\circ$ уже плохо работает приближение тонкого диска, требуется учет внутреннего поглощения и т.п.

Чтобы оценить величину пекулярных скоростей внешних филаментов мы экстраполировали нашу модель на большие расстояния в предположении о выходе кривой вращения на плато. На рис. 6.8 показано сравнение модельной экстраполяции и наблюдаемых лучевых скоростей по целевым разрезам. В разрезе 1 – неплохое согласие модели с наблюдениями на $r < 15''$ в NW-половине туманности. А вот в ее более протяженной SE-половинке отличия заметны уже далее $7 - 10''$ от центра, рассогласование достигает $30 - 35$ км/с. Разрез 2 проходит дальше от центра, по самому краю поля зрения MPFS, поэтому здесь отличия от модельной экстраполяции более заметны в области диска. Можно утверждать, что систематические отклонения наблюдаемых лучевых скоростей от модельных во внешних филаментах не превышают 30 км/с. В предположении о том, что здесь мы наблюдаем движения газа перпендикулярно к плоскости диска, получаем, с учетом эффекта проекции, скорость истечения $V_{out} \approx 130$ км/с. Это сравнимо с наблюдаемой полушириной эмиссионных линий, которое достигает $150 - 170$ км/с на расстоянии $r = 20 - 30''$ (0.9-1.4 кпк), в то время как в диске FWHM в два раза меньше.

Параметры ветра

Наблюдаемые в NGC 4460 особенности распределения параметров ионизованного газа (кинематика, плотность, состояние ионизации) проще всего объяснить в рамках предположения о “галактическом ветре” т.е. выбросе газа над плоскостью галактики, вызванном центральной вспышкой звездообразования. Альтернативное предположение о том, что мы наблюдаем остатки богатого газом спутника, разрушенного приливными силами, не подходит, так как тогда лучевые скорости в филаментах заметно отличались бы от системной. Кроме вышеперечисленных признаков, на галактический ветер указывает и сама форма эмиссионной туманности, напоминающая бабочку, или два расширяющихся над плоскостью галактики пузыря. Причем диаметр пузырей уже больше полутолщины газового диска, их вершина раскрыта, так как не обжимается окружающим газом. Морфология эмиссионной туманности сходна с наблюдаемой в известной галактике со сверхветром NGC 1482 (этот и другие примеры см. в обзоре Veilleux et al., 2005).

Все современное звездообразование идет в кольце диаметром менее 2 кпк, составляющим вершину ветрового конуса. Заметную роль в ионизации газа играет не только излучение OB-звезд, но и ударные волны, образованные коллективным действием сверхновых и ветров массивных звезд, передающих кинетическую энергию в межзвездную среду. Скорости в филаментах вдоль луча зрения невелики и близки к системной, что говорит в пользу того, что это газ, выброшенный из центральных областей и сохранившийся

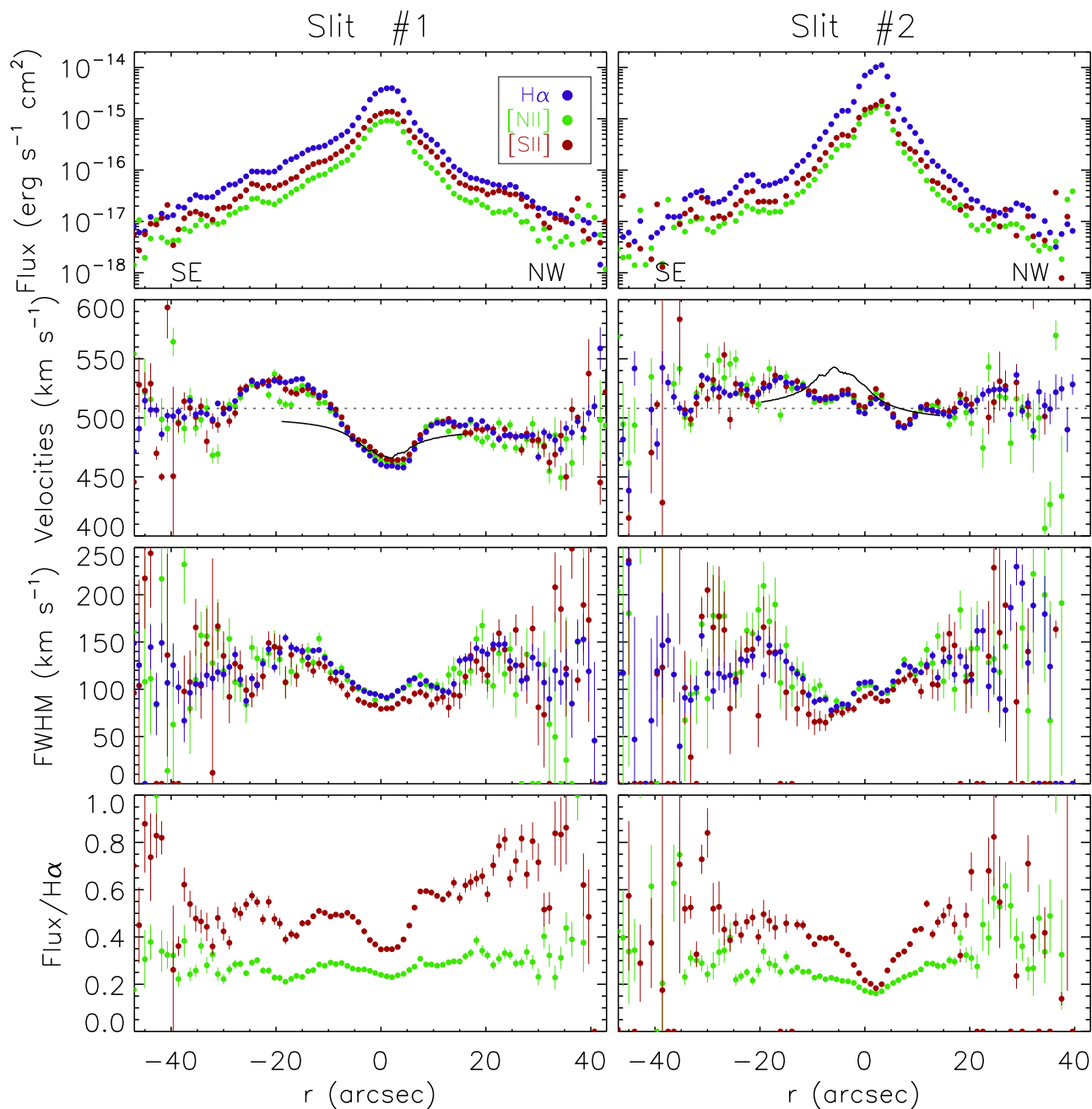


Рис. 6.8 Изменение вдоль щели параметров эмиссионных линий $H\alpha$, $[NII]\lambda 6583$ и $[SII]\lambda 6717 + 6731$ в NGC 4460. Слева – разрез 1, справа – разрез 2. Сверху вниз: поверхностная яркость, лучевая скорость, полуширина (скорректированная за ширину инструментального профиля) и отношение потока в линиях относительно $H\alpha$. На графиках для скоростей пунктиром помечена системная скорость (по данным MPFS), а сплошной линией – разрез через модельное поле скоростей.

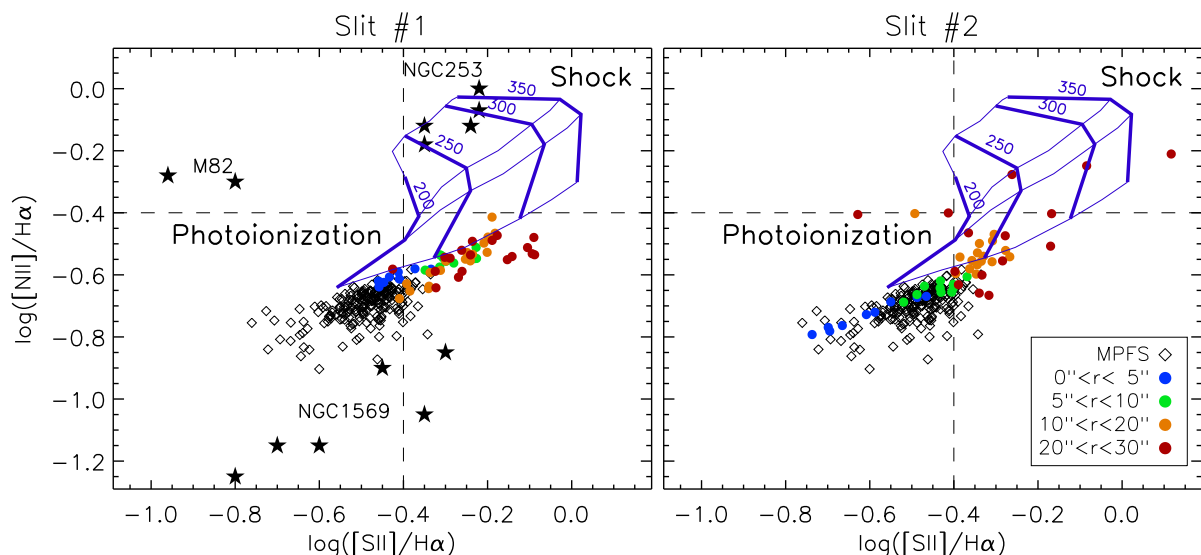


Рис. 6.9 Диаграмма отношения потоков $[NII]/H\alpha$ – $[SII]/H\alpha$. Пунктир разделяет области с различными механизмами ионизации. Нанесена сетка ионизационных ударных моделей (Allen et al., 2008), где тонкие линии соответствуют значениям магнитного параметра 0, 1, 2, 4 $\mu G cm^{2/3}$ (снизу вверх), а толстые линии – подписанным скоростям ударной волны (в км/с). Кругами показаны измерения вдоль разрезов 1 (слева) и 2 (справа). Цвета соответствуют разным расстояниям от плоскости галактики. Ромбами показаны результаты MPFS для околоядерной области. Звездочками на левом рисунке отмечены измерения для областей галактического ветра в M82, NGC253 и NGC1569.

свой момент вращения. А расширение (подъем над плоскостью галактики) происходит в основном в картинной плоскости, поэтому проекция скорости истечения на луч зрения мала.

Приняв характерную длину наиболее ярких филаментов $l = 30 - 35''$ (1.3–1.6 кпк), получаем кинематический возраст эмиссионной структуры $\tau = l/V_{out} \approx 10$ –12 млн. лет. Полная светимость галактики в $H\alpha$ составляет $L_{H\alpha} = 1.66 \times 10^{40}$ эргс⁻¹, согласно наблюдаемому потоку в $H\alpha + [NII]$ из работы Kaisin & Karachentsev (2008) и для среднего отношения линий $[NII]\lambda 6583/H\alpha = 0.2$. Мы приняли, что к ветру относится излучение за пределами области диска, заключенной внутри эллипса с большей полуосью $25''$ и отношением осей 0.4, куда попадают все области HII на изображении галактики. Тогда светимость ветрового конуса $L_{H\alpha}(wind) = 2.7 \times 10^{39}$ эрг/с, что составляет 16% от полной $L_{H\alpha}$, причем светимости SE и NW частей биполярной структуры практически равны (9% и 7% соответственно). Приняв, в соответствии с рис. 6.10, среднюю электронную плотность $n_e = 100$ см⁻³ и действуя аналогично Matsubayashi et al. (2009), получаем полную массу выброшенного из диска ионизованного газа $M_{wind} = 8.7 \times 10^4 M_{\odot}$, а его кинетическую энергию $E = 2.9 \times 10^{52}$ эрг. Представив излучающий объем SE-половинки ветра усеченным конусом с основаниями диаметром 30 и 40'', получаем характерное значение фактора заполнения этого объема $f \approx 6 \times 10^{-6}$, указывающее на высокую неоднородность излучающей среды – светящийся в $H\alpha$ газ в основном расположен на стенках пузыря, фрагментирующихся под воздействием характерных неустойчивостей (Veilleux et al., 2005).

Сравним полученные нами параметры с характеристиками ветра в двух хорошо известных близких галактиках: M82 (Shopbell & Bland-Hawthorn, 1998) и NGC 253 (Matsubayashi et al., 2009). Масса выброшенного газа в NGC 253 практически такая же, хотя его кинетическая энергия в 4 раза больше, а время образования структуры почти в 6 раз короче. Для M82 M_{wind} больше почти в 70 раз, а E в 720, при более близком значении $\tau = 3.4$ млн. лет. Скорости истечения ветра в этих галактиках в 3–4 раза выше чем в NGC 4460. С учетом замечания о неопределенности с измерением V_{out} можно заключить, что в целом характеристики ветра в NGC 4460 близки к наблюдаемым в NGC 253, за исключением того, что для образования эмиссионной туманности NGC 4460 потребовалось заметно большее время. Это не удивительно, если учесть, что полный SFR, формально опреде-

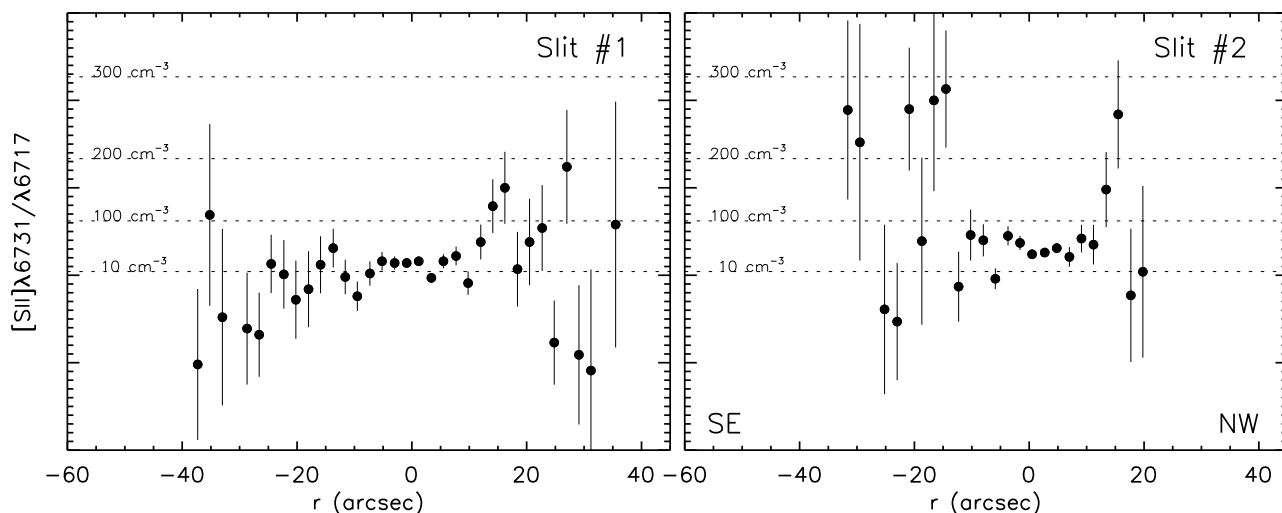


Рис. 6.10 Измерения электронной плотности по отношению линий дублета [SII] в обоих спектральных разрезах.

ляемый по $L_{H\alpha}$, в NGC 253 почти в 10 раз выше. Этот факт, скорее всего, и определяет относительно низкую скорость истечения. В частности, мы не можем утверждать, что кинетической энергии ветра достаточно для того, чтобы этот газ покинул галактику. Простейшая оценка скорости убегания в модели изотермической сферы с радиусом обреза $2'$ дает для областей на расстоянии $r < 8''$ от центра: $v_{esc} \geq 2.7 v_{max} = 180$ км/с, что заметно больше, чем V_{out} . Поэтому, остыв, газ из ветра упадет вновь в плоскость галактики и примет участие в формировании следующего поколения звезд.

Причина текущего звездообразования

Центр NGC4460 характеризуется довольно бурным звездообразованием с темпом $SFR = 0.26 M_{\odot}/\text{год}$ (Kaisin & Karachentsev, 2008), происходящем на фоне относительно старого и ‘спокойного’ диска галактики. Что же могло инициировать текущее звездообразования в линзовидной галактике? Приливное взаимодействие с компаньоном исключено – галактика сильно изолирована. Так же практически нет свидетельств поглощения богатого газом спутника – в поле скоростей отсутствуют ожидаемые в этом случае кинематически выделенные компоненты, в частности, никак не выделяется отмеченное на оптических снимках ‘второе ядро’, являющееся компактным звездным скоплением. На оптических изображениях и опубликованных картах HI низкого разрешения (Sage & Welch, 2006) не заметно приливных структур. Обнаруженный в распределении яркости внутренний диск является свидетельством того, что звездообразование в центре идет достаточно давно, но сам по себе не указывает на факт взаимодействия.

Хотя это несколько выходит за рамки диссертации, автор считает необходимым остановиться на интересных выводах о причинах наблюдаемого звездообразования в NGC 4460, сделанных И.Д. Караченцевым и представленных в нашей статье (Moiseev et al., 2010a). Там мы рассматриваем интегральные свойства NGC 4460 с помощью диаграммы ‘прошлое–будущее’ $\{P^*, F^*\}$, где $P^* = \lg([SFR] \times T_0/L_K)$ и $F^* = \lg(M_{HI}/[SFR] \times T_0)$, характеризуют эволюционный статус галактики на космологической шкале $T_0 = 13.7$ млрд.лет (Kaisin & Karachentsev, 2008). L_K означает светимость галактики к К-полосе, которая хорошо воспроизводит ее звездную массу при $M^*/L_K^* = 1M_{\odot}/L_{\odot}$. Для NGC 4460 величина $P^* \approx 0$, что свидетельствует о способности галактики воспроизвести основную часть своей звездной массы за космологическое время T_0 при современном темпе звездообразования. Вместе с тем, имеющиеся запасы газа могут поддерживать наблюдаемый сейчас темп звездообразования лишь на короткой шкале времени $1/40 T_0$. Схожая ситуация наблюдается еще в двух сильно изолированных (согласно критерию приливного индекса, введенного Karachentsev et al., 2004) E-S0 галактиках Местного Обьема: NGC

404 и NGC 855.

Положение изолированных E, S0 галактик на диагностической диаграмме $\{P^*, F^*\}$ не позволяет считать их наблюдаемую стадию эволюции как вспышку звездообразования, вызванную поглощением спутника или же одиночного водородного облака. В этом случае, помимо трех упомянутых эмиссионных изолированных E, S0 галактик в Местном объеме следовало бы ожидать на порядок большее число аналогичных объектов в спокойной межвспышечной стадии. Но существующие данные об $H\alpha$ -потоках 420 галактик Местного Объема Karachentsev & Kaisin (2010) не подтверждают наличия такой популяции. Кроме NGC 4460, NGC 404 и NGC 855, в Местном объеме имеются всего две другие изолированные галактики – NGC 2787 и NGC 4600 – со слабо выраженными признаками центральной эмиссии в $H\alpha$.

Преобладание среди изолированных E, S0 галактик объектов с активным центральным звездообразованием, способность их воспроизвести свою наличную звездную массу при наблюдаемом темпе звездообразования на космологической шкале времени T_0 , в сочетании со скудностью запасов газа в них ($\sim 1 \times 10^8 M_\odot$) позволяет сделать вывод, что активность звездообразования у этого редкого класса галактик подпитывается внешним источником – межгалактическим газом, и этот процесс имеет монотонный, невспышечный, характер.

6.5 Спиральные галактики

6.5.1 “Отрог” в NGC 1084

На первый взгляд NGC 1084 выглядит как ординарная галактика, с развитым спиральным узором, без заметных компаньонов (тип SA(s)c согласно NED). Принятое расстояние до галактики составляет 18.5 Мпк, что дает масштаб 90 пк/". В 1995 г. галактика изучалась со сканирующим ИФП501, с еще старым редуктором светосилы 6-м телескопа. Основная цель наблюдений состояла в изучении движений газа в спиральной волне плотности, но открывшаяся при анализе данных картина оказалось столь необычной, что была представлена в отдельной статье (Moiseev, 2000).

Именно, на северо-восточной периферии галактики обнаружена сложная и интересная структура профилей эмиссионных линий. Здесь от самой яркой в линии $H\alpha$ сверхассоциации, перпендикулярно спиральной ветви отходит “отрог”, состоящий из нескольких областей звездообразования⁵.

На рис. 6.11 показано увеличенное изображение “отрога” в линии $H\alpha$, отмечено расположение областей, где вид профиля эмиссионных линий сильно отличается от наблюдаемого по галактике в целом. Кроме $H\alpha$, в рабочий диапазон ИФП попала линия азота $[NII]\lambda 6583\text{\AA}$, хотя и несколько ослабленная крылом интерференционного фильтра. Практически по всему диску эта линия имеет низкую, сравнительно с $H\alpha$ интенсивность, однако вблизи “отрога” отношение $[NII]/H\alpha$ резко возрастает, достигая 1-1.5 в ряде регионов на периферии областей звездообразования (профили A, C, G на рис. 6.11). Кроме того, линия $H\alpha$ здесь часто раздваивается. Сравнение с полей скоростей, построенным в рамках квазикругового вращения плоского диска (§1.5.1) показывает, что скорости “нормального” компонента соответствуют круговому вращению, а второй (“аномальный”) компонент смещен по скорости на 50 – 150 км/с. Во внешних областях отрога (A–E) аномальный компонент смещен в красную сторону на +90..+150) км/с, отрицательные относительные скорости наблюдаются только в области F, ближе к центру галактики (около -100 км/с). Отметим, что впервые отрицательные избытки скоростей, определенные по центру тяжести эмиссионной линии $H\alpha$ были обнаружены здесь Афанасьевым и др. (1988) в ходе наблюдений с длиннощелевым спектрографом.

⁵Так эта область впервые была названа в статье Афанасьева и др. (1988). Термин оказался настолько удачен, что потом постоянно использовался коллегами, а также в курсовой и дипломной работах автора в ГАИШ МГУ. К сожалению, в англоязычной статье пришлось использовать более традиционный термин “spur”.

Пекулярные регионы располагаются строго между областями звездообразования, где эмиссия в линиях относительно невелика. Они образуют систему дуг и перемычек. В самих областях III профиль линий симметричный и однокомпонентный (рис. 6.11, i). Сложный профиль не может быть объяснен недостаточным отношением сигнал/шум – на том же рисунке (j) показан пример нормальных линий в области со слабым сигналом.

Имея измерения только в двух эмиссионных линиях, трудно делать выводы о физических условиях в пекулярных областях “отрога”. Но в любом случае, очевидно, что мы видим как минимум две подсистемы ионизованного газа: регулярно вращающийся диск галактики и отдельные облака с некруговыми движениями, превышающими 100 км/с по лучу зрения. Эти скорости в несколько раз превышают среднюю скорость звука в межзвездной среде, поэтому такие движения должны сопровождаться ударными волнами. В таком случае рост отношения $[NII]\lambda 6583/H\alpha > 1$ однозначно интерпретируется как высвечивание в запрещенных линиях за фронтом ударных волн, в согласии с фотоионизационными моделями, описанными в §§3.4.2 и 6.4.2.

К сожалению, не ясно, отслеживает ли волокнистая структура пекулярных областей реальную структуру ударных фронтов, или же просто в областях звездообразования слабый аномальный компонент теряется на фоне яркой эмиссии областей III. Действительно, оценка, выполненная на основе таблицы средних параметров пекулярных областей (Moiseev, 2000), дает светимость аномального компонента $L_{H\alpha} \approx 2 \times 10^{39}$ эрг/с, что составляет всего 2% от общей эмиссии отрога в линии $H\alpha$. Пространственный размер региона, охваченного пекулярными движениями, весьма внушителен и достигает 2.5–3 кпк.

В статье Moiseev (2000) рассмотрены несколько возможных объяснений возникновения пекулярных областей: приливное взаимодействие с неизвестным компаньоном, аккреция внешнего газового облака или даже вращение карликового спутника в плоскости, перпендикулярной диску NGC 1084. Наиболее подробно рассматривалась связь с областями современного активного звездообразования, т.е. представление о “галактическом фонтане” – выбросе облаков горячего газа над плоскостью диска с последующим падением охлажденного газа (§6.1). Это объясняет как присутствие ударных фронтов, так и разные направления скоростей отдельных облаков. Даже с учетом проекции на луч зрения, наблюдаемые скорости не превышают скорости вращения на данном радиусе (~ 180 км/с), т.е. явно недостаточны, чтобы облака ионизованного газа покинули галактику. С другой стороны, темп современного звездообразования в NGC 1084, согласно оценкам по светимости в линии $H\alpha$, составляет около $4 M_{\odot}$ /год, что вполне типично для Sc-галактик. На “отрог” при этом приходится около $0.8 M_{\odot}$ /год. Достаточно ли это для того, чтобы область размером 3 кпк породила “фонтаны” газа со скоростями более 100 км/с? Автору неизвестны другие примеры столь масштабных движений *ионизованного* газа в галактиках с вполне нормальным темпом звездообразования. Близкими аналогами могут быть только высокоскоростные облака нейтрального водорода наблюдаемые как в нашей Галактике, так и в ряде близких галактик. Спор об их происхождении еще не закончен, не всегда ясно – идет ли речь о газе, выброшенном в процессе звездообразования, или же об аккреции холодных облаков межгалактической среды. Возможно, что проводимый сейчас обзор HALOGAS (Heald et al., 2011) в линии 21 см поможет ответить на этот вопрос.

Через семь лет после выхода нашей статьи, Ramya et al. (2007) исследовали звездное население NGC 1084 и предположили, со ссылкой на нашу работу, что серия коротких вспышек звездообразования за последние 40 млн. лет могла быть индуцированная поглощением карликовой галактики. Позже, Martínez-Delgado et al. (2010) обнаружили слабые внешние приливные структуры на глубоких оптических изображениях NGC 1084, свидетельствующие о значительно более давнем (более 1 млрд. лет назад) взаимодействии. Хотя эти факты могут указывать на возможную связь пекулярных движений в “отроге” с внешним окружением, все же гипотеза о выбросе газа из областей III по-прежнему представляется нам более убедительной.

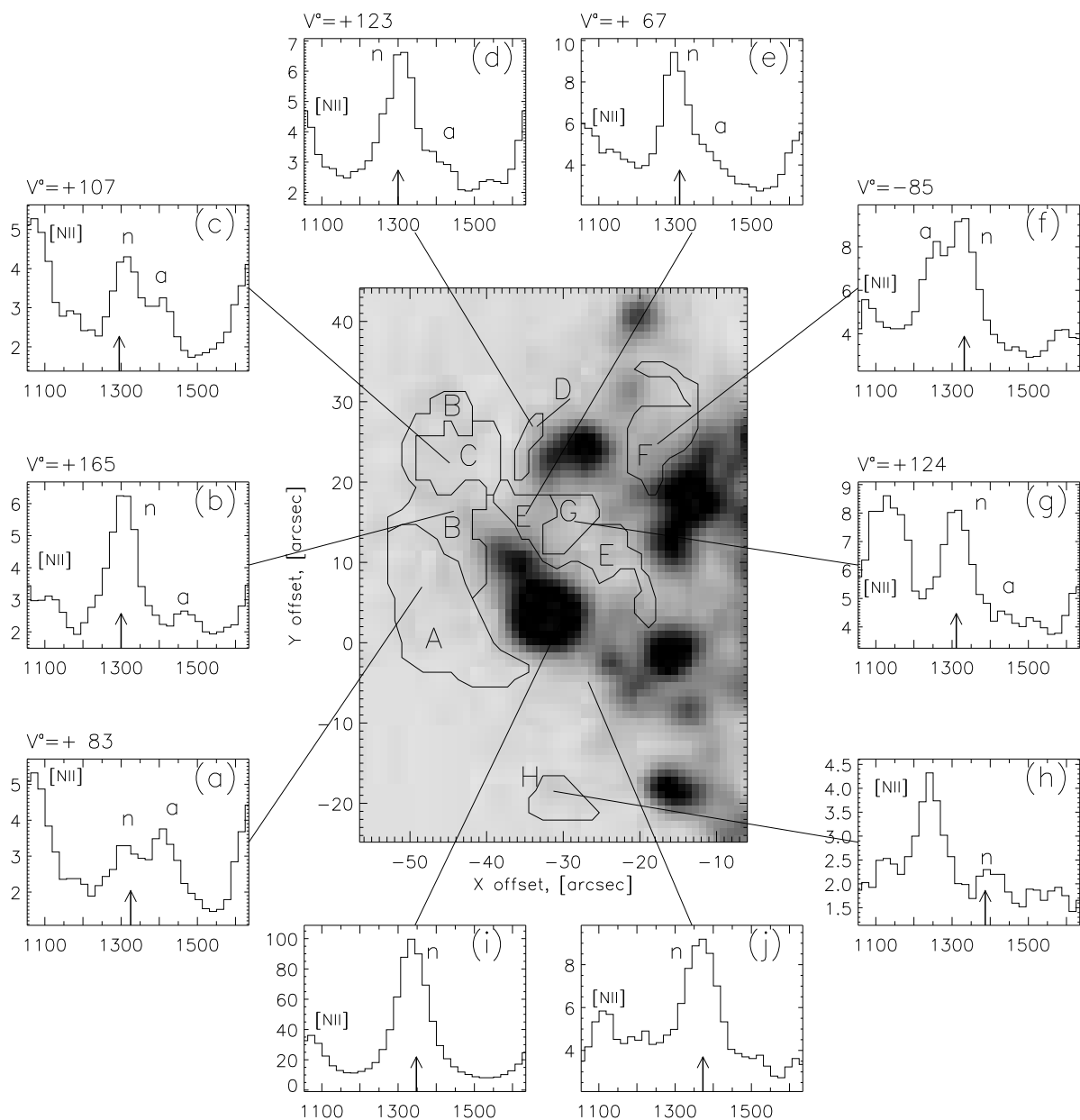


Рис. 6.11 $H\alpha$ - изображение "отрога" в NGC 1084, построенное с помощью сканирующего ИФП. Показаны примеры профилей эмиссионных линий. В каждом спектре по горизонтали отложены лучевые скорости $H\alpha$, стрелочка отмечает величину средней скорости вращения. Нормальный и аномальный компоненты отмечены как "n" и "a", линия [NII] λ 6583 помечена как "[NII]". Над каждым спектром указана скорость аномального компонента $H\alpha$.

6.5.2 Аналоги в других спиральных галактиках

Очевидно, что если пекулярная кинематика NGC 1084 связана с процессами современного звездообразования, то похожие крупномасштабные высокоскоростные движения ионизованного газа должны наблюдаться и в других дисковых галактиках. Проблема в том, что для их обнаружения требуются трудоемкие наблюдения методом панорамной спектроскопии областей низкой поверхностной яркости. Так, в ходе обзора GNASP с помощью сканирующего ИФП на телескопах диаметром 1.6-м и 1.9-м были построены поля скоростей ионизованного газа для 203 спиральных и неправильных галактик. Некоторые из объектов выборки GNASP наблюдались нами на 6-м телескопе. Сравнение данных показывает, что в большинстве случаев в GNASP не детектируются диффузное окружение областей HII, сравнимое по яркости с тем, где в NGC 1084 наблюдались пекулярные движения. Так что массовые исследования этого феномена еще впереди. Некоторую предварительную статистику можно получить из наблюдений выборки дисковых галактик в рамках проекта А.М. Фридмана (ИНАСАН), посвященного изучению движений газа, связанных со спиральными волнами. В работе Fridman et al. (2005) нами представлены результаты наблюдений на 6-м телескопе с ИФП в линии $H\alpha$ 15 галактик типов Sa–Sc. В пяти из них, т.е. в 1/3 всей выборки были выделены области высокоскоростных движений явно не связанные с динамикой спиральной структуры. Кроме уже описанной выше NGC 1084, это IC 1525, NGC 2964, NGC 3893 и NGC 6643. Часто здесь наблюдается второй компонент эмиссионных линий, говорящий о наличии не менее двух подсистем ионизованного газа на луче зрения. Как и в NGC 1084, пекулярные области расположены между яркими областями HII и возможно связаны с газом, выброшенный из комплексов звездообразования. Краткое описание наблюдаемых характеристик этих областей дается ниже.

IC 1525. После вычитания средней кривой вращения на поле остаточных скоростей заметно несколько областей, размером до 2 кпк, в которых проекция некруговых скоростей превышает 50 км/с. В области с координатами ($r = 28''$, $PA = 190^\circ$) остаточные скорости составляют +50... + 80 км/с, в областях ($r = 33''$, $PA = 34^\circ$), ($r = 22''$, $PA = 105^\circ$) и ($r = 35''$, $PA = 75^\circ$) они отрицательны: –40... – 70 км/с. Как и в NGC 1084, отношение $[NII]/H\alpha$ здесь увеличивается в 1.5 – 2 раза в сравнении с ближайшей окрестностью этих аномальных областей. В области ($R = 26''$, $PA = 254^\circ$) относительная интенсивность $[NII]$ не меняется, но $FWHM$ контура линии $H\alpha$ составляет 200 – 220 км/с, а остаточные скорости достигают –80 км/с. Все 5 областей аномальных скоростей расположены между яркими HII-областями и пространственно не связаны со спиральными рукавами.

NGC 2964. Между ядром и спиральным рукавом на $r = 5 - 12''$ к северу от ядра профиль линии $H\alpha$ имеет четко выраженную двухкомпонентную структуру. Основной компонент близок к средней скорости вращения, второй компонент часто сравнивается с ним по интенсивности и смещен на ~ 150 км/с в красную сторону. В соседних точках у профиля $H\alpha$ часто появляется красное крыло. Размер аномальной области 1–1.5 кпк.

NGC 3893. Галактика образует пару с NGC 3896, без следов явного взаимодействия. В области ($r = 43''$, $PA = 45^\circ$) с внутренней стороны спирального рукава, профиль линии $H\alpha$ имеет двугорбую структуру, второй (некруговой) компонент смещен в красную сторону на +50 км/с. Размер пекулярной области ~ 0.5 кпк, располагается между яркими регионами HII.

NGC 6643. В $12''$ к северо-западу от ядра, между яркими областями HII, профиль $H\alpha$ имеет широкое красное крыло, что может говорить о присутствии на луче зрения второго компонента, смещенного по скорости на 100 – 200 км/с. Размер аномальной области – около 1 кпк.

Основные результаты главы 6

- Изучена кинематика гигантской биполярной туманности S3 вокруг звезды WO в галактике Местной Группы IC 1613. Впервые удалось измерить скорость расшире-

ния обоих “пузырей”, составляющих туманность (диаметром около 110 и 220 пк) и оценить возраст ионизованной структуры. Необычная морфология туманности и объясняется тем, что звезда сформировалась в плотной газовой стенке на краю суперкаверны III, так что звездный ветер прорывался в двух направлениях из плотного слоя газа. Последующий анализ данных радионаблюдений галактики на телескопе VLA подтвердил это предположение.

- Изучена система оболочек нейтрального и ионизованного газа, связанных с единственным комплексом современного звездообразования в IC1613. Исследована их кинематика, уточнены скорости расширения ионизованных оболочек. Показано что большинство малых (диаметром менее 300 пк) оболочек сформировалось под действием современного звездообразования, в то время как для объяснения гигантской каверны III, размером более 1 кпк, требуется учёт последовательного воздействия на межзвездную несколько поколений звездных группировок.
- Исследована структура, кинематика и спектр свечения ионизованного газа в уникальной синхротронной сверхоболочке в карликовой галактике Местной Группы IC 10. Показано, что вспышка Гиперновой является более правдоподобным механизмом образования этой сверхоболочки, чем принятая ранее модель вспышки десятка сверхновых.
- Методами панорамной и длиннощелевой спектроскопии исследована яркая протяженная туманность в изолированной линзовидной галактике NGC 4460. Современное звездообразование здесь сосредоточено в компактной области диска радиусом около 1 кпк. Наблюдаемые параметры туманности объясняются выбросом ионизованного газа над плоскостью галактики, вызванным центральной вспышкой звездообразования. Характеристики галактического ветра в NGC 4460 (скорость истечения, кинетическая энергия газа) в несколько раз меньше, чем для ветра в галактике NGC 253, что объясняется заметно меньшим темпом звездообразования.
- В северо-восточной стороне диска галактики NGC 1084 обнаружены две системы ионизованного газа. Первая связана с нормальным вращением в диске. Вторая – с движениями газа вокруг группы областей III со скоростями $\pm(100 - 150)$ км/с по лучу зрения. Размер пекулярной области составляет около 3 кпк. Эти движения часто сопровождаются интенсивным высвечиванием в запрещенной линии [NII] на фронтах ударных волн. Наиболее вероятная интерпретация состоит в том, что мы наблюдаем газ, выброшенный из диска в процессе звездообразования. Морфологически и кинематически схожие области обнаружены еще в четырех галактиках (IC 1525, NGC 1084, NGC 2964, NGC 3893, NGC 6643), что составляет треть выборки спиральных галактик, кинематика ионизованного газа в которых детально изучалась на 6-м телескопе САО РАН.

Основные публикации, представляющие результаты этой главы:

- Moiseev A.V. “Strong non-circular motions of gas in the spiral galaxy NGC 1084”, 2000, *Astronomy and Astrophysics*, v. 363, p. 843
- Афанасьев В.Л., Лозинская Т.А., Моисеев А.В., Блантон Е. “Гигантская биполярная оболочка вокруг WO-звезды в галактике IC1613: структура и кинематика”, 2000, *Письма в Астрономический журнал*, т. 26, с. 190
- Лозинская Т.А., Моисеев А.В., Афанасьев В.Л., Вилкотс Э., Госс М. “Межзвездная среда вокруг WO звезды в галактике IC 1613: новые наблюдения в оптическом и радио диапазонах”, 2001, *Астрономический журнал*, т. 78, с. 235

- Лозинская Т.А., Моисеев А.В., Подорванюк Н.Ю., “Кинематика ионизованного и нейтрального газа в комплексе звездообразования в галактике IC 1613”, 2003, Письма в *Астрономический журнал*, т. 29, с. 95
- Fridman A.M., Afanasiev V.L., Dodonov S.N., Khoruzhii O.V., Moiseev A.V., Sil’chenko O.K., Zasov A.V., “The velocity fields of spiral galaxies. I. The data.”, 2005, *Astronomy & Astrophysics*, v. 430, p. 67
- Lozinskaya T.A., Moiseev A.V., “Synchrotron Superbubble in the IC 10 Galaxy: A Hypernova Remnant?”, 2007, *MNRAS*, v. 381, p. 26L
- Лозинская Т.А., Моисеев А.В., Подорванюк Н.Ю., Буренков А.Н., “Синхротронная сверхоболочка в галактике IC 10: структура, кинематика и спектр свечения ионизованного газа”, 2008, Письма в *Астрономический Журнал*, т. 34, с. 217
- Егоров О.В., Лозинская Т.А., Моисеев А.В., “Область бурного звездообразования в Irr галактике IC 10: структура и кинематика ионизованного и нейтрального газа”, 2010, *Астрономический Журнал*, т. 87, с. 316
- Moiseev A.V., Karachentsev I.D., Kaisin S.S., “Ionized gas outflow in the isolated S0 galaxy NGC 4460”, 2010, *MNRAS*, v. 403, p. 1849

Глава 7

Турбулентные движения газа в карликовых галактиках

*“Все тридцать пять миллионов солнц возникли
В единый миг и сгинут все зараз...”*

(М.А. Волошин)

7.1 Введение: дисперсия скоростей газа в областях звездообразования

Изучение газовой составляющей карликовых галактик важно и интересно по нескольким причинам. Во-первых, из-за малой глубины потенциальной ямы и отсутствия спиральных волн плотности, такие галактики являются замечательным “полигоном” для рассмотрения процессов взаимодействия молодых звездных группировок с межзвездной средой. Фотоионизационное излучение ОВ-звезд, энергия звездных ветров и взрывов сверхновых нагревают газ, формируют в газовом диске каверны, оболочки, упорядоченные истечения и хаотические турбулентные движения. Во-вторых, важно уметь правильно учитывать воздействие этих эффектов на газовую среду, чтобы из наблюдаемого распределения лучевых скоростей получить кривую кругового вращения, знание которой критически важно для изучения распределения темного вещества и функции масс карликовых галактик в рамках различных космологических тестов.

Наиболее полную и подробную информацию о структуре и кинематике межзвездной среды дают двумерные распределения параметров нейтрального и ионизованного водорода. Для некоторых карликовых галактик Местной Группы удалось сравнить кинематику HI и HII, используя диаграммы позиция-скорость, позволяющие выделить отдельные расширяющиеся оболочки (см примеры IC 10 и IC 1613 в предыдущей главе). Для более далеких объектов анализ поля скоростей и формы профилей линий $H\alpha$ и 21 см (van Eumeren et al., 2009a,b) позволяет выделить области истечения газа над галактической плоскостью. Преимуществом метода радиоинтерферометрии в линии 21 см является возможность картирования распределения HI далеко за пределами оптических дисков галактик, см. например результаты обзоров FIGGS (Begum et al., 2008), THINGS (Oh et al., 2011). Однако типичное угловое разрешение таких наблюдений ($\text{beam} = 10 - 30''$) часто дает слишком сглаженную картину и не позволяет изучить движения газа на малых пространственных масштабах. В отличие от радионаблюдений, 3D-спектроскопия в оптических эмиссионных линиях ограничена только теми областями, в которых достаточно ультрафиолетовых фотонов для ионизации газа, но зато позволяет изучать кинематику ионизованного газа с разрешением на порядок более высоким.

До недавнего времени большинство двумерных данных о кинематике газа в карликовых галактиках было получено из радионаблюдений в линии HI. Сейчас ситуация меняется. Публикуются результаты оптических исследований кинематики не только отдельных объектов, но и небольших выборок галактик (Östlin et al., 2011; Moiseev, Pustilnik

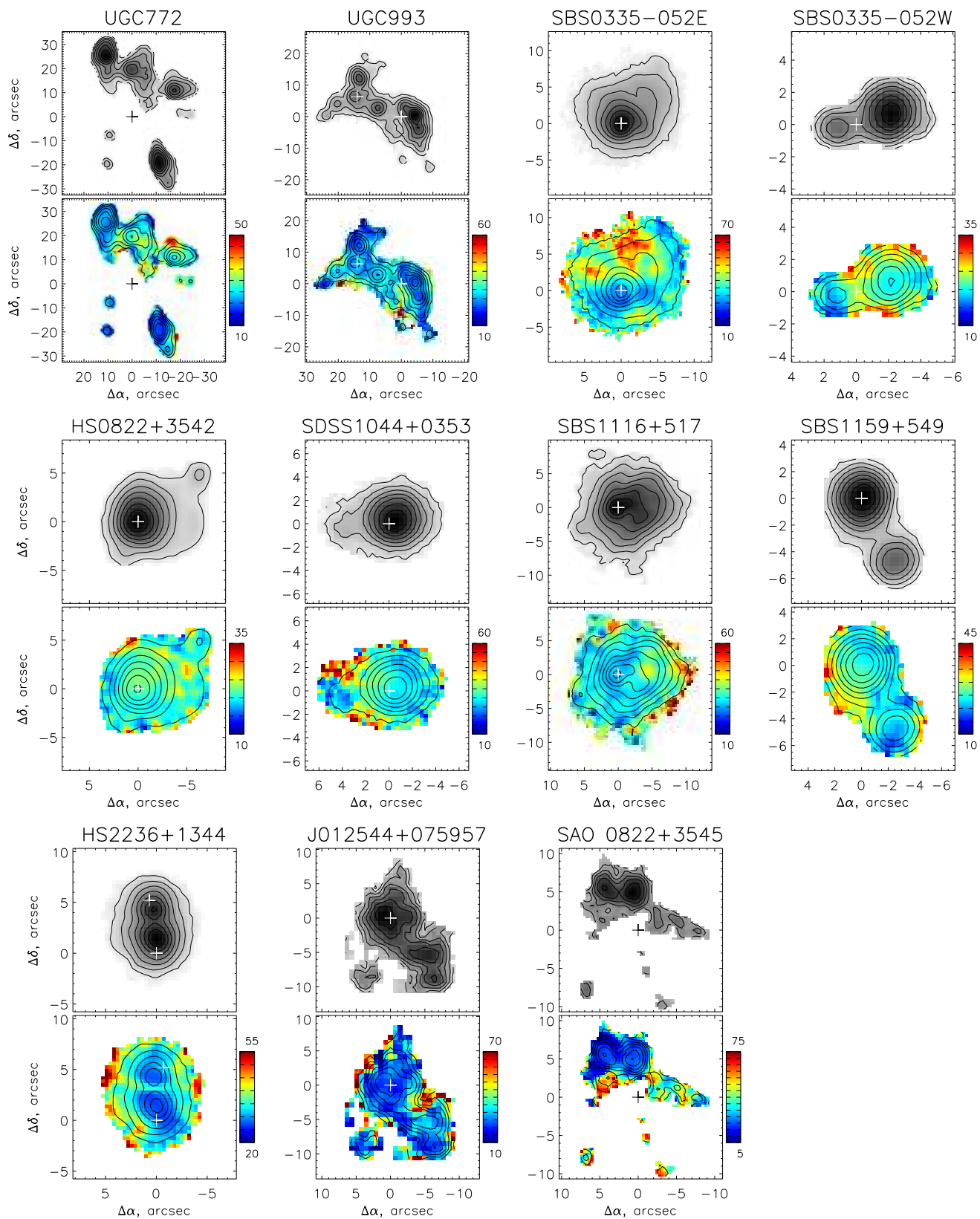


Рис. 7.1 Карты распределения интенсивности в линии H α (серые градации) и дисперсии скоростей (цветные) для выборки карликовых галактик с пониженной металличностью (Moiseev et al., 2010b). Крестиком помечен центр вращения, определенный из поля скоростей (по два для взаимодействующих объектов), шкала – в км/с. Контурами показаны уровни интенсивности H α в логарифмической шкале.

& Kniazev, 2010b). В обзоре GHASP с помощью сканирующего ИФП были построены поля скоростей ионизованного газа в двух сотнях галактик разных морфологических типов, 23 из которых относятся к типу dIrr (Epinat, Amram & Marcelin, 2008). Рост точности измерений позволяет строить и анализировать не только поля лучевых скоростей, но и двумерные карты дисперсии скоростей ионизованного газа (σ) в некоторых карликовых галактиках с интенсивным звездообразованием. Опубликованы карты σ таких галактик, являющиеся результатом наблюдений методами интегральной полевой спектроскопии (см., например, Bordalo et al., 2009; Lagos et al., 2009; Monreal-Ibero et al., 2010) или интерферометрии со сканирующим ИФП (Martínez-Delgado et al., 2007; Лозинская и др., 2006; Moiseev et al., 2010b).

Природа наблюдаемых в карликовых галактиках сверхзвуковых ($\sigma > 10 - 20$ км/с) турбулентных движений ионизованного газа является предметом давней дискуссии (см. обсуждение и ссылки в Bordalo & Telles, 2011). В общем случае, основной вклад в ширину наблюдаемых вдоль луча зрения линий ионизованного водорода в областях НII дают следующие механизмы:

1. Тепловое уширение линий, которое для типичных электронных температур в областях НII составляет $\sigma_{th} \approx 8 - 10$ км/с.
2. Турбулентные движения, определяемые суммарным воздействием на межзвездную среду звездных группировок: фотоионизационное излучение OB-звезд, кинетическая энергия вспышек сверхновых и ветра молодых звезд. Наряду с чисто хаотическими движениями газа, дающими гауссовский профиль линий, вклад от отдельных расширяющихся оболочек может приводить к появлению на суммарном профиле линий не симметричных деталей, крыльев, пиков и т.п.
3. Гравитационное уширение, вызванное вириальными движениями газовых облаков в заданном гравитационном потенциале.

До недавнего времени в литературе доминировала точка зрения, что взвешенная с яркостью средняя дисперсия скоростей ионизованного газа (σ_m) в карликовых галактиках и в гигантских областях НII определяется вириальными движениями, т.е. полной массой системы (Terlevich & Melnick, 1981; Melnick, Terlevich & Terlevich, 2000). Но в недавней работе Green et al. (2010) аргументировано показано, что в широком диапазоне светимостей галактик σ_m определяется только темпом звездообразования (т.е. потоком в линии $H\alpha$) и не коррелирует с массой. В этом случае σ_m является характеристикой механической энергии, передаваемой газу звездным ветром и вспышками сверхновых. В случае дисперсии скоростей нейтрального газа к аналогичному выводу ранее пришли Dib, Bell & Burkert (2006).

Также и на опубликованных нами картах распределения дисперсии скоростей в выборке из 11 карликовых галактик с пониженным содержанием тяжелых элементов (Moiseev et al., 2010b) четко видно, что в самих областях звездообразования дисперсия скоростей ионизованного газа понижена и растет к периферии (рис.7.1). В случае же, если бы σ определялась в основном распределением массы в дисках галактик, следовало бы ожидать иную картину – центральный максимум и уменьшение дисперсии с удалением от центра. Отметим, что речь, разумеется идет об общих трендах, поскольку мы наблюдаем картину сглаженную на масштабах нескольких десятков или даже сотен парсек, когда скрадываются локальные эффекты возмущения газа отдельными массивными звездами.

В любом случае, для решения проблем, связанных со взаимодействием звездного населения и межзвездной среды, необходимо уметь корректно интерпретировать структуры, наблюдаемые на картах дисперсии скоростей ионизованного газа. Среди немногочисленных работ на эту тему упомянем статьи Yang et al. (1996) и Muñoz-Tuñón et al. (1996), в которых детально рассматривались две гигантских области звездообразования NGC604 и NGC 588 в диске галактики M33. Авторами был предложен метод интерпретации наблюдаемых распределений точек на диаграмме ‘интенсивность линии – дисперсия скоро-

Таблица 7.1 Log of the observations

Имя	D (Мпк)	масштаб (пк/''')	M_B	дата	ИФП	T_{exp} сек	ω ''	ω (пк)
DDO 53	3.56	17	-13.21	26.02.2009	IFP501	200 × 36	3.3	57
DDO 99	2.64	13	-13.41	26.02.2009	IFP501	180 × 36	3.8	49
DDO 125	2.54	12	-14.07	18.05.2005	IFP501	180 × 36	3.0	37
DDO 190	2.79	14	-14.13	04.03.2009	IFP501	100 × 36	3.3	45
UGC 8508	2.56	12	-12.92	16.05.2005	IFP501	200 × 36	3.0	37
UGCA 92	1.80	9	-14.48	10.11.2009	FPI751	180 × 40	2.5	22
VII Zw 403	4.34	21	-13.87	29.11.2002	FPI501	300 × 36	2.2	46

стей' ($I - \sigma$) в терминах эволюции ионизованных оболочек внутри звездных группировок. Позже Martínez-Delgado et al. (2007) с помощью этих и других подобных диаграмм рассмотрели поведение ионизованного газа в трех более далеких голубых компактных галактиках.

Ниже мы подробно рассмотрим природу структур, наблюдаемых на картах дисперсии скоростей ионизованного газа. Представленный наблюдательный материал получен в ходе выполнения проекта по изучению внутренней кинематики ионизованного газа в карликовых галактиках Местного Объемы по заявке А.А. Клыпина (New Mexico State University). Для правильной интерпретации результатов проекта мы считаем необходимым прежде всего рассмотреть наиболее характерные особенности, наблюдаемые на картах σ . С целью детального анализа из общей выборки мы отобрали 7 наиболее близких галактик ($D = 1.8 - 4.3$ Мпк), в которых удалось достаточно хорошо изучить как яркие области НI, так и слабое диффузное $\text{H}\alpha$ излучение между ними. Важно, что для всех отобранных галактик опубликованы карты распределения НI, что позволяет сравнить распределения ионизованной и нейтральной фракций межзвездной среды.

7.2 Диаграммы $I - \sigma$

7.2.1 Выборка близких галактик местного объема

Наблюдения проводились в прямом фокусе 6-м телескопа CAO РАН с помощью сканирующего ИФП, установленного внутри фокального редуктора SCORPIO. Журнал наблюдений приведен в таблице 7.1. Здесь указаны: имя галактики; расстояние, угловой масштаб и абсолютная зв. величина M_B согласно Karachentsev et al. (2004); дата наблюдений; тип интерферометра; время экспозиции; итоговое угловое разрешение (ω) после сглаживания исходных данных двумерной гауссианой с целью увеличения отношения сигнал-шум в областях низкой поверхностной яркости.

На рис. 7.2 приведены изображения в линии $\text{H}\alpha$, карты σ , а также диаграммы $I - \sigma$ для всех галактик. При переводе карты потоков в линии в энергетические единицы мы принимали, что весь наблюдаемый интегральный поток от галактики должен равняться ее $\text{H}\alpha$ -светимости по литературным данным. Наши диаграммы отличаются от тех, что строились ранее (Yang et al., 1996; Muñoz-Tuñón et al., 1996; Martínez-Delgado et al., 2007) тем, что вместо пиковой интенсивности линии I_{peak} , мы используем полный поток в линии I , имеющий более ясный физический смысл (светимость с единицы площади). Поскольку карты σ маскировались по фиксированному уровню S/N , а уровень шума во внешних областях в основном определяется фоном, то левая граница облака точек на диаграммах представляет собой наклонную линию $I \sim \sigma I_{peak}$, где $I_{peak} = const$.

Синим цветом на диаграммах выделена горизонтальная полоса с относительно низкой σ и высокой поверхностной яркостью. Границы по яркости выбраны так, что выделенные области содержат 50% всей светимости галактики в линии $\text{H}\alpha$. Красным, желтым и зеленым мы отмечаем области с повышенной σ , стараясь, по-возможности, выделить оболочечные структуры. Красной чертой отмечен уровень средней дисперсии скоростей

Таблица 7.2 Параметры оболочек

галактика	размер пк	σ_m км/с	t_{kin} (млн.лет)
DDO 53 #1	240 × 240	39	3.0
DDO 53 #2	150 × 140	37	2.0
DDO 53 #3	150 × 150	37	2.0
DDO 125 #1	200 × 200	27	3.6
DDO 125 #2	160 × 120	25	3.1
UGC 8508 #1	350 × 350	40	4.2
UGCA 92 #1	180 × 130	39	2.2
UGCA 92 #2	190 × 110	31	3.1
UGCA 92 #3	90 × 90	31	1.4
UGCA 92 #4	170 × 170	40	2.1
VII Zw 403 #1	190 × 190	33	2.8

по всей галактике, взвешенный с интенсивностью в i -м пикселе: $\sigma_m = \sum \sigma_i I_i / \sum I_i$. Когда мы далее говорим о “высокой” и “низкой” дисперсии скоростей, то будем иметь в виду, соответственно $\sigma > \sigma_m$, и $\sigma \leq \sigma_m$. Остальные области с $\sigma > \sigma_m$ показаны оранжевым, а области низкой яркости и с малой дисперсией скоростей – серым.

Также на рис.7.2 приводятся карты расположения в плоскости галактики областей, выделенных на диаграммах.

7.2.2 DDO 53

Ранее кинематика ионизованного газа в этой галактике с помощью сканирующего ИФП изучалась Dicaire et al. (2008), однако им удалось измерить только распределение лучевых скоростей в ярких областях НII, в то время как наши данные включают и области слабого диффузного свечения. В распределении σ хороша видна, особенность, типичная для всех галактик выборки: минимальное значение дисперсии скоростей в центрах ярких областей НII, в то время как между комплексами звездообразования и во внешних частях галактики σ достигает максимальных значений, вплоть до 40 – 50 км/с, что однозначно указывает на сверхзвуковой характер движений. Вид диаграммы $I - \sigma$ напоминает схему, приведенную в статье Muñoz-Tuñón et al. (1996) – горизонтальная полоса (на рисунке выделенная синим) с $\sigma \leq \sigma_m$ и несколько наклонных полос со значительно большими значениями σ . Согласно интерпретации Muñoz-Tuñón et al. (1996), такие полосы должны соответствовать отдельным расширяющимся тонким оболочкам: максимальная дисперсия скоростей (или даже двойной профиль) и минимальная яркость в центре оболочки. С ростом расстояния от центра I – растет, а σ – уменьшается, пока не будет достигнут внутренний край оболочки. Пример такой оболочки дает структура, примыкающая с севера к самой яркой области НII, на диаграмме она окрашена оранжевым (центр), желтым (середина) и темно-зеленым (периферия). Эта оболочка заметна и в распределении яркости $H\alpha$. На рисунке она отмечена номером #1, ее диаметр около $d \approx 14''$ (240 пк). Для всех выделенных нами оболочек в таблице 7.2 приведены оценки размеров вдоль большой и малой осей (d_1, d_2), максимальная дисперсия скоростей σ_{max} и кинематический возраст $t_{kin} = 0.5d_{1,2}/\sigma_{max}$.

Точки из второго, менее контрастного пика на диаграмме (показан красным и зеленым) в соответствии с моделью Muñoz-Tuñón et al. (1996) должны соответствовать более молодой оболочке. На наших картах точки из этого пика в основном лежат в двух оболочках #2 и #3. Согласно таблице 7.2 их кинематический возраст действительно в полтора раза меньше, чем у оболочки #1. В то же время, точки из наиболее заметного пика на диаграмме (оранжевый цвет, высокая σ , малая яркость) не образуют связанной структуры, а соответствуют отдельным сгусткам на периферии областей НII, а также между ними.

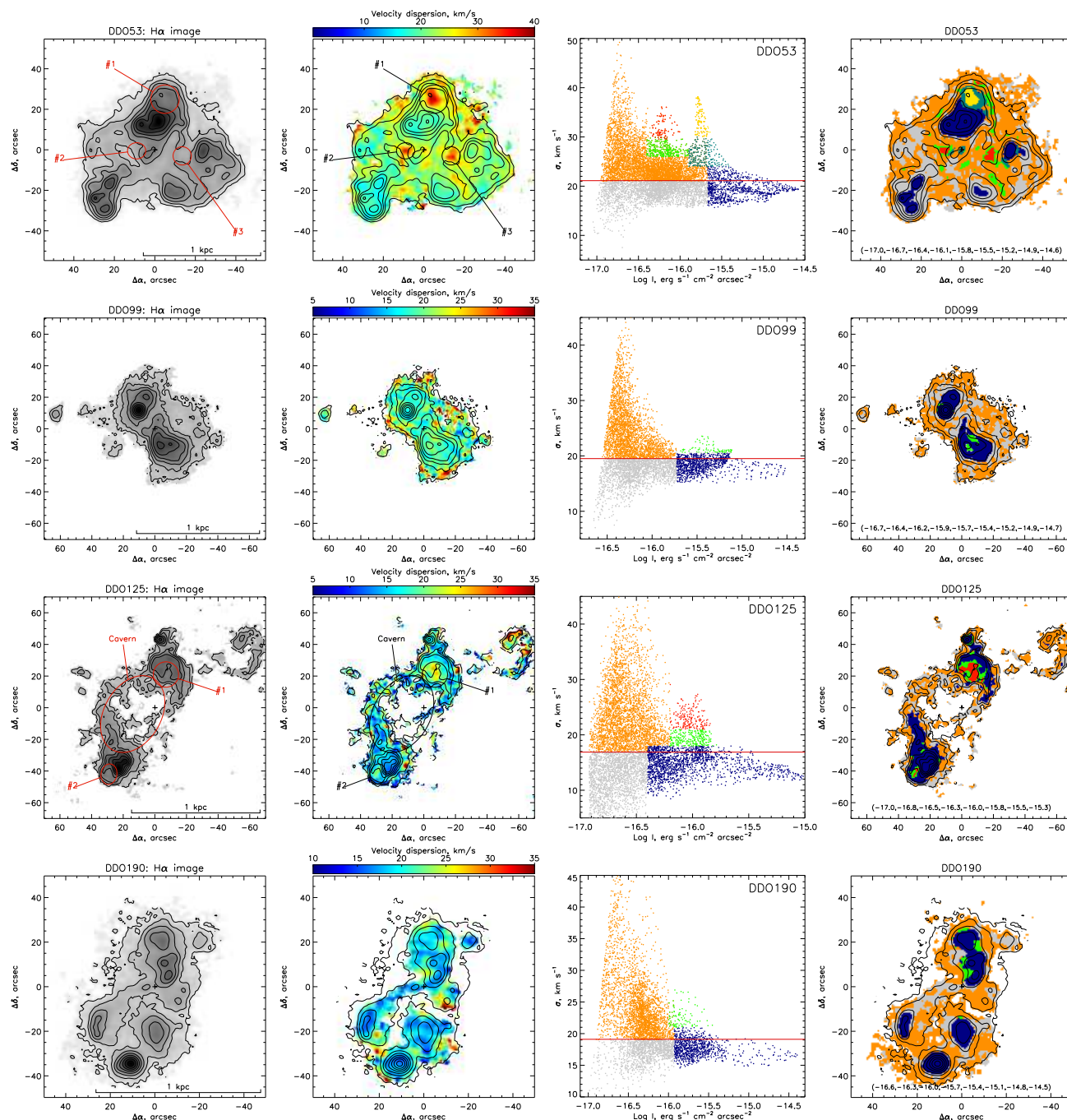


Рис. 7.2 Результаты наблюдений с ИФП, каждый ряд соответствует одной галактике. Слева направо: изображение в линии $H\alpha$ в логарифмической шкале интенсивностей; карта дисперсии скоростей с контурами изображения в $H\alpha$; диаграмма интенсивность - дисперсия скоростей. Эллипсами и номерами отмечены оболочки, параметры которых даны в таблице 7.2. Крестик показывает центр изображения в континууме. Красная горизонтальная линия отмечает величину σ_m . На крайних правых рисунках показана локализация областей, выделенных разным цветом на диаграмме $I - \sigma$. Контуров везде соответствуют изофотам в линии $H\alpha$, на правых панелях внизу указаны соответствующие величины $\lg I$.

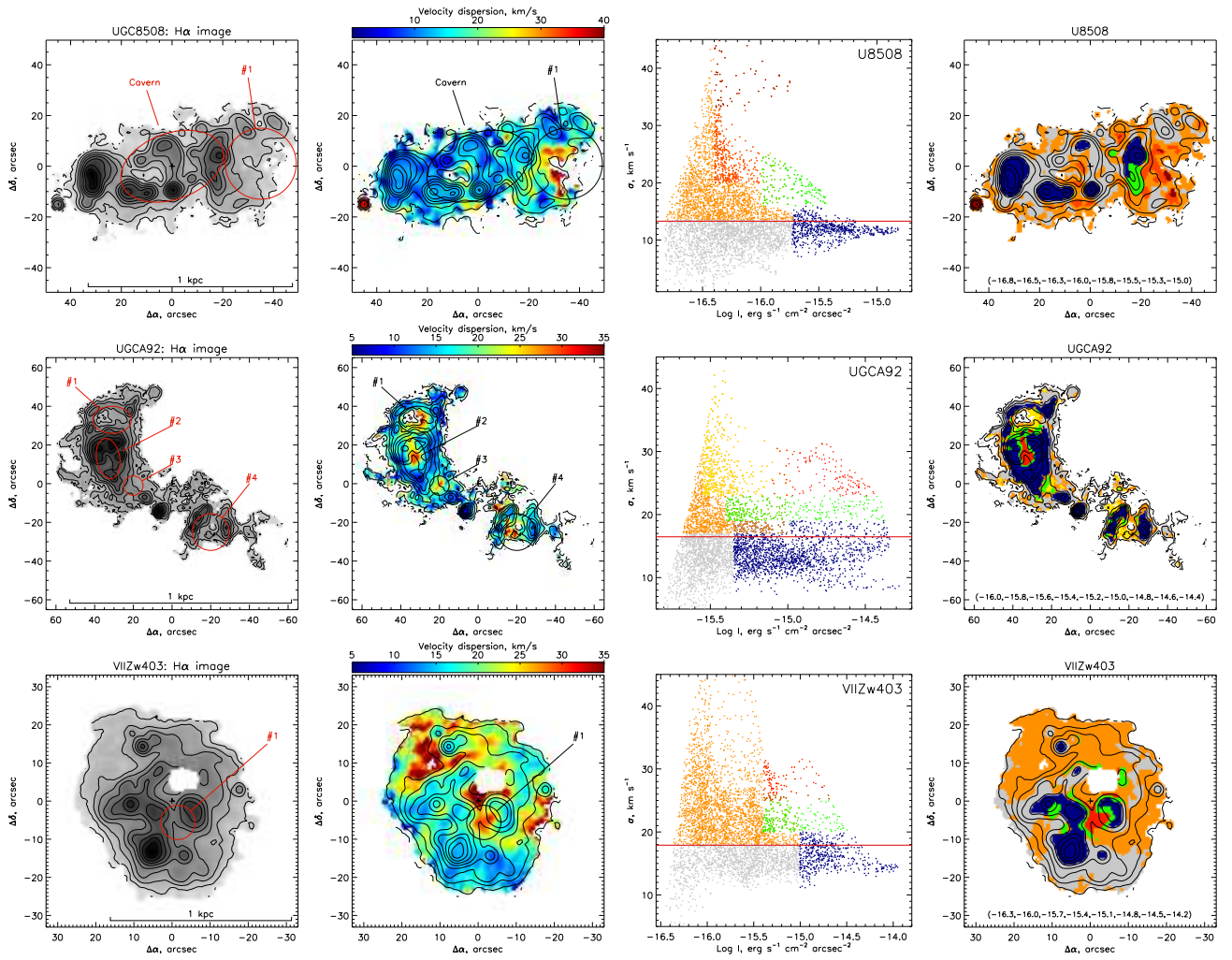


Рис. 7.2 Продолжение

7.2.3 DDO 99

Диаграмма $I - \sigma$ для DDO 99 имеет более простой вид – здесь нет выраженных деталей, кроме горизонтальной полосы и широкой треугольной области с повышенной σ . Некоторым намеком на возможную оболочку является лишь небольшое облако точек на диаграмме с $\lg I > 32.7$, $\sigma > 21$ км/с (показано зеленым). На карте галактики эти точки в основном сгруппированы на краю южной области звездообразования, размер этой возможной оболочки сравним с нашим пространственным разрешением ~ 50 пк. Остальные области повышенной σ распределены на периферии областей НII.

7.2.4 DDO 125

В распределении ионизованного газа заметно несколько оболочек и петель, связанных с двумя яркими областями звездообразования к северу и к югу от центра галактики. Эти две области НII расположены диаметрально на краю гигантской, размером около 600 пк каверны (на рис.7.2 обозначена как “Cavern”), внутри которой нет молодых областей звездообразования, ионизирующих газ. В центре каверны также понижена плотность HI (см. далее §7.4), что указывает на исчерпание и выметание газа в ходе предшествующей вспышки звездообразования. Размер каверны и особенности взаимного распределения HI и НII очень напоминают комплекс гигантских оболочек и арок в IC 1613 (§6.2). Нам не удалось найти кинематических свидетельств в пользу расширения оболочки DDO125 #1, на диаграмме $I - \sigma$ она не выделяется. В то же время, в распределении σ легко обнаруживаются более компактные оболочки DDO125 #1 и #2, (раскрашена красным и зеленым). Остальные области с повышенной σ , отмеченные на карте оранжевым цветом, ограничивают яркие области звездообразования.

7.2.5 DDO 190

Распределение дисперсии скоростей ионизованного газа и диаграмма $I - \sigma$ напоминают картину, наблюдаемую в DDO 99. Именно, точки с повышенной σ окружают яркие области НII, дисперсия скоростей в которых сравнима с σ_m . Слабым намеком на оболочку (в терминах модели Muñoz-Tuñón et al., 1996) здесь можно считать только несколько малоконтрастных пиков дисперсии скоростей вокруг вытянутой области НII в северной части галактики. Эти возможные оболочки, размер которых сравним с пространственным разрешением, отмечены на диаграмме зеленым цветом.

7.2.6 UGC 8508

Картина, во многом сходная с предыдущими объектами: минимум дисперсии скоростей внутри областей НII, окруженных диффузным газом с повышенной σ . Кроме того, на диаграмме $I - \sigma$ выделяется наклонная полоса, которая, согласно Muñoz-Tuñón et al. (1996), должна соответствовать оболочке.

Действительно, большинство точек из этой полосы (отмеченные красным и зеленым) сосредоточены внутри гигантской дуги из областей НII на краю западной части диска ионизованного газа. Морфологически и кинематически это напоминает половинку незамкнутой расширяющейся оболочки диаметром около 350 пк. Кинематический возраст этой оболочки, обозначенной как UGC 8508 #1, составляет около 4 млн. лет (таб. 7.2).

В работе Warren et al. (2011) показано, что в восточной половине галактики имеется полость в распределении HI диаметром около 550 пк, так что яркие области НII располагаются по ее границе. Однако по кинематике ионизованного газа эта область (отмеченная на рисунке как “Cavern”) почти не выделяется – дисперсия скоростей мала, за исключением нескольких пятен с повышенной σ в самом центре этой полости, там где почти нет эмиссии $\text{H}\alpha$. Их трудно интерпретировать как отдельную оболочку, скорее всего речь идет о росте турбулентных скоростей на границе областей НII.

В правой верхней части диаграммы $I - \sigma$ интересна группа точек, образующая 'горизонтальную последовательность', так как здесь поверхностная яркость заметно больше, чем для остальных точек с большой дисперсией скоростей ($\sigma = 35 - 40$ км/с). Все точки, отмеченные на нашей схеме кирпичным цветом, группируются внутри одной области III на восточном краю диска. Ее размер совпадает с $FWHM$ звездных изображений, т.е. пространственно она не разрешается. Профиль линии $H\alpha$ имеет здесь четко выраженную двухпиковую структуру с расстоянием между пиками около 80 км/с (рис.7.3). Сперва мы предположили, что здесь находится остаток вспышки сверхновой (см. далее обсуждение S8 в IC1613). Но пока отосланная статья проходила рецензирование, мы провели спектральные наблюдения этого объекта с прибором SCORPIO-2. Полученный спектр разительно отличается от ожидаемого для остатка сверхновой (рис. 7.4). Здесь видны мощные линии бальмеровской серии, а также достаточно яркие линии He I и He II, что характерно для эмиссионных звезд. Звезда отличается огромным значением эквивалентной ширины эмиссий $EW(H\alpha) = 770\text{\AA}$, причем линия $H\alpha$ имеет широкие крылья, соответствующие гаусс-компоненту с $FWHM \approx 2030$ км/с. В приложении к статье Moiseev & Lozinskaya (2012) мы приводим дополнительные аргументы в пользу того, что спектр принадлежит уникальной звезде – яркой голубой переменной (luminous blue variable =LBV).

7.2.7 UGCA 92

Здесь наблюдается наиболее заметная асимметрия в распределении ионизованного газа относительно центра среди всех галактик выборки. На изображении в линии $H\alpha$ заметно нескольких оболочек и незамкнутых арок, большинство из которых связано с ярчайшим комплексом звездообразования в восточной части галактики. Пять областей III образуют замкнутую вытянутую петлю, в центре которой наблюдается максимум в распределении σ . На диаграмме $I - \sigma$ можно выделить широкую наклонную полосу (показана зеленым и красным цветами), точки которой лежат внутри этой оболочки. В центре, где дисперсия скоростей максимальна, а интенсивность минимальна, профили линии $H\alpha$ имеют заметное правое крыло, так что их удается разложить на два компонента – более интенсивный синий и в 1.5-2 раза более слабый красный компонент (см. рис. 7.3). Разделение между компонентами составляет $\Delta V = 45 - 57$ км/с и уменьшается от центра к краям. Наблюдаемые особенности свидетельствуют о том, что мы имеем дело с оболочкой (обозначена как UGCA 92 #2), расширяющейся со скоростью $v_{exp} = \frac{1}{2}\Delta V \approx 30$ км/с. В распределении дисперсии скоростей легко выделяются еще три расширяющиеся оболочки, близкие по размеру и возрасту.

7.2.8 VII Zw 403

Мы используем переобработанные данные, ранее представленные в статье Лозинская и др. (2006). Пустое пятно вблизи центра вызвано маскированием следа от яркого блика. VII Zw 403 – один из наиболее хорошо описанных в литературе объектов нашей выборки. Согласно Lynds et al. (1998) возраст последней вспышки звездообразования здесь составляет 4–10 млн. лет, что близко к оценкам кинематического возраста для оболочек, связанных с яркими областями звездообразования (не моложе 3–4 млн. лет, согласно Лозинская и др., 2006). В самих областях III дисперсия скоростей ионизованного газа мала: $\sigma < \sigma_m = 18$ км/с. На диаграмме $I - \sigma$ уверенно выделяется наклонная полоса (отмечена зеленым и оранжевым), которая, согласно модели Muñoz-Tuñón et al. (1996), должна указывать на расширяющуюся оболочку. Распределение точек на карте галактики показывает, что эта оболочка (VII Zw 403 #1) располагается между яркими областями III в центре галактики и примыкает к области 4, согласно нумерации Lynds et al. (1998). Кинематический возраст оболочки совпадает с приведенными выше оценками Лозинская и др. (2006). Остальные области повышенной дисперсии скоростей расположены на периферии областей III и во внешних частях диска ионизованного газа. Кинематику газа здесь сложно описать в терминах отдельных оболочек. Так, несколько пятен с высокой

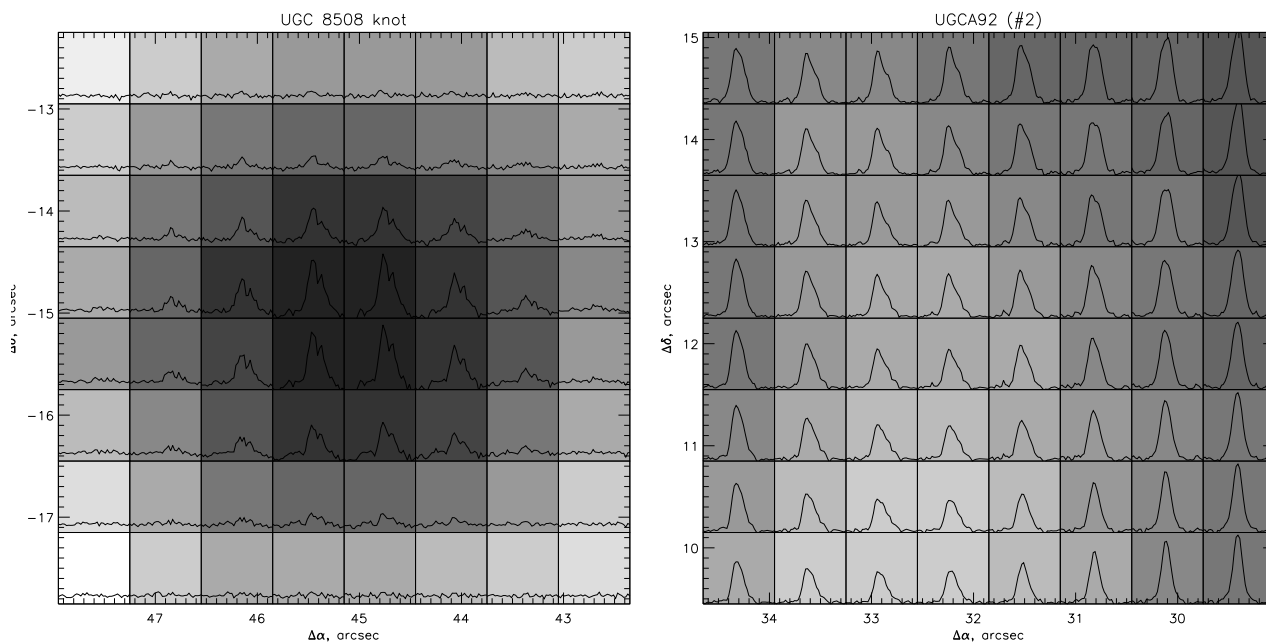


Рис. 7.3 Области, в которых профили эмиссионной линии имеют двухкомпонентную структуру, показанные на фоне распределения яркости в $H\alpha$: UGC 8508 (слева) и UGCA 92 (справа)

дисперсией скоростей в северной части галактики, скорее всего, связаны с эмиссионными дугами относительно низкой поверхностной яркости, являющимися результатом воздействия на межзвездную среду звездного населения с возрастом $t \approx 10$ млн. лет, сформировавшегося на раннем этапе последней вспышки звездообразования (Silich et al., 2002; Лозинская и др., 2006).

7.3 Влияние пространственного разрешения

Ранее Yang et al. (1996) и Muñoz-Tuñón et al. (1996) обсуждали и интерпретировали диаграммы $I - \sigma$, построенные для гигантских комплексов звездообразования в близкой галактике M33. Пространственное разрешение этих наблюдений $\omega \approx 3.5$ пк. Мы же изучаем более далекие галактики со значительно более грубым разрешением (последняя колонка в таблице 7.1). При этом теряется информация о мелкомасштабной кинематике газа. Насколько серьезно это может отразиться на виде диаграмм $I - \sigma$ и распределении дисперсии скоростей? С целью анализа влияния эффекта пространственного разрешения на наблюдаемую кинематику мы рассмотрели две близкие и хорошо изученные карликовые иррегулярные галактики Местной Группы: IC 10 и IC 1613. Обе галактики наблюдались нами ранее на 6-м телескопе с помощью сканирующего ИФП (глава 6). Полный размер областей, охваченных современным звездообразованием, составляет в них около 1 кпк, так же как и в рассмотренных выше галактиках (далее – ‘основная выборка’). Пространственное разрешение данных, полученных в линии $H\alpha$ ионизованного водорода составляло 5–8 пк.

Чтобы имитировать эффект низкого разрешения исходные кубы данных IC 10 и IC 1613 сглаживались с помощью двумерных гауссиан, а после бинировались, так что результирующий размер пикселя был $5''.6$, а угловое разрешение составило $11''$ (40–43 пк). Сглаженные данные показывают, как примерно выглядели бы эти галактики при наблюдениях с разрешением $\omega_{smo} \approx 40$ пк, т.е. в тех же условиях, что и объекты основной выборки. На рис. 7.5 показаны исходные и сглаженные изображения обеих галактик в линии $H\alpha$, а соответствующие диаграммы $I - \sigma$ приведены на рис. 7.6 и 7.7.

На диаграммах $I - \sigma$, построенных по исходным данным, прослеживается тонкая структура, отражающая информацию о движениях газа на масштабах в несколько десятков парсек. Разумеется, в сглаженных данных она теряется, поскольку в построении

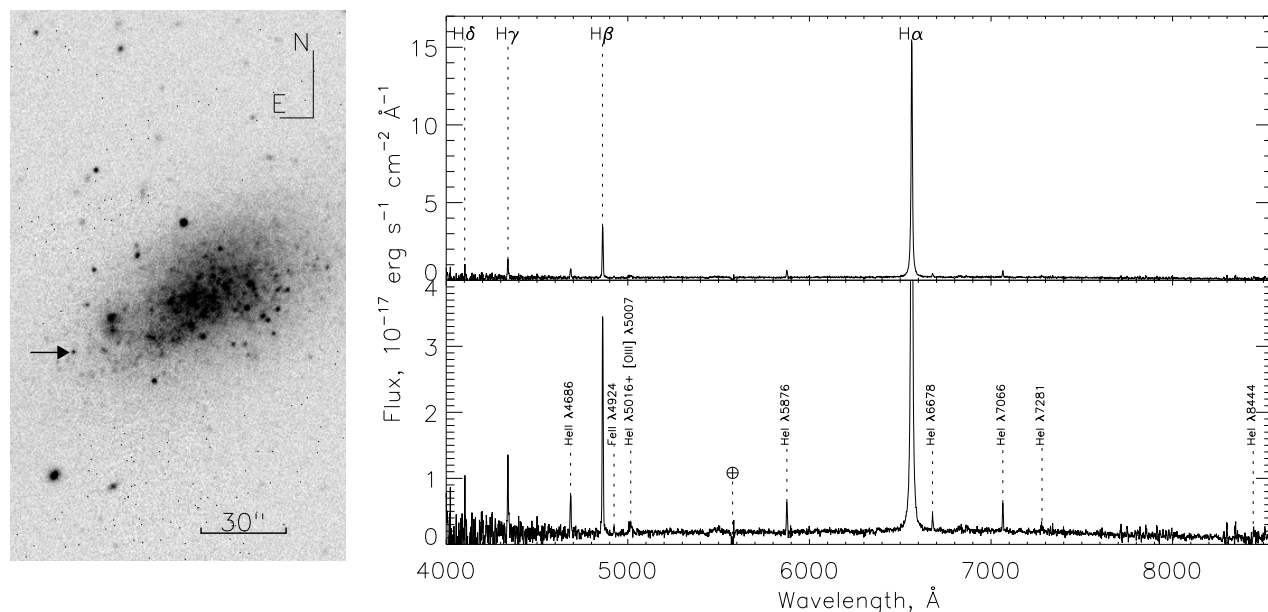


Рис. 7.4 Кандидат в LBV в UGC 8508. Слева – изображение в фильтре r из SDSS DR8, звезда отмечена стрелочкой. Справа – спектр звезды в двух вариантах шкалы интенсивностей, показаны основные эмиссионные линии.

соответствующих диаграмм участвует значительно меньше точек. Подробное рассмотрение диаграмм и карт распределения σ позволяет сделать следующие выводы:

- При сглаживании заметно (в несколько раз) уменьшается наблюдаемый диапазон поверхностной яркости I за счет ‘размазывания’ компактных ярких областей НII. Особенно хорошо это заметно в случае IC10 (рис. 7.6).
- Аналогично, почти в два раза уменьшается наблюдаемый разброс σ за счет усреднения мелкомасштабных возмущений. В то же время, сглаживание почти не влияет на величину σ_m , поскольку в рассматриваемых случаях изменения лучевой скорости по полю галактики внутри элемента разрешения малы по сравнению с величиной турбулентных скоростей.
- Распределение точек на диаграмме $I - \sigma$ сохраняет прежнюю ‘треугольную’ форму – горизонтальная полоса с $\sigma \leq \sigma_m$ (выделено синим) и области малой I с высокой дисперсией скоростей. Заметно также, как с ухудшением разрешения отдельные области с высокой σ на периферии НII областей сливаются в единую структуру, окаймляющую области звездообразования. Именно эту картину мы часто видим в галактиках основной выборки.

Крупномасштабные кинематически выделенные структуры остаются заметными и на сглаженных изображениях. В IC10 это синхротронная сверхоболочка выделяющаяся повышенной дисперсией скоростей. В §6.3 было показано, что эта оболочка вероятно является остатком грандиозной вспышки гиперновой, на месте которой сейчас наблюдается рентгеновский источник IC10 X-1. В IC1613 прежде всего заметен оболочечный комплекс в восточной части области звездообразования (красный и оранжевый цвет на рис. 7.7). Здесь профили линии $H\alpha$ имеют четкую двухпиковую структуру с разностью скоростей между компонентами $\Delta V \approx 100$ км/с. В §6.2.2 мы рассмотрели $P - V$ диаграммы для этой области и показали, что наблюдаемые особенности кинематики связаны с воздействием на межзвездную среду расширяющихся и, возможно, сталкивающихся оболочек ионизованного газа. Среди галактик основной выборки аналогичные кинематические детали на сходных пространственных масштабах обнаружены только в UGCA92. Второй интересной особенностью, выделяющейся на диаграммах $I - \sigma$ в IC1613, является самая

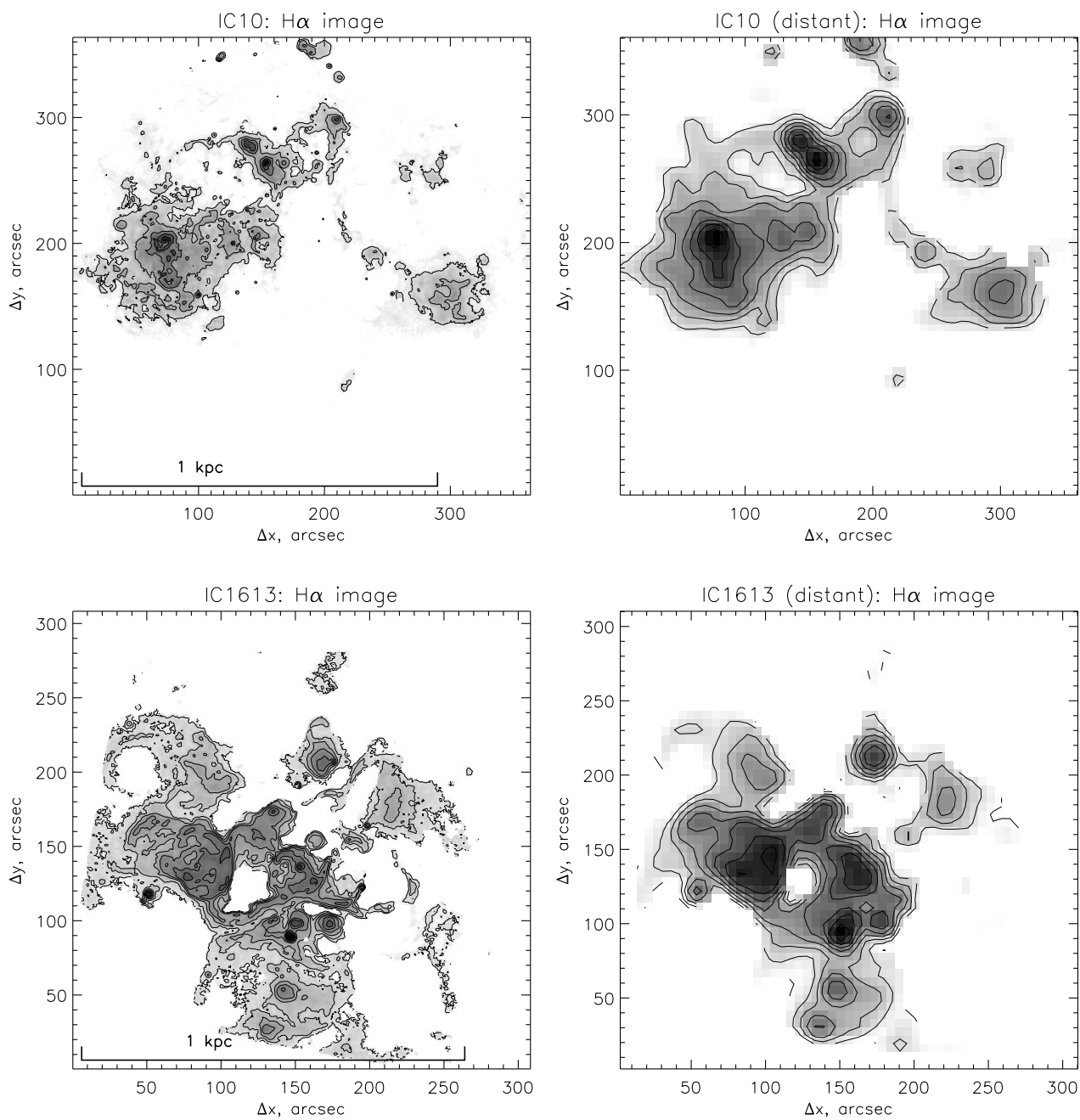


Рис. 7.5 Изображения в линии в H α галактик IC 10 (вверху) и IC1613 (внизу). Слева – оригинальные результаты наблюдений со сканирующим ИФП, справа – сглаженные до пространственного разрешения ~ 40 пк

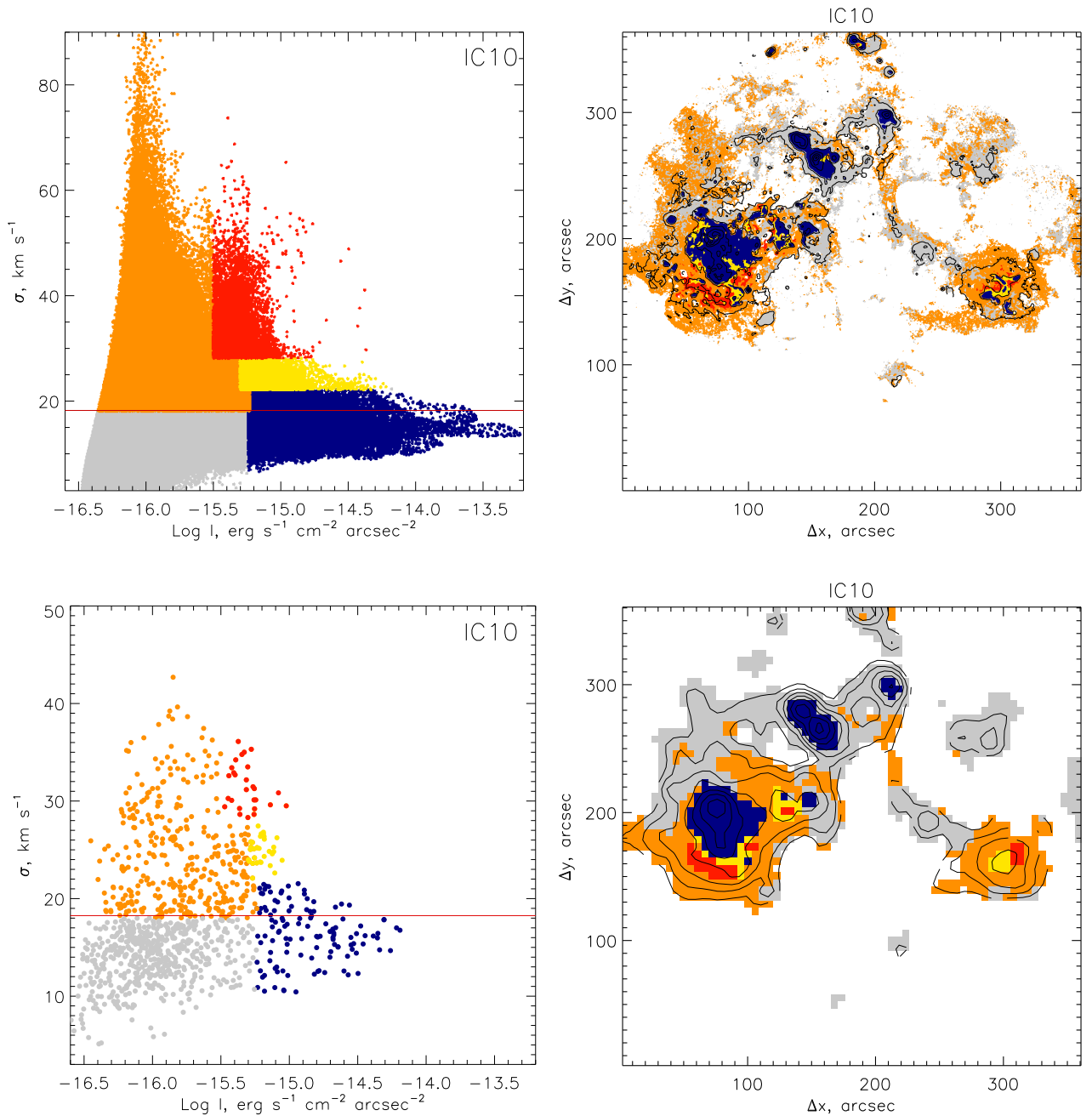


Рис. 7.6 IC10: исходные данные (вверху) и smoothed (внизу). Слева показаны диаграммы $I - \sigma$. Красная горизонтальная линия отмечает величину средневзвешенной по яркости дисперсии скоростей σ_m . Справа показана локализация областей, выделенных разным цветом на диаграмме $I - \sigma$. Контуры соответствуют изофотам в линии H α .

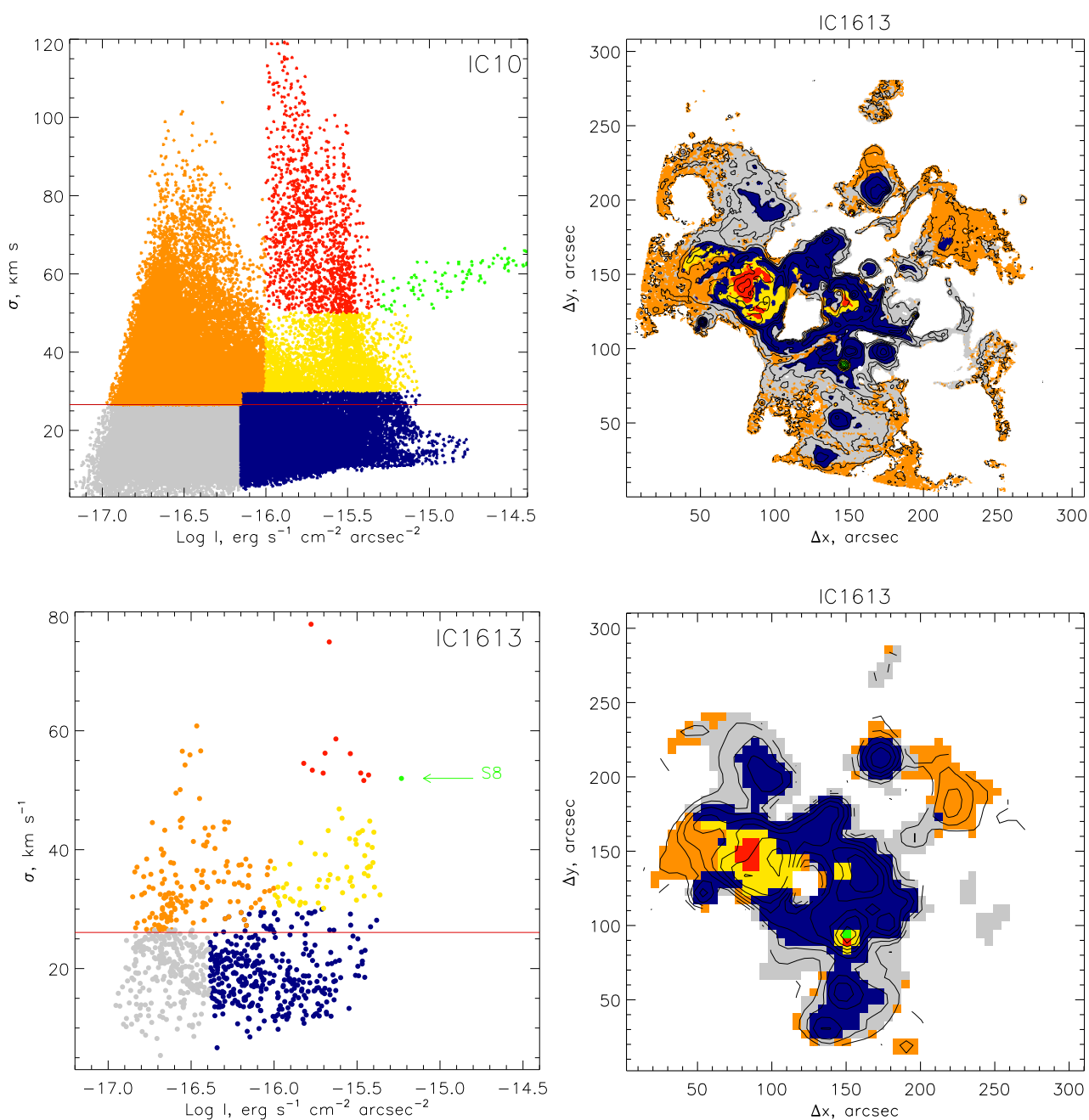


Рис. 7.7 Тоже, что на рис 7.6, но для IC1613. Стрелка с надписью показывает на точку, соответствующую известному остатку сверхновой.

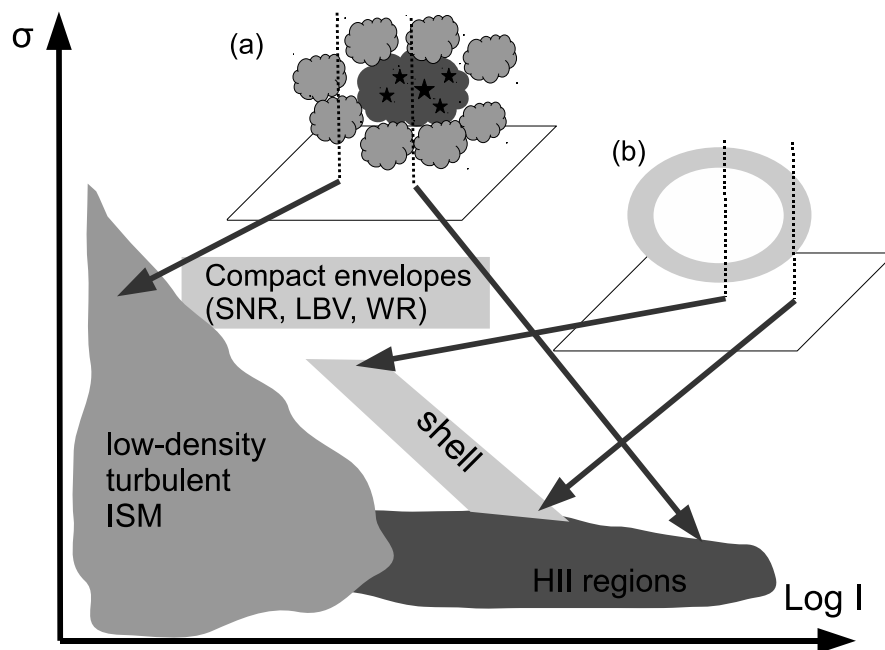


Рис. 7.8 Схема, поясняющая расположение точек на диаграмме $I - \sigma$. На врезках показано, как на картинную плоскость проецируется распределение яркости и дисперсия скоростей от областей НII, окруженных газом низкой плотности со значительными турбулентными движениями (а) и от расширяющейся оболочки — (б). Пунктиром показаны лучи зрения, проецирующие на картинную плоскость разные пространственные области.

яркая в линии $H\alpha$ компактная область в центре поля, характеризующаяся также высокой дисперсией скоростей ($\sigma \approx 50 - 60$ км/с). На рис.7.7 она отмечена зеленым цветом. Это — остаток сверхновой S8, отличающейся необычно высокой светимостью одновременно в рентгеновском (признак молодого остатка) и в оптическом (признак старого остатка) диапазонах (Lozinskaya et al., 1998). В галактиках основной выборки сходным по кинематике объектом оказалась туманность вокруг найденного нами кандидата в LBV в UGC 8508.

7.4 Обсуждение

Во всех рассмотренных выше галактиках прослеживается четкая связь между потоком в линии $H\alpha$ и дисперсией скоростей ионизованного газа. Яркие области НII показывают малую ширину линий ($\sigma \leq \sigma_m$), с уменьшением поверхностной яркости разброс наблюдаемых величин растет, так что в большинстве областей низкой яркости дисперсия значительно превосходит среднее значение ($\sigma > \sigma_m$), хотя отдельные точки и демонстрируют малую дисперсию скоростей ($\sigma \approx 3 - 7$ км/с). В целом, вид диаграммы $I - \sigma$ для карликовых иррегулярных галактики напоминает диаграммы, построенные Muñoz-Tuñón et al. (1996) для комплексов звездообразования NGC 588 и NGC 604. Такое сходство для объектов разных масштабов не удивительно, поскольку в обоих случаях кинематика газа должна в основном определяться притоком механической энергии ветра массивных молодых звезд и множественных вспышек сверхновых, взаимодействие которых с окружающей межзвездной средой зависит от ее плотности.

Однако есть и ряд отличий между кинематическими свойствами гигантских областей НII и Irr галактиками, для иллюстрации которых мы приводим схему на рис. 7.8.

Полный размер излучающих в линии $H\alpha$ областей в NGC 588 и NGC 604 составляет не более 130–150 пк, поэтому на соответствующих диаграммах $I - \sigma$ вся область повышенной дисперсии скоростей распадается на несколько наклонных полос, которые Muñoz-Tuñón et al. (1996) идентифицируют с расширяющимися ионизованными оболочками, различающимися по возрасту. В предложенной ими схеме, которая проиллюстрирована на рис. 7.8

(врезка b), центр расширяющейся тонкой оболочки в проекции на картинную плоскость обладает малой яркостью, но большой дисперсией скоростей, определяемой скоростью расширения. С удалением от центра яркость растёт (луч зрения пересекает все более толстый слой), а σ – уменьшается, так как уменьшается проекция скорости расширения на луч зрения.

В рассмотренных галактиках картина более сложная. Здесь значительно (в 8-10 раз) больше пространственный размер областей, в которых мы изучаем движения ионизованного газа. В 5 из 7 галактик основной выборки (DDO53, DDO125, UGC 8508, UGCA 92, VII Zw 403) удалось выделить расширяющиеся оболочки размером 80–350 пк. Точки, принадлежащие этим оболочкам, также образуют наклонные полосы на диаграммах. Но большую часть точек с высокой дисперсией скоростей не удается связать с такими структурами. Это не удивительно, так как само по себе образование гигантских оболочек требует некоторых специфических условий (достаточная начальная плотность газа, одновременное начало вспышки звездообразования) и, в большинстве случаев, может быть результатом воздействия на межзвездную среду нескольких поколений звездных группировок (McQuinn et al., 2010; Warren et al., 2011).

Но может быть из-за низкого пространственного разрешения мы просто не замечаем небольших оболочек размером 5-50 пк? Проведенный анализ исходных и сглаженных данных для близких галактик IC10 и IC 1613 показывает: тот факт, что большинство областей с высокой σ не связано с расширяющимися оболочками, не может быть объяснен недостаточным пространственным разрешением. Более важным здесь является то, что точки с высокой σ , населяющие левую верхнюю часть диаграммы $I - \sigma$, принадлежат диффузному фону низкой яркости и пространственно группируются вокруг областей звездообразования и на периферии диска ионизованного газа в галактиках. Отметим, что несмотря на низкую поверхностную яркость, отношение сигнал/шум здесь достаточное для уверенного измерения σ .

Представляется, что наблюдаемое расположение точек с повышенной дисперсией скоростей ионизованного газа связано не с конкретными оболочками, а с суммарным воздействием молодых звездных группировок на межзвездную среду. Здесь фотоионизационное излучение ОВ-звезд, энергия вспышек сверхновых и ветра молодых звезд приводят к росту хаотических, турбулентных скоростей ионизованного газа. При этом менее плотный газ демонстрирует большую амплитуду скоростей, чем газ в более плотных облаках. Тот же приток энергии в среде низкой плотности обеспечивает более высокие скорости движения газа из-за зависимости скорости распространения ударной волны от плотности окружающего газа.

Поэтому при интерпретации диаграмм $I - \sigma$ карликовых галактик к тонким оболочкам, рассматриваемым Muñoz-Tuñón et al. (1996), следует добавить и более протяженные структуры: области III, окруженные коронами возмущенного газа низкой плотности, с малой поверхностной яркостью в линии $\text{H}\alpha$. Это схематично показано на рис. 7.8 (а). Когда мы смотрим на центры ярких областей III, то превалирует вклад внутренних областей как в яркость, так и в дисперсию скоростей. Но на периферии мы в основном видим высокоскоростные турбулентные движения межзвездной среды с малой плотностью и, соответственно, с высокой дисперсией скоростей. Область, занимаемая этими точками на диаграмме, имеет характерную треугольную форму из-за того, что ее правая граница определяется эффектом уменьшения наблюдаемого разброса скоростей с ростом поверхностной яркости.

Понятно, что говоря о плотности, следует иметь в виду полную плотность газа, включая не только ионизованную, но также молекулярную и нейтральную фракции. На рис.7.9 мы сравниваем распределения II и III в нескольких галактиках нашей выборки, для которых Vegum et al. (2008) и Oh et al. (2011) опубликовали карты распределения нейтрального водорода. Хорошо видно, что яркие области III располагаются там, где повышена плотность нейтрального водорода и где, соответственно, и должны быть локализованы очаги звездообразования. Разумеется, есть некоторые мелкомасштабные отклонения, в частности пики в распределении III часто смещены на несколько сотен парсек от центров

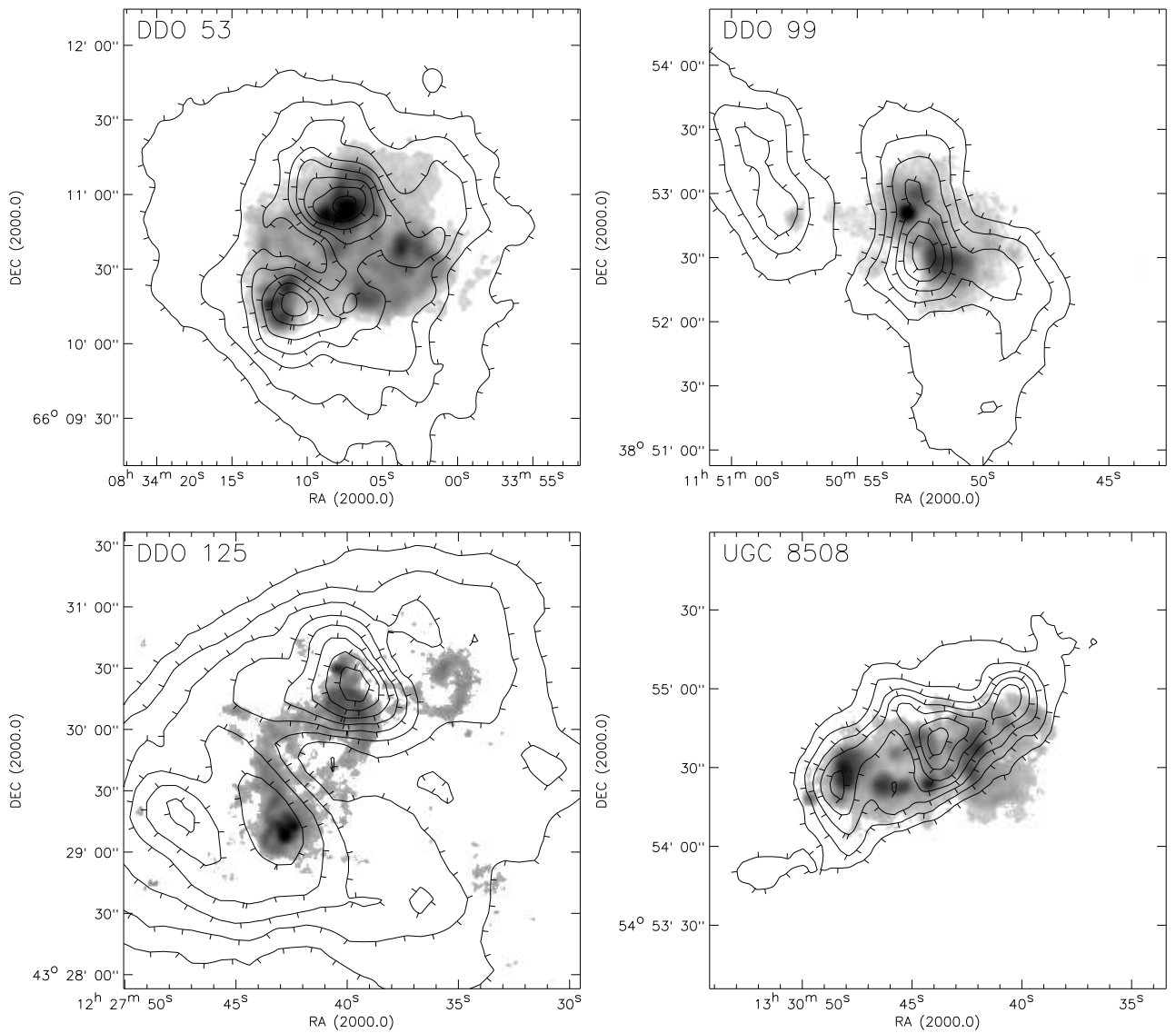


Рис. 7.9 Сравнение распределений яркости в H α (серые градации) и плотности HI (контуры). Данные по нейтральному водороду для DDO 53 приведены из обзора THING (Oh et al., 2011), для остальных галактик — из обзора FIGGS (Begum et al., 2008).

современного звездообразования. Этот эффект хорошо известен и связан как с исчерпанием газа, идущего на формирование звезд, так и с механическим воздействием молодых звездных группировок на межзвездную среду (см. обсуждение в работах Thuan, Hibbard & Lévrier (2004); Simpson et al. (2011), где приводятся карты HI для еще одной галактики нашей выборки — VII Zw 403). В некоторых случаях яркие оболочечные структуры, видимые в $H\alpha$, лежат на внутренней границе каверн в распределении HI, что связано с выметанием и исчерпанием нейтрального газа (смотри, примеры в работах Лозинская и др., 2003; Vegim et al., 2006). Сейчас становится общепринятым представление о том, что гигантские нейтральные сверхоболочки образованы несколькими поколениями звезд в течение сотен млн лет. На фоне этого продолжительного интенсивного звездообразования в плотных стенках гигантских сверхоболочек HI возникают локальные короткие (длительностью около 10 млн лет) вспышки, которые мы и наблюдаем как комплексы ионизованного газа (см. McQuinn et al., 2010; Warren et al., 2011, и ссылки в этих работах).

Таким образом, сравнение распределения HI с нашими картами HII подтверждает то, что газ в областях с высокой σ имеет низкую поверхностную и, следовательно — объемную, плотность.

В работе Thuan et al. (2004) авторы объясняют наблюдаемые особенности распределения поверхностной плотности и дисперсии скоростей HI в карликовых галактиках в рамках представлений о том, что нейтральная составляющая межзвездной среды находится в двух фазах, сбалансированных по давлению. При этом более “холодная” фаза характеризуется относительно малым пространственным масштабом, большой плотностью и малой дисперсией скоростей, а диффузная “теплая” фаза отличается повышенной дисперсией скоростей. Такие представления о *нейтральном* газе согласуются с предложенным нами объяснением состояния *ионизованной* среды карликовых галактик. Ионизованный газ низкой плотности, отличающийся высокой скоростью турбулентных движений, является своеобразным “энергетическим резервуаром”, поддерживающим высокую дисперсию скоростей теплой фазы HI.

Говоря о балансе давлений разных газовых фаз, следует иметь в виду, что ранние представления о доминирующей роли теплового давления являются слишком упрощенным взглядом на состояние межзвездной среды, в которой большую роль играют турбулентное давление (Burkert, 2006).

Вопрос о том, чем определяется дисперсия скоростей для точек ‘горизонтальной ветви’ на диаграмме $I - \sigma$, требует дальнейшего детального рассмотрения. Напомним, что речь идет о ярких областях HII, для которых $\sigma \approx \sigma_m$. В работе Muñoz-Tuñón et al. (1996) эти области именуется ‘кинематическим ядром’, в согласии с моделью, предложенной Tenorio-Tagle, Muñoz-Tuñón & Cox (1993) для объяснения природы сверхзвуковой турбулентности ионизованного газа в областях звездообразования. Эти авторы считают, что средняя дисперсия скоростей ионизованного газа в ‘кинематическом ядре’ напрямую связана с вириальными движениями, т.е. примерно равняется дисперсии скоростей звездного населения. Последняя, в свою очередь, определяется в основном массой и размером области звездообразования. Позже эта модель использовалась Melnick, Terlevich & Terlevich (2000) для объяснения физической природы корреляции средней дисперсии скоростей газа σ_m с полной светимостью в линии $H\beta$. Следует, однако, заметить, что модель Tenorio-Tagle et al. (1993) описывает эволюцию изолированных отрелаксировавших сфероидальных звездных систем. Поэтому она неприменима к поведению газа во всей карликовой галактике, области звездообразования которой находятся в гравитационном потенциале диска и темного гало. Альтернативный взгляд на природу корреляции светимость $H\beta$ (или $H\alpha$) — σ_m дают работы, в которых аргументируется, что основной вклад в наблюдаемую дисперсию скоростей ионизованного газа в галактиках различных типов дает современное звездообразование (Dib et al., 2006; Green et al., 2010).

В заключение, отметим еще одну интересную особенность, обнаруженную на диаграммах $I - \sigma$ в галактиках IC 1613 и UGC 8508. Речь идет о точках, группирующихся в горизонтальную полосу с относительно большой дисперсией скоростей $\sigma > 30 - 50$ км/с. Эти

точки хорошо отделяются от остальных областей на диаграмме и принадлежат изолированным остаткам вспышек сверхновых или иным расширяющимся туманностям вокруг молодых массивных объектов, таких как звезды Вольфа-Райе, LBV и т.д. (см. рис. 7.8). Таким образом, диаграммы $I - \sigma$ можно использовать также для поиска интересных и уникальных объектов в эмиссионных галактиках.

Основные результаты главы 7

Представлены результаты изучения турбулентных движений ионизованного газа в нескольких близких карликовых галактиках. Совместное использование диаграмм ‘поверхностная яркость – дисперсия скоростей’ ($I - \sigma$) вместе с двумерными картами дисперсии лучевых скоростей позволило выявить ряд общих закономерностей, указывающих на связь величины хаотических движений газа с процессами текущего звездообразования:

- Наблюдается четкая связь между поверхностной яркостью в линии $\text{H}\alpha$ и дисперсией лучевых скоростей: с уменьшением яркости растет разброс возможных значений σ , максимальная дисперсия скоростей наблюдается в областях малой яркости, а минимальная σ – в центрах областей III.
- В пяти галактиках (DDO53, DDO125, UGC 8508, UGCA 92 и VII Zw 403) выделены расширяющиеся оболочки ионизованного газа, размером 80 – 350 pc, являющиеся результатом коллективного действия звездных группировок на газовую среду галактик. Их кинематический возраст составляет 1–4 млн. лет, что указывает на связь с текущим звездообразованием.
- Показано, что диаграммы $I - \sigma$ могут быть полезны для поиска в близких галактиках остатков сверхновых или других компактных расширяющихся оболочек (туманности вокруг звезд WR и т.п.). Хорошей иллюстрацией и несомненным успехом методики является обнаружение уникальной звезды – кандидата LBV в галактике UGC 8508.
- Модель, ранее предложенная Muñoz-Tuñón et al. (1996) для объяснения вида диаграммы $I - \sigma$ отдельных комплексов звездообразования, требует существенного дополнения в случае карликовых галактик. Наиболее важным здесь является то, что основная часть областей с высокой дисперсией скоростей связана не с конкретными расширяющимися оболочками, а принадлежит диффузному фону низкой яркости, окружающему комплексы звездообразования. Это поведение наблюдаемых распределений σ мы объясняем наличием у гигантских областей III корон возмущенного газа низкой плотности с высокими турбулентными скоростями. Такое объяснение согласуется с современными представлениями о турбулентности в межзвездной среде.

Основные публикации, представляющие результаты этой главы:

- Martínez-Delgado I., Tenorio-Tagle G., Muñoz-Tuñón C., Moiseev A.V., Cairós L.M., “3D spectroscopy of Blue Compact Galaxies. Diagnostic Diagrams”, 2007, *Astronomical Journal*, v. 133, p. 2892 – *первые диаграммы $I - \sigma$ для карликовых галактик*
- Moiseev A. V., Pustilnik S. A., Kniazev A. Y., “Study of very metal-poor galaxies: ionized gas kinematics of nine objects”, 2010, *MNRAS*, v. 405, p. 2453 – *первое массовое картирование дисперсии скоростей ионизованного газа в выборке карликовых галактик*
- Moiseev A.V., Lozinskaya T.A., “Ionized gas velocity dispersion in the nearby dwarf galaxies: looking on super-sonic turbulent motions”, 2012, *MNRAS*, v. 423, p. 1831

Заключение

*“Срок жизни истин –
двадцать - тридцать лет, –
Предельный возраст водовозной клячи.
Мы ищем лишь удобства вычислений,
А в сущности, не знаем ничего...”*
(М.А. Волошин)

Как уже отмечалось во Введении, поток новых наблюдательных данных приводит к тому, что многие устоявшиеся представления о физике галактик меняются буквально у нас на глазах. Поэтому вполне закономерно то, что наблюдательные результаты, представленные в данной диссертации, не всегда однозначны, их подробная теоретическая интерпретация еще впереди. Автору приятно отметить, что по ряду направлений эта работа уже идет. На основе наших наблюдений, Н.Я. Сотникова и В.П. Решетников в СПбГУ разрабатывают новые динамические модели галактики Malin 1. Совместно с коллегами из ИНАСАН (С.А. Хоперсков) и ВолГУ (А.В. Хоперсков) получены первые результаты по численному моделированию новых полярных колец из списков SPRC, наблюдавшихся на 6-м телескопе САО РАН. F. Combes (Observatoire de Paris) провела первые наблюдения галактик нашего каталога в линиях молекулярного водорода, а I. Finkelman (Tel Aviv University) с коллегами используют каталог SPRC для изучения влияния окружения на формирование ГПК. По нашей заявке на радиointерферометре WSRT построена карта распределения нейтрального водорода в Объекте Хога, анализ этих данных еще только начинается. Изучение распределения дисперсии скоростей ионизованного газа в полусотне карликовых галактик, наблюдавшихся на БТА со сканирующим ИФП, подтверждает наше предположение о том, что темп звездообразования определяет величину хаотических скоростей ионизованного газа в этих объектах.

Исследования продолжаются, новые выводы еще впереди. Тем не менее, перечислим еще раз основные результаты, полученные в данной работе:

1. Разработана методика наблюдения и анализа данных, позволяющая с помощью сканирующего интерферометра Фабри-Перо картировать распределение дисперсии скоростей ионизованного газа в галактиках и эмиссионных туманностях. Предложены алгоритмы, позволяющие существенно уменьшить влияние систематических ошибок на измеряемую дисперсию скоростей.
2. Описаны методы анализа полей скоростей ионизованного газа в галактиках, включая объекты с изогнутыми дисками.
3. Описана методика измерения параметров звездной кинематики – лучевых скоростей и дисперсии скоростей методом кросс-корреляций.
4. Предложен алгоритм анализа полей скоростей карликовых галактик, позволяющий корректно учитывать вклад, вносимый в наблюдаемое поле скоростей гигантскими расширяющимися оболочками.
5. Обнаружено противовращение области центрального килопарсека: газовый диск NGC 3945 (по наблюдениям на 6-м телескопе САО РАН) и звездный диск в NGC

- 1316 (по данным 8.2-м телескопа VLT ESO). Этот феномен мы интерпретируем как результат относительно недавнего поглощения карликового спутника
6. Показано, что весь ионизованный газ в дисках галактик NGC 2551 и NGC 5631 вращается в противоположном направлении относительно звездного компонента. Приведены доказательства в пользу ударной ионизации газа в этих дисках. Аналогичная структура – компланарный со звездным противовращающийся газовый диск обнаружен в кольцевой галактике NGC 7742. Предложен сценарий формирования кольца звездообразования в этой галактике в результате недавнего взаимодействия с компаньоном или захвата спутника.
 7. Показано, что в NGC 7743 весь ионизованный газ располагается в диске, значительно наклоненном к звездному диску галактики. Угол наклона может составлять 34° или 77° , в зависимости от принятой взаимной ориентации дисков. Наиболее вероятной причиной формирования такого диска мы считаем аккрецию из богатого газом окружения галактики. Основной вклад в ионизацию газа вносят ударные волны, возникающие при пересечении звездного диска газовыми облаками на наклонных орбитах.
 8. Выполнено исследование кольцевой столкновительной галактики Agr 10. Измерены скорости расширения колец звездообразования, построена самосогласованная модель галактики, объясняющая ее пекулярную структуру. Показано, что кольцевая структура сформировалась в результате нецентрального столкновения с массивным спутником 85 млн. лет назад. Обнаружен сам спутник.
 9. Изучена кинематика звезд во внутренней части Malin 1 – уникальной галактики низкой поверхностной яркости, у которой обнаружен спутник (Malin 1B), взаимодействие с которым объясняет основные морфологические особенности центральной области Malin 1 – двухрукавную спиральную структуру, бар и внешнюю однорукавную спираль. А галактика SDSS J123708.91 + 142253.2, скорее всего, ответственна за формирование протяженной оболочки низкой поверхностной яркости, возникшей вследствие лобового столкновения с Malin 1.
 10. Выполнено детальное исследование структуры и кинематики сейфертовской галактики Mrk 334. На глубоких изображениях обнаружены протяженные приливные структуры в виде петель и арок, наблюдаемых на расстояниях от 2 до 40 кпк от центра – результат недавнего взаимодействия с достаточно большим компаньоном ($1/3 - 1/5$ от массы основной галактики). В диске Mrk 334 найдена каверна, заполненная ионизованным газом низкой плотности. Мы интерпретируем эту область как место недавнего (около 12 млн. лет назад) пролета остатков разрушенного спутника через газовый диск основной галактики.
 11. В Agr 212 обнаружены две кинематически различные подсистемы вращающегося газа – внутренний диск и внешние эмиссионные филаменты. Вращение внешней подсистемы происходит в плоскости, находящейся под значительным углом к звездному диску, достигающим 50° на $r \approx 6$ кпк. Свидетельством взаимодействия между газом полярного кольца и внутреннего диска являются ударные фронты в центральных областях галактики. На больших расстояниях от центра ионизованный газ уже не обнаруживается, но мы предполагаем, что диск нейтрального водорода продолжает изгибаться и приближается к плоскости, полярной относительно внутреннего диска галактики. Наиболее вероятной причиной образования полярного кольца в Agr 212 является аккреция газа с UGC 12549
 12. Подтверждена и изучена новая далекая галактика с полярным кольцом – SDSS J075234.33+292049.8. Анализ поля скоростей ионизованного газа показал, что это гигантское (48 кпк диаметром) кольцо вращается под заметным углом ($58 \pm 10^\circ$ или $73 \pm 11^\circ$) к плоскости центральной галактики. Измеренное отношение массы к

светимости $M/L \approx 20$ указывает на значительный вклад темной материи в общую массу системы.

13. Представлено исследование морфологии и кинематики уникальной кольцевой галактики - объекта Хога. Предложено объяснение пекулярной структуры этой галактики холодной аккрецией газа из межгалактической среды на прародительницу - эллиптическую галактику.
14. Составлен новый каталог, существенно увеличивающий число известных кандидатов в галактики с полярными кольцами. На 6-м телескопе САО РАН выполнены спектральные наблюдения 6 галактик из SPRC. В пяти галактиках подтверждено существование полярных колец, один объект оказался проекцией пары галактик. Вместе с имеющимися в литературе данными к кинематически-подтвержденным ГПК можно отнести уже 10 галактик из нашего каталога.
15. В результате наблюдений на 6-м телескопе САО РАН обнаружены окооядерные газовые полярные или сильно наклоненные диски в ряде галактик как ранних, так и поздних морфологических типов: Mrk 33, Mrk 370, NGC 3368, NGC 3599, NGC 3626, NGC 5850, NGC 7468.
16. Составлен список галактик, во внутренних областях которых найдены полярные (или сильно наклоненные к основной галактической плоскости) диски и кольца. Показано, что такие структуры встречаются в галактиках всех морфологических типов - от E до Irr. Радиус большинства из них не превышает 1.5 кпк. Возможно, что это ограничение связано со стабилизирующей ролью балджа.
17. Внутренние полярные структуры одинаково часто встречаются как в галактиках с перемычками, так и без них. В тоже время, если галактика обладает баром (или трехосным балджем), то это приводит к стабилизации полярного диска так, что его ось вращения совпадает с большой осью бара.
18. Более чем у 2/3 рассмотренных галактик заметны те или иные следы недавнего взаимодействия, что указывает на важную роль внешнего окружения в формировании этих пекулярных структур в результате поглощения галактик-спутников или газовых облаков межзвездной среды.
19. Изучена кинематика гигантской биполярной туманности S3 вокруг звезды WO в галактике Местной Группы IC 1613. Впервые удалось измерить скорость расширения обеих "пузырей", составляющих туманность (диаметром около 110 и 220 пк) и оценить возраст ионизованной структуры. Необычная морфология туманности и объясняется тем, что звезда сформировалась в плотной газовой стенке на краю суперкаверны HI, так что звездный ветер прорывался в двух направлениях из плотного слоя газа. Последующий анализ данных радионаблюдений галактики на телескопе VLA подтвердил это предположение.
20. Изучена система оболочек нейтрального и ионизованного газа, связанных с единственным комплексом современного звездообразования в IC1613. Исследована их кинематика, уточнены скорости расширения ионизованных оболочек. Показано что большинство малых (диаметром менее 300 пк) оболочек сформировалось под действием современного звездообразования, в то время как для объяснения гигантской каверны HI, размером более 1 кпк, требуется учёт последовательного воздействия на межзвездную несколько поколений звездных группировок.
21. Исследована структура, кинематика и спектр свечения ионизованного газа в уникальной синхротронной сверхоболочке в карликовой галактике Местной Группы IC 10. Показано, что вспышка Гиперновой является более правдоподобным механизмом образования этой сверхоболочки, чем принятая ранее модель вспышки десятка сверхновых.

22. Методами панорамной и длиннощелевой спектроскопии исследована яркая протяженная туманность в изолированной линзовидной галактике NGC 4460. Современное звездообразование здесь сосредоточено в компактной области диска радиусом около 1 кпк. Наблюдаемые параметры туманности объясняются выбросом ионизованного газа над плоскостью галактики, вызванным центральной вспышкой звездообразования. Характеристики галактического ветра в NGC 4460 (скорость истечения, кинетическая энергия газа) в несколько раз меньше, чем для ветра в галактике NGC 253, что объясняется заметно меньшим темпом звездообразования.
23. В северо-восточной стороне диска галактики NGC 1084 обнаружены две системы ионизованного газа. Первая связана с нормальным вращением в диске. Вторая – с движениями газа вокруг группы областей HII со скоростями $\pm(100 - 150)$ км/с по лучу зрения. Размер пекулярной области составляет около 3 кпк. Эти движения часто сопровождаются интенсивным высвечиванием в запрещенной линии [NII] на фронтах ударных волн. Наиболее вероятная интерпретация состоит в том, что мы наблюдаем газ, выброшенный из диска в процессе звездообразования. Морфологически и кинематически схожие области обнаружены еще в четырех галактиках (IC 1525, NGC 1084, NGC 2964, NGC 3893, NGC 6643), что составляет треть выборки спиральных галактик, кинематика ионизованного газа в которых детально изучалась на 6-м телескопе САО РАН.
24. Наблюдается четкая связь между поверхностной яркостью в линии H α и дисперсией лучевых скоростей: с уменьшением яркости растет разброс возможных значений σ , максимальная дисперсия скоростей наблюдается в областях малой яркости, а минимальная σ – в центрах областей HII.
25. В пяти галактиках (DDO53, DDO125, UGC 8508, UGCA 92 и VII Zw 403) выделены расширяющиеся оболочки ионизованного газа, размером 80 – 350 пс, являющиеся результатом коллективного действия звездных группировок на газовую среду галактик. Их кинематический возраст составляет 1–4 млн. лет, что указывает на связь с текущим звездообразованием.
26. Показано, что диаграммы $I - \sigma$ могут быть полезны для поиска в близких галактиках остатков сверхновых или других компактных расширяющихся оболочек (туманности вокруг звезд WR и т.п.). Хорошей иллюстрацией и несомненным успехом методики является обнаружение уникальной звезды – кандидата LBV в галактике UGC 8508.
27. Модель, ранее предложенная Muñoz-Tuñón et al. (1996) для объяснения вида диаграммы $I - \sigma$ отдельных комплексов звездообразования, требует существенного дополнения в случае карликовых галактик. Наиболее важным здесь является то, что основная часть областей с высокой дисперсией скоростей связана не с конкретными расширяющимися оболочками, а принадлежит диффузному фону низкой яркости, окружающему комплексы звездообразования. Это поведение наблюдаемых распределений σ мы объясняем наличием у гигантских областей HII корон возмущенного газа низкой плотности с высокими турбулентными скоростями. Такое объяснение согласуется с современными представлениями о турбулентности в межзвездной среде.

Благодарности

Представленное исследование выполнялось с помощью аппаратуры, разработанной и созданной **В.Л. Афанасьевым**, ведущую роль которого в развитии методов наблюдений на 6-м телескопе САО РАН невозможно переоценить. Я искренне благодарен Виктору Леонидовичу за опыт, приобретенный за годы совместной работы, и интерес проявленный к представленным в диссертации результатам. Подготовка диссертации было бы невозможно без постоянной поддержки и заботы со стороны моей супруги и соавтора **А.А. Смирновой**. Кроме большой помощи, оказанной Александриной во время работы над текстом диссертации, ей также принадлежит инициатива и ведущая роль в исследовании загадочной галактики Mrk 334. Ряд глав диссертации, а также множество вошедших в нее совместных статей являются результатом многолетнего и тесного взаимодействия с **Т.А. Лозинской** и **О.К. Сильченко**. Я очень рад, что наша совместная работа, начавшаяся еще во времена моего студенчества, не прерывается и по сей день, а лишь обогащается новыми идеями и проектами. Мне посчастливилось работать вместе с признанными специалистами в различных областях внегалактической астрономии и я очень надеюсь, что наше сотрудничество было и остается взаимно полезным. Это относится и к исследованию карликовых галактик вместе с **И.Д. Караченцевым** и **С.А. Пустильником**, и к изучению столкновительных кольцевых систем вместе с **Д.В. Бизяевым** и **Э.В. Воробьевым**, и к рассмотрению проблем галактик с полярными кольцами вместе с **В.П. Решетниковым** и **Н.Я. Сотниковой**, **N. Brosch** и **I. Finkelman**. Многие из вопросов, затронутых в диссертации, в разное время жарко обсуждались с **А.В. Тихоновым**, **А.В.** и **С.А. Хоперсковыми**, **А.А. Клыпиным**, **F. Combes**, **E. Iodice** и **L. Sparke**. Совместный проект с **Ю.В. Белетским** по исследованию Fornax A дал возможность ненадолго посетить обсерваторию ESO в Чили и этим серьезно повлиял на мои представления об организации астрономических исследований. Большую помощь в “доводке” окончательного текста диссертации мне оказали мои младшие коллеги и соавторы **О.В. Егоров**, **И.Ю. Катков** и **К.И. Смирнова**, за что я им искренне признателен. Огромному количеству ценных замечаний я обязан **А.Ф. Валееву** и **Л.М. Фатыховой**. Я благодарю всех своих друзей и коллег из САО РАН, Бюраканской АО, ГАИШ МГУ, СПбГУ и других институтов и университетов, которые так или иначе помогали в выполнении данной работы. А особенно **В.Р. Амирханяна** и **В.В. Мусцегова**, всегда являвших мне пример искреннего и честного служения науке.

В процессе работы использовалась база внегалактических данных НАСА/ИПАК (NED) управляемая Лабораторией реактивного движения Калифорнийского технологического института по контракту с Национальным Управлением Аэронавтики и Космонавтики (США), и база данных **Hyperleda**. В работе использовался наблюдательный материал, полученный на 6-м телескопе САО РАН с финансовой поддержкой Министерства образования и науки РФ (контракты 16.518.11.7073 и 16.552.11.7028), данные **Хаббловского космического телескопа** НАСА/ЕСА, взятые из архива Института космического телескопа, управляемого Ассоциацией университетов для исследований в астрономии на основании контракта с НАСА, а также данные **проекта SDSS**, поддержанного фондом Альфреда П. Слоана, институтами-участниками коллаборации SDSS, национальным научным обществом и Министерством энергетики США. В разные годы работа поддерживалась грантами **Российского фонда фундаментальных исследований**, грантом **Президента Российской Федерации**, программами **Отделения общей физики и астрономии РАН**, фондом некоммерческих программ “**Династия**” и федеральной целевой программой “**Научные и научно-педагогические кадры инновационной России**” (контракт 14.740.11.0800).

С уважением,
Алексей Моисеев

Литература

- Abazajian K.N., Adelman-McCarthy J.K., Agueros M.A. et al., 2009, ApJS, 182, 543
- Abolmasov P., Moiseev A., 2008, Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica, 44, 301
- Afanasiev V.L., Dodonov S.N., Moiseev A.V., 2001, in *Stellar Dynamics: from Classic to Modern*, Saint Petersburg, Eds.: Ossipkov L.P., Nikiforov I.I., p. 103
- Afanasiev V.L., Gazhur E.B., Zhelenkov S.R., Moiseev A.V., 2005, Bulletin of the SAO, 58, 90
- Afanasiev V.L., Moiseev A.V., 2011, Baltic Astronomy, 20, 363
- Afanasiev V.L., Sil'chenko O.K., 1991, Astrofiz. Issled. (Izvestiya SAO), 33, 88
- Afanasiev V.L., Sil'chenko O.K., 1999, AJ, 117, 1725
- Afanasiev V.L., Sil'chenko O.K., 2000, AJ, 119, 126
- Afanasiev V.L., Sil'chenko O.K., 2007, A&A Trans., 26, 311
- Aguerri J.A.L., Méndez-Abreu J., Corsini E.M., 2009, A&A, 495, 491
- Allen M .G., Groves B .A., Dopita M .A., Sutherland R .S., Kewley L .J., 2008, ApJS, 178, 20
- Amorín R, Aguerri J.A.L., Muñoz-Tuñón C., Cairós L.M., 2009, A&A, 501, 75 (2009)
- Amram P., Mendes de Oliveira C., Boulesteix J., Balkowski C., 1998, Astron. Astrophys., 330, 881
- Anantharamaiah K.R., Goss W.M., 1996, ApJ, 466, L13
- Appleton P.N. & Struck-Marcell C., 1996, Fundamentals of Cosmic Physics, 16, 111
- Arnaboldi M., Galletta G., 1993, A&A, 268, 411
- Arp H., 1966, ApJS, 14, 1
- Arribas S., Mediavilla E., Fuensalida J. J., 1998, ApJ, 505, L43
- Asplund M., Grevesse N., Sauval A. J., Allende P. C., Kiselman D., 2004, A&A, 417, 751
- Asvarov A.I., 2006, A&A, 459, 519
- Athanassoula E., 1996, In: Barred Galaxies, eds. Buta R., Crocker D.A., and Elmegreen B.G., ASP Conf. Proc. 91, 309
- Bacon R., Adam G., Baranne A., Courtes G., Dubet D. et al., 1995, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 113, 347
- Bacon R., Copin Y., Monnet G. et al., 2001, MNRAS, 326, 23
- Baes M., Sil'chenko O.K., Moiseev A.V., Manakova E.A., 2007, A&A, 467, 991

- Balcells M., Stanford, S. A.. 1990, ApJ, 362, 443
- Barlow M.J., Hummer D.C., 1986, IAU Symp., 99, 387
- Barth A.J., 2007, AJ, 133, 1085
- Barth A.J., Bentz M.C., Greene J.E., Ho L.C., 2008, ApJ, 683, L119
- Begeman K.G., A&A, 1989, 223, 47
- Begum A., Chengalur J. N., Karachentsev I. D., Kais S. S., Sharina M. E., 2006, MNRAS, 365, 1220
- Begum A., Chengalur J. N., Karachentsev I. D., Sharina M. E., Kaisin S. S., 2008, MNRAS, 386, 2008
- Beletsky Yu., Gadotti D.A., Moiseev A., Alves J., Kniazev A., 2011, MNRAS, 418, L6
- Bertola F., Corsini E.M., 2000, ASP Conference Series., 197, 115
- Bettoni D., Fasano G., Galletta G., 1990, AJ, 99, 1789
- Bettoni D., Buson L.M., Galletta G., 2010, A&A, 519, 72
- Binney J., 1978, MNRAS, 183, 501
- Binney J.J., Fraternali F., 2012, EPJ Web of Conferences, 19, id.08001
- Bizyaev D.V., Moiseev A.V., Vorobyov E.I., 2007, ApJ, 662, 304
- Bland J., Tully R.B., 1989, AJ, 98, 723
- Blasco-Herrera J., Fathi K., Beckman J. et al., 2010, MNRAS, 407, 2519
- Bordalo V., Plana H., Telles E., 2009, ApJ, 696, 1668
- Bordalo V., Telles E., 2011, ApJ, 735, 52
- Borkova T.V., Marsakov V.A., 2003, A&A, 398, 133
- Bothun G.D., Impey Ch.D., Malin D., Mould J.R., 1987, AJ, 94, 23
- Boulesteix J., Georgelin Y., Marcelin M., Fort J.A., 1982, in *Instrumentation for astronomy with large optical telescopes*, p. 223
- Bournaud F., Combes F. 2003, A&A, 401, 817
- Bournaud F., Jog C. J., Combes F., 2007, A&A, 476, 1179
- Brandt W.D., Ward M.J., Fabian A.C., Hodge P.W., 1997, MNRAS, 291, 709
- Braun R., Thilker D.A., Walterbos R.A.M., Corbelli E., 2009, 2009 ApJ, 695, 937
- Bravo-Alfaro H, Brinks E., Baker A.J., Walter F., Kunth D., 2004, AJ, 127, 264
- Brook C. B., Governato F., Quinn T. 2008, ApJ, 689, 678
- Brosch N., 1985, A&A, 153, 199
- Brosch N., Kniazev A.Yu., Moiseev A.V., Pustilnik S.A., 2010, MNRAS, 401, 2067
- Bruzual G., Charlot S., 2003, MNRAS, 344, 1000
- Bullejos A., Rosado M., 2002, Rev.Mex.A.A. (Serie de Conferencias), 12, 254

- Bureau M., Chung A., 2006, MNRAS, 366, 182
- Burkert A., 2006, Comptes Rendus - Physique, 7, 433
- Buson L.M., Bettoni D., & Galletta G. 2011, Ap&SS, 335, 231
- Buta R., Combes F. 1996, Fundamentals of Cosmic Physics, 17, 95
- Buta R., Crocker D. A. 1993, AJ, 106, 939
- Buta R., Crocker D. A., Byrd G. G. 1992, AJ, 103, 1526
- Buzzoni, B., Delabre B., Dekker H., et al., 1984, ESO Messenger (ISSN 0722-6691), Dec. 1984, p. 9.
- Cairós L.M., Caon B., Vílchez J.M. et al., 2001a, ApJS, 136, 393
- Cairós L.M., Vílchez J.M., González-Pérez J.N. et al., 2001b, ApJS, 133, 321
- Cairós L.M., Caon N., García-Lorenzo B., Vílchez J.M., Muñoz-Tuñón C., 2002, ApJ, 577, 164
- Capetti A., Axon D.J., Macchetto F.D., Marconi A., Winge C., 1999, ApJ, 516, 187
- Cappellari M., Emsellem E., Bacon R., et al., 2007, MNRAS, 379, 418
- Cappellari M., Bertola F., Burstein D. et al., 2001, ApJ, 551, 197
- Charmandaris V., Appleton, P. N. 1996, ApJ, 460, 686
- Charmandaris V., Appleton, P. N., Marston, A. P. 1993, ApJ, 414, 154
- Chilingarian I.V., Novikova A.P., Cayatte V. et al., 2009, A&A, 504, 389
- Chung A., van Gorkom J., Kenney J.D.P., Vollmer B., 2007, ApJ, 659, L115
- Chung A., van Gorkom J.H., Kenney J.D.P. et al., 2009, AJ, 138, 1741
- Churazov E., Sunyaev R., Forman W., Böhringer H., 2002, MNRAS, 332, 729
- Ciri R., Bettoni D., Galletta G., 1995, Nature, 375, 661
- Ciroi S., Afanasiev V.L., Moiseev A.V. et al. 2005, MNRAS, 360, 253
- Coccatto L., Corsini E.M., Pizzella A., Bertola F., 2007, A&A, 465, 777
- Coccatto L., Corsini E.M., Pizzella A. et al., 2004, A&A, 416, 507
- Coccatto L., Corsini E.M., Pizzella A., Bertola F., 2005, A&A, 440, 107
- Combes F., 2001, in *Advanced Lectures on the Starburst-AGN Connection*, Eds.: Itziar Aretxaga, Daniel Kunth, and Rau'l Mu'jica., 223
- Combes F., 2006, in *Mass Profiles and Shapes of Cosmological Structures*, Eds.: G.A. Mamon, F. Combes, C. Deffayet, B. Fort, EAS Publications Series, v. 20, p. 97
- Combes F., 2008, in *Pathways Through an Eclectic Universe*, Eds.: J. H. Knapen, T. J. Mahoney, and A. Vazdekis, ASP Conference Series, v. 390, p. 369
- Comerón S., Knapen J.H., Beckman J.E., Shlosman I., 2008, A&A, 478, 403
- Comerón S., Knapen J. H., Beckman J. E. et al., 2010, MNRAS, 402, 2462
- Corsini E. M., Pizzella A., Funes J. G., Vega Beltran J. C., Bertola F., 1998, A&A, 337, 80

- Corsini E.M., Pizzella A., Bertola F., 2002, *A&A*, 382, 488
- Corsini E.M., Pizzella A., Coccato L., Bertola F., 2003, *A&A*, 408, 873
- Cortés J.R., Kenney J.D.P., Hardy E. et al., 2006, 131, 747
- Courtés G., 1960, *Ann. d'Astrophys.*, 23, 115
- Courtés G., 1982, in *Instrumentation for Astronomy with Large Optical Telescopes*, eds. C. M. Humphries, *Astrophysics and Space Science Library*, 92, 123
- Cox A.L., Sparke L.S., Watson A.M., van Moorsel G., 2001, *AJ*, 121, 692
- Crocker A.F., Bureau M., Young L.M., Combes F., 2008, *MNRAS*, 386, 1811
- Davidge T.J., 2010, *ApJ*, 725, 1342
- Davis T.A., Alatalo K., Sarzi M. et al., 2011, *MNRAS*, 417, 882
- Di Matteo P., Combes F., Melchior A.-L., Semelin B., 2007, *A&A*, 468, 61
- Dib S., Bell E., & Burkert A., 2006, *ApJ*, 638, 797
- Dicaire I., Carignan C., Amram P., 2008, *MNRAS*, 385, 553
- Dopita M. A., 2008, in *Massive Stars as Cosmic Engines*, *Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium*, 250, 367
- Drew J.E., Barlow M.J., Unruh Y.C., 2004, *MNRAS*, 351, 206
- Dubinski J., 2006, *S&T*, 112, 30
- Dumas G., Mundell C.G., Emsellem E., Nagar N.M., 2007, *MNRAS*, 379, 1249
- Duprie K., Schneider S.E., 1996, *AJ*, 112, 937
- Eckart A., Downes D., 2001, *ApJ*, 551, 730
- Efremov Yu.N., Afanasiev V.L., Alfaro E.J. et al., 2007, *MNRAS*, 382, 481
- Eisenstein D.J., Weinberg D.H., Agol E. et al., 2011, *AJ*, 142, 72
- Emsellem E. et al., 2011, *MNRAS*, 414, 888
- Epinat B., Amram P., Marcelin M., 2008, *MNRAS*, 390, 466
- Erwin P., Beckman J.E., Pohlen M., 2005, *ApJ*, 626, L81
- Erwin P., Sparke L.S., 1999, *ApJ*, 521, L37
- Evstigneeva E.A., 2000, *Astrophysics*, 43, 381
- Fabricius M. H., Saglia R. P., Fisher D. B. et al., 2012, *ApJ*, 754, 67
- Fabry Ch., Perot A., 1901, *ApJ*, 13, 265
- Falcón-Barroso J., Bacon R., Bureau M. et al., 2006, *MNRAS*, 369, 529
- Fathi K., 2004, Ph.D. thesis, Univ. Groningen
- Finkelman I., Brosch N., 2011, *MNRAS*, 413, 2621
- Finkelman I., Graur Or., Brosch N., 2011a, *MNRAS*, 412, 208
- Finkelman I., Moiseev A., Brosch N., Katkov I., 2011b, *MNRAS*, 418, 834

- Finkelman I., Funes J. & Brosch N., 2012, MNRAS, 422, 2386
- Freeman K.C., 1970, ApJ, 160, 811
- Fridman A.M., Afanasiev V.L., Dodonov S.N., Khoruzhii O.V., Moiseev A.V., Sil'chenko O.K., Zasov A.V., 2005, A&A, 430, 67
- Friedli D., Benz, W. 1993, A&A, 268, 65
- Friedli D., Wozniak H., Rieke M., Martinet L., Bratschi P., 1996, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 118, 461
- Fried J.W., Illingworth G.D., 1994, AJ, 107, 992
- Gabbasov R.F., Repetto P., Rosado M., 2009, ApJ, 702, 392
- García-Lorenzo B., Cairós L.M., Caon N. et al., 2008, ApJ, 677, 201
- Geller M.J., Huchra J.P. 1983, ApJS, 52, 61
- Georgiev L., Borissova J., Rosado M., et al., 1999, A&ASS, 134, 21
- Ghosh K.K., Mapelli M., 2008, MNRAS, 386, L38
- Gonzalez Delgado R.M., Perez E., Tadhunter C. et al. 1997, ApJS, 108, 155
- Gordon S., Koribalski B., Houghton S., Jones K., 2000, MNRAS, 315, 248
- Goudfrooij P., Alonso M., Maraston C., Minniti D., 2001, MNRAS, 328, 237
- Green A.W., Glazebrook K., McGregor P.J. et al., 2010, Nature, 467, 684
- Hagen-Thorn V.A., Reshetnikov V.P., 1995, A&A, 319, 430
- Heald G., Józsa G., Serra P. et al., 2011, A&A, 526, 118
- Heckman T. M., Dahlem M., Lehnert M. D., Fabbiano G., Gilmore D., Waller W. H., 1995, ApJ, 448, 98
- Higdon J., Buta R., Purcel G.B., 1998, AJ, 115, 80
- Higdon J.L. 1996, ApJ, 467, 241
- Higdon J.L., Higdon S.J.U., Rand R.J., 2011, ApJ, 739, 97
- Ho L.C., Filippenko A.V., Sargent W.L.W. 1997, ApJS, 112, 315
- Hoag A. A., 1950, AJ, 55, 170
- Hopkins P.F., Quataert E., Murray N., 2012, MNRAS, 421, 3522
- Hubble, E. P., 1926, ApJ, 64, 321
- Ibata R., Chapman S., Ferguson A.M.N., 2004, MNRAS, 351, 117
- Iodice E., 2010, in *Hunting for the dark: the hidden side of galaxy formation*, AIP Conference Proceedings, 1240, p. 379
- Iodice E., Bournaud F., Combes F. et al., 2003, ApJ, 585, 730
- Jedrzejewski R., Schechter P.L., 1988, ApJ, 330, L87
- Jensen, J.B., Tonry, J.L., Barris B.J. et al., 2003, ApJ, 583, 712
- Jesseit R., Cappellari M., Naab T., Emsellem E., Burkert A., 2009, MNRAS, 397, 1202

- Jones D.H., Shopbell P.L., Bland-Hawthorn J., 2002, MNRAS, 329, 759
- Jungwiert B., Palous J., 1996, A&A, 311, 397
- Józsa G. I. G., Oosterloo T. A., Morganti R., Klein U., Erben T., 2009, A&A, 494, 489
- Kaisin S.S., Karachentsev I.D., 2008, A&A, 479, 603
- Karachentsev I.D., Kaisin S.S., 2010, AJ, 140, 1241
- Karachentsev I.D., Karachentseva V.E., Huchtmeier W.K., Makarov D.I., 2004, AJ, 127, 2031
- Kashikawa N., Aoki K., Asai R. et al., 2002, PASJ, 54, 819
- Katkov I.Yu., Chilingarian, I.V., 2011, ASP Conference Proceedings, 442, 143
- Katkov I.Yu., Chilingarian I.V., Sil'chenko O.K. et al., 2011a, Baltic Astronomy, 20, 453
- Katkov I.Yu., Moiseev A.V., Sil'chenko O.K., 2011b, ApJ, 740, 83
- Kauffmann G., Cheng H., Timothy M. J. 2010, MNRAS, 409, 491
- Kazantzidis S. Z., Andrew R., Kravtsov A. V. et al., 2009, ApJ, 700, 1896
- Kelz A., Verheijen M. A. W., Roth M. M. et al., 2006, PASP, 118, 129
- Kennicutt R.C.Jr., 1998a, ARA&A, 36, 189
- Kennicutt R.C.Jr., 1998b, ApJ, 498, 541
- Kennicutt R.C.Jr., Evans N.J. II, 2012, ARA&A, in press; arXiv:1204.3552
- Kewley L.J., Dopita M.A., Sutherland R.S. et al., 2001, ApJ, 556, 121
- Kim S., Dopita M.A., Staveley-Smith L., Bessell M.S., 1999, AJ, 118, 2797
- Knapen J.H., Whyte J.F., de Blok W.J.G., van der Hulst J.M., 2004, A&A, 423, 481
- Kobayashi C., 2004, MNRAS, 347, 740
- Koleva M., Prugniel Ph., De Rijcke S., 2008a, AN, 329, 968
- Koleva M., Prugniel Ph., Ocvirk P., Le Borgne D., Soubiran C., 2008b, MNRAS, 385, 1998
- Koleva M., Prugniel Ph., Bouchard A., Wu Y. 2009, A&A, 501, 1269
- Komossa S., Xu D., Zhou H., Storchi-Bergmann T., Binette L., 2008, ApJ, 680, 926
- Korchagin V., Mayya D., Vorobyov E.I., 2001, ApJ, 554, 281
- Kormendy J., 1993, in *Galactic Bulges*, eds. H. Dejonghe & H. Habing, IAU Symposium Series, 153, 209
- Kormendy J., Kennicutt R. C., 2004, ARA&A, 42, 603
- Krajnović D., Bacon R. et al., 2008, MNRAS, 390, 93
- Kuijken, K., Fisher, D., Merrifield, M.R., 1996, MNRAS, 283, 543
- Lagos P., Telles E., Muñoz-Tuñón C., Carrasco E. R., Cuisinier F., Tenorio-Tagle G., 2009, AJ, 137, 5068
- Lake G., Skillman E.D., 1989, AJ, 98, 1274
- Larson R. B., 1974, MNRAS, 166, 585

- Le Borgne D., Rocca-Volmerange B., Prugniel P., et al., 2004, *A&A*, 425, 881
- Legrand F., Kunth D., Mas-Hesse J.M., Lequeux J., 1997, *A&A*, 326, 929
- Lelli F., Fraternali F., Sancisi R., 2010, *A&A*, 516, 11
- Li J.G., Seaquist E.R., Wrobel J.M. et al., 1993, *ApJ*, 413, 150
- Lintott Ch., Schawinski K., Bamford S. et al., 2011, *MNRAS*, 410, 166
- Lozinskaya T.A., 1997, *Astrophys. Space Sci.*, 1997, 252, 199.
- Lozinskaya T.A., Moiseev A.V., 2007, *MNRAS*, 381, 26L
- Lozinskaya T.A., Silchenko O.K., Helfand D.J., Goss W. M., 1998, *AJ*, 116, 2328
- Lumsden S.L., Heisler C.A., Bailey J.A., Hough J.H., Young S., 2001, *MNRAS*, 327, 459
- Lynds R., Toomre A., 1976, *ApJ*, 209, 382
- Lynds R., Tolstoy E., O'Neil E.J., Hunter D.A., 1998, *AJ*, 116, 146
- López-Sanjuan C., Le Fèvre O., de Ravel L. et al., 2011, *A&A*, 530, 20
- Macciò A.V., Moore B., Stadel J., 2006, *ApJ*, 636, L25
- Mackie G., Fabbiano G, 1998, *AJ*, 115, 514
- Madore B. F., Nelson E., Petrillo K., 2009, *ApJS*, 181, 572
- Mapelli M., Mayer L., 2012, *MNRAS*, 420, 1158
- Mapelli M., Moore B., Ripamonti E., Mayer L., Colpi M., Giordano L., 2008, *MNRAS*, 383, 1223
- Marasco A., Fraternali F., Binney J.J., 2012, *MNRAS*, 419, 1107
- Martínez-Delgado I., Tenorio-Tagle G., Muñoz-Tuñón C. et al., 2007, *AJ*, 133, 2892
- Martínez-Delgado D., Gabany R.J., Crawford K. et al., 2010, *AJ*, 140, 962
- Martini P., Regan M.W., Mulchaey J.S., Pogge R.W. 2003, *ApJS*, 146, 353
- Massey P., Holmes S., 2002, *ApJ*, 580, L35
- Massey P., Olsen K., Hodge P., et al., 2007, *AJ*, 133, 2393
- Matsubayashi K., Sugai H., Hattori T., Kawai A., Ozaki S., Kosugi G., Ishigaki T., Shimono A., 2009, *ApJ*, 701, 1636
- Mazzuca L.M., Sarzi M., Knapen J.H., Veilleux S., Swaters R., 2006, *ApJ*, 649, L79
- McDermid R.M., Emsellem E., Shapiro K.L. et al., 2006, *MNRAS*, 373, 906
- McQuinn K.B.W., Skillman E.D., Cannon J.M. et al., 2010, *ApJ*, 724, 49
- Melchior A.-L., Combes F., 2011, *A&A*, 536, 52
- Melnick J., Terlevich R., Terlevich E., 2000, *MNRAS*, 311, 629
- Merrifield M.R., Kuijken K., 1994, *ApJ*, 432, 575
- Michel-Dansac L., Duc P.-A., Bournaud F. et al., 2010, *ApJL*, 717, L142
- Moiseev A.V., 2000, *A&A*, 363, 843

- Moiseev A.V., 2001a, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.*, 51, 11
- Moiseev A.V., 2001b, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.*, 51, 140
- Moiseev A.V., 2002, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* 54, 74
- Moiseev A.V., 2011, *EAS Publications Series*, 48, 115
- Moiseev A.V., Afanasiev V.L., 2005, *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplement*, 7, 44
- Moiseev A.V., Lozinskaya T.A., 2012, *MNRAS*, 423, 1831
- Moiseev A.V., Valdés J.R., Chavushyan V.H., 2004, *A&A*, 421, 433
- Moiseev A.V., Karachentsev I.D., Kaisin S.S., 2010a, *MNRAS*, 403, 1849
- Moiseev A.V., Pustilnik S.A., Kniazev A.Y., 2010b, *MNRAS*, 405, 2453
- Moiseev A.V., Sil'chenko O.K., Katkov I.Yu, 2010c, in *Hunting for the dark: the hidden side of galaxy formation*, ed. V.P. Debattista & C.C. Popescu, *AIP Conference Series*, 1240, p. 251
- Moiseev A.V., Smirnova K.I., Smirnova A.A., Reshetnikov V.P., 2011, *MNRAS*, 418, 244
- Monreal-Ibero A., Vílches J. M., Walsh J.R., Muñoz-Tuñón C., 2010, *A&A*, 517, 27
- Moore L., Parker Q.A., 2006, *PASA*, 23, 165
- Morganti R., de Zeeuw P. T., Oosterloo T. A. et al. 2006, *MNRAS*, 371, 157
- Morse J.A., Cecil G., Wilson A.S., Tsvetanov Z.I., 1998, *ApJ*, 505, 159
- Muñoz-Tuñón C., Tenorio-Tagle G., Castañeda H.O., Terlevich R., 1996, *AJ*, 112, 1636
- Nair P.B., Abraham R.G., 2010, *ApJS*, 186, 427
- Nicklas H., Seifert W., Boehnhardt H. et al., 1997, *Proc. SPIE*, 2871, 1222
- Noordermeer E., van der Hulst J. M., Sancisi R., Swaters R. A., van Albada T. S., 2005, *A&A*, 442, 137
- Nowak, N., Saglia, R. P., Thomas, J., Bender, R., Davies, R. I., Gebhardt, K., 2008, *MNRAS*, 391, 1629
- O'Connell R. W., Scargle J. D., Sargent W. L. W., 1974, *ApJ*, 191, 61
- Oh S-H., de Blok W. J. G., Brinks E., Walter F., Kennicutt R. C. Jr., 2011, *AJ*, 141, 193
- Oosterloo T., Morganti R., Crocker A. et al., 2010, *MNRAS*, 409, 500
- Osterbrock D. E., 1989, *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei*, University Science Books, Mill Valley, CA
- Östlin G., Amram P., Masegosa J., Bergvall N., Boulesteix J., 1999, *A&AS*, 137, 419
- Petrosian A.R, Movsessian T., Comte G., Kunth D., Dodonov S., 2002, *A&A*, 391, 487
- Pickering T.E., Impey C.D., van Gorkom J.H., Bothun G.D., 1997, *AJ*, 114, 1858
- Pizzella A., Bertola F., Sarzi M.C. et al., 2001, *MmSAI.*, 72, 797
- Plana H., Boulesteix J., Amram P., Carignan C., Mendes de Oliveira C., 1998, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 128, 75

- Prestwich A.H., Kilgard R., Crowther P.A. et al., 2007, ApJ, 669, L21
- Ramya S., Sahu D.K., Prabhu T.P., 2007, MNRAS, 381, 511
- Reshetnikov V. P., 2004, A&A, 416, 889
- Reshetnikov V., Sotnikova N., 1997, A&A, 325, 933
- Reshetnikov V.P., Hagen-Thorn V.A., Yakovleva V.A., 1995, A&A, 303, 398
- Reshetnikov V.P., Moiseev A.V., Sotnikova N. Ya., 2010, MNRAS, 406, L90
- Royer P., Smartt S.J., Manfroid J., Vreux J., 2001, A&A, 366, L1
- Rozas M., Zurita A., Beckman J. E., Pérez D., 2000, A&AS, 142, 259
- Rubin V.C., Thonnard N., Ford W.K.Jr., 1977, ApJ, 217, 1L
- Sackett P. D., Pogge R. W., 1995, in *Dark matter*, AIP Conference Proceedings, v. 336, p. 141
- Sage L. J., Welch G.A., 2006, ApJ, 644, 850
- Sales L. V., Navarro J. F., Theuns T. et al., 2012, MNRAS, 423, 1544
- Salim S. et al., 2007, ApJS, 173, 267
- Sandage A.R., 1971, ApJ, 166, 13
- Sarzi M., Corsini E. M., Pizzella A. et al. 2000, A&A, 360, 439
- Sarzi M., Falcón-Barroso J., Davies R.L. et al., 2006, MNRAS, 366, 1151
- Schechter P. L., Gunn J.E., 1978, AJ, 83, 1360
- Schinnerer E., Eckart A., Tacconi L.J., 2000a, ApJ, 533, 826
- Schinnerer E., Eckart A., Tacconi L.J. et al., 2000b, ApJ, 533, 850
- Schneider, S.E., 1989, ApJ, 343, 94
- Schweizer F., 1980, ApJ, 237, 303
- Schweizer F., Ford W.K. Jr., Jenderzejewsky R., Giovanelli R., 1987, ApJ, 320, 454
- Schweizer F., Seitzer P., 1988, ApJ, 328, 88
- Serra P., Trager S.C., Oosterloo T., Morganti R., 2008, A&A, 483, 57
- Serra P., Oosterloo T., Morganti R., 2012, MNRAS, 422, 1835
- Sharp R.G., Bland-Hawthorn J., 2010, ApJ, 711, 818
- Shopbell P. L., Bland-Hawthorn J., 1998, ApJ, 493, 129
- Shostak G.S., 1987, A&A, 175, 4
- Sil'chenko O.K., 2000, AJ, 120, 741
- Sil'chenko O.K., Afanasiev V.L., 2000, A&A, 364, 479
- Sil'chenko O.K., Afanasiev V.L., 2004, AJ, 127, 2641
- Sil'chenko O.K., Moiseev A.V., 2006, 131, 1336

- Sil'chenko O.K., Vlasyuk V.V., Burenkov A.N., 1997, A&A, 326, 941
- Sil'chenko O.K., Moiseev A.V., Afanasiev V.L., Chavushyan V.H., Valdés J.R., 2003, ApJ, 591, 185
- Sil'chenko O.K., Moiseev A.V., Afanasiev V.L., 2009, ApJ, 694, 1550
- Sil'chenko O.K., Moiseev A.V., Shulga A.P., 2010, AJ, 140, 1462
- Sil'chenko O.K., Chilingarian I.V., Sotnikova N.Ya., Afanasiev V.L., 2011, MNRAS, 414, 3645
- Silich S., Tenorio-Tagle G., Muñoz-Tuñón C., Cairós L.M., 2002, AJ, 123, 2438
- Silich S., Lozinskaya T., Moiseev A., Podorvanuk N., Rosado M., Borissova J., Valdez-Gutierrez M., 2006, A&A, 448, 123
- Silverman J.M., Filippenko A.V., 2008, ApJ, 678, L17
- Simien F., Prugniel Ph. 2002, A&A, 384, 371
- Simpson C.E., Hunter D. A., Nordgren T. E. et al., 2011, AJ, 142, 82
- Smirnova A., Moiseev A., 2010, MNRAS, 401, 307
- Smirnova A.A., Gavrilović N., Moiseev A.V., et al., 2007, MNRAS, 377, 480
- Sofue Y., Wakamatsu K., 1994, AJ, 107, 1018
- Sparke L.S., van Moorsel G., Erwin P., Wehner E.M.H., 2008, AJ, 135, 99
- Sparke L. S., van Moorsel G., Schwarz U. J., Vogelaar M., 2009, AJ, 137, 3976
- Spavone M., Iodice E., Arnaboldi M. et al., 2010, ApJ, 714, 1081
- Springob C.M., Haynes M.P., Giovanelli R., Kent B.R., 2005, ApJS, 169, 149
- Stanonik K., Platen E., Aragón-Calvo M. A., et al. 2009, ApJ, 696L, 6
- Stasińska G., Cid Fernandes R., Mateus A., Sodré L., Asari N.V., 2006, MNRAS, 371, 972
- Steiman-Cameron T. Y., Durisen R. H. 1982, ApJ, 263L, 51
- Steiman-Cameron T. Y., Kormendy J., Durisen R. H. 1992, AJ, 104, 1339
- Steinmetz M., 2012, Astron. Nachr., 333, 523
- Swaters R. A., Rubin V. C. 2003, ApJ, 587L, 23
- Tenorio-Tagle G., Muñoz-Tuñón C., Cox P. D., 1993, ApJ, 418, 767
- Terlevich R., Melnick J., 1981, MNRAS, 195, 839
- Teuben P.J., 2002, in *Disks of Galaxies: Kinematics, Dynamics and Perturbations*, ASP Conference Proceedings 275, Eds. E. Athanassoula, A. Bosma, R. Mujica, 217
- Thakar A.R., Ryden B.S., Jore K.P., Broeils A.H. 1997, Astrophys. J., 479, 702
- Theis Ch., Sparke L., Gallagher J., 2006, A&A, 446, 905
- Thuan T.X., Martin G.E., 1981, ApJ, 247, 823
- Thuan T.X., Hibbard J. E., Lévrier G.E., 2004, AJ, 128, 617
- Thurrow J.C., Wilcots E.M., 2005, AJ, 129, 745

- Tonry J., Davis M., 1979, AJ, 84, 1511
- Tully B.R., 1974, ApJS, 27, 415
- Ulvestad J.S., 1986, ApJ, 310, 136
- Valdez-Gutierrez M., Rosado M., Georgiev L. et al., 2001, A&A, 366, 35
- Veilleux S., Osterbrock D.E., 1987, ApJS, 63, 295
- Veilleux S., Cecil G., Bland-Hawthorn J., 2005, ARA&A, 43, 769
- Vorontsov-Vel'yaminov B.A., 1977, A&AS, 28, 1
- Wakamatsu K. 1993, AJ, 105, 1745
- Warren S. R., Weisz D. R., Skillman E. D. et al., 2011, ApJ, 738, 10
- Weitzel L., Krabbe A., Kroker H., et al., 1996, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 119, 531
- Westmoquette M. S., Gallagher J. S., Smith L. J. et al., 2009, ApJ, 706, 1571
- Whitmore B.C., 1991, in *Warped Disks, Inclined Rings Around Galaxies* Ed. by S. Casertano P. D., Sackett F.H., Briggs (Cambridge University Press), 60
- Whitmore B.C., McElroy D. B., Schweizer F., 1987, ApJ, 314, 439
- Whitmore B.C., Lucas R.A., McElroy D.B. et al., 1990, AJ, 100, 1489
- Wilcots E.M., Miller B.W., 1998, AJ, 116, 2363
- Wozniak H., Combes F., Emsellem E., Friedli D., 2003, A&A, 409, 469
- Yang H., Chu Y-H., Skillman E. D., Terlevich R., 1996, AJ, 112, 146
- Yang H., Skillman E.D, 1993, AJ, 106, 1448
- Yasuda N., Fujisawa K., Sofue Y. et al., 1992, PASJ, 44, 1
- Young L.M., 2002, AJ, 124, 788
- Zwicky F., Zwicky M.A. 1971, Catalogue of selected compact galaxies and of post-eruptive galaxies, Guemligen: Zwicky, 1971
- de Grijs R., Peletier R.F., 2000, MNRAS, 313, 800
- de Jong R.S., 1996, A&A, 313, 45
- de Zeeuw T., Franx M., 1991, ARA&A, 29, 239
- de Zeeuw P.T., Bureau M., Emsellem E. et al., 2002, MNRAS, 329, 513
- van Albada T.S., Kotanyi C.G., Schwarzschild M., 1982, MNRAS, 198, 303
- van Driel W., Combes F., Casoli F. 1995, AJ, 109, 942
- van Eymeren J., Marcelin M., Koribalski B. S., Dettmar R.-J., Bomans D. J., Gach J.-L., Balard P., 2009a, A&A, 493, 511
- van Eymeren J., Marcelin M., Koribalski B. S., Dettmar R.-J., Bomans D. J., Gach J.-L., Balard P., 2009b, A&A, 505, 105
- Архипова В.П., Егоров О.В., Лозинская Т.А., Моисеев А.В., 2011, Письма в Астрон. Журнал, 37, 83

- Афанасьев В.Л., Власюк В.В., Додонов С.Н., Сильченко О.К., 1990, препринт САО РАН, 54, 1
- Афанасьев В.Л., Буренков А.Н., Засов А.В., Сильченко О.К., 2000, *Астрофизика*, 28, 243
- Афанасьев В.Л., Лозинская Т.А., Моисеев А.В., Блантон Е., 2000, *Письма в Астрон. журнал*, 26, 190
- Афанасьев В.Л., Моисеев А.В., 2005, *Письма в Астрон. журнал*, 31, 214
- Воронцов-Вельяминов Б.А., Красногорская А.А., Архипова В.П., 1962, “Морфологический каталог галактик”, издательство МГУ
- Додонов С.Н., Власюк В.В., Драбек С.В., 1995, “Интерферометр Фабри-Перо. Руководство пользователя”, Нижний Архыз
- Егоров О.В., Лозинская Т.А., Моисеев А.В., 2010, *Астрон. журнал*, 87, 316
- Ефремов Ю.Н., 1989, *Очаги звездообразования в галактиках*, М.: Наука, 1989
- Ефремов Ю.Н., Чернин А.Д., 2003, *УФН*, 173, 3
- Ефремов Ю.Н., Афанасьев В.Л., Егоров О.В., 2011, *Астрофиз. Бюллетень*, 66, 327
- Засов А.В., Моисеев А.В., Хоперсков А.В., Сидорова Е.А., 2008, *Астрономический Журнал*, 85, 99
- Карташева Т. А., Чунакова Н. М., 1978, *Астрофизические исследования - Известия САО*, 10, 44
- Лозинская Т.А., 1986, *Сверхновые звезды и звездный ветер : взаимодействие с газом галактики*, М.: Наука, 1986
- Лозинская Т.А., Моисеев А.В., Афанасьев В.Л., Вилкотс Э., Госс М., 2001, *Астрон. журнал*, 78, 235
- Лозинская Т.А., Архипова В.П., Моисеев А.В., Афанасьев В.Л., 2002, *Астрон. журнал*, 79, 19
- Лозинская Т.А., Моисеев А.В., Подорванюк Н.Ю., 2003, *Письма в Астрон. журнал*, 29, 95
- Лозинская Т.А., Моисеев А.В., Авдеев В.Ю., Егоров О.В., 2006, *Письма в Астрон. журнал*, 32, 408
- Лозинская Т.А., Моисеев А.В., Подорванюк Н.Ю., Буренков А.Н., 2008, *Письма в Астрон. Журнал*, 34, 243
- Меркулова О. А., Шаляпина Л. В., Яковлева Н. А., Каратаева Г. М. 2008, *Письма в Астрон. Журнал*, 34, 599
- Меркулова О. А., Шаляпина Л. В., Яковлева Н. А. 2009, *Письма в Астрон. Журнал*, 35, 652
- Моисеев А.В., 2008, *Астрофиз. Бюллетень*, 63, 215
- Моисеев А.В., 2012, *Астрофиз. Бюллетень*, 67, 154
- Моисеев А.В., Егоров О.В., 2008, *Астрофиз. Бюллетень*, 63, 193
- Моисеев А.В., Мусцевой В.В., 2000, *Письма в Астрон. журнал*, 26, 657
- Панчук В.Е., Афанасьев В.Л., 2011, *Астрофиз. Бюллетень*, 66, 253

- Решетников В.П., 1999, *Астрофизика*, 41, 106
- Решетников В.П., Faúndez-Abans M., deOliveira-Abans M., 2011, *Письма в Астрон. журнал*, 37, 194
- Сильченко О.К., 2002, *Письма в Астрон. Журнал*, 28, 243
- Сильченко О.К., 2005, *Письма в Астрон. Журнал*, 31, 250
- Сильченко О.К., Афанасьев В.Л., 2008, *Астрономический Журнал*, 85, 972
- Смирнов М.А., Комберг Б.В., 1978, *Письма в Астрон. журнал*, 4, 245
- Смирнова А.А., Моисеев А.В., Афанасьев В.Л., 2006, *Письма в Астрон. журнал*, 32, 577
- Тутуков А.В., Федорова А.В., 2006, *Астрон. журнал*, 84, 1
- Шаляпина Л.В., Моисеев А.В., Яковлева В.А., 2002, *Письма в Астрон. журнал*, 28, 505
- Шаляпина Л.В., Моисеев А.В., Яковлева В.А., Гаген-Торн В.А., Барсунова О.Ю., 2004, *Письма в Астрон. журнал*, 2004, 30, 643
- Шаляпина Л.В., Меркулова О. А., Яковлева В.А., Волков Е.В., 2007, *Письма в Астрон. журнал*, 33, 585