

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

На правах рукописи

УДК 523.852.32:520.35; 524.72:520.35

МОИСЕЕВ Алексей Валерьевич

**МОРФОЛОГИЯ И КИНЕМАТИКА ГАЗА И ЗВЕЗД В
ГАЛАКТИКАХ С ПЕРЕМЫЧКАМИ**

(01.03.02 – астрофизика, радиоастрономия)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Афанасьев В.Л.

Нижний Архыз – 2002

Оглавление

Введение	4
1 Методика наблюдений и обработки данных панорамной спектроскопии	19
1.1 Введение	19
1.2 Интерферометр Фабри-Перо в спектрографе SCORPIO . . .	21
1.3 Обработка наблюдений со сканирующим ИФП	27
1.3.1 Основные соотношения	27
1.3.2 Сравнение счетчика фотонов и ПЗС	29
1.3.3 Формирование кубов данных и учет плоского поля . .	30
1.3.4 Вычитание линий ночного неба и фотометрическая коррекция	34
1.3.5 Калибровка шкалы длин волн	36
1.3.6 Оценка точности измерения скоростей	38
1.4 Изучение звездной кинематики с панорамным спектрографом MPFS	41
1.4.1 Методы измерения скорости и дисперсии скоростей .	42
1.4.2 Проблема аппаратного контура	47
1.4.3 Последовательность работы с данными MPFS	48
1.4.4 Оценка ошибок	51
2 Моделирование движений газа и звезд в галактиках с перемычками	55
2.1 Введение	55
2.1.1 Бар как динамически выделенная система	55

2.1.2	Интерпретация наблюдаемых лучевых скоростей	59
2.1.3	Дисперсия лучевых скоростей	61
2.2	Влияние эффекта проекции на наблюдаемые поля скоростей газа.	61
2.2.1	Построение модельных полей скоростей	61
2.2.2	Методика поиска параметров ориентации	63
2.2.3	Анализ результатов моделирования	65
2.2.4	Кинематика газа в галактике NGC 972	69
2.3	Динамическое моделирование движений звезд в перемычках	71
2.3.1	Описание модели	71
2.3.2	Распределение дисперсии скоростей	72
2.3.3	Двойные бары	75
3	Наблюдение галактик с перемычками	77
3.1	Введение: история вопроса	77
3.2	Необходимость панорамной спектроскопии	83
3.3	Наблюдения и обработка	86
3.3.1	Панорамная спектроскопия с MPFS	87
3.3.2	Кинематика ионизованного газа с ИФП	88
3.3.3	ИК-фотометрия на 2.1-м телескопе	89
3.3.4	Фотометрия на БТА и HST	90
3.4	Методы анализа полей скоростей и изображений	91
3.5	Описание отдельных галактик	94
3.5.1	Атлас (Приложение А.)	94
3.5.2	NGC 470	96
3.5.3	NGC 2273 (Mrk 620)	98
3.5.4	NGC 2681	99
3.5.5	NGC 2950	102
3.5.6	NGC 3368 (Messier 96)	102
3.5.7	NGC 3786 (Mrk 744)	103
3.5.8	NGC 3945	104
3.5.9	NGC 4736 (Messier 94)	105

3.5.10	NGC 5566	106
3.5.11	NGC 5850	107
3.5.12	NGC 5905	108
3.5.13	NGC 6951	109
3.5.14	NGC 7743	111
4	Анализ общих особенностей проявлений баров.	113
4.1	Распределения дисперсии скоростей звезд	113
4.2	Поля скоростей	117
4.2.1	Влияние бара	118
4.2.2	Смещение центра вращения	121
4.2.3	Противовращение газа и звезд	121
4.2.4	Полярные околядерные диски	122
4.3	Мини-спирали	125
4.4	Остальные кандидаты в галактики с двойными барами	130
4.5	Иллюзия второго бара	133
	Заключение	137
	Литература	141
A	Атлас галактик с перемычками	152

Введение

"..it is becoming clear that bar phenomenon is pervasive, complex and very important for most areas of galactic structure and evolution"

(K.C. Freeman)

Актуальность темы

Согласно наблюдательным оценкам, галактики с центральными перемычками (барами) составляют большую часть (50-70%) от общего количества близких дисковых галактик типов S0-Sd (Сэлвуд, Вилкинсон, 1993; Кнапен и др., 2000б). Движения звезд и газовых облаков внутри перемычки заметно отличаются от невозмущенного кругового вращения, существенными оказываются радиальные течения газа к центру, что подтверждается как непосредственными наблюдениями (Афанасьев, Шаповалова, 1981; Дюваль, Моне, 1985; Кнапен и др., 2000а), так и многочисленными модельными расчетами, обзор которых можно найти в работе Линдблада (1999). Центральные области таких галактик оказываются выделенными по своим динамическим характеристикам, темпам звездообразования, концентрации газопылевой материи. К примеру, концентрация молекулярного газа внутри центрального килопарсека галактик с барами на порядок выше, по сравнению с галактиками без перемычек (Сакамото и др., 1999).

Динамическое влияние бара рассматривается как один из основных механизмов транспортировки межзвездного газа из диска в околядерную область, где он становится "топливом" для околядерной вспышки звездообразования или активного ядра (Комб, 2001). Но связь между наличием бара и активного (в случае дисковой галактики – сейфертовского) ядра далеко не однозначна. Так, относительная доля баров в сейфертовских галактиках лишь незначительно превышает эту долю в галактиках

без активного ядра (Кнапен и др., 2000б; Лайне и др., 2002), по данным других авторов присутствие активного ядра может быть вообще не связано с баром (Макуез и др., 2000). Основное противоречие, по-видимому, состоит в том, что в баре газ концентрируется не в самом ядре, а в кольце радиусом несколько сотен парсек, в области внутреннего линдбладовского резонанса (ILR). Поэтому необходим дополнительный механизм, чтобы уменьшить угловой момент вращения газа, находящегося на расстоянии 100 – 1000 пк от центра, и транспортировать газ в область действия гравитационных сил центральной сверхмассивной черной дыры (Комб, 2001). Изящным решением задачи о переносе вещества к активному ядру является идея Шлосмана и др. (1989) о том, что в газовом диске (кольце) внутри крупномасштабного бара может образоваться еще один бар, который вновь формирует потоки газа в направлении ядра. Система из двух баров способна собирать межзвездный газ на масштабах в несколько килопарсек и концентрировать его на расстояниях 1 – 10 пк от центра.

Повышенный интерес к проблеме двойных баров связан с тем, что нечто похожее иногда видно на изображениях галактик с перемычками. Еще де Вокулер (1975) обнаружил бароподобную структуру, расположенную внутри крупномасштабного бара в NGC 1291. Систематическое наблюдательное изучение галактик с двойными барами было предпринято Бута, Крокке (1993), которые опубликовали первый список галактик с произвольной ориентацией внутреннего (второго) бара относительно внешнего (первого). Анализ формы изофот позволил обнаружить вторые бары на оптических и инфракрасных изображениях ряда галактик с перемычками (Возняк и др., 1995; Фридли и др., 1996; Лайне и др., 2002). Подробная библиография и список кандидатов в двойные бары, составленный по литературе, приводятся в работе Моисеева (2001б).

Хотя сейчас существует довольно большое количество работ по этой теме, динамическое поведение подобных звездных конфигураций не ясно. Мачиевски, Спарк (2000) показали принципиальную возможность существования замкнутых орбитальных петель, поддерживающих форму обоих баров, вращающихся с разной угловой скоростью. Похожее независимо вращающиеся структуры иногда появляются и в экспериментах по моделированию звездно-газовых галактических дисков (Пфеннигер, Норман, 1990; Фридли, Мартине, 1993). Численное изучение поведения газа в двойных барах представлено в работах Мачиевски и др. (2002) и Шлосман, Хеллер (2002). На рис. 1 показана схема галактики с двумя независимо вращающимися барами, которая стала практически общепринятой.

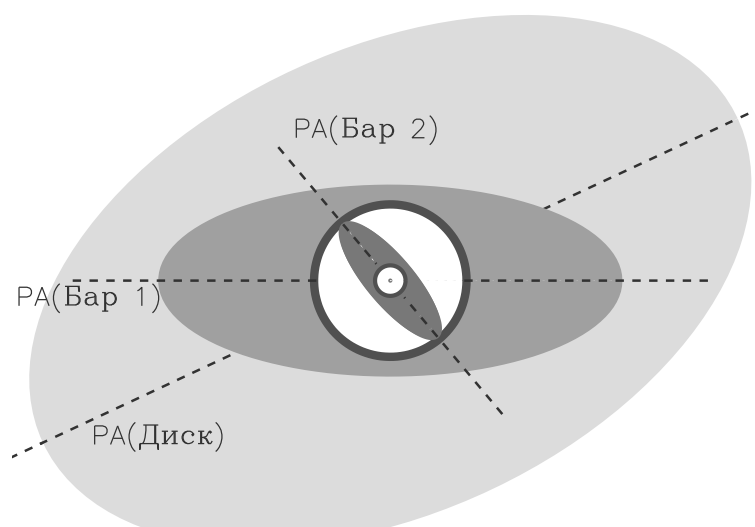


Рис. 1: Общепринятая схема изображения галактики с двумя барами в проекции на картинную плоскость. Выделено кольцо, соответствующее области внутреннего линдбладовского резонанса внешнего бара. Пунктиром показаны основные направления ориентации изофот

Следует заметить, что результаты численных экспериментов сильно зависят от принятой модели. Так Хоперсковым и др. (2002б) показано, что второй бар может периодически возникать лишь только на определенных этапах динамической эволюции галактики и практически сразу же он должен распадаться. Долгоживущий второй бар смоделировать пока не удастся (Фридли, Мартине, 1993; Эрвин, Спарк, 2002). Для проверки противоречивых теоретических предсказаний требуются новые наблюдательные данные.

Многочисленные наблюдательные работы указывают на то, что в случае двойных баров мы, по-видимому, сталкиваемся с какой-то новой структурной особенностью галактик с перемычками. Однако подавляющее большинство этих работ основано только на фотометрических данных, когда на изображении галактики внутри внешнего бара видна некоторая протяженная структура. Формальное применение изофотного анализа (Возняк и др., 1995) позволяет некоторым авторам даже выделять "тройные бары" (Джунгвет и др., 1997; Фридли и др., 1996; Эрвин, Спарк, 1999), без какой-либо аргументации динамической устойчивости подобных конфигураций. Но наблюдаемые особенности фотометрической структуры таких галактик могут объясняться и менее экзотическими способами, без привлечения второго или третьего баров. Сплюснутый балдж, сложное распределение областей звездообразования и пыли в околоядерной области, эллиптическое кольцо в области резонансов большого бара – все это мо-

жет создать иллюзию присутствия второго бара на изображениях галактик (Фридли и др., 1996; Моисеев, 2001б). Для решения проблемы необходимы кинематические данные, т.е. измерения лучевых скоростей и дисперсии скоростей газа и звезд. Поскольку движение вещества в области баров заметно отличается от кругового, то большую помощь могут оказать методы панорамной спектроскопии, позволяющие строить двухмерные распределения лучевых скоростей и дисперсии лучевых скоростей в картинной плоскости. Подобные наблюдения возможны только на крупнейших телескопах, снабженных соответствующей аппаратурой. К их числу относится и 6-м телескоп САО РАН, на котором и была выполнена настоящая работа.

Цели и задачи исследования

В работе поставлена задача детального изучения галактик-кандидатов в объекты типа "бар-в-баре" с целью решения вопроса о том, как наличие второго бара отражается на структуре и динамике центральной килопарсековой области. Основной вопрос, который предстояло решить, это является ли второй бар, обнаруживаемый на изображениях галактик, независимо вращающейся динамически выделенной подсистемой. Для этого необходимо развить существующие методы панорамной спектроскопии, выбрать и разработать оптимальные алгоритмы обработки и анализа таких наблюдений, а также сравнить их с результатами численного моделирования галактик с перемычками. По сравнению с другими методами оптических наблюдений, панорамная спектроскопия дает возможность наиболее детально изучить особенности движений газовой и звездной подсистем в галактиках. Подобный наблюдательный материал необходимо собрать для возможно большего количества галактик с перемычками с целью статистического изучения феномена двойного бара.

Научная новизна

Изготовлен новый многорежимный спектрограф 6-м телескопа SCORPIO (Spectral Camera with Optical Reducer for Photometrical and Interferometrical Observations). Спектрограф по эффективности в 4-6 раз превосходит существующие отечественные приборы этого класса и сравним с лучшими мировыми аналогами. Разработаны новые алгоритмы обработки наблюдений протяженных объектов со сканирующим интерферометром Фабри-

Перо (ИФП), позволившие полностью использовать преимущества ПЗС-матрицы в качестве детектора. Построены критерии применимости распространенных методов анализа полей скоростей для анализа наблюдаемой кинематики галактик с перемычками. Впервые получен однородный материал по двухмерной кинематике газа и звезд для выборки галактик с двойными барами. Показано, что второй (внутренний) бар, обнаруживаемый многими исследователями на прямых изображениях галактик, не является, вопреки общепринятому мнению, динамически выделенной звездно-газовой подсистемой.

Научная и практическая значимость работы

Новый спектрограф – фокальный редуктор 6-м телескопа SCORPIO и разработанные автором алгоритмы обработки наблюдательных данных позволили в несколько раз повысить эффективность метода наблюдений с интерферометром Фабри-Перо, как по пропусканию, так и по точности измерения лучевых скоростей. SCORPIO с интерферометром Фабри-Перо может использоваться (и уже используется) для изучения кинематики различных протяженных астрофизических объектов (туманности, галактики, шаровые и рассеянные звездные скопления и т.д.). Развитый автором комплексный подход к изучению структуры и кинематики галактик с перемычками, включающий в себя анализ полей лучевых скоростей, дисперсии скоростей, оптических и ИК изображений, может использоваться для детального исследования различных типов галактик со сложной морфологической структурой (активные галактические ядра, взаимодействующие и сливающиеся галактики, галактики с полярными кольцами).

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Метод панорамной спектроскопии с интерферометром Фабри-Перо в новом спектрографе SCORPIO с квантовой эффективностью системы в 4 раза превосходящей старый вариант. Алгоритмы, позволившие существенно повысить точность измерения лучевых скоростей и довести ее до 2-3 км/с.
2. Метод определения геометрии движений газа и звезд в околядерных областях галактик (бар, наклонный диск), основанный на анализе результатов численного моделирования.

3. Результаты детальной панорамной спектроскопии 13 галактик с перемычками на 6-м телескопе САО РАН – двумерные распределения лучевых скоростей и дисперсии скоростей звезд в околядерных областях, крупномасштабные поля скоростей ионизованного газа, кривые вращения газа и звезд. Данные поверхностной фотометрии для этих галактик, полученные на 6-м телескопе (САО РАН) в фильтрах V и R и на 2.1-м телескопе (обсерватория ОАН, Мексика) в фильтрах JHK'.
4. Вывод о том, что "галактики с двойными барами" не являются отдельным типом галактик, а представляют из себя объекты с сильно различной морфологией околядерных областей. Внутренняя "бароподобная" структура, обнаруживаемая на изображениях таких галактик, никак не связана с динамически выделенным вторым баром.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Zasov A.V., Moiseev A.V., *"Nuclear kpc-sized disks of spiral galaxies"* // 1999, in "Activity in galaxies and related phenomena (eds. Terzian et al.), IAU Symposium 194, San Francisco: ASP, p. 279-284
2. Моисеев А.В., Муцевой В.В. *"Влияние эффекта проекции на наблюдаемые поля скоростей газа в галактиках с перемычками"* // 2000, Письма в Астрон. журн., том 26, с. 657-664
3. Moiseev A.V. *"Measurement of radial velocities and velocity dispersion of stars in circumnuclear regions of galaxies using the 2D spectroscopy technique"* // 2001, Bull. Spec. Astrophys. Obs., vol. 51, p. 11-20
4. Moiseev A.V. *"Velocity dispersion of stars and gas motion in double-barred galaxies"* // 2001, Bull. Spec. Astrophys. Obs., vol. 51, p. 140-150
5. Afanasiev, V.L., Dodonov S.N., Moiseev A.V. *"Kinematics of circumnuclear regions of galaxies: 2D spectroscopy on SAO RAS 6m telescope"* // 2001, in "Stellar dynamics: from classic to modern" (eds. Osipkov et al.), Saint Petersburg, p. 103-109
6. Moiseev A.V., Afanasiev V.L. *"Stellar and gaseous kinematics of double-barred galaxies"* // 2001, in "Stellar dynamics: from classic to modern" (eds. Osipkov et al.), Saint Petersburg, p. 117-120

7. Khoperskov A.V., Moiseev A.V., Chulanova E.A., *"Dynamical modeling of SB galaxies"* // 2002, Bull. Spec. Astrophys. Obs., vol. 52, p. 135-144
8. Moiseev A.V., Valdes J.R., Chavushyan V.H., *"2D spectroscopy of double-barred galaxies"* // 2002, in "Galaxies: the third dimension" (eds Rossado et al.), ASP Conf. Ser., vol. 264, p. 232-239, (astro-ph/0202192)
9. Moiseev A.V., Afanasiev, V.L., Dodonov S.N., *"Fabry-Perot observations at the 6m telescope"* // 2002, in "Galaxies: the third dimension" (eds. Rossado et al.), ASP Conf. Ser., vol. 264, p. 147-148, (astro-ph/0202193)
10. Моисеев А.В., *"Обработка ПЗС-наблюдений со сканирующим интерферометром Фабри-Перо"* // 2002, препринт САО, Н. Архыз, № 166, с. 1-20 (принято к печати в Bull. Spec. Astrophys. Obs.)
11. Моисеев А.В., Валдес Х.Р., Чавушян В.О., *"Структура и кинематика галактик с двойными барами. I. Наблюдения."* // 2002, препринт САО, Н. Архыз, № 171, с. 1-40
12. Моисеев А.В. *"Панорамная спектроскопия галактик с двойными барами"* // 2002, препринт САО, Н. Архыз, № 173, с. 1-18 (принято к печати в Письма в Астрон. журн., 2002, т. 28)

Личный вклад автора

Задача изучения галактик с двойными барами сформулирована автором. Идея использования двумерных распределений дисперсии лучевых скоростей звезд принадлежит В.Л. Афанасьеву. Все наблюдательные данные на 6-м телескопе получены и обработаны лично автором. В работах [8] и [11] автору принадлежит постановка проблемы, выполнение спектральных и фотометрических наблюдений на 6-м телескопе, анализ и обсуждение результатов. Соавторами (В.О. Чавушяном и Х.Р. Валдесом) выполнены фотометрические наблюдения на 2.1-м телескопе в ближнем инфракрасном диапазоне и их первичная обработка. В создании нового спектрографа SCORPIO вклад автора равноценен с остальными участниками проекта. Новые алгоритмы обработки наблюдений с интерферометром Фабри-Перо со SCORPIO разработаны и программно реализованы автором. В работе [2] автору принадлежит постановка проблемы и анализ модельных полей скоростей, обсуждение результатов проводилось совместно В.В. Мусцевым. В работе [7] автору принадлежит постановка задачи по изучению проекций

модельных распределений дисперсии скоростей звезд на картинную плоскость, само динамическое моделирование выполнено А.В. Хоперсковым и Е.А. Чулановой. В работах [1], [5], [6] и [9] вклад всех соавторов равноправен.

Апробация результатов

Основные результаты диссертации докладывались на семинарах и конкурсах научных работ в САО РАН, на коллоквиуме "Двухмерная спектроскопия галактических и внегалактических туманностей" (САО, 2000), а также на одной всероссийской и 4-х международных конференциях:

1. Joint European and National Astronomical Meeting (JENAM-2000), Москва, 2000
2. "Stellar dynamics: from classic to modern Санкт-Петербург, 2000
3. Всероссийская астрономическая конференция (ВАК-2001), Санкт-Петербург, 2001
4. "Galaxies: The third dimension Мексика, 2001
5. "Chemical and dynamic evolution of stars and galaxies Одесса, 2002

Краткое содержание диссертации

Диссертация состоит из Введения, 4-х глав, Заключения и Приложения; содержит 48 рисунков, 10 таблиц. Список цитируемой литературы включает 164 наименования. Общий объем диссертации – 170 страниц.

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

Первая глава посвящена методическим разработкам в области панорамной спектроскопии.

В разделе 1.1 описывается современное состояние методов панорамной (двухмерной) спектроскопии, позволяющих получать независимую спек-

тральную информацию от отдельных участков протяженного объекта, равномерно заполняющих поле зрения прибора. Используемые спектрографы подразделяются на два основных типа: с одновременной и последовательной регистрацией куба данных. В CAO РАН развиваются оба типа таких приборов: – панорамный волоконный спектрограф MPFS (Афанасьев и др., 1990, 2001) и сканирующий интерферометр Фабри-Перо (ИФП). С точки зрения изучения внутренней кинематики галактик, MPFS позволяет измерить лучевые скорости и их дисперсию для звездного компонента в окрестностях ядра, а также изучить движения ионизованного газа сразу в нескольких эмиссионных линиях. С помощью ИФП можно построить детальное крупномасштабное поле скоростей в одной-двух эмиссионных линиях. Наблюдательная часть диссертации основана на комплексном изучении объектов с использованием преимуществ каждого из используемых приборов.

В разделе 1.2 описывается новый редуктор светосилы SCORPIO, разработанный и изготовленный в CAO РАН при непосредственном участии автора. Рассматриваются возможности SCORPIO при наблюдениях со сканирующим интерферометром Фабри-Перо.

В разделе 1.3 подробно описываются алгоритмы, на которых основан пакет программ, написанный автором для обработки данных наблюдений с ИФП. Основное внимание уделяется процедуре фотометрической коррекции каналов и вычитанию линий ночного неба, что особенно важно для ПЗС-наблюдений (по сравнению со счетчиком фотонов). Особенностью таких наблюдений является то, что точность измерения лучевых скоростей часто определяется не формальным значением отношения сигнал/шум, а присутствием паразитных колец в пространстве длин волн. Рассматриваются причины возникновения подобных артефактов и методы борьбы с ними на этапе редукции данных. Исследуется влияние различных источников ошибок на оценки лучевых скоростей в кубе данных. Показано отсутствие систематического сдвига при измерении лучевых скоростей в интерферометрических наблюдениях со SCORPIO.

В разделе 1.4 описываются методы, используемые в пакете программ, написанных автором для анализа звездной кинематики по данным наблюдений с MPFS. Здесь же рассматривается проблема учета аппаратного контура спектрографа при построении двумерных карт дисперсии лучевых скоростей. Приводятся оценки точности измерения лучевых скоростей и дисперсии скоростей звездного компонента в дисковых галактиках ранних типов.

Вторая глава посвящена численному моделированию движений газа и звезд в галактиках с неосесимметричным распределением гравитационного потенциала.

В разделе 2.1 дается обзор современного состояния проблемы изучения движений звездно-газовой подсистемы в галактиках с перемычками, как с теоретической, так и с наблюдательной точек зрения. На сегодняшний день можно считать доказанным, что бары являются динамическими выделенными галактическими подсистемами, причем движения газа и звезд в них имеют различный характер. Бар отнимает угловой момент газа диска, в результате чего формируются потоки газа в направлении к центру галактики, что приводит к увеличению концентрации газа в околоядерной области. Показано, что для правильной интерпретации структуры околоядерных областей необходимо сравнение результатов моделирования с наблюдаемыми в картинной плоскости двумерными распределениями лучевых скоростей и дисперсии скоростей.

В разделе 2.2 обсуждается проблема определения типа движений газа в центральных областях дисковых спиральных галактик. Рассматриваются два принципиально различных случая: наличие некруговых движений в области трехосного потенциала перемычки или же движения по круговым орбитам, но вне плоскости внешнего (основного) диска галактики. Оба типа движений имеют сходные наблюдаемые проявления в поле лучевых скоростей газа. Необходим надежный критерий для разделения этих двух возможностей. С целью поиска такого критерия, анализируются результаты двумерного нелинейного гидродинамического моделирования движений газа в дисковых галактиках с перемычками. Для различных наклонов плоскости галактики к лучу зрения и углов ориентации бара получены распределения лучевой скорости и поверхностной плотности газа в картинной плоскости. Показано, что использование формальной модели движений по круговым орбитам при анализе поля скоростей может привести к неверному выводу о присутствии наклонного (полярного) диска в центре галактики. Только сравнение позиционных углов большой оси внутренних изофот и динамической оси в поле скоростей (линии максимального изменения лучевой скорости) позволяет отличить бар от наклонного диска.

В разделе 2.3 описываются результаты динамического моделирования движений звезд в перемычках методом N-тел. Основное внимание уделяется проблеме распределения дисперсии скоростей в перемычках, где наблюдается сильная анизотропия эллипсоида скоростей (радиальная, азимутальная и вертикальная компоненты дисперсии скоростей имеют раз-

личное распределение в галактике). Построены карты распределения дисперсии скоростей вдоль луча зрения для различных взаимных ориентации диска и бара. Если большие оси бара и галактики совпадают, то поле дисперсии не обнаруживает бар-образования. При других ориентациях бара и большой оси галактики заметны эллипсоидальные образования в поле дисперсии лучевых скоростей, симметричные относительно большой оси перемички.

Показано, что при определенных условиях в процессе динамического моделирования формируются структуры, которые можно интерпретировать как двойные бары. Однако время жизни таких структур невелико – они формируются на заключительных стадиях развития гравитационной неустойчивости, как правило, при достаточно массивных сфероидальных компонентах.

Третья глава посвящена наблюдательному изучению кинематики кандидатов в галактики с двойными барами.

В разделе 3.1 излагается история изучения галактик с двумя барами, начиная с первой работы де Вокулера (1975). Дается обзор фотометрических характеристик таких объектов. Факт отсутствия выделенного значения угла между обоими бароподобными структурами на оптических и инфракрасных снимках галактик всеми авторами интерпретируется в пользу различия скоростей вращения обоих баров (динамически выделенный второй бар). Приводится список из более чем 90 кандидатов в такие объекты, составленный по литературным данным. Многочисленные наблюдательные работы указывают на то, что в случае двойных баров мы, по-видимому, сталкиваемся с какой-то новой структурной особенностью галактик с перемичками. Однако подавляющее большинство всех работ в этой области основано только на фотометрических данных, т.е. на том факте, что на изображении галактики внутри основного крупномасштабного бара видна некоторая протяженная структура. Формальный подход к интерпретации наблюдаемых радиальных изменений параметров эллиптических изофот позволил некоторым авторам даже выделять на изображениях "тройные бары без какой-либо аргументации возможного динамического поведения подобных конфигураций.

В разделе 3.2 показано, что наблюдаемая фотометрическая структура рассматриваемых галактик может объясняться и менее экзотическим способом, без привлечения гипотезы динамически независимого бара. Сплюснутый балдж, сложное распределение областей звездообразования и пыли

в околядерной области, эллиптическое кольцо в области резонансов большого бара – все это может создать иллюзию присутствия второго бара на изображениях галактик. Поскольку движение вещества в области баров заметно отличается от кругового (раздел 2.1), то значительно больше информации (по сравнению с классической спектроскопией) можно получить с помощью методов панорамной спектроскопии, которые позволяют сразу строить двухмерные распределения лучевых скоростей и их дисперсии в картинной плоскости. Поэтому автором была проведена серия наблюдательных программ по изучению морфологии и кинематики галактик с двойными барами, с целью ответа на вопрос: "Являются ли вторые бары реально существующими, динамически выделенными галактическими структурами?"

Сам процесс наблюдений описывается в разделе 3.3. Необходимый наблюдательный материал был получен для 13 галактик, что составляет около трети от общего числа таких объектов на северном небе. Околядерные области всех галактик наблюдались методом панорамной спектроскопии на 6-м телескопе САО РАН с помощью мультиспектрального волоконного спектрографа MPFS. По этим данным были построены поля лучевых скоростей и дисперсия скоростей звезд в околядерных областях, поля скоростей ионизованного газа в линиях [OIII], [NII] и $H\beta$. Крупномасштабные поля скоростей ионизованного газа были построены по результатам наблюдения с ИФП на 6-м телескопе. Поверхностная фотометрия в ближнем инфракрасном диапазоне (в полосах JHK') проводилась на 2.1-м телескопе обсерватории OAN (Мексика) с помощью прибора CAMILA. Для 7 галактик были получены изображения на 6-м телескопе с помощью редуктора светосилы SCORPIO. Также использовались данные из архива Космического Телескопа им. Хаббла (HST).

В разделе 3.4 описывается методика анализа наблюдательного материала. По полям лучевых скоростей определялась радиальная зависимость ориентации динамической оси (линии максимального градиента скорости), строились средние кривые вращения. Также проводились анализ формы и ориентации изофот на изображениях галактик, Фурье-анализ распределения поверхностной яркости в плоскости галактики.

В разделе 3.5 дано описание структуры околядерных областей отдельных галактик, на основе полученного наблюдательного материала. В большинстве наблюдавшихся галактик обнаружены различные типы некруговых движений звезд и ионизованного газа, связанные как с внешним баром и так и с другими особенностями структуры центральной килопарсековой

области. Так в NGC 470 наблюдается значительное (около 600 пк) смещение центра вращения газа и звезд относительно центра изофот. В линзовидной галактике NGC 3945 обнаружен внутренний газовый диск радиусом около 500 пк, вращающийся в противоположную сторону относительно звездного диска. Доказано существование в NGC 5850 полярного газового диска, а в NGC 2681 полярного звездно-газового диска. Плоскости вращения этих дисков, размером в несколько сотен парсек, практически ортогональны плоскостям внешних дисков галактик. В NGC 4736 и NGC 6951 некруговые движения ионизованного газа скорее всего связаны с мини-спиральными структурами в околядерных областях этих галактик.

Примечательно, что все некруговые движения газа и звезд, наблюдающиеся в галактиках выборки, объясняются без привлечения второго внутреннего бара, в качестве дополнительного динамического компонента.

В **Четвертой главе** проводится анализ общих особенностей проявлений баров в изучаемых объектах. В разделе 4.1 показано, что фаза и амплитуда второй гармоники распределения дисперсии лучевых скоростей звезд по позиционному углу несет информацию о характере анизотропии пространственных компонент дисперсии скоростей в баре. Даже при самых общих предположениях о влиянии бара на движения звезд, оказывается, что наблюдаемое распределение дисперсии скоростей определяется только внешней перемычкой и никак не связано с внутренней бароподобной структурой. Автор считает это одним из основных аргументов в пользу того, что вопреки распространенному мнению, второй (внутренний) бар не является динамически выделенной галактической структурой.

В разделе 4.2 галактики классифицируются по типу структуры центральной килопарсековой области. Показано, что поля скоростей в 11 объектах не обнаруживают влияния центральной бароподобной структуры, а связаны только с крупномасштабной перемычкой. В двух галактиках (NGC 3368 и NGC 3786) наоборот, динамически проявляет себя только внутренний мини-бар. Однако и здесь нельзя говорить о динамически выделенном втором баре, поскольку Фурье-анализ распределения поверхностной яркости показывает, что повороты изофот, интерпретируемые предшествующими исследователями как внешний бар, на самом деле вызваны двухрукавной спиральной структурой, отходящей от мини-бара. В этом же разделе обсуждается проблема существования полярных околядерных дисков внутри крупномасштабных баров. В NGC 5850 полярный диск расположен перпендикулярно к большой оси бара, что находится в согласии с гипотезой о переходе газа на полярные орбиты под воздействием гравитационного по-

тенциала бара. Похожие структуры обнаружены в нескольких галактиках другими авторами (см. Сильченко, 2002).

В разделе 4.3 показано, что в 5-ти из 13-ти галактик выборки внутри внешнего бара на изображениях с высоким пространственным разрешением с Космического телескопа наблюдаются околядерные мини-спиральные структуры. Более того, проведенный автором анализ имеющихся в литературе и в открытом архиве Космического телескопа изображений указывает на то, что мини-спирали (ядерные спирали размером несколько сотен парсек) присутствуют в 35 – 45% всех кандидатов в галактики с двойными барами, список которых приводился в разделе 3.1. Предложен сценарий, объясняющий связь таких спиралей с барами. Бар способствует концентрации газа внутри области резонанса ILR, так что в центре образуется газопылевой диск размером в несколько сотен парсек. И в этом диске под действием акустической либо гравитационной неустойчивости образуется спиральная структура, как правило многорукавная. На примере двух галактик с многорукавными ядерными спиралями, для которых автором был получен материал по кинематике газа и звезд (NGC 4736 и NGC 6951), приводятся аргументы в пользу того, что здесь имеют место газопылевые, а не звездные спирали.

В разделе 4.4 критически рассматривается морфология всех известных галактик – кандидатов в объекты с двойными барами. Показано, что, по крайней мере, в половине всех галактик "со вторым внутренним баром изофоты этого "внутреннего бара" вытянуты вдоль линии узлов внешнего диска. Такое совпадение никак нельзя назвать случайным, но для его понимания вовсе не требуется привлечения гипотезы второго бара. Поведение изофот сразу объясняется более "естественными" причинами, такими как сплюснутый сфероидальный балдж, поверхностная яркость которого в околядерной области превалирует над внешним баром, или же выделенный диск внутри резонанса ILR это бара.

В разделе 4.5 суммируются результаты наблюдательного изучения галактик с двойными барами. На основании проведенного исследования оказалось, что так называемые "галактики с двойными барами не принадлежат к одному классу галактик, а представляют из себя объединение объектов с сильно различающейся морфологией околядерных областей. Таким образом, формальное применение изофотного анализа к изучению галактик, без привлечения кинематических данных, может приводить к неправильным выводам. Представляется, что "галактики с двойными барами" можно условно разделить на два типа. К первому относятся галактики ран-

них типов (S0-Sa). Иллюзия второго бара здесь связана с трехосной формой галактического балджа. Ко второму типу относятся галактики более поздних типов (Sab-Sc). Здесь внутри крупномасштабных баров часто присутствуют мини-спиральные газопылевые структуры, искажающие форму изофот.

Предлагаемый автором отказ от традиционного представления о динамически независимых двойных барах позволяет разрешить целый ряд противоречий между существующими моделями вложенных баров и результатами наблюдений. В частности, находит объяснение тот факт, что согласно статистическим данным, фотометрический "второй бар" никак не связан с присутствием в галактике активного ядра (Лайне и др. 2002; Эрвин, Спарк, 2002), хотя из теоретических соображений корреляция здесь должна быть значительно более тесная, чем для "одинарных" баров. Ответом является то, что "второй бар обнаруживающийся по изменению формы изофот, вообще не является реальной динамически выделенной структурой в галактике.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

В **Приложении** приводится атлас галактик с перемичками, изучаемых в данной работе: поля лучевых скоростей и дисперсия скоростей звезд в околядерных областях, поля скоростей ионизованного газа в линиях H_α , H_β , [OIII] и [NII], полученные на 6-м телескопе. Здесь также приводятся радиальные зависимости параметров изофот и изображения галактик в оптическом и ближнем ИК диапазонах.

Глава 1

Методика наблюдений и обработки данных панорамной спектроскопии

"Метод важнее открытия"
(Л.Д. Ландау)

В этой главе рассматривается проблема изучения протяженных астрономических объектов методами панорамной спектроскопии. Основные типы используемых с этой целью приборов описываются в разделе 1.1. В разделе 1.2 рассматривается новый редуктор светосилы SCORPIO, используемый для наблюдений с интерферометром Фабри-Перо и изготовленный в САО РАН с участием автора. В разделе 1.3 подробно описываются алгоритмы на которых основан пакет программ, написанный автором для обработки данных наблюдений с ИФП. Основное внимание уделяется процедуре фотометрической коррекции каналов и вычитанию линий ночного неба, что особенно важно для ПЗС-наблюдений (по сравнению со счетчиком фотонов). Исследуются источники ошибок измерений лучевых скоростей. В разделе 1.4 описываются методы, используемые в пакете программ, написанных автором для анализа звездной кинематики по данным наблюдений с MPFS. Здесь же рассматривается проблема учета аппаратного контура спектрографа при построении двухмерных карт дисперсии лучевых скоростей.

1.1 Введение

Методы панорамной (или 2D) спектроскопии, активно развивающиеся в последнее десятилетие, позволяют получать независимую спектральную информацию от отдельных участков протяженного объекта, равномерно

заполняющих поле зрения прибора. После определенной обработки наблюдательные данные обычно представляют 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 . 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 (Бэкон и др., 1995), пучка световолокон (Аррибас и др., 1998) или системы зеркал – резателей изображений (Вейтзел, 1996). Для решения спектрофотометрических задач наиболее оптимальной оказалась комбинация микролинз и световолокон, впервые реализованная в спектрографе MPFS Афанасьевым и др. (1990, 2001). Число пространственных элементов в полевых спектрографах ограничено прежде всего форматом детектора и обычно не превышает нескольких сотен, достигая ~ 1600 в спектрографе SAURON (Бэкон и др., 2002). Поэтому поле зрения таких спектрографов составляет не более нескольких десятков угловых секунд, в то время как протяженность куба данных по шкале длин волн может составлять сотни ангстрем. В другом типе спектрографов происходит последовательная регистрация изображений на разных длинах волн. К таким приборам относятся системы с использованием сканирующего интерферометра Фабри-Перо. Здесь относительно небольшой спектральный интервал (всего несколько десятков ангстрем) компенсируется значительно большим полем зрения, которое даже на крупных телескопах может составлять десятки угловых минут.

Сейчас в САО успешно работают спектрографы обоих вышеперечисленных типов – мультизрачковый волоконный спектрограф MPFS и сканирующий интерферометр Фабри-Перо (ИФП). MPFS имеет поле зрения размером от $8''$ до $16''$ и ширину спектрального диапазона $\Delta\lambda = 1200 - 4800 \text{ \AA}$, а ИФП – поле зрения $5'$ при $\Delta\lambda = 10 - 25 \text{ \AA}$. С точки зрения изучения внутренней кинематики галактик, MPFS позволяет измерить лучевые скорости и дисперсию скоростей звездного компонента в околядерной области, а также изучить движения ионизованного газа сразу в нескольких эмиссионных линиях. С помощью ИФП можно построить детальное крупномасштабное поле скоростей в одной-двух эмиссионных линиях. Примеры кубов данных, получаемых с каждым из приборов, приведены на рис. 1.1. Следует отметить, что хотя оба типа спектрографов (с одновременной и с последовательной регистрацией) сейчас широко распространены в круп-

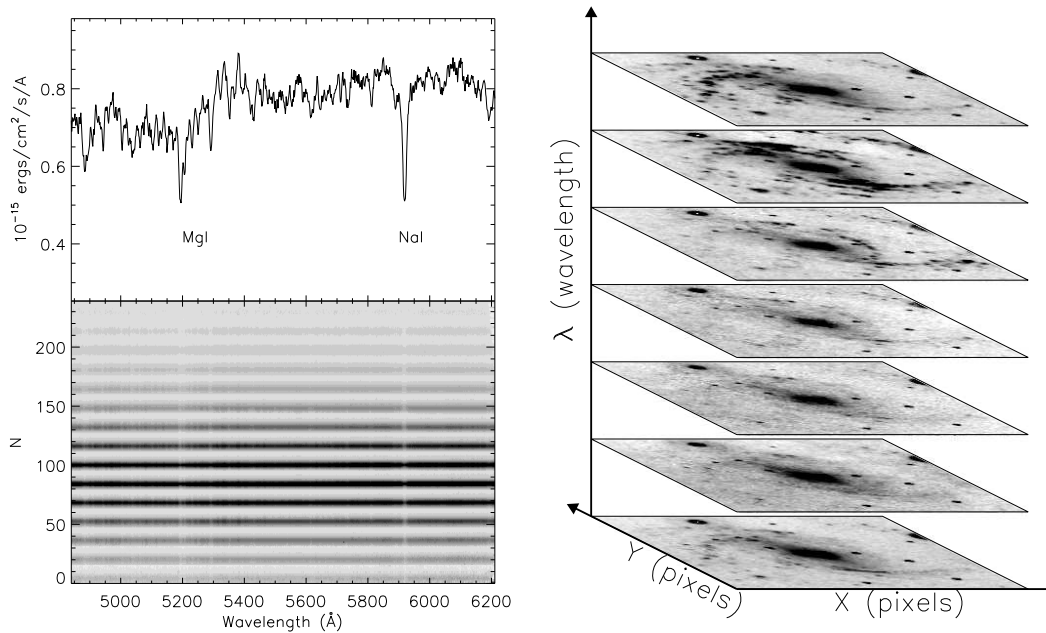


Рис. 1.1: Кубы данных, полученные со спектрографами САО РАН. Слева – наблюдения с MPFS галактики NGC 2950. N – номер спектрального элемента, вверху показан спектр, соответствующий центру галактики. Справа – наблюдения с ИФП галактик NGC 6951 в линии H_{α} . Показан только каждый четвертый канал вдоль длины волны λ

ных обсерваториях, однако практически отсутствуют работы, в которых авторы использовали бы одновременно оба метода панорамной спектроскопии при изучении протяженных объектов. В то же время, наблюдательная часть диссертации основана именно на таком комплексном изучении объектов с использованием преимуществ обоих типов спектрографов.

1.2 Интерферометр Фабри-Перо в спектрографе SCORPIO

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 была применена Талли

(1974) при изучении движений ионизованного газа в М 51 в линии H_α с использованием фотопластинки в качестве детектора. В последующие два десятилетия системы со сканирующим ИФП применялись для наблюдений на многих крупных телескопах (прибор TAURUS-2 на 4.2-м телескопе WHT (Испания), PUMA на 2.1-м телескопе OAN (Мексика), SIGALE на 3.6-м телескопе (ESO), проект KTS для японского 8.2-м телескопа SUBARY и т.д.)

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 (Булестекс и др., 1982; Амрам и др., 1992; Додонов и др., 1995; Плана и др., 1998). Наблюдения проводились с помощью системы SIGALE, представляющей собой редуктор фокуса с интерферометром Фабри-Перо и двухмерным счетчиком фотонов ИПС в качестве детектора (Додонов и др., 1995). Счетчик фотонов был в 1997 г. заменен ПЗС-матрицей с низким шумом считывания. Использование укорачивающей фокус системы (фокального редуктора) позволяет одновременно решить несколько задач. Во-первых, увеличиваются эквивалентная светосила системы и поле зрения, что важно при наблюдениях слабых протяженных объектов. Во-вторых, использование специально рассчитанной оптики компенсирует внеосевые абберации главного зеркала. В-третьих, интерферометр при наблюдениях необходимо размещать в параллельном пучке, внутри оптической схемы редуктора. Первый фокальный редуктор для интерферометрических наблюдений на 6-м телескопе был собран в САО в середине 80-х годов с использованием коммерческих фотообъективов. Несмотря на ряд таких недостатков, как плохое качество изображений внеосевых звезд, малое пропускание оптики ($\sim 30\%$ на $\lambda 6500 \text{ \AA}$) и отсутствие какой-либо автоматизации, редуктор использовался на БТА более десяти лет, пока по ряду причин не встал вопрос о его модернизации. В 1999 г. мы начали работы по созданию нового редуктора светосилы для первичного фокуса БТА SCORPIO (Spectral Camera with Optical Reducer for Photometrical and Interferometrical Observations).

Механические и оптические части редуктора были изготовлены в макетных мастерских САО РАН по проекту В.Л. Афанасьева и Э.Б. Гажура. Оптика спектрографа изготовлена Е.И. Перепелицыным согласно расчетам В.Л. Афанасьева. Сборка механики прибора осуществлялась В.В. Веретеновым. Платы дистанционного управления прибором спроектированы и изготовлены С.Р. Желенковым, а электросиловая часть – Ф.И. Фатеевым.



Рис. 1.2: Устройство редуктора светосилы SCORPIO

Программное обеспечение написано А.В. Моисеевым. Первые пробные наблюдения на БТА с новым редуктором светосилы состоялись в сентябре 2000 г.

Прибор SCORPIO многофункционален и представляет из себя спектрограф нового поколения, позволяющий реализовать в первичном фокусе БТА следующие режимы наблюдений протяженных и звездообразных объектов:

- ПЗС-фотометрия в широко-, средне- и узкополосных фильтрах.
- Панорамная спектроскопия с интерферометром Фабри-Перо.
- Спектроскопия и спектрополяриметрия с "длинной щелью".
- Бесщелевая спектроскопия для наблюдения спектрофотометрических стандартов.
- Многообъектная спектроскопия с 16 щелями, дистанционно перемещаемыми в фокальной плоскости.

Далее описываются параметры SCORPIO и особенности конструкции, важные для наблюдений с ИФП. Общий вид редуктора приведен на рис. 1.2, а оптическая схема – на рис. 1.3

Основными оптическими элементами SCORPIO являются коллиматор $F/2.2$ и камера $F/1.8$, общая светосила системы в первичном фокусе 6-м телескопа составляет $F/2.9$. Оптика редуктора компенсирует аберрации главного зеркала телескопа, что позволяет отказаться от использования штатного непросветленного линзового корректора. Все оптические поверхности просветлены в диапазоне $3600 - 10000 \text{ \AA}$. Имеется две турели с шестью позициями для установки светофильтров. *Турель 1* располагается в фокальной плоскости телескопа, а *Турель 2* – за полевой линзой, перед коллиматором. В *Турели 1* устанавливаются средне- и узкополосные интерференционные фильтры, а также щель для спектральных наблюдений. В *Турели 2* – широкополосные фильтры, реализующие фотометрическую систему BVR_cI_c . Установленный на SCORPIO микропроцессор управляет всеми механизмами редуктора. Удаленное управление самим микропроцессором осуществляется дистанционно от компьютера находящегося в аппаратной 6-м телескопа.

Сканирующий пьезоэлектрический интерферометр Queensgate ET-50 устанавливается между коллиматором и камерой, там где располагается выход-

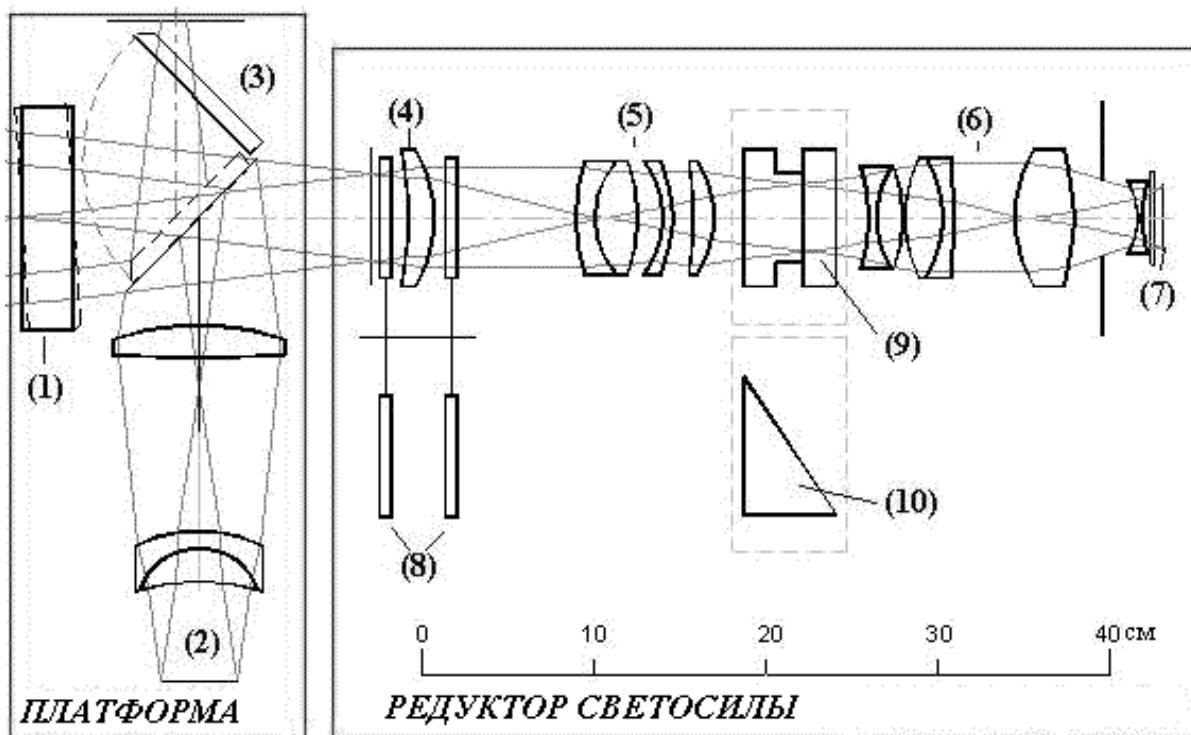


Рис. 1.3: Оптическая схема системы SCORPIO. (1) – наклоняемая пластина, (2) – оптика калибровки, (3) – плоское зеркало, (4) – полевая линза, (5) – коллиматор, (6) – камера, (7) – ПЗС, (8) – турели светофильтров, (9) – ИФП, (10) – гризма прямого зрения.

ной зрачок оптической системы. Параметры используемых интерферометров приведены в таблице 1.1. В 2000-2001 гг. для наблюдений использовалась ПЗС Tecktronix $1K \times 1K$ с шумом считывания $3\bar{\epsilon}$. Этот приемник обеспечивал поле зрения около $5'$ при масштабе $0.28''/\text{пиксель}$. В 2002 г. планируется установить новую ПЗС размером $2K \times 2K$. Общая квантовая эффективность SCORPIO при наблюдениях с ИФП (телескоп+фильтр+ИФП+ПЗС) составляет около 20% в области H_{α} , что примерно в 4 раза больше, чем у предыдущего фокального редуктора.

Редуктор светосилы устанавливается на универсальной платформе первичного фокуса, которая содержит два перемещаемых жгута световодов для внеосевого гидирования, лампы для калибровки шкалы длин волн (He-Ne-Ar лампа) и для создания плоского поля (лампа непрерывного спектра). Обе лампы установлены в интегрирующей сфере, создающей однородную засветку поля. Оптика калибровки формирует на входе редуктора пучок со светосилой эквивалентной светосиле телескопа ($F/4$). Такая схема засветки, в которой создается одинаковое заполнение выходного зрачка при наблюдениях и калибровке, обеспечивает отсутствие сдвига по длинам волн при измерении лучевых скоростей. Это подтвердили реальные

наблюдения с ИФП.

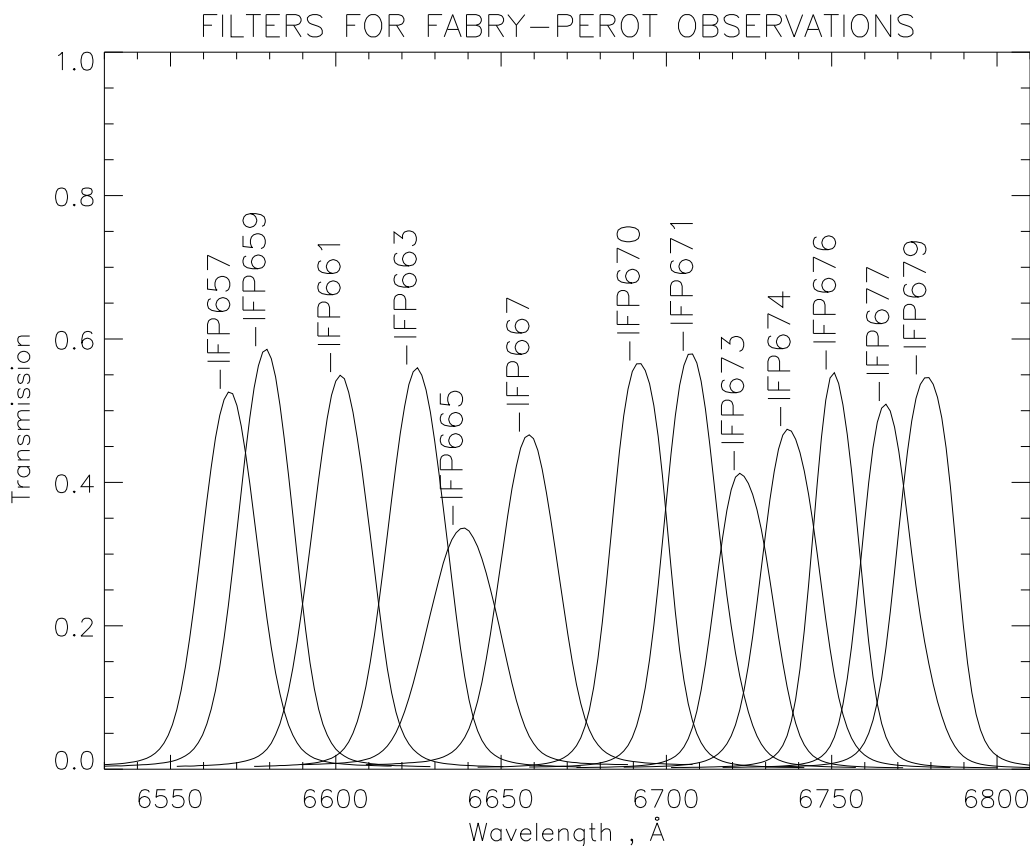


Рис. 1.4: Кривые пропускания фильтров для наблюдений с интерферометром Фабри-Перо в линии H_{α}

В настоящее время (2002 г.) завершаются работы по созданию системы гидирования, осуществляемого с помощью наклоняемой плоскопараллельной пластины, установленной в карданном подвесе на универсальной платформе. Такая схема должна обеспечивать быстрое гидирование на частотах 1 – 10 Гц.

Для выделения требуемого участка спектра используются узкополосные фильтры шириной $FWHM = 10 - 15 \text{ \AA}$. При наблюдениях галактик необходим набор таких фильтров, центрированных на длину волны изучаемой эмиссионной линии смещенной из-за эффекта Доплера. Набор фильтров, оптимизированный для наблюдений линии H_{α} в галактиках с системными скоростями от -200 до $+10\,000$ км/с был изготовлен в НИИ прецизионного приборостроения (Москва) согласно техзаданию, составленному автором. На рис. 1.4 показаны кривые пропускания этих фильтров измеренные в первичном фокусе 6-м телескопа с помощью спектрографа MPFS.

Таблица 1.1: Параметры SCORPIO в режиме наблюдений с Фабри-Перо

	Queensgate IFP	
	FP260	FP500
порядок интерференции, n^1	235	501
спектральное разрешение, $\delta\lambda^1$	2.5 Å	0.7 Å
спектральный интервал, $\Delta\lambda^1$	29 Å	13 Å
добротность, F^1	11	17
количество спектральных каналов n_z	24 ÷ 32	32 ÷ 40
¹ на длине волны 6563 Å		

1.3 Обработка наблюдений со сканирующим ИФП

В настоящее время существуют несколько распространенных программ обработки наблюдений с ИФП, прежде всего это пакет ADHOC (Булестексом, 2000) и пакеты программ в системе IRAF (см. Гордон и др., 2000). Однако в перечисленных программах недостаточен, на наш взгляд, учет специфики наблюдений с ПЗС-матрицей, при которых вклад атмосферы в кубе данных меняется от кадра к кадру. Это приводит к появлению систематических ошибок и артефактов при построении полей лучевых скоростей. Заметим, что такой проблемы нет при наблюдениях со счетчиком фотонов, который позволяет делать короткие экспозиции и этим усреднять влияние атмосферы. Использование разработанной автором новой методики обработки ПЗС-изображений позволяет учесть влияние атмосферы и этим увеличить точность измерения лучевых скоростей.

1.3.1 Основные соотношения

Теория интерферометра Фабри-Перо в приложении к астрономическим исследованиям подробно изложена в ряде работ (Куртес, 1960; Блэнд и Талли, 1989; Гордон и др., 2000). Ниже приводятся только некоторые необходимые соотношения.

Если на интерферометр под углом ϑ к оптической оси падает параллельный 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 на двумерном приемнике. Легко показать, что дисперсия растет в направлении к центру колец, а ширина колец уменьшается с увеличением радиуса r . Расстояние между соседними порядками интерференции определяет свободный спектральный диапазон:

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

Важной характеристикой интерферометра является добротность (Finesse):

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

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

Для сканирующего интерферометра $2\mu l = A + Bz$, где z -номер спектрального канала, а A и B – некоторые константы (Гордон и др., 2000). Легко получить, что

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

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 . 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:

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

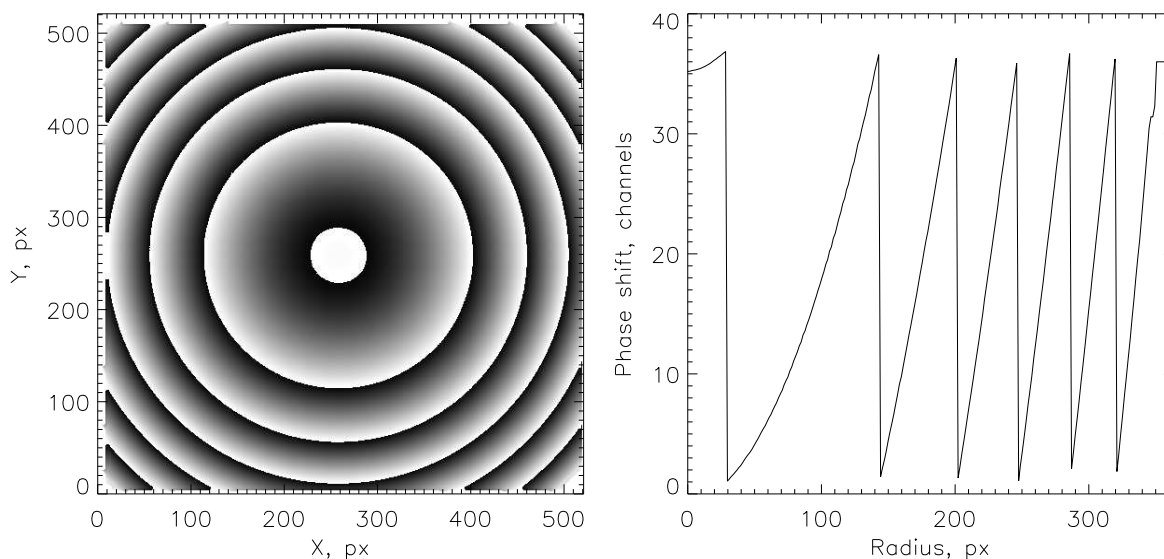


Рис. 1.5: Слева – карта фазовых смещений для FP501. Справа – радиальное изменение фазового смещения в единицах спектрального канала

Распределение величины $z(x, y)$ в плоскости изображения для линии калибровочной лампы называют обычно *картой фазового сдвига*, а процедуру перехода от z к λ – *фазовой коррекцией*. Пример такой карты приведен на рис. 1.5. Выражение (1.5) показывает, что фазовый сдвиг в первом приближении пропорционален квадрату расстояния от центра колец.

1.3.2 Сравнение счетчика фотонов и ПЗС

При наблюдениях со счетчиком фотонов делают несколько десятков циклов сканирования с очень малой экспозицией (10-20 сек) в каждом канале ИФП. Таким образом удастся усреднить влияние атмосферной экстинкции на различных зенитных расстояниях и нестабильности качества изображений при длительных наблюдениях. ПЗС-матрица обладает значительно большей квантовой эффективностью по сравнению со счетчиком фотонов. Однако наличие шума считывания не позволяет делать очень короткие накопления, а время считывания уменьшает полезное время экспозиции. Применение малошумящих ПЗС позволяет несколько улучшить ситуацию. Используя соотношение (3) из статьи Блэнда и Талли (1989) мы сравнили возможности SCORPIO по достижению максимально возможного отношения сигнал/шум при использовании нашей "тонкой" ПЗС ТК 1024 (шум считывания $3\bar{e}$, максимальная квантовая эффективность на $\lambda 6500 \text{ \AA}$ около 80%) и при использовании современного счетчика фотонов с GaAs-катодом и максимальной квантовой эффективностью 23% (Хернандес и др., 2001). Расче-

ты проводились для наблюдений в прямом фокусе 6-м телескопа с системой SCORPIO. В широком диапазоне интенсивностей наблюдаемых объектов ПЗС позволяет достичь большего отношения сигнал-шум (S/N), только если время накопления превышает время считывания ($T_{exp} > T_{readout}$). Но уже при $T_{exp} \simeq T_{readout}$ наблюдательное время тратится неэффективно, поскольку половину его будет уходить на считыванием сигнала с ПЗС. Сейчас $T_{readout} = 20$ сек в режиме биннинга 2×2 , и 90 сек – без биннинга. Поэтому с ПЗС приходится делать экспозиции длительностью несколько минут в каждом канале ИФП. Но здесь возникает проблема учета вариаций пропускания атмосферы и качества изображений на отдельных ПЗС-кадрах (проблема фотометрической коррекции), поскольку реально удается сделать только 1-2 цикла сканирования. Поэтому, с появлением новых высокочувствительных счетчиков фотонов, превосходящих ПЗС на коротких экспозициях, их начинают активно использовать для наблюдения со сканирующим ИФП (Хернандес и др., 2001). В то же время, модификация способа фотометрической коррекции ПЗС-накоплений (раздел 1.3.4) позволяет использовать преимущества ПЗС на больших экспозициях.

1.3.3 Формирование кубов данных и учет плоского поля

На языке IDL 5.4 автором был написан пакет программ IFPWID для обработки наблюдений с ИФП (рис. 1.6). Исходными являются следующие наборы ПЗС-кадров:

- **ОБЪЕСТ** - интерферограммы исследуемого объекта. Рекомендуется вначале наблюдать изображения в нечетных каналах интерферометра (1,3,5..), а затем – в четных (2,4,6...), чтобы избежать систематических ошибок при оценке изменений атмосферной прозрачности и качества изображений.
- **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.

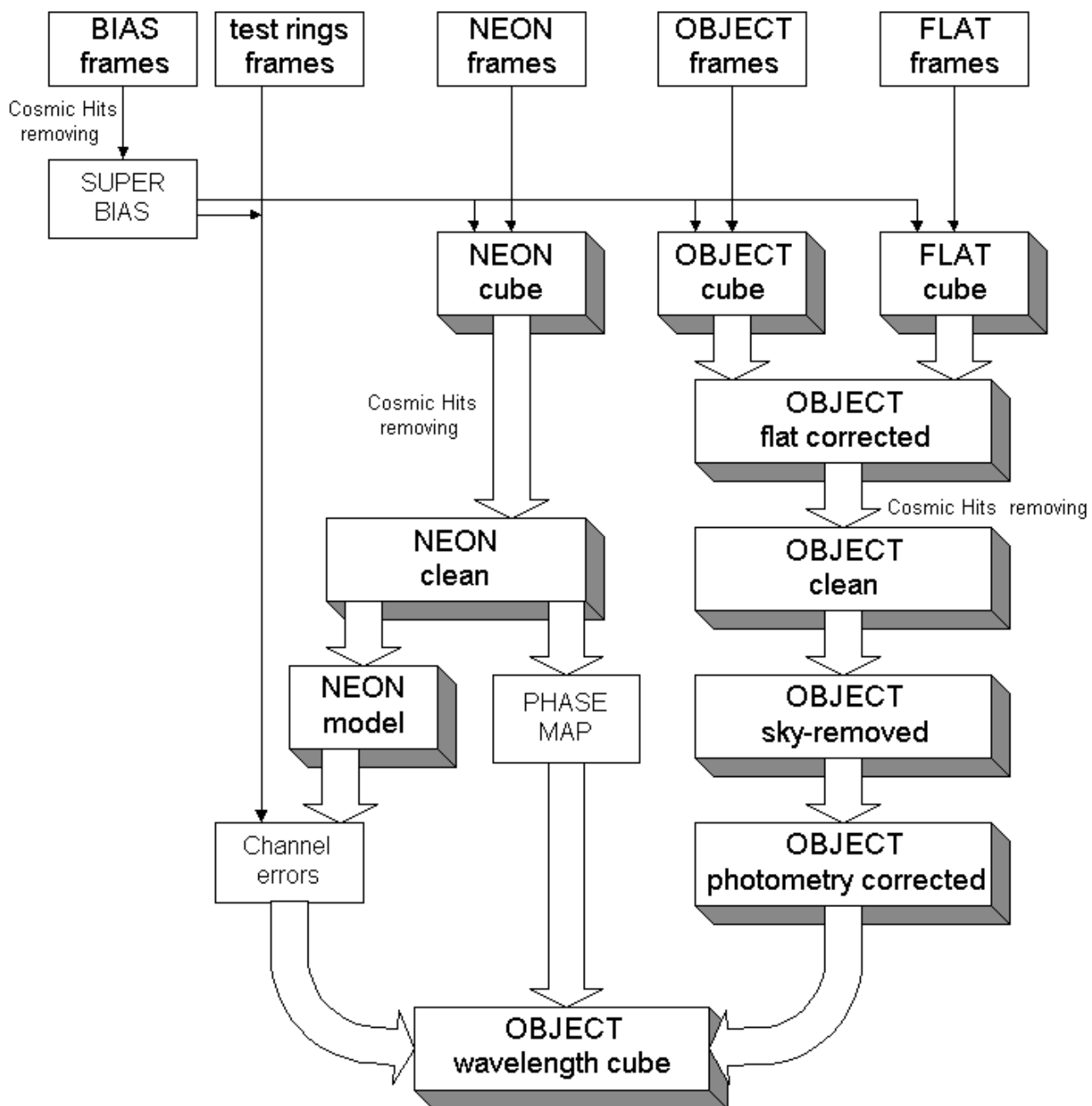


Рис. 1.6: Блок-схема обработки данных.

- **TEST** – изображения колец от He-Ne-Ar лампы в отдельных каналах, получаемые каждые 30-60 минут в течении экспозиции объекта. Используются для мониторинга точности сканирования интерферометра (характеристики которого, вообще говоря, зависят от времени) и для контроля смещений положения центра колец интерференционной картины, возникающих из-за гнутый прибора. Наши измерения показали, что у SCORPIO смещение центра колец из-за гнутый не превышает $20 - 40\mu$ во всем диапазоне изменений зенитных расстояний.

Также необходимы "стандартные" для ПЗС-наблюдений кадры тока смещения (**BIAS**) и темнового тока (**DARK**)¹.

Кадры **BIAS** усредняются как и при обычной ПЗС-обработке. Полученный в результате усреднения кадр **SUPERBIAS** вычитается из всех накопленных объекта и калибровок. Дефектные колонки в кадрах маскируются. Дальнейшая обработка производится уже не над двухмерными кадрами, а над трехмерными кубами (поканально собранными интерферограммами объекта и калибровок). Чистка следов космических частиц в кубах осуществляется простым σ -фильтром: отсчеты в индивидуальных спектрах, отличающиеся от среднего на пороговую величину (в масштабе стандартных отклонений), заменяются полусуммой соседних.

Предварительно, куб **ОБЪЕСТ** нормируется на куб **FLAT**, что позволяет учесть сразу два эффекта: во-первых, вариации чувствительности элементов ПЗС и пропускания оптики по полю зрения (фотометрическое "плоское поле"), во-вторых, спектральную модуляцию, вносимую узкополосным фильтром, которая меняется по полю детектора, что вызвано радиальными вариациями толщины напыления слоев интерференционного фильтра. Важно, чтобы угол сходимости пучка лучей от калибровочной лампы был близок к углу сходимости пучка лучей от телескопа. Другими словами, заполнение выходного зрачка для объекта и калибровки должно быть одинаковым. В SCORPIO это условие (телецентризм) выполняется за счет использования специальной оптики в тракте калибровки. Нарушение условия эквивалентности зрачков приводит к сдвигу спектров в кубе **FLAT** по длине волны. Корректная обработка таких данных (полученных со старой версией редуктора светосилы) возможна, если в поле зрения есть достаточно яркие звезды, спектр которых можно считать "плоским" в диапазоне $10 - 20 \text{ \AA}$. Тогда величина сдвига по λ определяется из кросс-

¹В дальнейшем мы не будем говорить об учете темнового тока, поскольку в используемой нами ПЗС он составляет около $0.1\bar{e}/\text{мин}$, т.е. незначителен на экспозициях менее 10 мин.

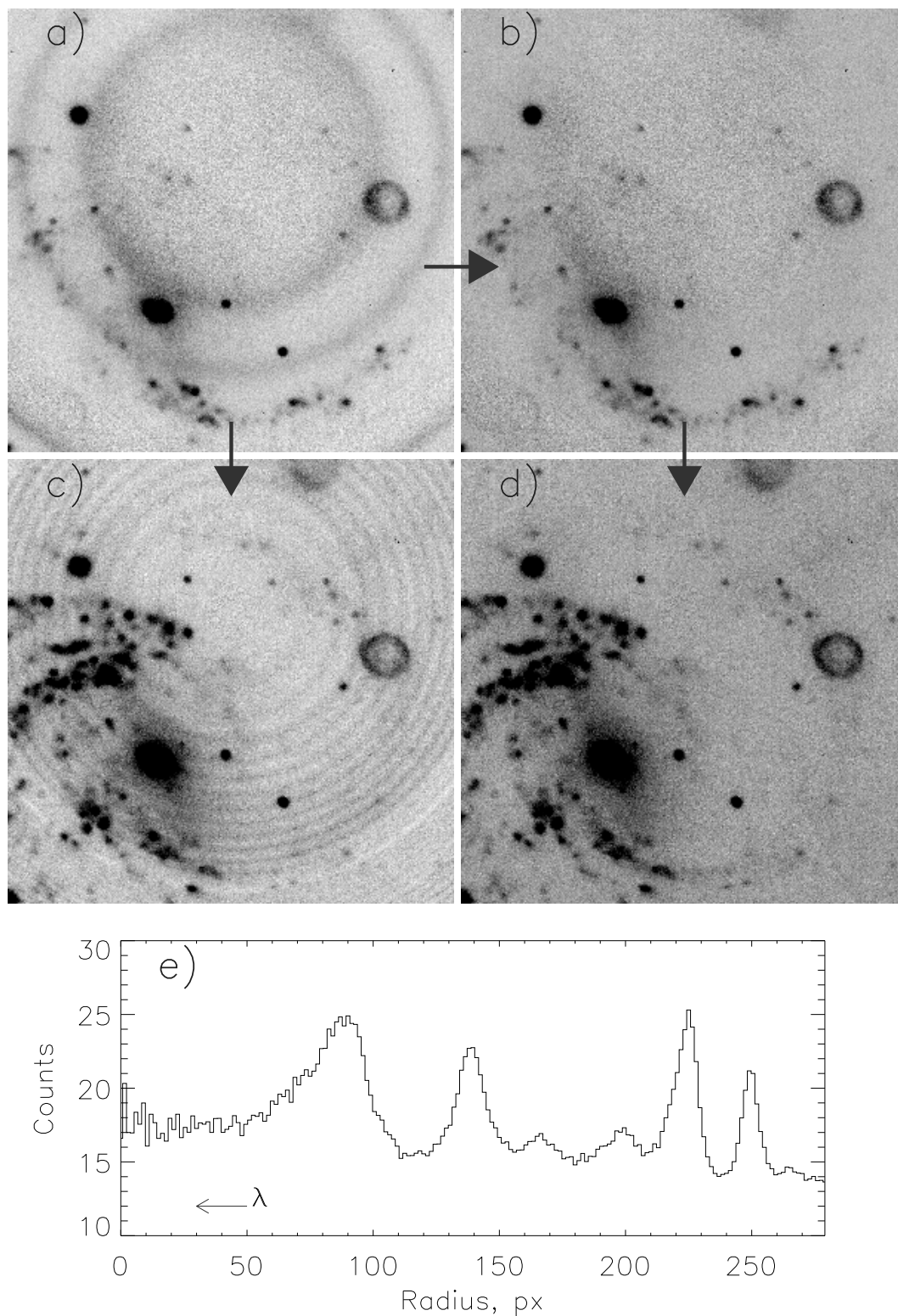


Рис. 1.7: Наблюдения галактики NGC 6951 в линии H_{α} со SCORPIO (a) – фрагмент спектрального канала с кольцами от линий неба, (b) – этот же кадр после вычитания неба, (c) – спектральный канал в пространстве длин волн, полученный после фазовой коррекции куба с небом (Метод I), (d) – аналогичный канал после фазовой коррекции куба с вычтенным небом (Метод II). Стрелками показана последовательность обработки в каждом из методов. (e) – радиальный профиль спектра ночного неба, стрелка указывает направление дисперсии.

корреляции спектров звезд с **FLAT**. Затем, в кубе **FLAT** производится сдвиг спектров на требуемое количество спектральных каналов и полученный куб используется для нормировки **ОБЪЕСТ**.

1.3.4 Вычитание линий ночного неба и фотометрическая коррекция

После предварительной обработки наблюдаемый поток в каждом канале может быть представлен в виде:

$$I_{obs}(x, y) = (I_{obj}(x, y) \bullet PSF) \cdot Ext + I_{sky}(r), \quad (1.6)$$

здесь I_{obj} – заатмосферное изображение объекта в данном канале; Ext – множитель, характеризующий атмосферную экстинкцию; I_{sky} – поток от ночного неба (эмиссионный спектр, засветка от Луны и т.д.), промодулированный интерферометром; PSF – функция рассеяния точки; значком \bullet обозначен оператор свертки. Основную проблему представляет то, что I_{sky} , PSF и Ext зависят от времени наблюдения. Причем кроме плавных постоянных изменений, связанных с изменением зенитного расстояния, существенны и случайные вариации всех этих величин. В общепринятой схеме обработки (Блэнд и Талли, 1989; Булестекс, 2000; Гордон и др., 2000) вначале делается поканальное исправление качества изображений и изменений атмосферной прозрачности, затем – фазовая коррекция, а вычитание линий неба производится уже в шкале длин волн. Далее этот метод будем обозначать как Метод I. Подобная схема идеальна при работе со счетчиком фотонов, когда влияние атмосферы в каждом канале усредняется за счет коротких многократных экспозиций. При наблюдениях с ПЗС такая методика применима только при работе в спектральном диапазоне, свободном от эмиссий ночного неба. Вариации интенсивности линий неба приводят к тому, что в шкале длин волн профиль эмиссионных линий неба меняется с радиусом r . Другими словами, в пространстве длин волн в каналах **ОБЪЕСТ** появляются артефакты – контрастные кольца. Это ограничивает точность измерения скоростей от слабых эмиссий объекта и приводит к систематическим ошибкам в их оценке (раздел 1.3.6).

Поэтому автором был предложен метод вычитания неба в каждом изображении до фазовой коррекции (далее – Метод II). В областях детектора, свободных от эмиссий объекта, линии ночного неба усредняются по азимутальному углу в узких кольцах шириной 0.5 – 1 пиксель с центром на оптической оси ИФП (рис. 1.7). Полученный радиальный профиль (рис. 1.7e)

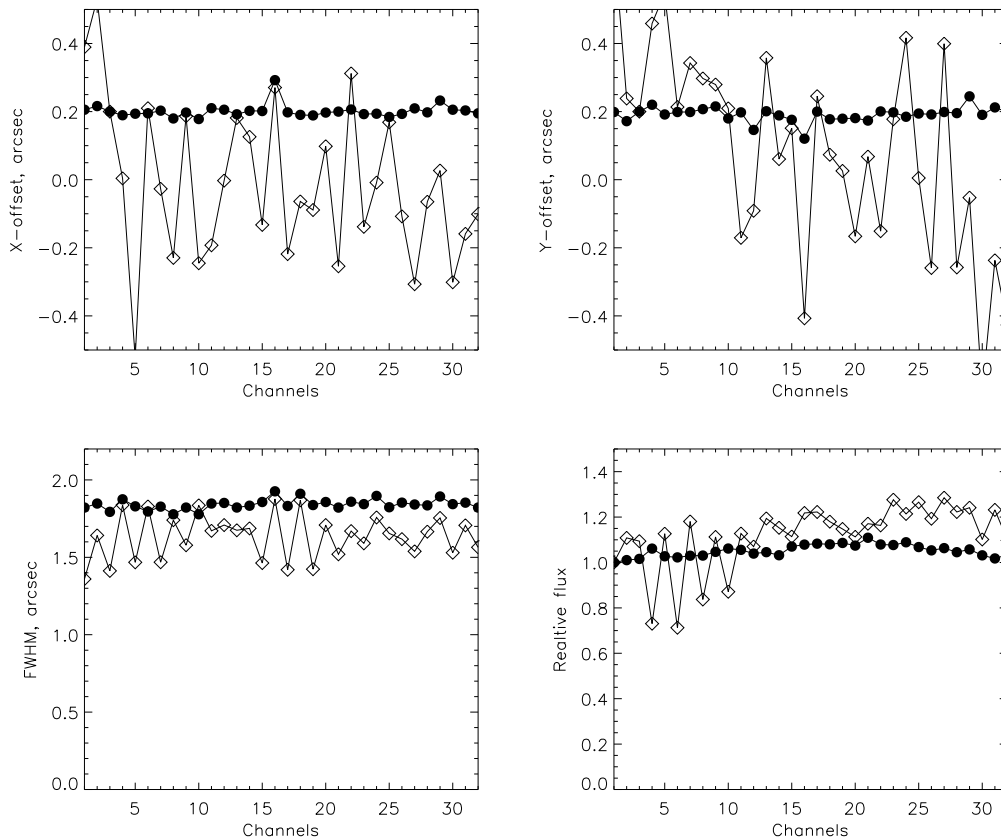


Рис. 1.8: Вариации средних параметров звезд поля: относительные смещения барицентров по X и Y , качество изображений, интегральный поток в относительных единицах. Открытые и закрашенные символы соответствуют наблюдениям NGC 6951 до и после фотометрической коррекции.

вычитается из изображения (рис. 1.7а-б). Повторяя эту процедуру во всех каналах, удастся корректно избавиться от влияния второго члена в (1.6), не внося искажений в пространстве длин волн. Рис. 1.7 наглядно демонстрирует преимущество принятой нами методики (последовательность $a \rightarrow b \rightarrow d$) в сравнении с Методом I (последовательность $a \rightarrow c$).

Процедура вычитания неба чувствительна к точности определения центра колец, который может смещаться от кадра к кадру. Мы используем простую итерационную процедуру для автоматического поиска оптимального положения центра колец от неба. В основе ее лежит минимизация квадратов отклонений отсчетов в пикселях от среднего профиля в областях детектора, свободных от эмиссий объекта. Обычно ошибки определения центра не превышают $0.05 - 0.2$ пикселя (в зависимости от яркости линий неба), что достаточно для аккуратного вычитания неба.

Фотометрия звезд в поле зрения позволяет оценить вклад нестабиль-

ности атмосферы и ошибок гидирования в каждом канале **ОБЪЕСТ**. С помощью аппроксимации двухмерной гауссианой для каждой звезды определяются относительные смещения центра изображения, вариации FWHM и интегрального потока. Изменения этих параметров с номером канала в наблюдениях с ИФП со SCORPIO, определенные по 12 звездам, приведены на рис. 1.8. Смещения кадров относительно друг друга, связанные с ошибками гидирования телескопа, обычно не превышают $0.2'' - 0.5''$ и исправляются соответствующим смещением кадров (рис. 1.8). Для коррекции качества изображений кадры сворачиваются с двухмерными гауссианами, чтобы получить результирующее FWHM такое же, как в кадре с наихудшими изображениями. Таким образом, амплитуда вариаций FWHM 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. Вообще, это не всегда так (особенно в области абсорбции H_α), но если используется $8 - 10$ звезд, расположенных на разных радиусах r , то вариации среднего потока, как правило, соответствуют вариациям экстинкции и не зависят от спектральных особенностей в звездах.

1.3.5 Калибровка шкалы длин волн

Фазовая карта

Согласно (1.5), все спектры в наблюдаемом кубе линейно (с точностью до фактора $(r/f)^4$) сдвинуты на величину фазового смещения относительно некоторой начальной длины волны. Для определения величины фазового смещения в спектр калибровочной линии в каждой точке (x, y) куба **NEON** вписывается профиль Лоренца:

$$I(x, y, z) = \frac{I_o(x, y)}{1 + \left(\frac{2(z-p(x,y))}{w(x,y)}\right)^2}, \quad (1.7)$$

который, согласно Бленд-Хэсону (1995), является значительно лучшей аппроксимацией аппаратного контура Фабри-Перо в сравнении с гауссианой. Здесь $w(x, y)$ – ширина линии, а $p(x, y)$ – искомое фазовое смещение. Пример распределения p по полю показан на рисунке 1.5.

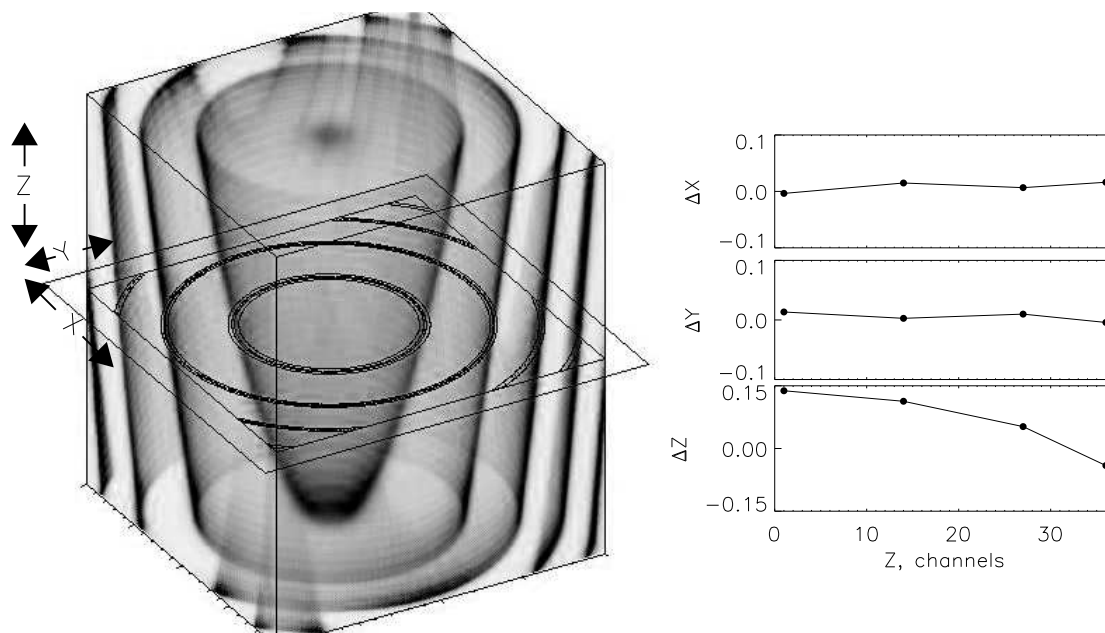


Рис. 1.9: Слева – схема, иллюстрирующая поиск оптимального положения изображения калибровочных колец внутри модельного куба калибровки. Градациями серого показаны изменения интенсивности модельного профиля в кубе. Справа – относительные смещения тестовых накоплений относительно куба калибровки в течение 2-х часовой экспозиции по всем трем координатам (в пикселях).

Поканальная коррекция

Вышеописанным способом фазовый сдвиг определяется в предположении, что величины A и B , связывающие номер канала z с величиной зазора между пластинами (раздел 1.3.1), постоянны в течение сканирования. Однако на точность сканирования влияет целый ряд факторов, таких как температурные изменения, ошибки и нестабильности электроники управления. Для контроля взаимных смещений калибровочных каналов для каждого кадра в кубе **NEON** по МНК ищется лучшее положение с учетом смещений по всем трем координатам внутри модельного куба $I(x, y, z)$, построенного согласно (1.7). Для стабильно работающего ИФП разброс ошибок сканирования по z внутри одного куба не превышает 1 – 3% и не сказывается на качестве данных. Так, в течение двух лет наблюдений только 2 раза в кубе калибровки присутствовали каналы с ошибкой сканирования 10 – 20%, связанные со сбоями в электронике управления. Наша методика также позволила выявить и устранить систематические отличия шага сканирования на $\simeq 10\%$ от правильного значения, вызванные неточным подбором констант A и B в наблюдениях 2000 г.

Аналогично производится поиск относительных смещений тестовых на-

коплений калибровочных колец **TEST**. На рис. 1.9 показано изменение положения центра колец калибровки в течение 2-х часов наблюдений. Смещение центра колец незначительно, видно плавное изменение шага сканирования более чем на 15% относительно калибровочного куба. Поэтому перед исправлением за фазовую карту в куб объекта вносится соответствующая поправка по координате z .

1.3.6 Оценка точности измерения скоростей

Для удобства изложения часть оценок будет приводиться в единицах спектрального канала, который составляет 15–18 км/с для наблюдений в линии H_α с интерферометром FP501 и 35–40 км/с для FP235. Ошибка измерения скорости по эмиссионной линии в кубе объекта может быть представлена в виде

$$\sigma_{Vel} = \sqrt{\sigma_{gaus}^2 + \sigma_\lambda^2 + \sigma_{reduct}^2}, \quad (1.8)$$

где σ_{gaus} – ошибка определения центра линии методом гаусс-аппроксимации, определяемая отношением сигнал/шум в линии; σ_λ – точность приведения к шкале длин волн; σ_{reduct} – ошибки, появляющиеся на этапе обработки и связанные прежде всего с учетом атмосферной нестабильности.

Вклад σ_{gaus} мал. Мы промоделировали ее зависимость от отношения S/N методом Монте-Карло. Для типичных ширин линий ($FWHM = 4 - 10$ каналов) и пуассоновских случайных шумов получается, что ошибка определения центра $\sigma_{gaus} < 0.05 - 0.08$ канала уже при $S/N > 4 - 5$.

Ошибки фазовой коррекции

Независимая оценка точности исправления фазового смещения была проведена при измерении скоростей эмиссионных линий ночного неба в кубе данных, полученном с FP501 при наблюдениях M71. Для измерений использовались линия H_α $\lambda 6562.82 \text{ \AA}$ и ОН $\lambda 6568.78 \text{ \AA}$ из соседнего порядка интерференции. Средняя величина скорости составила 2.2 км/с при дисперсии скоростей от точки к точке 2.0 км/с, т.е. точность построения абсолютной шкалы длин волн составляет около 0.1 канала, или $\simeq 2$ км/с для FP501 и $\simeq 4$ км/с для FP235.

Систематические ошибки

В изображении в спектральном канале для фиксированной λ на каждом радиусе r присутствуют участки изображений из кадров с различным z . Поэтому любая неоднородность от кадра к кадру (изменение яркости линий неба, качество изображений и т.д.) приводит к появлению систематических искажений в длинноволновом кубе, зависящих от радиуса. В свою очередь это приводит к систематическим ошибкам (артефактам) на получаемых монохроматических изображениях и в полях скоростей. Мы представляем эти ошибки состоящими из нескольких независимых компонент:

$$\sigma_{reduct} = \sqrt{\sigma_{SKY}^2 + \sigma_{SHIFT}^2 + \sigma_{FLAT}^2}. \quad (1.9)$$

Здесь σ_{SKY} – ошибка, вносимая переменностью фона и линий ночного неба, σ_{SHIFT} – ошибка гидирования и σ_{FLAT} – ошибка деления на $FLAT$.

С целью изучения вклада различных составляющих в (1.9) было проведено моделирование процесса обработки (Моисеев, 2002а). Моделирование проводилось для варианта наблюдений с FP235. Получены следующие результаты:

- σ_{SKY} оценивалась для двух методов вычитания неба (раздел 1.3.4) – Метод I (в пространстве λ) и Метод II (в пространстве z). Уже при 10–20% изменениях яркости линий неба и экстинкции Метод II дает в 2–5 раз меньшую ошибку измерения скоростей в сравнении с Методом I, что более существенно для слабых (относительно неба) линий объекта. Если амплитуда линий объекта $A_{obj} > (0.3 - 0.5)A_{sky}$, где A_{sky} – амплитуда самой яркой линии неба, то $\sigma_{SKY} < 10$ км/с (0.2 канала). Для $A_{obj} > (1.5 - 2)A_{sky}$ ошибка становится незначительной и составляет менее 2 км/с. Разумеется, σ_{SKY} зависит от относительного расположения линий неба и объекта в спектре, но вышеприведенные точности можно считать типичными. При незначительной интенсивности линий неба оба метода дают сходные результаты.

При использовании Метода II важно точно определять положение центра колец. Моделирование показало, что заметный рост σ_{SKY} начинается когда ошибка определения положения центра колец превышает 0.3 – 0.5 пикселя. Как уже отмечалось в разделе 1.3.4, эта точность обеспечивается автоматической процедурой определения центра колец.

- Ошибки гидирования и гнущия аппаратуры приводят к взаимным смещениям между изображениями в кубе z . Исправление этого эффекта по положению изображений звезд одновременно приводит к смещению каналов в пространстве длин волн. В результате возникает систематическая ошибка в определении скоростей σ_{SHIFT} . В отличие от σ_{SKY} она слабо зависит от интенсивности линий и в основном определяется расстоянием от центра колец r . Кроме того, возникающие ошибки зависят от типа взаимных смещений – случайных от канала к каналу (ошибки гидирования) или систематически нарастающих (гнущие аппаратуры). В первом случае возникают паразитные кольца, во втором – постоянный градиент скорости. В таблице 1.2 приводятся средние амплитуды паразитных скоростей в зависимости от величины смещений обоих типов. У SCORPIO систематические гнущия не превышают $0.2 - 0.3''$ во всем диапазоне зенитных расстояний, а типичные ошибки гидирования порядка $0.1 - 0.2''$.
- Пропускание интерференционного фильтра зависит от угла падения лучей. Поэтому, если пучки света от телескопа и калибровочного тракта не совпадают, то кривые пропускания фильтра в кубе **FLAT** и **ОБЪЕКТ** будут различаться как по ширине, так и по центральной длине волны. Возможные ошибки определяются соотношением между шириной фильтра $12 - 18 \text{ \AA}$ и свободным спектральным диапазоном $\Delta\lambda$. Легко показать, что если спектр в кубе **FLAT** смещен по спектру на 2-3 канала или его FWHM отличается на 20% от **ОБЪЕКТ**, то возникают возмущения с дисперсией $0.15 - 0.2$ и $0.05 - 0.08$ от интенсивности континуума для FP235 и FP501 соответственно (на $\lambda = 6563 \text{ \AA}$ при ширине фильтра 15 \AA). При наблюдениях ярких эмиссионных линий со слабым континуумом это приведет к появлению незначительной ошибки измерения скорости σ_{FLAT} , однако для объектов с относительно сильным континуумом несовпадение пучков от объекта и калибровки может привести к появлению паразитных линий в спектре на фоне яркого континуума.

Используя фотометрию звезд в кубе **ОБЪЕКТ** этот эффект можно значительно уменьшить, внося соответствующие исправления в куб **FLAT** (раздел 1.3.3).

Таблица 1.2: Амплитуды паразитных скоростей (в км/с) для различных типов взаимных смещений каналов

Смещение	Тип смещений	
	случайные	систематические
0'05	3	2
0'10	5	2
0'25	22	7
0'50	25	16
0'75	32	23
1'00	47	30

1.4 Изучение звездной кинематики с панорамным спектрографом MPFS

Проблема определения двух основных наблюдательных параметров, характеризующих движение звезд в галактиках – лучевой скорости v и дисперсии скоростей σ , имеет полувековую историю, начиная с пионерских наблюдений Минковского (1954) и до последних работ о связи массы центральной черной дыры с дисперсией скоростей (Геххардт и др., 2000). Методика измерения v и σ с применением техники преобразований Фурье восходит к классическим работам Тонри и Дэвиса (1979, далее TD) и Саджент и др. (1977, далее SSBS).

Методы панорамной спектроскопии, позволили перейти к построению двумерных карт скоростей и дисперсии скоростей. В случае дисковых галактик это дает возможность изучать некруговые движения в области трехосного потенциала (бара) или вблизи активного ядра (см. обзор Аррибас и Медиавилла, 2000). В САО РАН с 1990 года работает мультиспектральный спектрограф MPFS, на котором проводились подобные наблюдения (см. к примеру Афанасьев и др. 1996; Афанасьев и Сильченко 1999; Сильченко и др., 1997). Но в этих работах рассматривались только поля скоростей звезд. В то же время распределение дисперсии скоростей несет информацию об отличиях распределения гравпотенциала от осесимметричного и является одним из ключевых параметров при построении динамических моделей галактик. Основная методическая проблема при измерении дисперсии скоростей – это корректный учет вариаций аппаратного контура спектрографа. Новый вариант MPFS (Афанасьев и др. 2001), который работает на БТА с 1998 г., позволяет уверенно строить распределения дисперсии скоростей в околоядерных областях галактик, что и будет показано

ниже.

1.4.1 Методы измерения скорости и дисперсии скоростей

Общие замечания

Спектрограф MPFS позволяет одновременно регистрировать спектры от 240 пространственных элементов (конструктивно выполненных в виде квадратных линз), составляющих в картинной плоскости матрицу размером 16×15 элементов. Угловой размер одного элемента составляет $0.5 - 1''$. Одновременно со спектрами галактики регистрировался спектр ночного неба с площадки удаленной на $4'.5$ от центра поля зрения. В качестве приемника используется ТК1024 размером 1024×1024 пикселей. Описание спектрографа приведено в INTERNET по адресу <http://www.sao.ru/~gafan>.

После предварительной редукции данные наблюдений могут быть представлены как двухмерные спектры. Спектры от разных пространственных элементов совмещаются по длине волны и располагаются в кадре последовательно один над другим (см. рис. 1.1).

Идею методов измерения v и σ рассмотрим на примере спектра от одного пространственного элемента. Пусть $G(\lambda)$ и $T(\lambda)$ – наблюдаемые спектры галактики и звезды-шаблона с вычтенным континуумом). Спектры дискретизованы по длине волны λ , и состоят из N точек λ_i ($i = 0, \dots, N - 1$).

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

$$n = a \log(\lambda) + b \quad (1.10)$$

где

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

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

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:

$$G(n) \approx \alpha T(n) \bullet B(n - v) \quad (1.11)$$

В первом приближении функция уширения $B(n)$ может быть представлена гауссианой:

$$B(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{n^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1.12)$$

где α – численный коэффициент, v и σ – искомые скорость и дисперсия скоростей вдоль луча зрения.

Описываемые ниже методы основаны на вычислении дискретного Фурье-преобразования, определяемого для функции $F(n)$ как

$$\tilde{F}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} F(n) \exp\left(-\frac{2\pi ink}{N}\right) \quad (1.13)$$

Кросс-корреляционный метод (ТД)

Метод ТД основан на вычислении нормализованной кросс-корреляционной функции:

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

где

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

В Фурье-области соотношение (1.14) записывается в виде

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

где звездочка обозначает комплексное сопряжение.

Применяя операцию кросс-корреляции к выражению (1.11) легко получить:

$$C(n) = (T(n) \bullet T(n)) \bullet B(n-v) \quad (1.16)$$

т.е. кросс-корреляционная функция спектра галактики и звезды является сверткой автокорреляционной функция 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 может быть представлен 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 шаблона – гауссианой с дисперсией $\sqrt{2}\tau$, то квадрат дисперсии скоростей вычисляется как

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

При этом τ будет являться дисперсией гауссианы, описывающей аппаратный контур спектрографа.

На рисунке 1.10 приведены примеры спектров звезды и галактики, подготовленные для кросс-корреляции, а также автокорреляционные и кросс-корреляционные пики. 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 .

Для учета последнего эффекта рядом авторов были предложены различные модификации метода TD. Боттема (1988) напрямую использует соотношение (1.16) – автокорреляционная функция шаблона сворачивается с гауссианами различной ширины до наилучшего воспроизведения формы кросс-корреляционного пика. Мы остановились на использовании эмпирической зависимости между шириной кросс-корреляционного пика и дисперсией скоростей (Нельсон и Вайтл, 1995). Для этого спектр шаблона T сглаживается гауссианами различной ширины σ_{in} , строится кросс-корреляционная функция уширенного спектра с T и по формуле (1.18) формально определяется дисперсия скоростей σ_{out} . Зависимость между σ_{in} и σ_{out} , приведенная на рис. 1.11, аппроксимируется полиномом второго порядка:

$$\sigma_{in} = \sum_{i=0}^2 \alpha_i \sigma_{out}^i \quad (1.19)$$

и в дальнейшем используется для оценки дисперсии по ширине кросс-корреляционного пика:

$$\sigma = \sum_{i=0}^2 \alpha_i (\mu^2 - 2\tau^2)^{i/2} \quad (1.20)$$

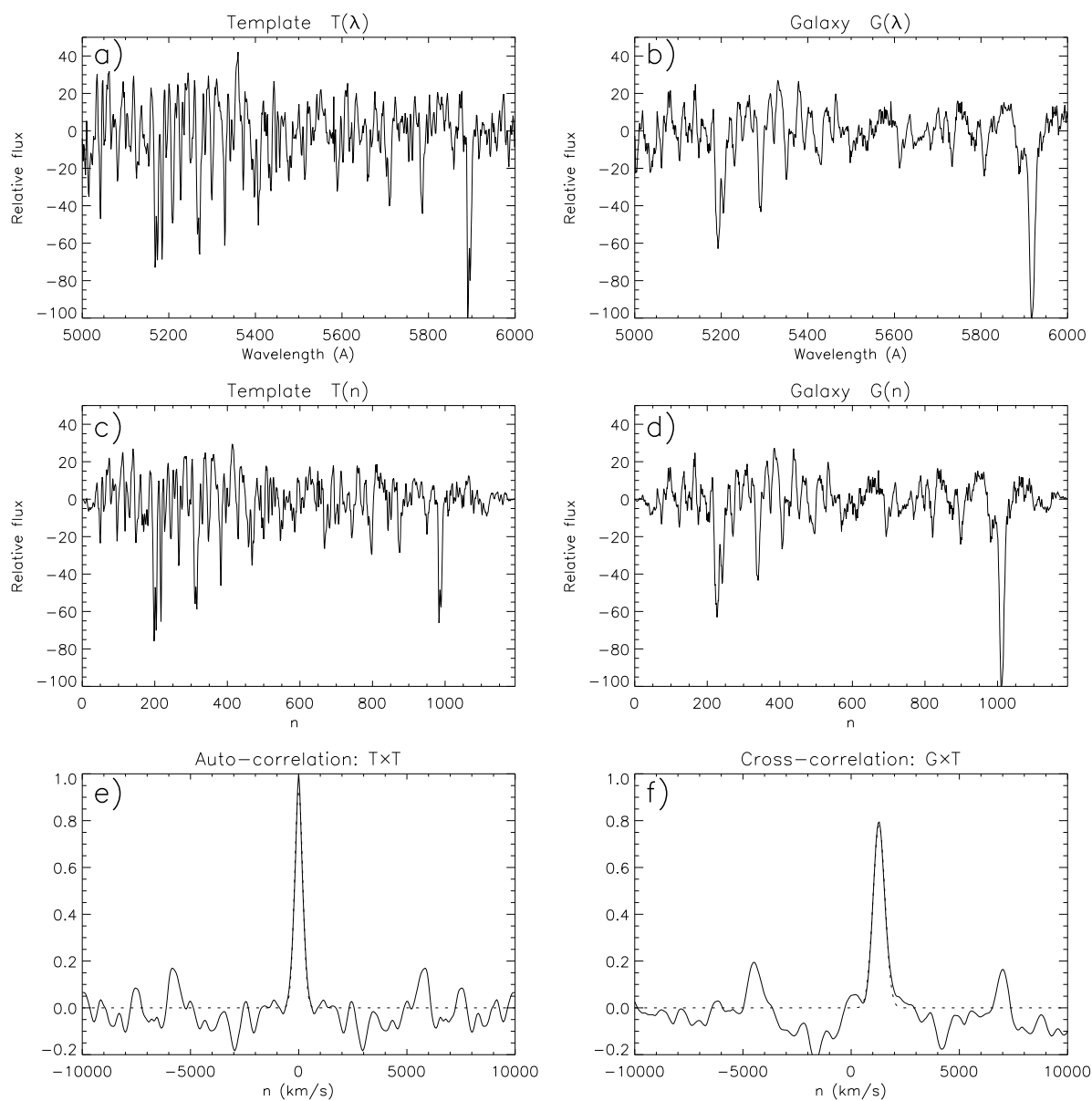


Рис. 1.10: Кросс-корреляционный метод. а, b – спектры звезды класса КIII и галактики NGC 2950, континуум вычтен; с, d – спектры в логарифмической шкале с шагом 50 км/с, границы спектров умножены на синусоиду (см. раздел 1.4.3); e, f – автокорреляционная и кросс-корреляционная функции, пунктиром показана аппроксимация пиков гауссианой.

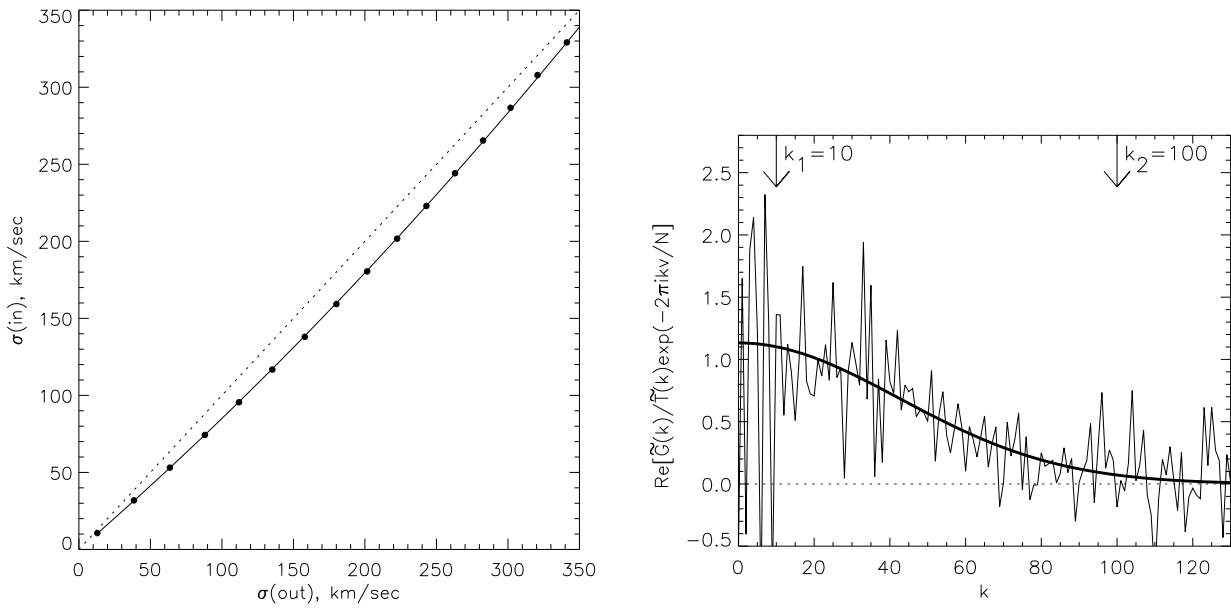


Рис. 1.11: Слева – зависимость (1.19): σ_{in} – ширина сглаживающей гауссианы, σ_{out} – дисперсия, оцененная по ширине кросс-корреляционного пика (точки). Сплошная линия – аппроксимация полиномом 2-й степени, пунктир соответствует линейной зависимости. Справа – аппроксимация функции (1.22) гауссианой в методе коэффициентов Фурье. Отмечены границы области подгонки (k_1 и k_2)

Метод коэффициентов Фурье (SSBS)

Этот метод был предложен в работе SSBS. Применяя Фурье-преобразование (1.13) к (1.11) с учетом (1.12) получаем

$$\frac{\tilde{G}(k)}{\tilde{T}(k)} = \gamma \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{2\pi k\sigma}{N} \right)^2 + \left(\frac{2\pi i k v}{N} \right) \right] \quad (1.21)$$

Реальная часть в показателе экспоненты определяется дисперсией скоростей, мнимая – скоростью галактики. Из соотношения (1.21) формально определяются оба параметра (σ и v), но на практике отношение Фурье-спектров объекта и шаблона значительно сильнее зашумлено чем пик кросс-корреляционной функции в методе ТД. Поэтому, в отличие от классической работы Саджента и др. (1979), мы определяли v по смещению кросс-корреляционного пика, как и в методе ТД. Тогда дисперсия скоростей определяется из выражения:

$$\operatorname{Re} \frac{\tilde{G}(k) \exp(-\frac{2\pi i k v}{N})}{\tilde{T}(k)} = \gamma \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{2\pi k\sigma}{N} \right)^2 \right] \quad (1.22)$$

Пример аппроксимации правой части (1.22) показан на рис. 1.11. Необ-

ходимо выбрать границы по частоте k в которых происходит подгонка $k_1 < k < k_2$, чтобы избежать влияния высокочастотных и низкочастотных шумов. Наш опыт показывает, что оптимальными величинами для числа точек в спектре $N = 500 - 1000$ являются $k_1 = 5 - 10$ и $k_2 = 50 - 120$.

Преимущество метода SSBS в сравнении с методом TD заключается в том, что в первом случае не требуется дополнительных ограничений на форму кросс-корреляционного и авто-корреляционного пиков, используется только предположение о гауссовской форме функции уширения (1.12).

1.4.2 Проблема аппаратного контура

В реальном спектрографе ширина (и даже форма) аппаратного контура меняется по полю (вдоль щели спектрографа и по матрице микрозрачков), что в первую очередь определяется оптикой спектрографа, точностью ее юстировки и фокусировки. Кроме того, из-за температурных колебаний и гнутый спектрографа, величина τ в каждой точке является функцией времени наблюдений и зенитного расстояния. Здесь, как и в предыдущем разделе, τ – дисперсия гауссианы, описывающей аппаратный контур.

Анализ спектров, получаемых с новым вариантом MPFS, показывает, что спектрограф обладает стабильным во времени аппаратным контуром, т.е. изменениями τ в течение наблюдательной ночи можно пренебречь. В таком случае ширина контура определяется только координатами того пространственного элемента, которому соответствует данный спектр: $\tau = \tau(x, y)$.

На рис. 1.12 показаны оценки ширины контура MPFS, измеренные по спектрам разных объектов (He-Ne-Ar лампа спектра сравнения, расфокусированная на все поле звезда-шаблон, сумеречное небо). Измерения сделанные по спектру сравнения систематически больше на 20 – 30 км/с (около 30% от среднего). Это связано с тем, что изображение входного зрачка при засветке через калибровочный тракт смещено относительно положения зрачка при наблюдениях объекта. Из рис. 1.12 видно, что вариации ширины контура составляют $\pm(10 \div 20)\%$ от среднего.

Мы экспериментировали с различными способами учета систематических вариаций аппаратного контура с целью построения уверенных карт распределения дисперсии скоростей σ и пришли к выводу, что наиболее корректной и в то же время простой является следующая методика. Яркая ($5^m - 6^m$) звезда-шаблон расфокусируется на весь растр микрозрачков. За

умеренные экспозиции (90-200 сек) удается получить шаблонные спектры по всему полю.

При анализе спектра галактики методами TD и SSSB в каждой точке (x, y) берется "свой" спектр шаблона $T(x, y)$. Это позволяет практически полностью учесть влияние аппаратного контура, если внутренняя дисперсия скоростей в наблюдаемом объекте превышает ~ 70 км/с (см. следующий раздел).

1.4.3 Последовательность работы с данными MPFS

Подготовка спектров

На языке IDL 5.4 автором был написан пакет программ CROSS.LIB, реализующий вышеописанную методику. Исходными данными служат двумерные спектры галактики и звезды (рис. 1.1) прошедшие предварительную обработку (учтен bias и плоское поле, вычищены следы космических частиц, индивидуальные спектры выделены из CCD-изображений и приведены к единой линейной шкале длин волн, линии ночного неба вычтены, при необходимости данные исправлены за эффект дифференциальной атмосферной рефракции).

Из подготовленных таким образом спектров вычитается континуум. Недоучет уровня континуума приводит к появлению низкочастотной составляющей в Фурье-спектре и, как следствие, к большим шумам для малых k в методе SSBS и к появлению широкой подложки у кросс-корреляционного и автокорреляционного пиков в методе TD. Часто для аппроксимации континуума используют полиномы высоких порядков (Ларсен и др., 1983), но наш опыт обработки показал, что наилучший результат достигается, если в качестве континуума брать спектр сглаженный медианным фильтром с окном 150-200 элементов, при этом даже наиболее широкие абсорбционные детали в спектре практически не искажаются.

Эмиссионные линии в спектре галактики уменьшают контраст кросс-корреляционного пика. В зависимости от количества и интенсивности линий могут использоваться разные методы их удаления. В большинстве случаев достаточно аппроксимировать гауссианой самую яркую линию (в рассматриваемом диапазоне – $H\beta$ или [OIII]5007), определить относительно нее интенсивность остальных линий и вычесть из спектра гауссианы с соответствующими весами.

После вычитания континуума и эмиссионных линий спектры переводят-

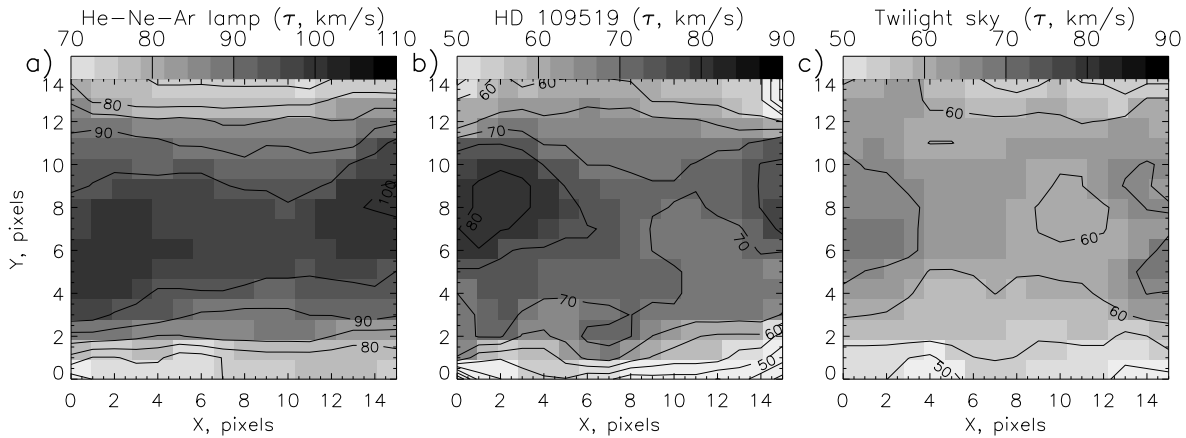


Рис. 1.12: Аппаратный контур MPFS (дисперсия гауссианы τ в км/с) оцененный в спектральном диапазоне 5100-6100Å, дисперсия спектрографа 1.35 Å/px: а – по спектру сравнения, б – по спектру звезды КIII, с – по спектру сумеречного неба

ся в логарифмическую шкалу согласно (1.10). Для уменьшения эффекта "утечки энергии" (leakage) при Фурье-преобразовании из-за резкого обрыва концов спектра (Браулт и Вайт, 1979; Тонри и Дэвис, 1979), необходимо спектр умножить на колоколообразную функцию вида:

$$F(n) = \begin{cases} \sin \frac{\pi n}{2Np}, & n < Np \\ 1, & Np \leq n \leq N(1-p) \\ \sin \frac{\pi(N-n)}{2Np}, & n > N(1-p) \end{cases}$$

Здесь $p = 0.05 - 0.1$ – относительный размер границ спектра.

Определение v и σ

Для спектров от каждого пространственного элемента (x, y) строится соотношение (1.19): спектр звезды-шаблона $T(x, y)$ сглаживается гауссианами различной ширины и производится оценка дисперсии методом ТД.

Получаем набор коэффициентов: $\mu(x, y)$, $\alpha_i(x, y)$, $i = 0, 1, 2$. Если разброс коэффициентов от точки к точке значителен, то лучше сделать аппроксимацию этих коэффициентов вдоль щели полиномом 2-го порядка. Строим кросс-корреляционные функции $C(x, y)$ и с помощью соотношения (1.17) определяем v , а по ширине пика, с помощью (1.18) и (1.20), определяем σ .

Для оценки дисперсии методом SSBS производится аппроксимация правой части выражения (1.22) с учетом замечаний о выборе пределов k_1 и k_2

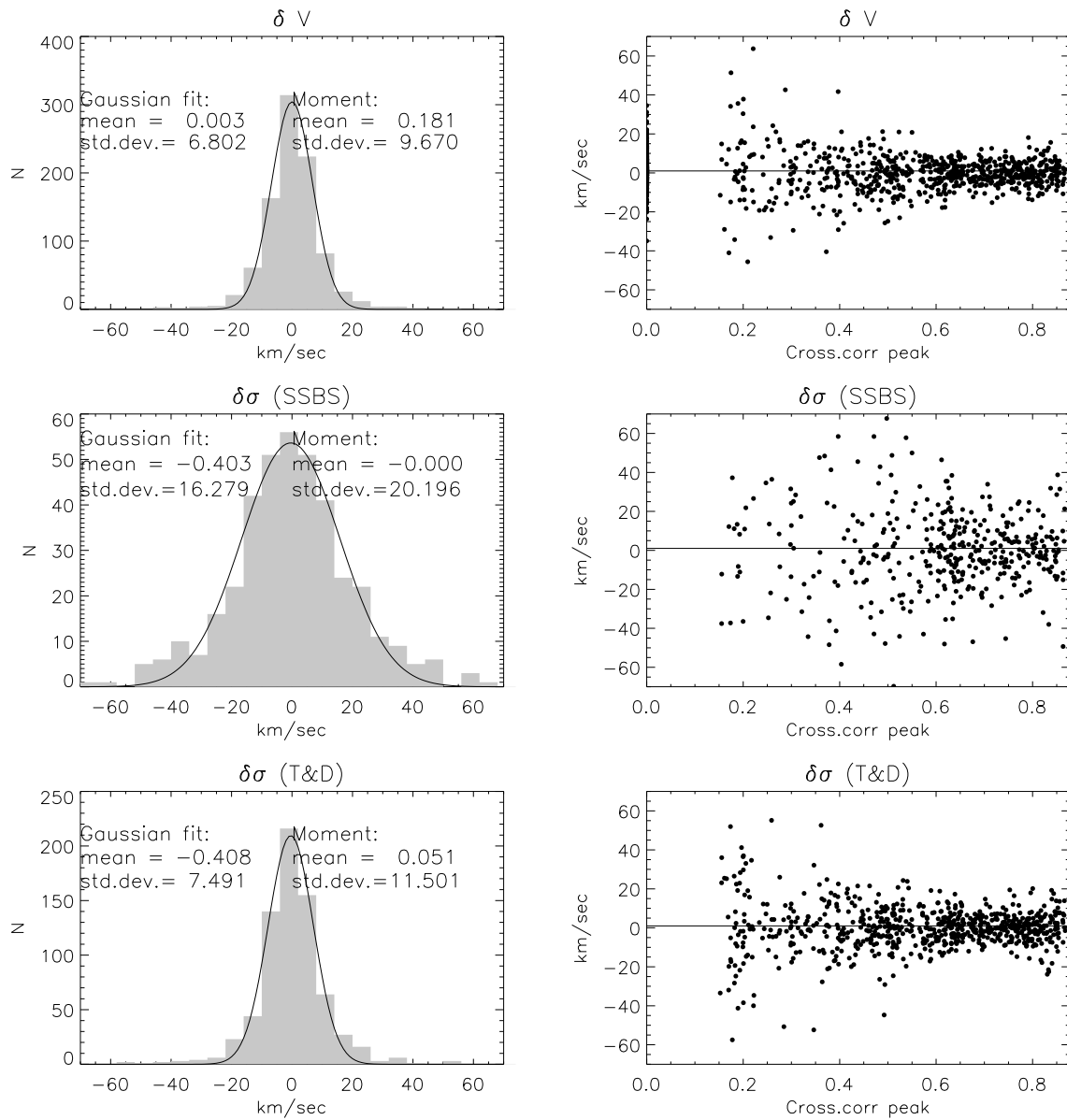


Рис. 1.13: Ошибки определения v (вверху) и σ (в середине – методом SSBS, внизу – методом TD) по всему полю MPFS для галактики NGC 2950, оцененные с помощью 4 звезд-шаблонов. Левые рисунки – гистограммы распределения ошибок и их аппроксимация гауссианой. Правые рисунки – зависимость ошибок от высоты кросс-корреляционного пика.

(рис. 1.11).

Применяя описанные выше процедуры для всех пространственных элементов строим двухмерных карты лучевых скоростей $v(x, y)$ и дисперсии скоростей $\sigma_{TD}(x, y)$, $\sigma_{SSBS}(x, y)$ (индекс указывает метод построения). Гелиоцентрические скорости (приведенные к центру Солнца) определяются из выражения:

$$V_{Hel} = v + V_* - V_{\odot,*} + V_{\odot,gal} \quad (1.23)$$

Здесь $V_{\odot,*}$, $V_{\odot,gal}$ – гелиоцентрические поправки скорости для звезды-шаблона и галактики, вычисленные стандартным способом, V_* – лучевая скорость звезды из каталога (приведенная к центру Солнца).

Выбор спектрального диапазона

Оптимальный спектральный диапазон, в котором проводится вышеописанный анализ, должен содержать в себе абсорбционные линии характерные для звездного населения ядер галактик, по возможности не блендированные. Желательно, чтобы количество эмиссионных линий ионизованного газа было минимально. Наиболее часто используются области в районе триплетов $MgI\lambda\lambda 5167, 5172, 5183 \text{ \AA}$ и $CaII\lambda\lambda 8498, 8542, 8662 \text{ \AA}$. Последний предпочтительнее, поскольку при одной и той же дисперсии спектрографа размер спектрального элемента в км/с в области $CaII$ в 1.6 раза меньше, чем в области MgI . О преимуществах использования $CaII$ см. работу Терлевича и др. (1990).

К сожалению, конструкция спектрографа и существующий набор решеток не позволяет работать в области инфракрасного триплета $CaII$ без значительных потерь света. Эксперименты в оптическом диапазоне показали, что для изучения кинематики звезд в центрах SO-Sb галактик наиболее оптимальным является спектральный диапазон, включающий в себя абсорбции $MgI\lambda 5175 \text{ \AA}$, $FeI\lambda 5229 \text{ \AA}$, $FeI+CaI\lambda 5270 \text{ \AA}$, $NaI\lambda 5893 \text{ \AA}$ и др. В то же время, эмиссионные линии здесь относительно слабые и немногочисленные, заметные в основном только в Сейфертовских галактиках ($[NI]\lambda 5199 \text{ \AA}$, $[FeVII]\lambda\lambda 5158, 5276, 5720, 6086 \text{ \AA}$, $HeI\lambda 5875 \text{ \AA}$).

1.4.4 Оценка ошибок

Оценка ошибок в различных методах определения σ и v подробно рассматривается в ряде работ (TD, 1979; SSBS, 1977; Ларсен и др., 1983). Но лучше

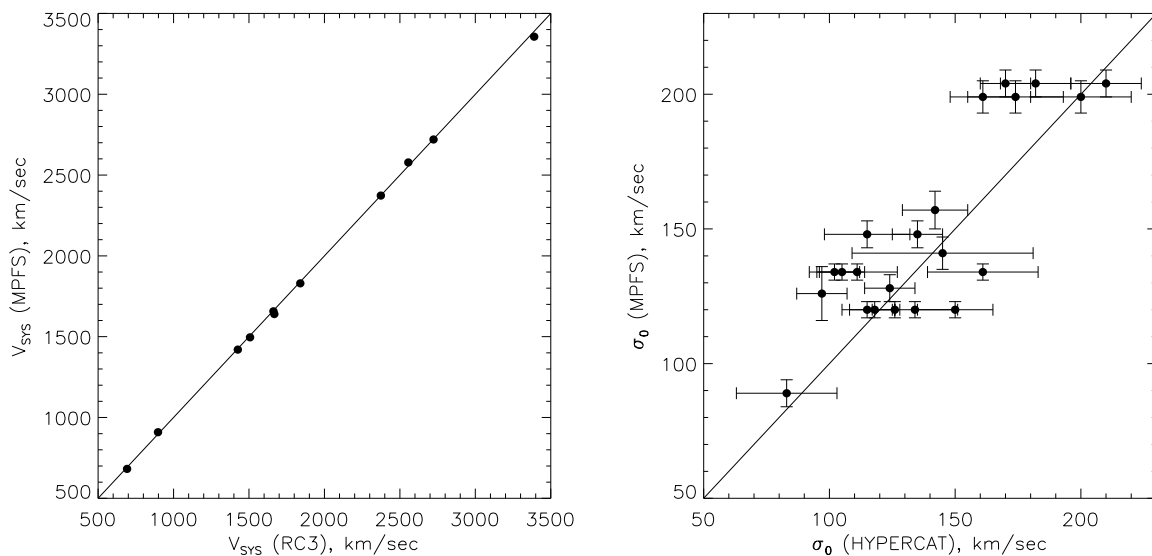


Рис. 1.14: Сравнение системных скоростей (слева) и центральных дисперсий скоростей (справа) определенных из MPFS-наблюдений с данными каталога RC3 и базы HYPERCAT. Сплошные линии соответствуют прямой пропорциональности.

всею влияние случайных и систематических ошибок видно при сравнении результатов полученных по разным звездам-шаблонам, снятым в течение одной ночи. На рис. 1.13 показано распределение ошибок определения скорости и дисперсии скоростей для всех 240 индивидуальных спектров NGC 2905 в поле зрения MPFS. Наблюдения проводились с решеткой 1200 штр/мм, дающей обратную дисперсию $1.35 \text{ \AA}/\text{пиксель}$ в спектральном диапазоне $4800 - 6100 \text{ \AA}$ (раздел 3.3.1).

Средние величины v и σ в каждой точке определялись по 4-м звездам спектральных классов G7 III-K2 III. Величины средних ошибок, оцененные двумя способами – как второй момент в распределении отклонений индивидуальных измерений от среднего по 4-м звездам и как ширина гауссианы, аппроксимирующей это распределение, указаны рядом с гистограммами ошибок. Эти ошибки являются типичными для наших наблюдений и составляют для скорости $\delta v = 5 - 10 \text{ км/с}$, для дисперсии скоростей оцененной методом кросс-корреляций $\delta\sigma_{TD} = 10 - 15 \text{ км/с}$, и $\delta\sigma_{SSBS} = 15 - 25 \text{ км/с}$ для метода Фурье коэффициентов. Для самых центральных областей, в которых высота кросс-корреляционного пика составляет $C_{max} = 0.8 - 1.0$, эти ошибки примерно в 1.5 раза меньше, чем в среднем по полю. Из рис. 1.13 видно, что ошибки дисперсии скоростей в методе SSBS резко возрастают при $C_{max} < 0.7$, т.е. уверенно определяется только центральная дисперсия скоростей. Но поскольку этот метод не требует дополнительной ка-

либровки, то оценки по SSBS полезно использовать для проверки оценок центральной дисперсии скоростей.

Мы провели ряд экспериментов по проверке точности методов TD и SSBS, используя для этого спектры звезд классов G6 III/IV-K3 III, полученные с MPFS. Если отношение сигнал/шум в индивидуальных спектрах $S/N > 20$, то оно уже мало влияет на точность определения σ , которая составляет менее 10–20 км/с, а в центре галактики даже ~ 5 км/с (рис. 1.13).

Эксперименты со сглаженными спектрами звезд подтвердили хорошо известный факт о невозможности уверенно оценить дисперсию скоростей, если она меньше или близка к ширине аппаратного контура. В нашем случае этот предел составляет $\sim 70 - 80$ км/с.

Основным фактором, влияющим на точность определения дисперсии скоростей для фиксированного отношения S/N , являются различия в спектральных деталях галактики и звезды, приводящие к уменьшению контраста кросс-корреляционного пика, и к различиям Фурье-спектров в методе SSBS. Обычно, в качестве шаблонов при изучении движения звезд в галактиках ранних типов используются спектры красных гигантов G6 III-K3 III, в течение наблюдательной ночи необходимо получать спектры звезд разных классов из этого диапазона, чтобы выбрать шаблон, наиболее близкий к спектру галактики.

Для 12 галактик, наблюдавшихся с MPFS (глава 3) мы сравнили наши оценки системных скоростей галактик с данными по нейтральному водороду, взятыми из каталога RC3 (рис. 1.14). Среднеквадратичная величина отклонений составила 15 км/с, без систематического сдвига скоростей. На рис. 1.14 приводится сравнение оценок дисперсии скоростей звезд в ядре σ_0 по результатам наблюдений с MPFS и по данным с "длинной щелью" из базы данных HYPERCAT. Систематических различий нет, относительно большой разброс данных HYPERCAT связан, скорее всего, с неопределенностью точной установки щели спектрографа на ядро галактики. В то же время, применяя панорамную спектроскопию, мы уверенно выделяем области, соответствующие центру галактики.

Основные результаты главы 1.

1. Изготовлен новый многорежимный спектрограф 6-м телескопа SCORPIO, в 4-5 раз превосходящий по эффективности существующие отечественные приборы этого класса и сравнимый с лучшими мировыми анало-

гами. Квантовая эффективность новой системы в 4 раза превосходит старый вариант.

2. Исследованы возможности прибора SCORPIO при наблюдениях со сканирующим интерферометром Фабри-Перо. Показано отсутствие систематического сдвига при измерении лучевых скоростей. Детально рассмотрены различные источники ошибок измерения лучевых скоростей при интерферометрических наблюдениях. Разработан пакет программ, позволяющий корректно учесть влияние атмосферы при таких наблюдениях с ПЗС в качестве детектора и этим существенно повысить точность измерения лучевых скоростей. Теперь точность измерения абсолютных значений лучевых скоростей доведена до 2-3 км/с (с интерферометром FP501).
3. Исследованы возможности спектрографа MPFS для изучения движений звездного компонента галактик. Разработана методика учета вариации аппаратного контура по полю, позволяющая уверенно строить двухмерные карты дисперсии скоростей. Написан пакет программ для построения карт лучевых скоростей и дисперсии скоростей звезд в галактиках. Точность измерения скоростей составляет в среднем $\delta v = 5 - 10$ км/с, а дисперсии скоростей – $\delta\sigma_{TD} = 10 - 20$ км/с.

Глава 2

Моделирование движений газа и звезд в галактиках с перемычками

"Любая модель – карикатура на реальность"
(А.В. Засов)

В этой главе обсуждается проблема изучения движений звезд и газовых облаков внутри перемычек методами численного моделирования. Современные представления о галактиках с перемычками представлены в разделе 2.1. Здесь же описываются трудности, возникающие при интерпретации наблюдаемых полей лучевых скоростей и дисперсии скоростей в подобных объектах. В разделе 2.2 анализируются поля скоростей в галактиках с перемычками, построенные для различных наклонов плоскости галактики к лучу зрения на основании результатов численного гидродинамического моделирования движений газа в перемычках. В разделе 2.3 описываются результаты численного динамического моделирования движения звезд в перемычках. Здесь основное внимание уделяется распределению дисперсии лучевых скоростей в проекции на картинную плоскость.

2.1 Введение

2.1.1 Бар как динамически выделенная система

Согласно современным представлениям, бары представляют из себя устойчивые равновесные образования в дисках галактик, вращающиеся твердо-тельно и существующие на протяжении многих оборотов. С этой точки зрения перемычки имеют много общего со спиральными волнами плотности (Линдبلاد, 1963; Лин, Шу, 1964) и могут формально рассматриваться

как некоторый "вырожденный" случай спиральной структуры. Другими словами, бар – результат некоторого коллективного процесса в звездно-газовом диске, причем существует, как минимум, два механизма, приводящих к образованию бара. Это барообразующая (овальная) неустойчивость, впервые рассмотренная Острикером, Пиблзом (1973) и неустойчивость радиальных орбит (Линден-Белл, 1979; Поляченко, 1992).

Важную роль в динамике перемычек играют основные резонансы спиральной структуры, расположение которых определяется соотношением между угловой скоростью дифференциального вращения галактики $\Omega(R)$ и угловой скоростью вращения бара Ω_b . Так, коротационным резонансом (RC) называют область, в которой $\Omega_b = \Omega$. Положение внутренних линдбладовских резонансов (ILR) соответствует условию $\Omega_b = \Omega - \kappa/2$, где κ – частота эпициклических колебаний звезд, $\kappa^2 = R \frac{d\Omega^2}{dR} + 4\Omega^2$. На рис. 2.1 стрелочками отмечены вышеперечисленные особые точки для произвольно взятой кривой вращения. Если кривая вращения такова, что в центральной области существуют два ILR (как на рис. 2.1), то их называют внутренним внутренним и внешним внутренним резонансами (iILR и oILR соответственно). Концы бара должны располагаться между радиусами ILR и RC. Возможно, что их точное положение определяется природой неустойчивости, породившей бар (см. дискуссию у Фридмана, Хоружего, 2001).

Большой прогресс в понимании структуры и эволюции баров достигнут благодаря численным экспериментам, проводимым как методом динамического моделирования N-тел (Миллер, Смит, 1979), так и гидродинамическими расчетами движений газа в перемычках (Атанассула, 1992а,б). Подробный обзор результатов, полученных численными методами, и ссылки на оригинальные статьи можно найти в работах Комб (1994) и Линдблада (1999). Поскольку распределение гравитационного потенциала в области бара, вообще говоря, сильно отличается от осесимметричного (обычно говорят о трехосном потенциале), то и движения звезд и газовых облаков в баре отличны от круговых. На сегодняшний день можно считать доказанным, что бары являются динамически выделенными подсистемами, причем движения газа и звезд в них имеют различный характер. Внутри бара существует несколько "семейств" устойчивых периодических орбит, образующих своеобразный "каркас" бара (Контопулус, Гросбол, 1989). Основные орбиты звезд, поддерживающие форму перемычки, вытянуты параллельно бару и принадлежат семейству x_1 . Если в галактике существуют два внутренних линдбладовских резонанса (см. рис. 2.1), то между ними существуют устойчивые орбиты семейства x_2 , перпендикулярные большой оси

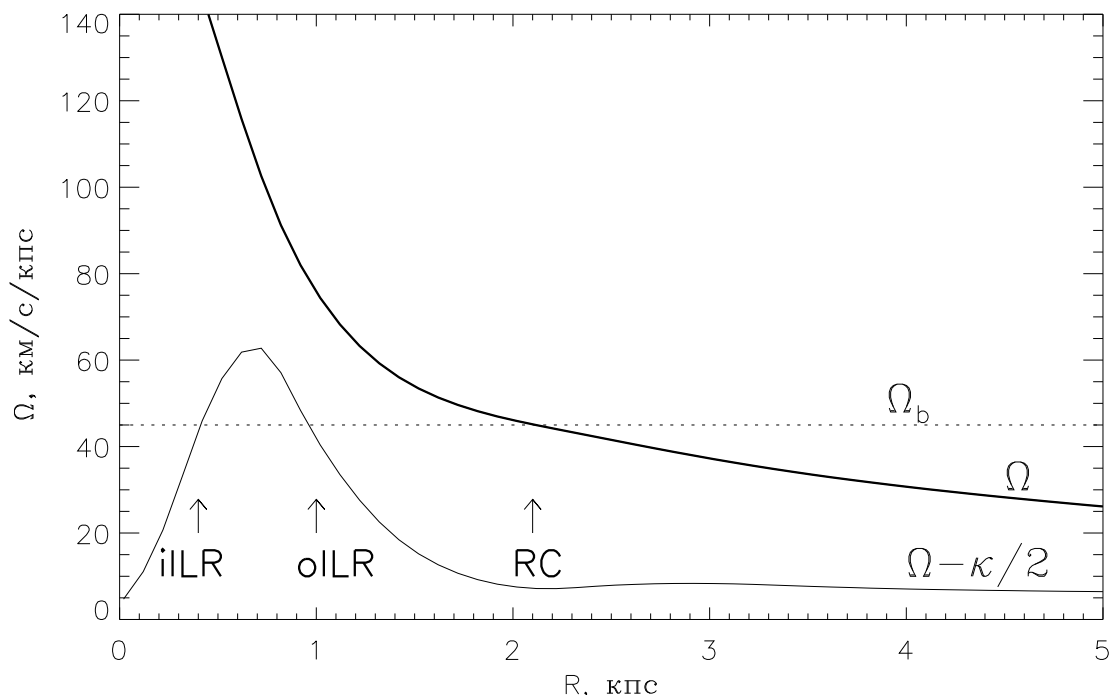


Рис. 2.1: Схема, поясняющая расположения внутренних линдбладовских резонансов (iILR, oILR) и коротации (RC) в галактике с произвольно взятой кривой вращения. Жирной линией показана радиальная зависимость угловой скорости вращения Ω , тонкой — кривая $\Omega - \kappa/2$. Пунктир соответствует угловой скорости вращения бара

бара. Таким образом, во внутренних областях бара ориентация периодических орбит звезд меняется на 90° .

Но подобные движения возможны только в бесстолкновительной звездной подсистеме. Газовая подсистема (под "молекулами" газа здесь следует понимать отдельные газовые облака) является столкновительной, в ней невозможно устойчивое существование пересекающихся потоков. Газовые облака двигаются по сглаженным траекториям, натекание галактического газа на относительно медленно вращающийся бар, происходящее со скоростями 50 — 100 км/с, приводит к образованию сильных ударных фронтов на лидирующих краях бара (Атанассула, 1992а,б).

Многочисленные модельные расчеты показывают, что газ диска, попав в гравитационную яму, связанную с перемычкой, теряет угловой момент. В результате формируются потоки газа вдоль бара в направлении к центру галактики (строго говоря, к области ILR). Детальное гидродинамическое моделирование (Леви и др., 1996) показывает, что кроме потоков к центру (inflow) существует и обратное движение (outflow), обусловленное седловой точкой гравитационного потенциала. Однако движение к центру все же является преобладающим.

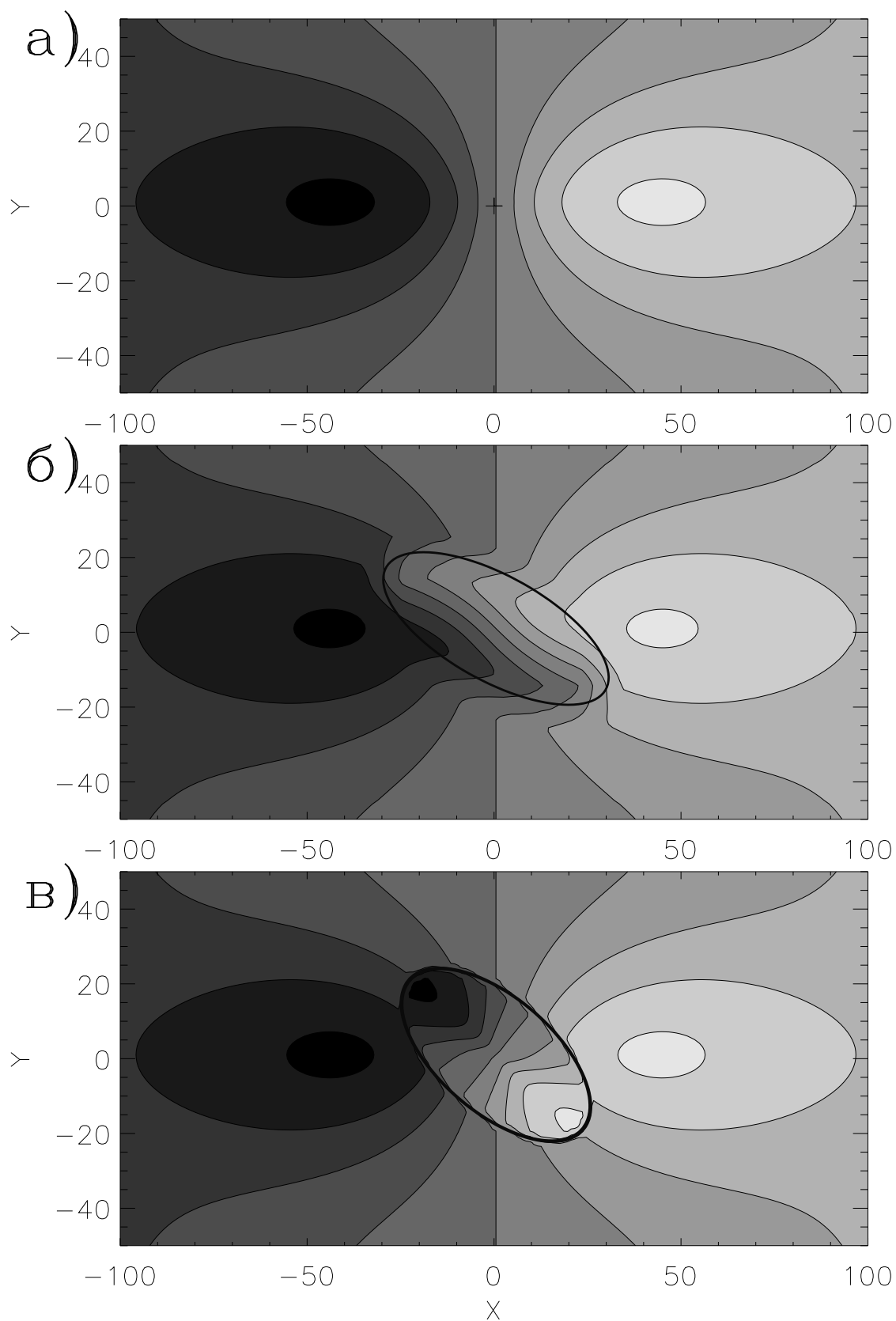


Рис. 2.2: Схематические изображения контуров наблюдаемого поля скоростей газа в галактике. Линия узлов диска направлена горизонтально. Линейный масштаб и шкала скоростей – произвольные. (а) – диск только с круговыми движениями (б) – в центре находится бар, ограниченный черным эллипсом. (в) – в центре находится диск, наклоненный к плоскости галактики, ограниченный черным эллипсом).

2.1.2 Интерпретация наблюдаемых лучевых скоростей

Несмотря на то, что теоретическая сторона динамики баров разработана достаточно подробно, наблюдаемую картину движений газа и звезд в перемычках часто очень трудно интерпретировать. Основная проблема состоит в том, что измеряется только проекция вектора скорости на луч зрения. Так, 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:

$$V_{OBS} = V_{SYS} + V_R \sin \varphi \sin i + V_\varphi \cos \varphi \sin i + V_Z \cos i \quad (2.1)$$

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

В области бара некруговые скорости могут достигать 50 – 100 км/с, поэтому, если наблюдения галактики проводились методом спектроскопии с "длинной щелью" то полученные распределения лучевых скоростей вдоль одномерных разрезов чрезвычайно трудно интерпретировать. В большинстве случаев приходится только констатировать сам факт присутствия некруговых движений (см. к примеру, Афанасьев и др., 1988). Иногда эти движения могут привести к иллюзии существования газового компонента, вращающегося в противоположную сторону относительно галактики в целом. Но на самом деле эти движения газа в баре нельзя интерпретировать как круговое вращение.

Значительно больше информации дает изучение полного двухмерного поля скоростей, получаемого из наблюдений радиолиний нейтрального или молекулярного газа с помощью радиоинтерферометров, или из наблюдений линий ионизованного газа методами панорамной спектроскопии в оптическом диапазоне (глава 1). Но из-за значительных некруговых движений, даже выделение средней скорости вращения в области бара – задача не однозначная. Метод Фурье-анализа поля лучевых скоростей, предложенный Ляховичем и др. (1997), позволяет при некоторых предположениях о природе спирального узора восстановить полную пространственную картину движений газа в спиральной галактике. Но в случае бара, рассматриваемого как частный случай двухрукавной спирали, возникает ряд трудностей

при интерпретацией получаемого Фурье-спектра, кроме того, теория движения газа в рукавах, вообще говоря, неприменима к перемычкам из-за значительно больших нелинейных эффектов.

Для некоторых галактик с перемычками построены детальные динамические модели, при этом непосредственно сравниваются результаты нелинейного гидродинамического моделирования течений газа в барах с наблюдаемыми полями скоростей (Линдبلاد и др., 1996; Кнапен и др. 2000а). Но и здесь результат часто оказывается зависимым от начальных параметров моделирования.

Но несмотря на перечисленные проблемы, возникающие при интерпретации наблюдаемых скоростей газа, использование модели кругового вращения с переменными параметрами ориентации на каждом радиусе, позволяет сделать ряд важных выводов о характере движений в баре. Так присутствие бара в галактике вызывает поворот динамической оси (линии максимального изменения лучевой скорости) относительно линии узлов галактики (Шевалье, Фуренлид, 1978; Афанасьев и др. 1992; Засов, Моисеев 1999). Другими словами, линии равных лучевых скоростей искажаются, вытягиваясь вдоль бара, а динамическая ось, перпендикулярная к ним, должна, соответственно, поворачиваться в противоположную сторону.

В то же время, следует учитывать тот факт, что присутствие наклонного диска в центре галактики также может привести к повороту динамической оси (Афанасьев, Сильченко, 1999; Засов, Моисеев, 1999). На рис. 2.2 показаны примеры полей скоростей, построенные для произвольной кривой вращения с помощью соотношения (2.1). Рис. 2.2а соответствует нормальному круговому вращению, рис. 2.2б – бару с радиальными движениями к центру. Хорошо видна характерная "S-подобная" форма контуров равных скоростей, вытянутых вдоль перемычки. Поле скоростей для диска, наклоненного к основной плоскости галактики приведено на рис. 2.2в. Но в этом случае, поскольку в диске с круговым вращением динамическая ось совпадает с линией узлов, поворот позиционного угла фотометрической и динамической осей должен происходить в одну и ту же сторону. Так как это лишь качественный вывод, необходимы конкретные расчеты – возможно, что эффект проекции в совокупности с радиальными потоками газа в баре может создать картину аналогичную ожидаемой для наклонного диска.

Итак, оказывается, что два принципиально различных случая: наличие некруговых движений в области трехосного потенциала перемычки или же движения по круговым орбитам, но вне плоскости внешнего (основ-

ного) диска галактики, имеют сходные наблюдаемые проявления в поле лучевых скоростей газа. Необходим надежный критерий для разделения этих двух возможностей. С целью поиска такого критерия, в разделе 2.2 анализируются результаты двухмерного нелинейного гидродинамического моделирования движений газа в дисковых галактиках с перемычками.

Следует заметить, что умение правильно отождествить динамические проявления бара в наблюдаемом поле скоростей становится особенно актуальным при изучении структур с небольшими угловыми размерами, когда имеется всего несколько десятков точек с независимыми измерениями лучевых скоростей. Это случай так называемых мини-баров, с линейными размерами меньше одного килопарсека.

2.1.3 Дисперсия лучевых скоростей

Распределение дисперсии скоростей звездного диска – один из важных параметров его характеризующих, позволяющий строить однозначные многокомпонентные модели распределения массы в галактиках (Хоперсков и др., 2002а). Как показывают численные расчеты, образование перемычки приводит к тому, что распределение дисперсии скоростей в галактическом диске начинает сильно отличаться от невозмущенного (без бара и спиральной структуры) осесимметричного распределения (Миллер, Смит, 1979; Вутерин, Дежонг, 1997). Бар является значительно более "горячей" динамической подсистемой – дисперсия скоростей в нем резко возрастает. Кроме того, обнаруживается сильная анизотропия эллипсоида скоростей, проявляющаяся в том, что дисперсии радиальных, азимутальных и вертикальных скоростей имеют различное распределение в плоскости диска.

2.2 Влияние эффекта проекции на наблюдаемые поля скоростей газа.

2.2.1 Построение модельных полей скоростей

В основе моделирования лежит численное решение уравнений гидродинамики двухмерного газового диска, находящегося во внешнем гравитационном поле галактики. Модельный гравитационный потенциал состоит из осесимметричного компонента (балдж, диск и гало) на который накладывается неосесимметричное возмущение (см. работу Матсуда и др., 1987).

Неосесимметричное возмущение (звездная бар-мода) включается плавно и постепенно выводится на фиксированный уровень. При этом наблюдается своеобразный квазипериодический режим прокачки газа через бар (Аванасьев и др., 1989; Леви и др., 1994 и 1996). Структура радиальных течений бисимметрична – в двух секторах потоки газа направлены вдоль бара к центру, а в двух других имеет место обратное движение – отток газа от центра диска, обусловленный седловой точкой гравитационного потенциала. Но движение газа к центру вдоль бара является преобладающим, на что указывает увеличение концентрации газа в околядерной области. Наряду с этим, как и следовало ожидать, развитие бара порождает двухрукавную спиральную структуру в диске снаружи от коротационной окружности бара.

Использовались результаты эксперимента, полностью аналогичного описанному в Леви и др. (1996), за исключением того, что осесимметричная часть гравитационного потенциала подбиралась так, чтобы кривая вращения была близка к кривой вращения Галактики (Хауд, 1979). Максимальная скорость вращения – около 250 км/с, шкала длин диска 3 кпк, радиальная шкала бара – около 1 кпк, радиус расчетной области 10 кпк. Расстояние до галактики принято равным 20.6 Мпк, так что 1'' соответствует 0.1 кпк.

Результатом численного моделирования являются распределения поверхностной плотности газа $\rho_{gas}(R, \varphi)$, радиальной $V_R(R, \varphi)$ и азимутальной $V_\varphi(R, \varphi)$ компонент скорости газа, где R – радиальная, а φ – азимутальная координата в плоскости галактики. Размер ячеек расчетной сетки в полярных координатах: по азимуту $\Delta\varphi = 2^\circ$ и по радиусу $0.016 \leq \Delta R \leq 0.2$ кпк в зависимости от расстояния до центра. Используя эти данные мы строили модельные кубы данных по нижеследующей схеме.

Лучевая скорость в точке (R, φ) определяется из выражения (2.1) для $V_Z = 0$, поскольку моделирование – двухмерное. Распределения $V_{OBS}(R, \varphi)$ и $\sigma_{gas}(R, \varphi)$ проецировались на сетку декартовых координат с размером ячеек 0.02 кпк. Позиционный угол линии узлов в картинной плоскости принимался равным $PA_0 = 90^\circ$. В результате были получены распределения лучевой скорости $V_{OBS}(x, y)$ и поверхностной плотности газа $\rho_{gas}(x, y)$. Спектр эмиссионной линии представлялся в каждой точке гауссианой с центром соответствующим $V_{OBS}(x, y)$ и полушириной $FWHM = 130$ км/с. Из-за грубого спектрального разрешения мы пренебрегали влиянием дисперсии скоростей газовых облаков на ширину линии. Интенсивность спектральной линии принималась пропорциональной $\rho_{gas}(x, y)$. Пространственный масштаб огрублялся до размера элемента изображения 0''.8, в каждом

спектральном канале производилось сглаживание гауссианой, так что итоговое пространственное разрешение составляло $\sim 2''$. Таким образом, построенные нами модельные кубы были близки по своему спектральному и пространственному разрешению к типичным наблюдательным данным, получаемым на 6-м телескопе с интерферометром Фабри-Перо FP235 в линии H_α (таблица 1.1).

2.2.2 Методика поиска параметров ориентации

Поля скоростей строились путем определения положения барицентра линии в модельных спектрах для каждой точки в картинной плоскости. Аналогично, вычисляя интеграл в линии, были построены "наблюдаемые" распределения поверхностной плотности газа (изображения в линии H_α).

Для анализа полей скоростей применялся метод "наклонных колец" (Бегеман, 1989), несколько модифицированный, согласно Моисееву, Мусцевому (2000). Суть метода вкратце заключается в следующем.

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 наблюдаемая лучевая скорость V_{OBS} определяется выражением:

$$V_{OBS}(r, PA) = V_{SYS} + V_{ROT}(R(r)) \frac{\cos(PA - PA_{dyn}) \sin i}{(1 + \sin^2(PA - PA_{dyn}) \tan^2 i)^{1/2}} \quad (2.2)$$

а расстояние до центра вращения в плоскости галактики:

$$R(r) = r(1 + \sin^2(PA - PA_0) \tan^2 i)^{1/2} \quad (2.3)$$

Здесь V_{ROT} – скорость кругового вращения, PA_{dyn} – позиционный угол динамической оси. В случае чисто круговых движений $PA_{dyn} \equiv PA_0$, где PA_0 – позиционный угол линии узлов.

В процессе работы наблюдаемое поле скоростей разбивается на эллиптические кольца, задаваемые уравнением (2.3) для $R = const$. В каждом кольце проводится аппроксимация наблюдаемой зависимости $V_{OBS}(PA)$ модельной кривой (2.2) с помощью нелинейного метода наименьших квадратов. В результате на каждом радиусе r удается оценить параметров ориентации PA_{dyn} , i и скорость кругового вращения V_{ROT} .

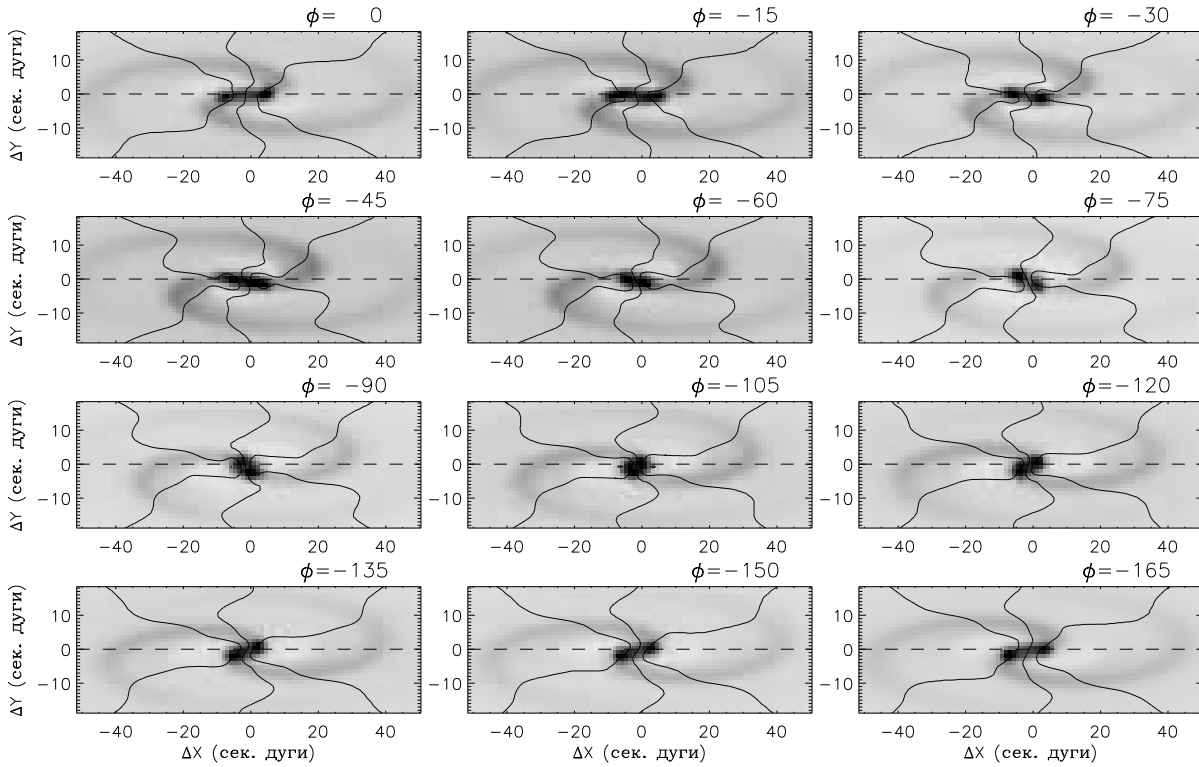


Рис. 2.3: Проекция на картинную плоскость распределения поверхностной плотности газа для разных углов ϕ поворота бара (отмечен в правом верхнем углу на каждом графике), в момент времени $T=2.0$. Контурными показаны линии равных лучевых скоростей модельного поля скоростей соответствующие V_{SYS} и $V_{SYS} \pm 100$ км/с. Наклон плоскости галактики $i = 70^\circ$. Пунктиром показана линия узлов диска.

Следует заметить, что если PA определяется вполне однозначно по положению экстремумов функции (2.2), то с оценкой i ситуация менее определенная. Так, если наклон i мал (галактика видна в положении "плашмя"), то невозможно разделить вклад в наблюдаемую проекцию скорости от V_{ROT} и угла i ; однозначно определяется только значение выражения $V_{ROT} \sin i$. Бегеман (1989) на примере обработки данных радионаблюдений показал, что указанная неопределенность возникает при углах наклона $i \leq 40^\circ$.

Вышеописанным способом были построены и проанализированы модельные поля для разных стадий развития бара и для углов наклона $30^\circ \div 70^\circ$. Угол между линией узлов и баром менялся с шагом 15° . Всего было построено более 400 модельных полей скоростей.

2.2.3 Анализ результатов моделирования

На рис. 2.3 показано распределение поверхностной плотности газа и линии равных лучевых скоростей для различных углов ориентации бара. Это типичная картина для моментов безразмерного времени $T < 3 \div 4$ (где $T = 1$ соответствует одному обороту бара), затем бар выходит на насыщение, а спирали вырождаются в псевдокольцо (Леви и др., 1996). Внутри $r < 10 - 15''$ искажения контуров равных лучевых скоростей связаны с баром, они имеют характерную "S-образную" форму. На больших радиусах отличия их формы от случая кругового вращения определяются движениями газа в спиральных рукавах. Контуров равных лучевых скоростей в центре искажаются, даже если бар расположен вдоль большой оси галактики ($\phi = 0$, где ϕ – угол между большой осью бара и линией узлов, отсчитываемый в плоскости галактики). Формально в этом случае проекция радиальных скоростей равна нулю, согласно (2.1). Но во-первых, бар имеет конечную ширину, поэтому в нем всегда присутствуют точки с ненулевой проекцией радиальных скоростей. А во-вторых, в возмущениях круговой скорости присутствует азимутальная компонента, которая и вносит свой вклад в наблюдаемую лучевую скорость.

На рис. 2.4 приведены характерные радиальные изменения PA_{dyn} и наклона i , формально определяемые по формуле (2.2). Рассмотрим поведение позиционного угла динамической оси. В самом центре динамическая ось из-за влияния бара заметно отклоняется от линии узлов $PA_0 = 90^\circ$ (кроме $\phi \approx 0^\circ$, и -90° – положений вблизи большой и малой оси). Начиная с $r \approx 5''$ отклонение уменьшается и на $r \approx 10''$ (ближе к концам бара) оно незначительно. На больших расстояниях поворот происходит в другую сторону от линии узлов и только на $r > 20''$ искажения прекращаются.

При развитии бара на его лидирующей кромке устанавливается ударная волна, особенно хорошо заметная на картах распределения давления – газ здесь сильно сжат. Такое расположение ударных фронтов согласуется как с наблюдением пылевых полос в барах, так и с результатами более раннего численного моделирования (Атанассула, 1992а,б). "Осцилляции" PA_{dyn} вокруг величины PA_0 на $r = 10 - 20''$ связаны со сложной картиной скоростей на концах бара, когда фронт ударной волны перемещается с лидирующей кромки бара на внутреннюю сторону отстающих рукавов (радиус коротации бара $r \approx 20''$). Картина радиальных изменений PA_{dyn} не симметрична относительно малой оси галактики, так как имеется выделенное направление отсчета позиционного угла – направление закрут-

ки спиральной волны плотности, противоположное направлению вращения галактики.

Жирной линией на рис. 2.4 показана ориентация проекции оси бара на картинную плоскость (наблюдаемая фотометрическая ось бара). Несмотря на сложный характер изменения PA с радиусом, поворот динамической оси в баре (на $r < 10''$) всегда происходит в противоположном направлении от линии узлов, по сравнению с фотометрической осью бара. Это верно для всех построенных полей скоростей с разными i , ϕ и T .

Чтобы лучше продемонстрировать этот эффект, на рис. 2.5 показаны зависимости отклонения позиционных углов динамической оси (усредненных по всем точкам с $r < 6''$) от позиционного угла большой оси бара. Для всех наклонов и разных стадий развития бара прослеживается следующая закономерность.

Для углов ϕ от 0° до $\pm 45^\circ$ динамическая ось поворачивается практически в противофазе с ориентацией бара. С ростом угла между баром и линией узлов динамическая ось начинает "отставать" ее PA изменяется не столь быстро как для фотометрической оси и при $\phi \approx \pm 90^\circ$ практически совпадает с линией узлов. Тем не менее, ее отклонения от линии узлов всегда противоположны отклонениям оси бара (практически все точки на рис. 2.5 лежат во 2-м и 4-м квадрантах координатной плоскости). Подобное "отставание" динамической оси является следствием комбинации эффекта проекции с тем очевидным фактом, что бар не полностью останавливает вращение газа (максимальный контраст потенциала бара в этом эксперименте 30%) – кроме радиальной всегда есть и азимутальная компонента скорости.

Рассмотрим подробнее радиальные изменения угла наклона i , формально определяемого по полю скоростей (рис. 2.5). В области бара радиальные движения искажают зависимость (2.2), которая должна выполняться при чисто круговом вращении. Поэтому определяемый на этих радиусах наклон диска может заметно отличаться от истинного наклона диска. Амплитуды изменения i достигают $20^\circ \div 30^\circ$, при этом прослеживается следующая общая тенденция. Для наклонов плоскости галактики $i \geq 60^\circ \div 70^\circ$, при $\phi > -30^\circ$ ($\phi < -150^\circ$) формально определяемая величина наклона в области бара практически выходит на постоянную величину. Создается впечатление, что в центре находится выделенный диск с наклоном к картинной плоскости на $15^\circ \div 25^\circ$ меньшим, чем для внешнего диска галактики. При этом оценки угла между плоскостями дисков могут достигать 90° (иллюзия

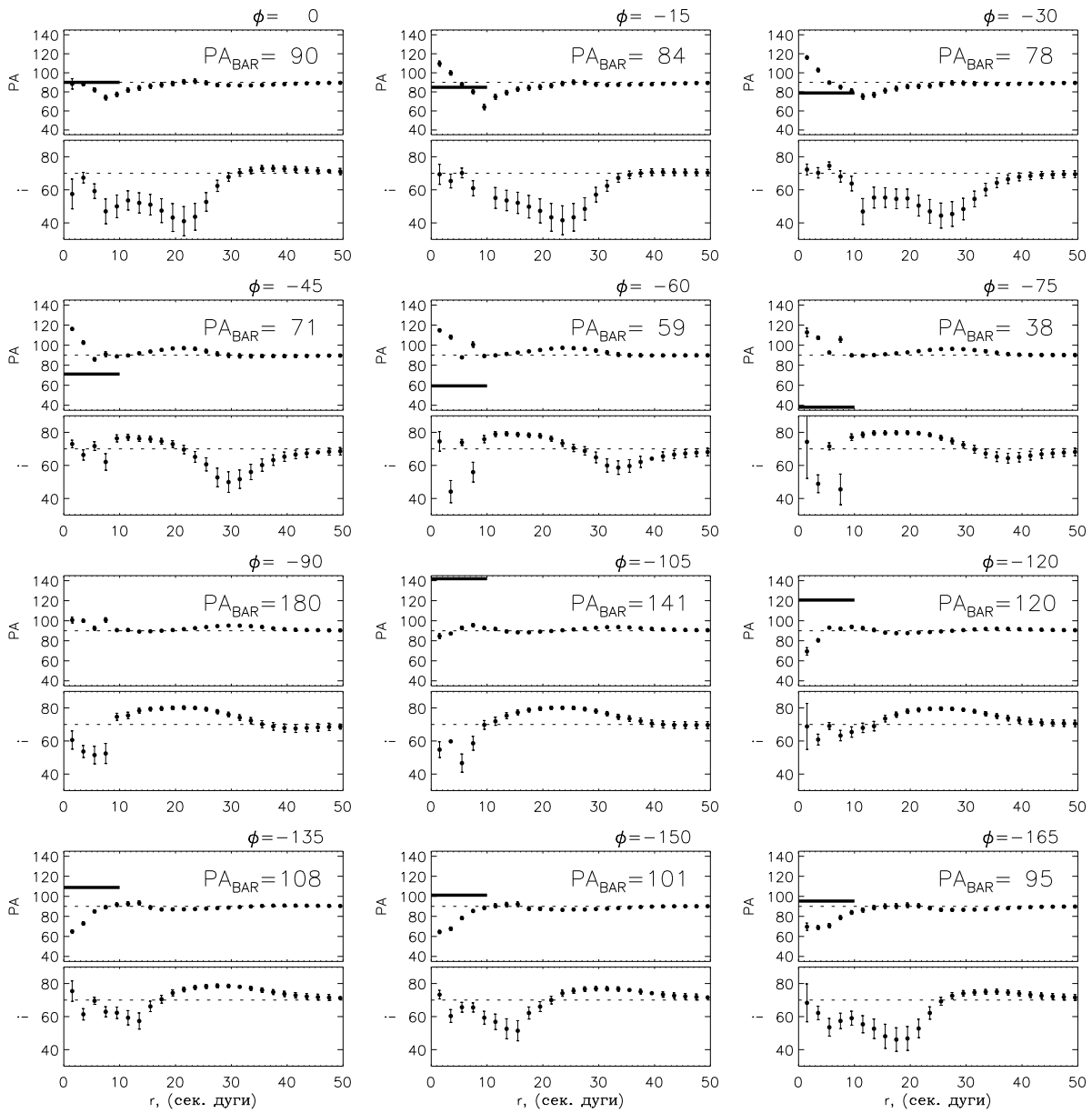


Рис. 2.4: Результаты анализа модельных полей скоростей для разных углов поворота бара ϕ в момент времени $T = 2$. Радиальные изменения ориентации динамической оси PA_{dyn} и наклона i . На графиках для PA жирной линией указан позиционный угол бара в проекции на плоскость неба (этой же ориентации соответствует и надпись " $PA_{BAR} = \dots$ " на каждом графике). На пунктиром показаны параметры ориентации плоскости галактики $PA_0 = 90^\circ$, $i = 70^\circ$.

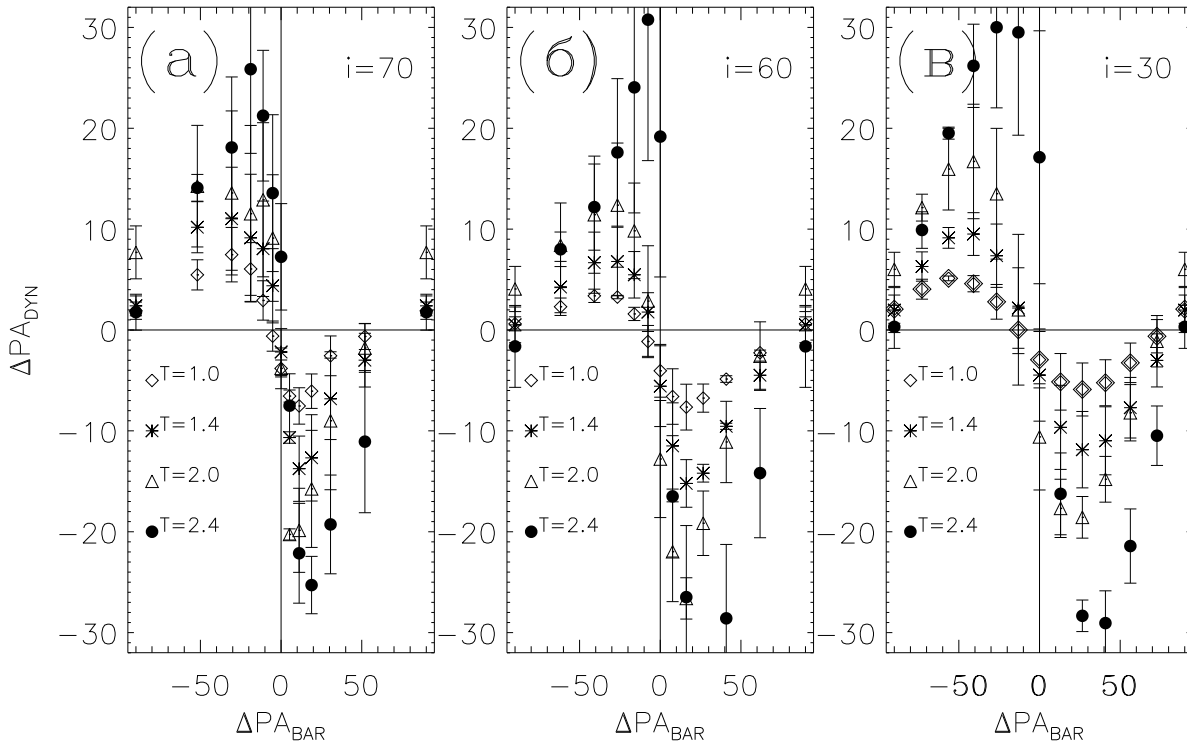


Рис. 2.5: Зависимость среднего отклонения позиционного угла динамической оси от линии узлов в области бара ΔPA_{DYN} от позиционного угла бара ΔPA_{BAR} , для разных наклонов i . Разные значки соответствуют разным моментам безразмерного времени T .

полярного диска).

Причина этого заключается в том, что зависимость V_{OBS} от PA в (2.2) при $i > 50^\circ \div 60^\circ$ сильно отличается от синусоидальной, но радиальные движения, проекция скоростей которых максимальна вдоль малой оси галактики, искажают зависимость (2.2) так, что она становится ближе к синусоидальной, но соответствующей меньшим величинам i .

Таким образом, используя только поля скоростей довольно сложно отличить мини-бар от околоядерного наклонного диска: можно сделать ошибочный вывод о наблюдении движения газа по круговым орбитам для меньших значений наклона. Однако в действительности это просто эффект проекции на луч зрения суммы круговых и некруговых движений в баре. Так как и в случае реального наклонного диска должен наблюдаться поворот динамической оси, то анализ одного только поля скоростей может привести к неправильным выводам. Аналогично и анализ эллиптичности изофот на изображении галактики не может дать однозначного ответа на вопрос, что именно наблюдается – бар или наклонный диск. Поэтому лишь сравнение PA_{dyn} полученного из анализа поля скоростей с результатами поверхностной фотометрии (радиальными зависимостями PA изофот) может отве-

тить на вопрос, что мы видим – наклонный диск или бар.

2.2.4 Кинематика газа в галактике NGC 972

В качестве примера применения вышеописанного критерия рассмотрим галактику NGC 972. Она наблюдалась на 6-м телескопе с помощью сканирующего интерферометра FP501 в линии [NII] λ 6583. Кратко результаты анализа этого поля скоростей изложены Засовым, Моисеевым (1999). Центральная область NGC 972 сильно запылена, однако на инфракрасных JHK изображениях видна четкая двухрукавная спираль на $r \approx 10''$ отходящая от бароподобной структуры, вытянутой вдоль $PA \approx 180^\circ$ (Майя и др., 1998; Засов, Моисеев, 1999).

На рис. 2.6 приведены радиальные зависимости PA динамической оси и наклона i , формально определенные по полю скоростей в приближении кругового вращения методом, описанным в разделе 2.2.2. Здесь наклон диска галактики к лучу зрения принимался равным 64° , позиционный угол линии узлов $PA = 150^\circ$, что согласуется с ориентацией внешних изофот на изображении галактики в фильтре K, полученном на инфракрасном телескопе UKIRT¹ (Гавайские о-ва). Резкое изменение PA и i на $r < 10''$ может интерпретироваться и как результат присутствия наклонного диска и как мини-бар.

Но сопоставление поворотов динамической оси с ориентацией изофот на K-изображении, помогает разобраться с этой неопределенностью. На рис. 2.6 черный отрезок соответствует средней ориентации изофот в центральной части галактики, то есть положению фотометрической оси. Видно, что фотометрическая ось, по сравнению с динамической, отклоняется в противоположную относительно линии узлов сторону. Это указывает на то, что мы имеем дело именно с мини-баром. Изменения наклона i в таком случае связаны с некруговыми движениями газа в баре.

Мы построили модельные поля скоростей с параметрами ориентации диска и бара NGC 972 для различных моментов времени T , соответствующих постепенному нарастанию контраста гравитационного потенциала бара. На рис. 2.6 сплошными кривыми показаны результаты анализа модельного поля скоростей для момента $T=2.2$. С учетом того, что распределение массы в NGC 972, вообще говоря, отлично от принятого в нашей модели, следует отметить хорошее согласие наблюдаемых и расчетных зависимо-

¹Это изображение было любезно предоставлено С. Райдером

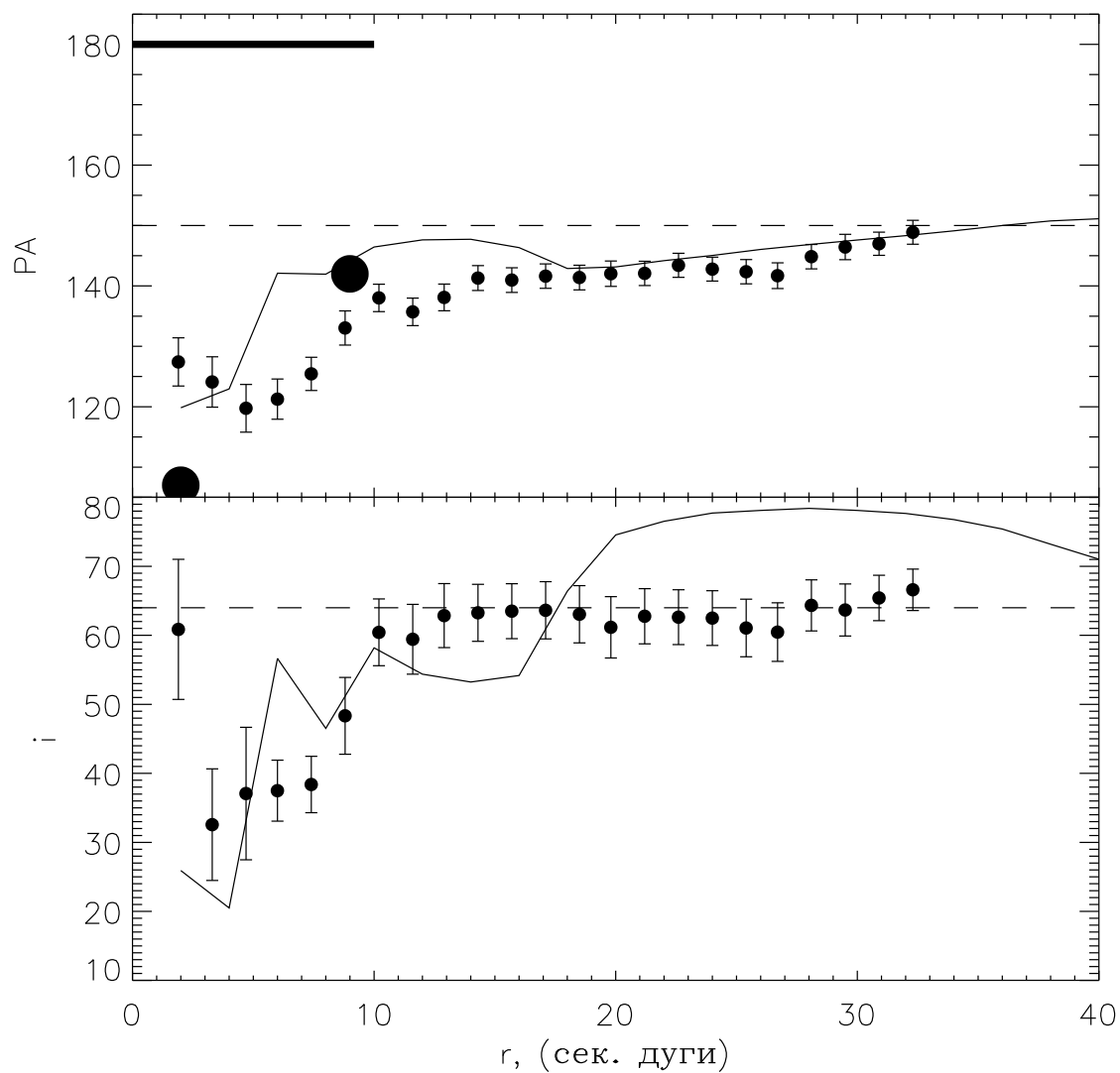


Рис. 2.6: Результаты анализа полей скоростей галактики NGC 972 в линии [NII] (черные точки с указанием ошибок). Двумя большими кружками показаны результаты из работы Засов, Сильченко (1996). Вверху – радиальные изменения PA динамической оси, толстым отрезком показан средний позиционный угол центральных изофот К-изображения NGC 972 (положение бара). Внизу – величины наклона газового диска, определенные из полей скоростей. Сплошными линиями на каждом рисунке показаны модельные зависимости для момента безразмерного времени $T = 2.2$ и угла поворота бара $\phi = 120^\circ$.

стей.

2.3 Динамическое моделирование движений звезд в перемычках

2.3.1 Описание модели

Используемая нами динамическая модель галактики подробно описана в статье Хоперскова и др. (2002б), в основном посвященной проблемам возникновения, эволюции и устойчивости баров. Поскольку эти вопросы выходят за рамки настоящей диссертации, то ниже мы лишь кратко коснемся деталей моделирования, сосредоточив основное внимание на изучении распределения дисперсии скоростей звезд.

В процессе моделирования численно решалась задача эволюции системы из N гравитирующих точек, двигающихся во внешнем гравитационном потенциале сферической составляющей. В начальный момент времени точки были распределены в пространстве таким образом, что образовывали трехмерный диск с экспоненциальным распределением поверхностной плотности, характеризующейся радиальной шкалой L . Сферический компонент состоял из гало с фиксированным распределением объемной плотности $\rho_h(r) = \rho_{h0}/(1 + (r/a))$ и балджа Кинга с $\rho_b = \rho_{b0}/[1 + (r/b)^2]^{3/2}$. Здесь ρ_{h0} , ρ_{b0} , a и b – центральные плотности и радиальные шкалы для гало и балджа соответственно.

Начальная функция распределения по скоростям является шварцшильдовской, которая представляет собой анизотропное максвелловское распределение:

$$f(V_r, V_\phi, V_Z) = A \exp \left\{ -V_r^2 / 2 c_r^2 - (V_\phi - r\Omega)^2 / 2 c_\phi^2 - V_Z^2 / 2 c_z^2 \right\},$$

где $\{V_r, V_\phi, V_Z\}$ – компоненты скорости в цилиндрической системе координат, а c_r, c_ϕ, c_z – дисперсия скоростей по радиальной, азимутальной и вертикальной координатам соответственно.

Число точек в экспериментах составляло $N = 80\,000 - 200\,000$. Бар возник сам в процессе динамической эволюции звездного диска, неустойчивого к возникновению бар-моды. Структура бара, его размеры, отношение полуосей, а также кинематические характеристики в центральной области диска зависят не только от вида кривой вращения, но и от законов распределения вещества в дисковой и сфероидальных подсистемах, которые

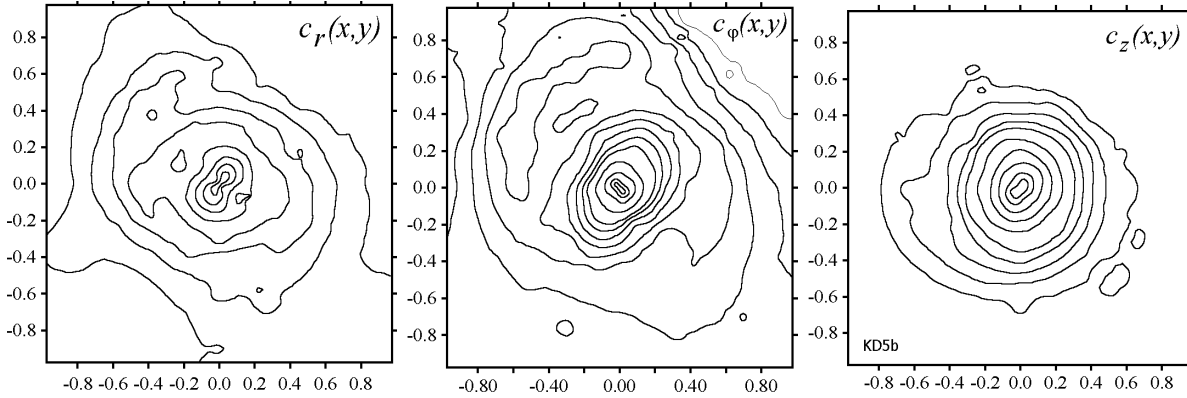


Рис. 2.7: Распределения в плоскости диска дисперсии радиальных (слева), азимутальных (в центре) и вертикальных (справа) компонент скорости при наличии бара в распределении поверхностной плотности. Здесь и далее единица пространственного масштаба равна $4L$.

менялись в различных экспериментах. Поэтому понять структуру конкретной галактики в рамках общих моделей достаточно трудно — требуется строить модели для каждого реального объекта.

2.3.2 Распределение дисперсии скоростей

Формирование бара в результате развития гравитационной неустойчивости сопровождается разогревом диска — в результате дисперсия скоростей частиц увеличивается. Квазистационарная картина устанавливается только через $\simeq 2$ оборота по внешнему краю диска. За это время бар успевает сделать приблизительно 2.5 оборота.

На рис. 2.7 изображены изолинии трех компонент дисперсии скоростей вещества в диске c_r, c_ϕ, c_z . Каждая компонента дисперсии скоростей имеет свое характерное распределение, которое является типичным для бар-моды независимо от условий эксперимента. Отметим, что в отличие от поверхностной плотности, распределение дисперсии радиальных скоростей сохраняет два спиральных рукава. В то же время размеры "бара" по распределению c_r примерно в 2 раза меньше, чем по поверхностной плотности. Пространственное распределение дисперсии азимутальной скорости c_ϕ заметно отличается от $c_r(x, y)$, для которой характерно перпендикулярное образование в центре. Только дисперсия вертикальной скорости практически не обнаруживает отличия от симметрии, за исключением самого центра.

Дисперсия скоростей вдоль луча зрения зависит от ориентации диска и

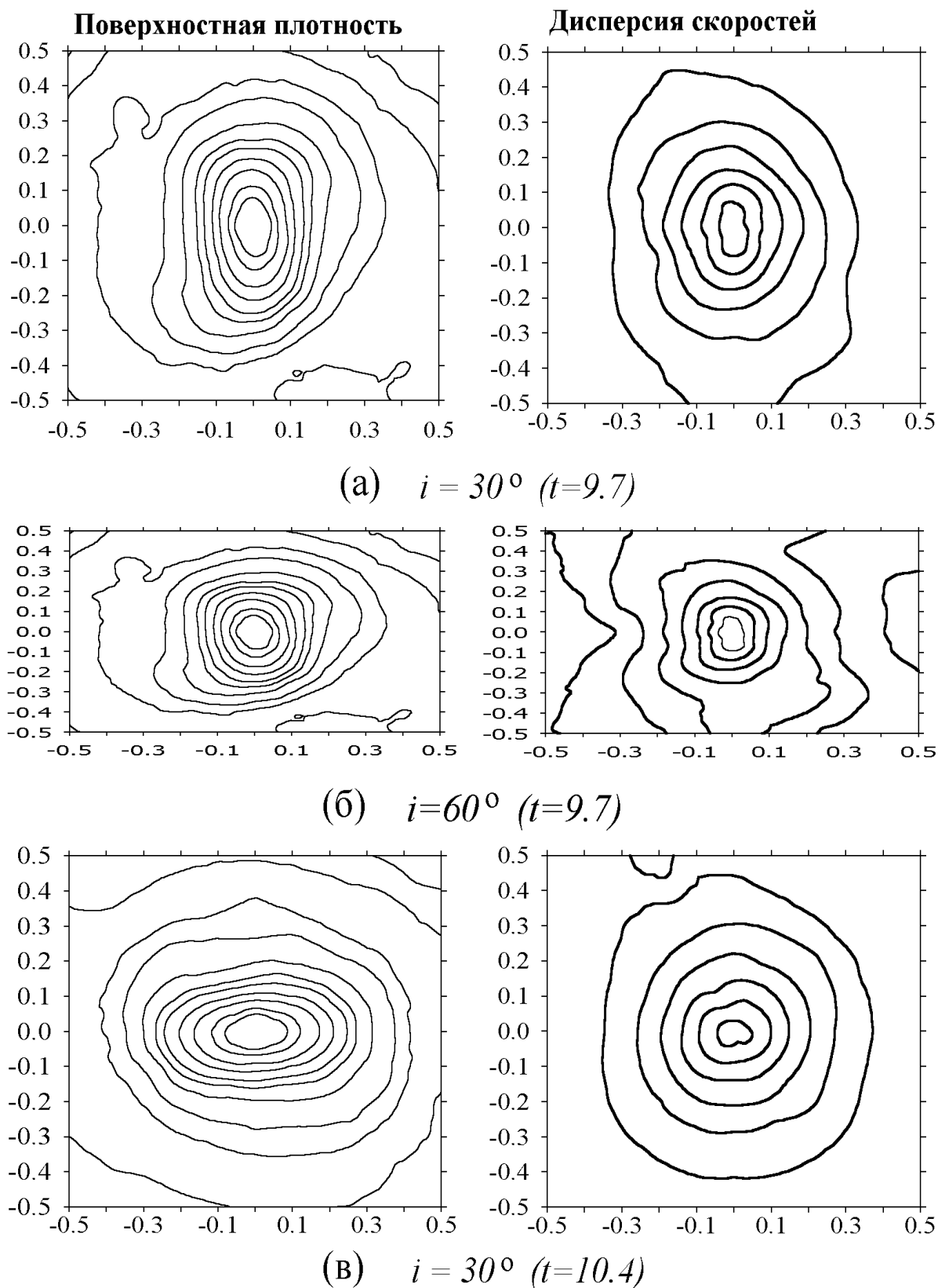
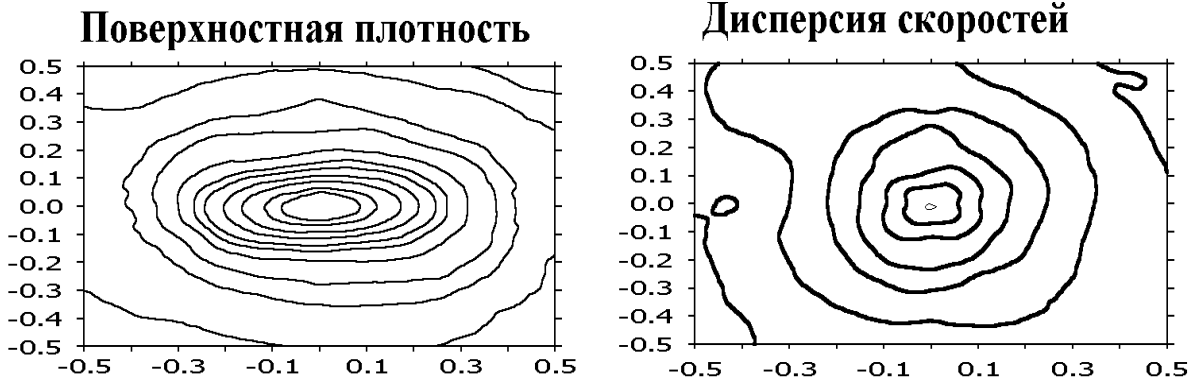
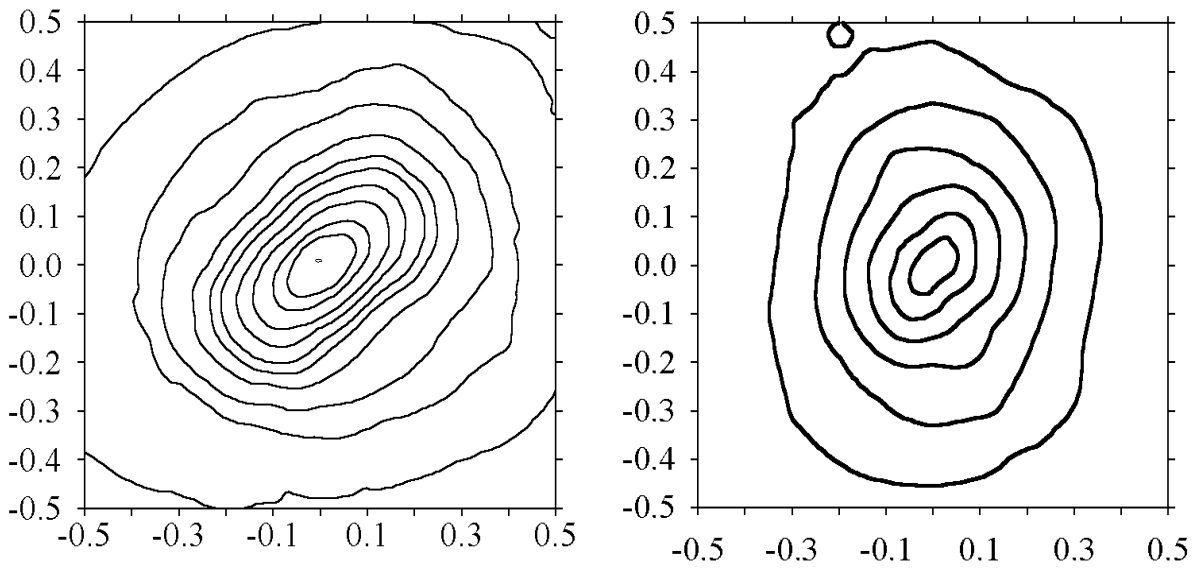


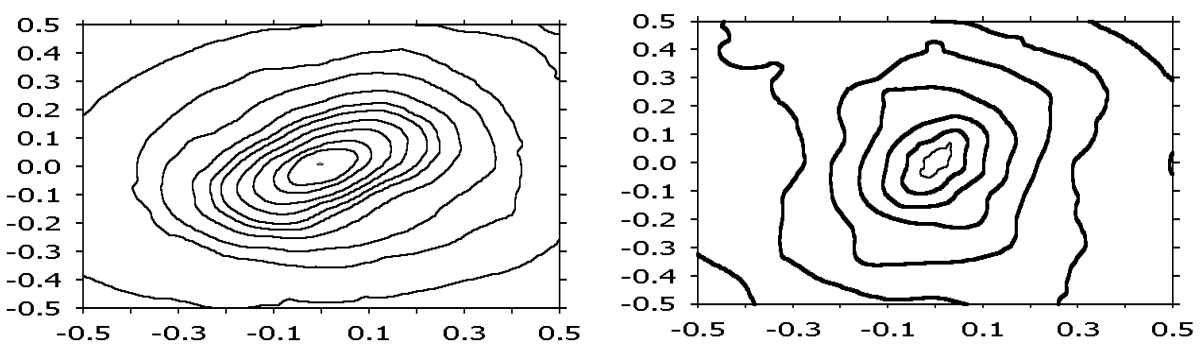
Рис. 2.8: Распределение дисперсии скоростей вещества диска вдоль луча зрения при различных углах наклона диска i к лучу зрения: (а), (б) — большая ось и бар перпендикулярны; (в), (г) — большая ось и бар параллельны; (д), (е) — между большой осью и баром угол 45° . В скобках указано время от начала эксперимента.



(Г) $i = 60^\circ$ ($t=10.4$)



(Д) $i = 30^\circ$ ($t=10.7$)



(е) $i=60^\circ$ ($t=10.7$)

Рис. 2.8: (продолжение)

бара в соответствии с формулой:

$$\sigma_* = \sqrt{c_z^2 \cos^2 i + c_\varphi^2 \sin^2 i \cos^2 \varphi + c_r^2 \sin^2 i \sin^2 \varphi}, \quad (2.4)$$

где φ – по-прежнему азимутальный угол в плоскости диска, отсчитываемый от линии узлов.

На рис. 2.8 показаны распределения дисперсии скоростей вдоль луча зрения для различных углов наклона диска ($i = 30^\circ, 60^\circ$) и ориентациях линии узлов и бара. Если большие оси бара и галактики совпадают (см. рис. 2.8 в, г), то поле дисперсии не обнаруживает бар-образования. При других ориентациях бара и большой оси галактики заметны вытянутые образования на поле c_{obs} . "Бар-структура" дисперсии скоростей во всех случаях имеет меньшие размеры по сравнению баром поверхностной плотности. При прочих равных условиях бар в дисперсии скоростей более заметен при больших углах наклона i , что связано с уменьшением вклада дисперсии вертикальной скорости c_z в σ_* .

Но в любом случае оказывается, что для различных углов ориентации диска бара дисперсия лучевых скоростей звезд внутри перемычки распределена симметрично относительно большой оси бара, а не относительно большой оси (линии узлов) диска, как это было бы в случае отсутствия перемычки. Этот эффект, хотя и не столь явно выраженный в виде можно проследить и на модельных картах распределения дисперсии скоростей звезд вдоль луча зрения, построенных в работах Миллера, Смита (1979) и Вутерин, Дежонг (1997), так же посвященных численному моделированию звездных баров.

2.3.3 Двойные бары

При определенных условиях в процессе динамического моделирования в распределении поверхностной плотности формируются структуры, которые можно интерпретировать как "двойные бары". Второй бар может быть расположен под произвольным углом к основному. Однако время жизни таких структур невелико (1-2 оборота). Они формируются на заключительных стадиях развития гравитационной неустойчивости, как правило, при достаточно массивных сфероидальных компонентах. Примеры распределения плотности во вложенных барах приведены на рис. 2.9

Таким образом, в нашем моделировании не удалось получить долгоживущую систему из двух баров. Подробное обсуждение этого результата и

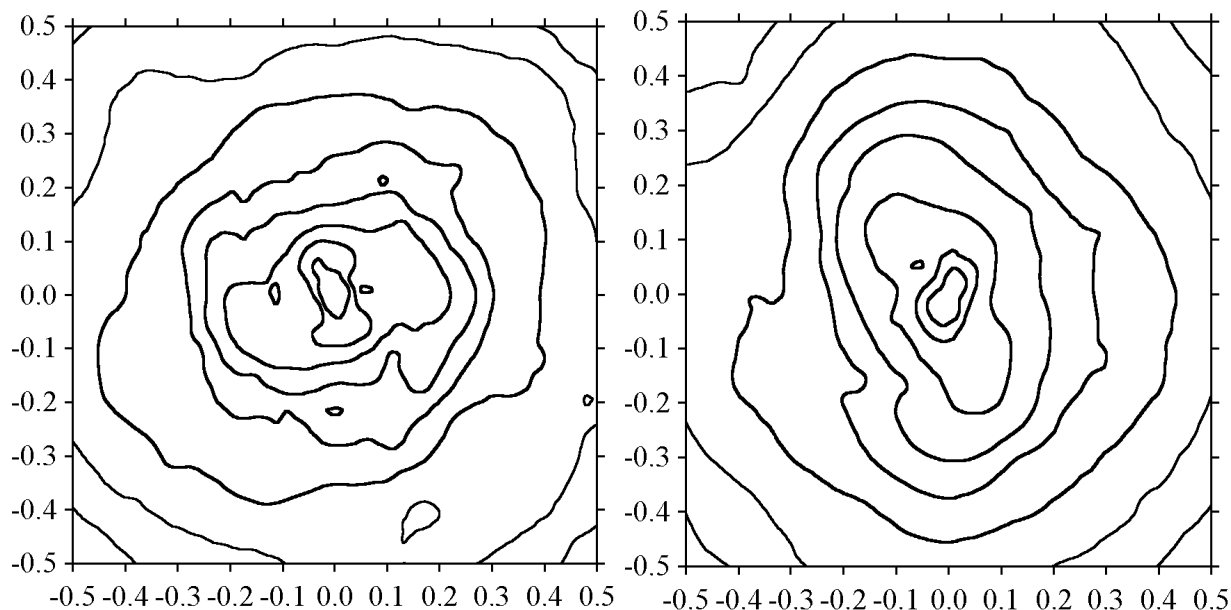


Рис. 2.9: Центральная часть диска ($r < 2L$) некоторых динамических моделей, в которых появлялись транзистные вторые бары. Показаны изолинии поверхностной плотности.

сравнение его с другими работами по моделированию вторых баров будет сделано в разделе 4.5.

Основные выводы главы 2.

1. На основе анализа результатов нелинейного численного моделирования течений газа в баре показано, что для углов наклона $i > 60^\circ$ использование формальной модели движений по круговым орбитам при анализе поля скоростей может привести к неверному выводу о присутствии наклонного (полярного) диска в центре галактики. Однако сравнение взаимных ориентаций фотометрической и динамической осей позволяет отличить бар от наклонного диска.
2. На основе результатов динамического моделирования методом N-тел, построены карты распределения дисперсии скоростей вдоль луча зрения для различных взаимных ориентации диска и бара. В большинстве случаев на картах дисперсии лучевых скоростей четко выделяются вытянутые образования, симметричные относительно большей оси бара в распределении поверхностной плотности.

Глава 3

Наблюдение галактик с перемычками

"..Clearly, the most promising method in detecting the nuclear bar is 2D spectroscopy.. "

(I. Shlosman)

Эта глава посвящена наблюдательному изучению галактик с двойными барами (объекты типа "бар-в-баре"). Современные представления о подобных объектах, основанные на фотометрических данных и результатах моделирования суммируются в разделе 3.1. В разделе 3.2 приводятся аргументы в пользу применения панорамной спектроскопии при изучении кандидатов в двойные бары. Журнал наблюдений на 6-м и 2.1-м телескопах и описание процедур обработки данных представлены в разделах 3.3. и 3.4 соответственно. В разделе 3.5 детально описываются морфологические и кинематические особенности всех наблюдавшихся объектов. Наибольшее внимание уделяется интерпретации наблюдаемых некруговых движений газа и звезд в околядерных (килопарсековых) областях.

3.1 Введение: история вопроса

Четверть века назад де Вокулер (1975) на оптических изображениях галактики NGC 1291 обнаружил вытянутую структуру, расположенную внутри основной крупномасштабной перемычки (бара). Эту же галактику исследовали Джевис и др.(1988), которые привели еще один пример галактики с двойным баром – NGC 1543. Первое систематическое наблюдательное изучение подобных объектов, получивших название галактики с двойными барами (double-bagged) было предпринято в работе Бута и КROKE (1993), опубликовавших список из 13 галактик с произвольной ориентацией внутрен-

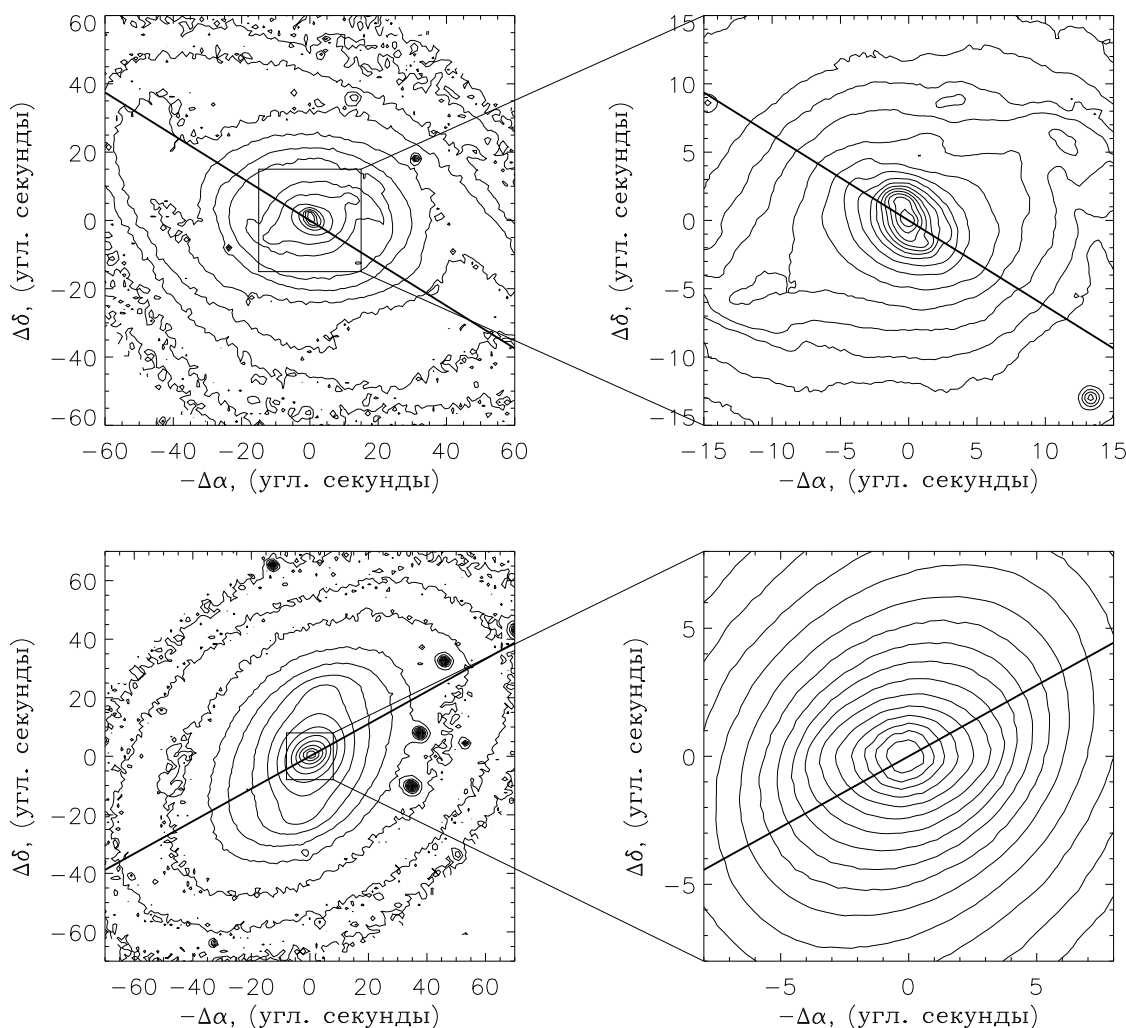


Рис. 3.1: Изображения галактик NGC 2273 (вверху) и NGC 2950 (внизу), полученные на 6-м телескопе в фильтре R. Справа показаны увеличенные центральные области, выделенные квадратом на левых рисунках. Хорошо заметен поворот внутренних изофот относительно внешних перемычек. Жирными линиями показана ориентация линии узлов диска.

него (второго) бара относительно внешнего (первого). Возняк и др. (1995) предложили метод поиска и классификации двойных баров, основанный на изофотном анализе изображений галактик. По повороту позиционного угла (PA) и изменению эллиптичности внутренних изофот галактики разделялись на объекты с одним баром, двумя барами и содержащие бар с трехосным балджем. Последний термин применялся к галактикам демонстрирующим плавное изменение PA , в отличие от "чистого" бара, где $PA \approx const$. В последующих работах для выделения внутренних баров применялись и другие методы анализа изображений, такие как "нечеткие маски" (вычитание сглаженного изображения из оригинального) и карты показателей цвета (Макуез и др. 1999; Эрвин, Спарк, 2002).

Таблица 3.1: Кандидаты в галактики с двойными барами

Имя	Тип	a_1''	a_2''	PA_1	PA_2	PA_d	ядро	ссылки
IC 184	SBa	9	4	170	30	177	Sy2	(14)
IC 454	SBab	18	3	128	133	140		(14)
ESO 215-31	SBb	47	10	147	153	130		(9)
ESO 320-30	SABa	37	5	142	107	121		(9)
ESO 323-77	SB0	17	8	56	156	155	Sy1.2	(9)
ESO 443-17	SB0/a	15	6	12	31	23		(9)
ESO 437-67	SBab	32	3	119	138	103		(12)
ESO 508-78	SBa					68		(6)
Mrk 573	SAB0	20	5	0	100	90	Sy2	(1), (2), (13), (18)
Mrk 1066	SB0	16	3	142	113	125	Sy2	(2), (13)
NGC 151	SBbc	18	5	155	80	75		(14)
NGC 470 ²	SAb	32	8	14	150	157		(8), (20)
NGC 613	SBbc	59	5	127	122	111	Sy	(7), (12)
NGC 718	SABa					45		(27)
NGC 1068	SAb	14	2	40	160	70	Sy1.5	(13)
NGC 1079	SABa	32	17	122	96	87		(12)
NGC 1097	SBb	80	10	147	30	130	Sy1	(8), (19), (20), (22)
NGC 1241	SBb	30	2	90	40	145	Sy2	(13)
NGC 1291	SB0/a	116	21	170	18	80		(10), (11)
NGC 1317	SAB0/a	60	11	150	58	78		(8), (16), (21)
NGC 1326	SB0/a	50	10	17	77	77	LINER	(6), (8)
NGC 1353	SAbc	14	4	184	131	138	LINER	(12)
NGC 1365 ²	SBb	150	8	80	46	40	Sy1.8	(7), (12), (13)
NGC 1398	SBab	36	14	12	83	100	Sy	(12)
NGC 1433	SBab	100	5	94	32	201	Sy2	(4), (7), (8), (12)
NGC 1512	SBab	150	6	45	74	90		(12)
NGC 1530	SBb	92	1	110	95	81		(13)
NGC 1543	SB0		15	98	28	160		(6), (11)
NGC 1667	SABc	14	5	40	10	20	Sy2	(13)
NGC 1808	SABb		3		158	133	Sy2	(12)
NGC 2217	SB0/a	37	8	112	138	34		(7), (12)
NGC 2273	SBa	24	8	108	37	58	Sy2	(3), (16), (27)
NGC 2339	SABbc	25	1	70	65	175		(13)
NGC 2639	SAa	8	2	137	117	140	Sy1.9	(14)
NGC 2681 ¹	SAB0/a	29	5	80	5	120	LINER	(8), (20), (26), (27)
NGC 2712	SBb	20	5	25	5	178		(14)
NGC 2811	SBa	20	5	30	20	20		(14)
NGC 2859	SB0	46	12	161	62	85		(8), (25), (27)
NGC 2880 ²	SB0					140		(25), (27)
NGC 2935	SABb	25	11	134	153	0.1		(12)
NGC 2950	SB0	38	6	152	92	119		(8), (20), (27)
NGC 2962	SAB)					3		(27)
NGC 3081	SAB0/a	37	10	65	113	123	Sy2	(1), (5), (8), (13), (16), (20)
NGC 3185 ²	SBa	30	2	113	134	145	Sy2	(2), (25), (27)
NGC 3275	SBa	34	5	124	163	122		(16)
NGC 3358	SABab					141		(6)

(продолжение следует)

(продолжение таб. 3.1)								
Имя	Тип	a_1''	a_2''	PA_1	PA_2	PA_d	ядро	ссылки
NGC 3368 ¹	SABab	24	4	156	130	135	LINER	(12), (13)
NGC 3393	SBab	13	2	159	145	47	Sy2	(1), (9), (12)
NGC 3412 ²	SB0					155		(25), (27)
NGC 3516	SB0	22	6	170	55	53	Sy1	(13), (15)
NGC 3786	SABa	25	7	58	75	67	Sy1.8	(2)
NGC 3941	SB0					10	Sy2	(25), (27)
NGC 3945 ¹	SB0	42	20	73	158	157	LINER	(8), (23), (26), (27)
NGC 4253	SBa	11	2	105	5	71	Sy1.5	(14)
NGC 4262	SB0	14	10	20	160	150		(23)
NGC 4274	SBab	39	10	27	100	102		(23)
NGC 4314	SBa	75	6	143	131	121	LINER	(20), (23), (25), (27)
NGC 4303	SABbc	47	2	10	60	162	Sy2	(13)
NGC 4321	SABbc	66	10	105	112	30		(23), (17)
NGC 4340	SB0	52	5	32	35	102		(8), (20)
NGC 4371 ¹	SB0	43	24	158	91	95		(8), (23)
NGC 4593 ²	SBb	60	2	60	38	55	Sy1	(8), (23)
NGC 4594	SAa	68	10			89	LINER	(24)
NGC 4643 ²	SB0/a	51	17	51	132	130	LINER	(23), (25), (27)
NGC 4725	SABab	134	5	50	125	30	Sy2	(13)
NGC 4736	SAab	26	10			31	LINER	(22)
NGC 4750	SAab	14	3	100	60	154	LINER	(13)
NGC 4754	SB0	21	7	159	19	23		(23)
NGC 4785	SABab	10	5	65	82	81	Sy2	(14)
NGC 4984	SAB0	30	4	95	64	15		(12)
NGC 5033 ¹	SAc	30	4	0	70	170	Sy1.9	(13)
NGC 5101	SB0/a	50	2	121	46	167	LINER	(12)
NGC 5365	SB0	33	18	115	20	4		(16)
NGC 5383	SB	58	4	130	100	85		(13)
NGC 5566	SBab	24	6	156	37	30	LINER	(12)
NGC 5728	SABa	44	4	30	90	0.1	Sy2	(6), (8), (14), (22)
NGC 5850	SBb	84	9	112	46	155		(6), (8), (20)
NGC 5905	SBb	37	6	20	133	130		(8), (20)
NGC 6221 ²	SBbc	29	6	116	5	5	Sy2	(9), (13)
NGC 6300	SBb	44	4	101	77	108	Sy2	(13), (16)
NGC 6654	SB0/a					0.1		(27)
NGC 6782	SB0/a	26	3	178	150	45		(6), (8), (12), (20)
NGC 6860	SBab	10	4	10	90	34	Sy1	(14)
NGC 6951 ²	SABbc	44	5	85	158	140	Sy2	(8), (16), (20)
NGC 7007	SA0	9	4	178	127	2		(16)
NGC 7098	SABa	57	14	50	71	74		(6), (8), (20)
NGC 7187 ¹	SAB0	28	9	66	134	69		(8)
NGC 7280	SAB0					78		(27)
NGC 7479 ²	SBc	46		6		25	LINER	(7), (20)
NGC 7702 ²	SA0		10		100	117		(8)
NGC 7716	SABb	23	3	15	60	35		(13)
NGC 7742	SAb	7	1	140	145	171	LINER	(13)
NGC 7743 ²	SB0	57	10	94		90	Sy2	(8)

(продолжение следует)

(продолжение таб. 3.1)								
Имя	Тип	a_1''	a_2''	PA_1	PA_2	PA_d	ядро	ссылки
UGC 1395	SAb	16	7	145	139	153	Sy1.9	(14)
Обозначения ссылок на литературу:								
(1) – Алонсо-Херреро и др. (1998)				(15) – Моисеев и др. (2000)				
(2) – Афанасьев и др. (1998а)				(16) – Мульчи и др. (1997)				
(3) – Афанасьев и др. (1998б)				(17) – Писе (1986)				
(4) – Бута (1986б)				(18) – Погге, де Робертис (1995)				
(5) – Бута (1990)				(19) – Фобес и др. (1992)				
(6) – Бута, Кроке (1993)				(20) – Фридли и др. (1996)				
(7) – Бэмгат, Петерсон (1986)				(21) – Швейзе (1980)				
(8) – Возняк и др. (1995)				(22) – Шоу и др. (1993)				
(9) – Гресад и др. (2000)				(23) – Шоу и др. (1995)				
(10) – де Вокулер (1975)				(24) – Эмселлем, Феррюи (2000)				
(11) – Джевис и др. (1988)				(25) – Эрвин, Спарк (1998)				
(12) – Джунгвет и др. (1997)				(26) – Эрвин, Спарк (1999)				
(13) – Лайне и др. (2002)				(27) – Эрвин, Спарк (2002)				
(14) – Макуез и др. (1999)								
¹ объекты с возможными тремя барами								
² наиболее спорные кандидаты (бар + трехосный балдж)								

Все эти методы позволили обнаружить "вторые бары" как на оптических изображениях бар-галактик (Возняк и др., 1995; Эрвин, Спарк, 2000), так и на изображениях в ближнем инфракрасном диапазоне, где меньше влияние пылевого поглощения (Фридли и др., 1996; Джунгвет и др. 1997; Макуез и др. 1999; Лайне и др., 2001). В качестве примера на рис. 3.1 показаны изображения двух галактик с возможным внутренним баром, полученные автором на 6-м телескопе с редуктором светосилы SCORPIO.

В таблице 3.1 приводится перечень всех подобных объектов, найденных автором в литературе и представляющий из себя несколько расширенный вариант списка впервые опубликованного в работе Моисеева (2001б). В таблице 3.1 указаны имя галактики, ее морфологический тип, размеры видимых полуосей внешнего (a_1) и внутреннего (a_2) баров в секундах дуги, позиционный угол изофот баров и линии узлов диска (PA_1 , PA_2 и PA_d соответственно), тип активности ядра из базы данных NED и ссылки на литературу, в которой обсуждается фотометрическая структура объекта. Позиционный угол большой оси PA_d в основном брался из базы данных LEDA, только для некоторых галактик уточненное значение этого параметра было найдено в литературе.

Обращает на себя внимание тот факт, что 34% всех галактик в таблице 3.1 – имеют Сейфертовское активное ядро, а 15% ядер относятся к типу LINER. Однако такое (на порядок) повышенное количество активных

объектов относительно дисковых галактик поля скорее всего обусловлено сильными селекционными эффектами, поскольку внутренней морфологии галактик с активными ядрами многими наблюдателями уделяется повышенное внимание. В то же время, все авторы, которые сравнивали относительное количество двойных баров в выборках Сейфертовских и "нормальных" галактик, указывают на то, что присутствие второго бар не связано с активностью галактического ядра (Мульчи, Реган, 1997; Фридли, 1999; Макуез и др., 2000; Лайне и др., 2002; Эрвин, Спарк, 2002). Влиянием эффектов селекции также объясняется относительно большое число (53%) галактик ранних морфологических типов – S0-Sa, поскольку в таких галактиках второй бар обычно легче выделить по повороту изофот (меньше влияние пыли, спиралей и областей звездообразования по сравнению с галактиками поздних типов). Эрвин, Спарк (2002) утверждают, что не менее чем в 25% S0-Sa галактик с барами также наблюдается и второй бар.

Следует заметить, что далеко не все 94 галактики из приведенного выше списка, демонстрируют четкие повороты изофот, указывающие на возможный внутренний бар. Часто одна и та же галактика в разных работах может классифицироваться и как объект с одним, и как с двумя барами (NGC 1365, NGC 4321 и тд.). Но при этом буквально только в нескольких статьях (Шоу и др., 1993; Шоу и др., 1995; Макуез и др., 1999) авторы демонстрируют осторожный подход к этой проблеме и не стремятся объяснить влиянием второго бара каждое изменение позиционного угла изофот. Так Макуез и др. (1999) специально отмечают, что "...вытянутые структуры, которые мы называем *вторым баром*, могут являться как баром, так и эллиптическим кольцом или диском; разобраться в этом вопросе помогут кинематические данные"

На сегодняшний день существует довольно большое количество работ о двойных барах, но динамическое поведение таких звездных конфигураций не ясно. Так, Шлосман и др. (1989) предположили, что новый внутренний бар может сформироваться в результате неустойчивости газового кольца на внутреннем Линдбладовском резонансе (ILR) внешнего бара. Подробное численное моделирование этого процесса проделано в работе Хеллера и др. (2001), однако речь здесь идет об эволюции эллиптического кольца, а не о звездно-газовом баре. Мачиевски, Спарк (2000) показали принципиальную возможность существования замкнутых орбит, поддерживающих форму обоих баров, вращающихся друг через друга с разной угловой скоростью (Ω_1 и Ω_2 для внешнего и внутреннего баров соответственно).

Фридли, Мартине (1993) приводят аргументы в пользу того, что если

оба бара имеют одинаковую скорость углового вращения ($\Omega_1 = \Omega_2$), то возможны только две устойчивые конфигурации – бары параллельны или перпендикулярны друг к другу. Первый случай сводится к тривиальному изменению радиального хода поверхностной плотности вдоль оси бара. Случай перпендикулярных баров более интересен, однако наблюдательно его подтвердить не так просто, поскольку реально измеряется только позиционный угол между проекциями баров в картинной плоскости и необходимо ввести поправку за наклон плоскости галактики к лучу зрения. Задача нетривиальная, поскольку речь идет о проекции заведомо трехмерных структур. Иногда модель взаимно перпендикулярных баров хорошо описывает наблюдаемое распределение поверхностной яркости (Моисеев, 1998). Однако в большинстве галактик наблюдаемых почти "плашмя" угол между барами значительно отличается от 90° (Бута, КROKE 1993). В работах Фридли, Мартине (1993), Фридли и др. (1996), Джунгвет и др. (1997) делались попытки учесть эффект проекции баров на картинную плоскость и прежде всего проверить гипотезу о взаимно перпендикулярных барах. И все эти авторы приходят к выводу о том, что "нет выделенной характерной величины угла между барами" (цитируется по Фридли, 1999). А это, в свою очередь, должно указывать на различие скоростей вращения обоих баров, обычно считают, что $\Omega_1 < \Omega_2$.

Почти одновременно с работой Шлосман и др. (1989), в которой говорилось только о чисто газовом внутреннем баре, Пфеннигер, Норман используя численное моделирование продемонстрировали образование второго бара в результате развития неустойчивости звездного самогравитирующего диска, при этом $\Omega_1 \neq \Omega_2$. Та численное моделирование звездно-газовых дисков было проведено Фридли и Мартине (1993), которые рассматривали существование второго бара в качестве одного из этапов динамической эволюции галактик с перемичками. Численное моделирование поведения газа в двойных барах представлено также в статьях Мачиевски и др. (2002) и Шлосман, Хеллер (2002). В этих же работах подробно обсуждаются проблемы, возникающие при моделировании подобных структур и интерпретации результатов расчетов.

3.2 Необходимость панорамной спектроскопии

Многочисленные наблюдательные статьи указывают на то, что в случае двойных баров мы, по-видимому, сталкиваемся с какой-то новой структур-

ной особенностью галактик с перемычками. Однако все эти работы основаны только на данных поверхностной фотометрии, когда на изображении галактики внутри основного внешнего бара видна некоторая протяженная структура. Формальное применение результатов изофотного анализа (Возняк и др., 1995) позволило некоторым авторам даже выделять "тройные бары" (Эрвин и Спарк, 1999; Джунгверт и др., 1997; Фридли и др., 1996), без какой-либо аргументации возможного динамического поведения подобных конфигураций. Но наблюдаемые особенности фотометрической структуры могут, вообще говоря, объясняться и менее экзотическим способом, нежели привлечением второго или третьего баров. Вообще говоря, используя только данные поверхностной фотометрии трудно разделить следующие вероятные возможности (Макуез и др. 1999; Моисеев 2001б):

- Динамически независимый внутренний бар ($\Omega_1 \neq \Omega_2$)
- x_2 -орбиты (перпендикулярные основному бару) в области двух внутренних резонансов ILR внешнего бара. В отличие от предыдущего случая эта структура не является динамически независимой (т.е. $\Omega_1 \neq \Omega_2$). Шоу и др. (1993) использовали этот механизм для объяснения поворотов изофот во внутренних областях галактик с перемычками, которые другие авторы классифицировали как "галактики с двойными барами".
- Эллиптическое кольцо в плоскости диска на резонансе ILR внешнего бара.
- Полярный диск (кольцо) внутри бара. Подобные образования обнаружены в некоторых галактиках, таких как NGC 2841 (Сильченко и др., 1997; Афанасьев и Сильченко, 1999), NGC 4548 (Сильченко, 2002), и др.
- Проекция центральной части сплюснутого балджа внутри внешнего бара на картинную плоскость. При этом может создаваться иллюзия "второго бара" большая ось которого практически совпадает с направлением линии узлов диска.
- Сложное распределение пыли и областей звездообразования внутри внешнего бара затрудняет изучение околядерной области и может соответствующим образом исказить форму околядерных изофот.

О неоднозначности фотометрической интерпретации двойных баров говорит, к примеру тот факт, что Реган, Мульчи (1999), используя карты распределения цветов полученные на HST (в том числе и в ближнем ИК) интерпретируют структуры наблюдаемые в ряде галактик (Mkn 573, Mkn 1066, NGC 1667, NGC 3516) как околядерные спирали, а не как вторые бары.

Для проверки противоречивых теоретических предсказаний и понимания природы внутренних баров необходим дополнительный наблюдательный материал. Прежде всего это кинематические данные, т.е. измерения лучевых скоростей и дисперсии скоростей газа и звезд. Так, Кнапен и др. (2000a) анализировали поля скоростей ионизованного и молекулярного газа в NGC 4321 и пришли к выводу, что вопреки фотометрическим данным в этой галактике существует только один бар. Попытка систематического изучения кинематики вторых баров была предпринята Эмселлемом и др. (2001a). Эти авторы сделали вывод о динамической выделенности внутренних баров в трех объектах только лишь на основании существования околядерного пика лучевой скорости на разрезах, полученных с "длинной щелью". Однако подобные особенности могут объясняться и более естественными причинами, такими как сильная концентрация массы в балдже или некруговые движения во внешнем баре, без привлечения гипотезы второго бара.

Представляется, что поскольку движение вещества в области баров заметно отличается от кругового (раздел 2.1), то значительно больше информации (по сравнению с классической спектроскопией) можно получить с помощью методов панорамной спектроскопии, которые позволяют сразу строить двухмерные распределения лучевых скоростей и их дисперсии в картинной плоскости. Поэтому в 2000-2002 гг. нами была проведена серия наблюдательных программ по изучению структуры и кинематики галактик с двойными барами с целью ответа на вопрос: "Являются ли вторые бары динамически выделенными системами?" Поставленная проблема сложна и неоднозначна, хотя бы потому, что пока еще ни в одной из теоретических работ не было ясно сказано, а как, собственно, должно выглядеть наблюдаемое поле скоростей внутри второго бара. Тем более важно собрать статистически значимое количество подобного наблюдательного материала, хотя бы с целью поиска общих динамических и кинематических особенностей таких галактик.

Основной целью панорамной спектроскопии на 6-м телескопе являлось построение полей лучевых скоростей звезд и ионизованного газа и двухмерных карт дисперсии скоростей звезд. Анализ этого материала позволяет

прежде всего выявить следующие проявления баров:

- поворот динамической оси в полях скоростей (глава 2);
- различие лучевых скоростей ионизованного газа, измеряемых по балмеровским (H_α , H_β) и запрещенным ([OIII], [NII]) линиям, связанное с присутствием ударных фронтов на кромках баров (Афанасьев, Шаповалова, 1996);
- отличие распределения дисперсии скоростей звезд от осесимметричного (см. раздел 2.3).

В дополнение к изучению кинематики было запланировано получение изображений исследуемых галактик в оптическом и ближнем ИК-диапазоне, в котором меньше искажения изофот, обусловленные пылевым поглощением и областями звездообразования. Кроме того, основной вклад в излучение в этом спектральном диапазоне вносят старые маломассивные звезды, ответственные за распределение гравитационного потенциала видимой материи в галактике.

В своей недавно вышедшей работе, посвященной численному моделированию галактик, Шлосман, Хеллер (2002) также отметили необходимость использования панорамной спектроскопии для изучения галактик с двойными барами. Но к этому времени наши наблюдения таких галактик на 6-м телескопе уже завершились. Независимо от нас и практически одновременно, подобная программа изучения двойных баров в галактиках была начата Эмселлемом и др. с помощью панорамного спектрографа OASIS на 3.6-м телескопе. Однако осмысленных результатов этой программы пока не появилось, за исключением полей скоростей 2-3 галактик, показанных на нескольких конференциях (Эмселлем, Фридли, 2000; Эмселлем и др., 2001б; Эмселлем, 2002).

3.3 Наблюдения и обработка

Из списка кандидатов в галактики с двойными барами из работы Моисеева (2001б) была составлена подвыборка объектов, прежде всего, на основании удобства их наблюдения на БТА: $\delta > 0^\circ$, а угловой диаметр второго бара близок к размеру поля зрения спектрографа MPFS. Необходимый наблюдательный материал был получен для 13 галактик, что составляет около трети от общего числа таких объектов на северной полусфере. При этом

в выборку вошли несколько объектов, уже ставших "классическими примерами" галактик с вложенными барами, таких как NGC 2681, NGC 2950, NGC 3945 и NGC 5850.

3.3.1 Панорамная спектроскопия с MPFS

Околоядерные области всех галактик наблюдались методом панорамной спектроскопии на 6-м телескопе с помощью мультиспектрального волоконного спектрографа MPFS (раздел 1.4). Угловой размер одного элемента изображения – $1''$, поэтому поле зрения спектрографа составляло $16 \times 15''$. Для трех галактик наблюдения проводились при двух смещенных положениях центра поля зрения спектрографа, каждое из которых включало ядро галактики. Для этих объектов кубы данных (после предварительной обработки) совмещались, так что результирующее поле зрения составило $16 \times 18''$ для NGC 2273, $18 \times 18''$ для NGC 3368 и $23 \times 23''$ для NGC 3951 (в наблюдениях 2000 г.). Одновременно со спектрами галактики регистрировался спектр ночного неба с площадки, удаленной на $4.5'$ от центра поля зрения. В качестве приемника использовалась ПЗС ТК1024 размером 1024×1024 пикселей. Обратная дисперсия спектрографа была $1.35 \text{ \AA}/\text{пиксель}$, спектральное разрешение – около 4.5 \AA . Журнал наблюдений приводится в таблице 3.2, где указано имя галактики, дата наблюдений, суммарная экспозиция T_{exp} , спектральный диапазон $\lambda\lambda$ и среднее качество изображений во время экспозиции.

Обработка наблюдений проводилась пакетом программ MPFS.LIB, разработанным В.Л. Афанасьевым, работающим в среде IDL. Первичная редукция включала в себя вычитание тока смещения, учет плоского поля, удаление следов космических частиц, выделение из ПЗС-изображений индивидуальных спектров, приведение их к шкале длин волн с использованием спектра калибровочной лампы, вычитание спектра ночного неба. Для перевода потоков в абсолютную энергетическую шкалу использовались спектры звезд – спектрофотометрических стандартов, наблюдавшихся в те же ночи.

Обработанные спектры представляют собой "кубы данных в которых каждому пространственному элементу соответствовал спектр из 1024 каналов. В галактиках с достаточно яркими эмиссионными линиями ионизованного газа мы использовали гаусс-аппроксимацию контуров спектральных линий для построения двухмерных карт распределения интенсивностей и скоростей (поля скоростей) в линиях H_{β} , [OIII] $\lambda 4959, 5007 \text{ \AA}$ или

Таблица 3.2: Журнал наблюдений с MPFS

Имя		дата наблюдений	T_{exp} , сек	$\lambda\lambda$, Å	Seeing, "
NGC	470	01/09/2000	4×1200	4820 – 6190	2.8
NGC	2273	01/12/2000	6×1200	4770 – 6140	2.5
NGC	2681	30/03/2000	4×1200	4840 – 6210	2.0
		09/03/2002	3×900	5800 – 7170	1.7
NGC	2950	27/03/2000	3×1200	4840 – 6210	2.0
NGC	3368	27/03/2000	7×1200	4840 – 6210	2.5
NGC	3786	27/03/2000	4×1200	4840 – 6210	2.5
NGC	3945	01/12/2000	6×1200	4770 – 6140	2.5
		13/05/2002	2×1200	4700 – 6070	1.5
		13/05/2002	3×1200	5900 – 7270	1.5
NGC	4736	11/05/2000	3×1200	4840 – 6210	1.8
NGC	5566	10/05/2000	3×1200	4840 – 6210	2.3
NGC	5850	13/08/2001	3×1200	5710 – 7080	2.7
		13/05/2002	3×1200	4700 – 6070	1.2
NGC	5905	30/03/2000	8×1200	4840 – 6210	2.0
NGC	6951	03/09/2000	5×1200	4840 – 6210	2.2
NGC	7743	02/09/2000	3×1200	4840 – 6210	2.0

[NII] λ 6548, 6583 Å. В случае дублетов использовалась модель из двух гауссиан. Точность абсолютного определения лучевых скоростей, после коррекции по линиям неба, составила около 10 км/с. При построении изображений в континууме мы определяли суммарный поток в спектральном диапазоне, свободном от эмиссионных линий (5600 – 5800 Å для "зеленых" и 6350 – 6450 Å для "красных" спектров).

Построение карт лучевых скоростей и дисперсии скоростей звездного компонента проводилось согласно методике, подробно описанной в разделе 1.4.

3.3.2 Кинематика ионизованного газа с ИФП

Шесть галактик с яркими эмиссионными линиями наблюдались на 6-м телескопе с помощью сканирующего интерферометра Фабри-Перо (см. разделы 1.2-1.3). Использовался интерферометр FP235 работающий в 235 порядке интерференции на длине волны линии H_{α} . При этом расстояние между соседними порядками интерференции $\Delta\lambda = 28$ Å соответствовало свободной от перекрытия порядков области ~ 1270 км/с. Предварительная монохроматизация осуществлялась с помощью узких фильтров шириной $FWHM = 12 - 18$ Å, центрированных на избранный спектральный диа-

пазон, включавший эмиссионные линии галактики (H_α или $[NII]\lambda 6583 \text{ \AA}$). В течение экспозиции мы последовательно получали 32 интерферограммы объекта при различных расстояниях между пластинами ИФП, так что размер спектрального канала $\delta\lambda \approx 0.9 \text{ \AA}$ ($\sim 40 \text{ км/с}$). Спектральное разрешение составляло около 2.5 \AA ($\sim 110 \text{ км/с}$). В качестве приемника использовалась ПЗС-матрица ТК1024 размером 1024×1024 пикселей. Наблюдения проводились с аппаратным биннингом 2×2 пикселя с целью уменьшения времени считывания, так что в каждом спектральном канале получались изображения размером 512×512 пикселей.

Зимой 2000 г. интерферометр устанавливался в параллельный пучок внутри редуктора светосилы (Додонов и др., 1995). В этом варианте результирующая светосила в прямом фокусе 6-м телескопа составляла $F/2.4$. Поле зрения составляло $5'.8$ при масштабе $0''.68/\text{пиксель}$. С осени 2000 г. наблюдения проводились с помощью нового редуктора светосилы SCORPIO, подробно описанного в разделе 1.2. Здесь поле зрения составляло $4'.7$ при масштабе $0''.56/\text{пиксель}$. Журнал наблюдений с ИФП приводится в таблице 3.3.

Обработка интерферометрических наблюдений проводилась с помощью матобеспечения, разработанного автором и описанного в разделе 1.3. Оптимальная фильтрация кубов данных (гауссовское сглаживание по спектральной координате с $FWHM = 1.5$ канала и пространственное сглаживание в каждом канале двумерной гауссианой с $FWHM = 2 - 3$ пикселя, в зависимости от качества изображений) проводилась с помощью программного пакета АДНОС. Для построения полей скоростей и монохроматических изображений использовалась гаусс-аппроксимация профилей эмиссионных линий. Кроме того, были построены изображения галактик в континнуме вблизи эмиссионных линий.

3.3.3 ИК-фотометрия на 2.1-м телескопе

Поверхностная фотометрия в ближнем инфракрасном диапазоне проводилась на 2.1-м телескопе OAN (Мексика) с помощью прибора CAMILA (Круз-Гонзалес и др., 1994). Формат приемника 256×256 пикселей. Наблюдения в фильтрах JH и K' проводились в двух режимах с различной светосилой. В режиме со светосилой $F/13.5$ поле зрения было $1'.3$ при масштабе $0''.30/\text{пиксель}$. А при светосиле $F/4.5$ поле зрения было $3'.6$ при масштабе $0''.85/\text{пиксель}$. Журнал наблюдений приведен в таблице 3.4. Наблюдатели – Х.Р. Вальдес и В.О. Чавушян. Обработка изображений проводилась стан-

Таблица 3.3: Журнал наблюдений с ИФП

Имя		дата наблюдений	T_{exp} , сек	диапазон	Seeing, "
NGC	470	02/11/2000	32×200	H_{α}	2.1
NGC	2273	03/11/2000	32×200	H_{α}	2.0
NGC	3368	28/02/2000	32×150	H_{α}	2.7
		28/02/2000	32×200	[NII]	3.5
NGC	3945	03/11/2000	32×190	[NII]	2.0
NGC	4736	02/03/2000	32×150	H_{α}	2.7
		02/03/2000	32×180	[NII]	3.5
NGC	6951	23/09/2000	32×120	H_{α}	2.5
		23/09/2000	32×120	[NII]	2.5

дартным образом в системе IRAF.

3.3.4 Фотометрия на БТА и HST

Для ряда галактик были получены изображения на 6-м телескопе с помощью редуктора светосилы SCORPIO. Приемник – ПЗС ТК1024 с размером пикселя $0''.28$. Журнал наблюдений дан в таблице 3.5. Наблюдения проводились в трех фильтрах – V Джонсона, R_c Казинса и среднеполосном фильтре для получения изображений в красном континууме заведомо свободном от ярких эмиссионных линий. Этот фильтр, обозначенный как SED755, имел ширину на половине интенсивности $FWHM = 220 \text{ \AA}$ и центральную длину волны 7560 \AA . Обработка наблюдений включала в себя стандартные этапы редукции ПЗС-изображений (вычитание тока смещения, деление на плоское поле, чистка космических частиц).

Также мы использовали имеющиеся в свободном доступе изображения галактик из архива Хаббловского космического телескопа (HST), полученные с Широкопольной и Планетарной Камерой (WFPC2) и камерой ближнего инфракрасного диапазона (NICMOS). Масштаб изображений WFPC2 составлял $0''.1$ /пиксель для поля $2'.7$ и $0''.045$ /пиксель для центральной планетарной камеры (PC) с полем зрения $36''$. Камера NICMOS имеет три чипа, размер пикселя и поле зрения которых составляли соответственно $0''.043$ и $11''$ для NIC1, $0''.075$ и $19''$ для NIC2, $0''.2$ и $51''$ для NIC3. В таблице 3.6 приводятся сведения об используемых изображениях. Здесь ID – идентификационный номер наблюдательной программы, в рамках которой были получены изображения.

Таблица 3.4: Журнал фотометрических наблюдений на 2.1-м телескопе

Имя		дата наблюдений	Режим	Фильтр	Seeing, "
NGC	2273	09/03/2001	($F/4.5$)	J, H, K'	3.5
NGC	2681	09/03/2001	($F/4.5$)	J, H, K'	2.8
		18/03/2000	($F/13.5$)	J, H, K'	1.5
NGC	2950	12/03/2001	($F/4.5$)	J, H	3.0
		18/03/2000	($F/13.5$)	J, H, K'	1.5
NGC	3368	12/03/2001	($F/4.5$)	J, H	2.2
		18/03/2000	($F/13.5$)	J, H, K'	1.5
NGC	3786	19/03/2000	($F/13.5$)	J, H	1.5
NGC	3945	09/03/2001	($F/4.5$)	J, H	4.0
		18/03/2000	($F/13.5$)	J, H, K'	1.5
NGC	4736	20/03/2000	($F/13.5$)	J, H, K'	1.5
NGC	5566	18/03/2000	($F/13.5$)	J, H, K'	1.5
		12/03/2001	($F/4.5$)	J, H	1.6
NGC	5850	18/03/2000	($F/13.5$)	J, H, K'	1.5
NGC	5905	19/03/2000	($F/13.5$)	J, H, K'	2.5

Таблица 3.5: Журнал фотометрических наблюдений на 6-м телескопе

Имя		дата наблюдений	Фильтр	Seeing, "
NGC	470	03/11/2000	V, R _c , SED755	1.4
NGC	2273	03/11/2000	V, R _c	1.0
NGC	2681	25/10/2000	V	1.0
NGC	2950	04/11/2000	V, R _c	1.5
NGC	3945	03/11/2000	V, R _c	1.0
NGC	6951	04/11/2000	V, R _c , SED755	1.2
NGC	7743	03/11/2000	V, R _c , SED755	1.5

3.4 Методы анализа полей скоростей и изображений

Аппроксимация изображений эллиптическими изофотами проводилась с помощью программы FITELL В. В. Власюка (САО РАН), реализующей стандартную методику изофотного анализа. Для всех изображений были построены радиальные зависимости параметров изофот: позиционного угла PA и эллиптичности $\epsilon = 1 - b/a$, где a и b – видимые размеры большой и малой полуосей эллипсов.

Поля скоростей газа и звезд анализировались методом "наклонных колец" описанным в разделе 2.2. Для этого они разбивались на эллиптические кольца шириной $1 - 1.5''$, ориентированные соответственно внешнему

Таблица 3.6: Изображения их архива HST

Имя	дата наблюдений	камера	Фильтр	ID
NGC 2273	05/02/1997	FWPC2	F791W	6419
	03/04/1998	NIC2	F160W	7172
	03/04/1998	NIC3	F164N, F166N	7172
NGC 2681	07/06/1998	NIC3	F187N, F160W	7919
	03/09/2000	FWPC2	F300W	8632
NGC 2950	26/01/1999	FWPC2	F450W, F555W, F814W	6633
NGC 3368	04/05/1998	NIC2	F160W	7331
	08/05/1998	NIC2	F110W	7331
	12/12/2000	FWPC2	F814W	8602
NGC 3786	30/03/1995	FWPC2	F606W	5479
	29/04/1998	NIC1	F110W, F160W	7867
NGC 3945	11/05/1997	FWPC2	F450W, F555W, F814W	6633
NGC 4736	02/07/2001	FWPC2	F814W	9042
NGC 5566	04/04/1999	FWPC2	F606W	6359
NGC 6951	30/10/2000	FWPC2	F814W	8602
	18/11/2000	FWPC2	F606W	8597
NGC 7743	30/05/1994	FWPC2	F547M	5419
	11/10/1994	FWPC2	F606W	5479
	16/09/1997	NIC2	F160W	7330

диску галактики. Минимизируя сумму квадратов отклонений от модели, можно в каждом кольце определить все 6 параметров, характеризующих модель кругового вращения на данном радиусе R в плоскости галактики: координаты центра вращения в картинной плоскости (x_0, y_0) , системную скорость центра V_{sys} , позиционный угол динамической большой оси PA_{dyn} , наклон плоскости галактики к лучу зрения i и среднюю скорость вращения V_{rot} . Однако во всех изучаемых галактиках наблюдаются крупномасштабные бары, а во внешних областях часто еще и спиральные рукава, поэтому в полях скоростей заведомо должны присутствовать некруговые движения. А это, в свою очередь, приводит к систематическим ошибкам в определении параметров ориентации диска (см. главу 2 и Приложение В. к статье Ляховича и др., 1997). В такой ситуации удобно зафиксировать часть параметров. Хорошим первым приближением является $x_0, y_0, V_{sys}, i = const.$ Тогда в каждом кольце необходимо определить всего два параметра – V_{rot} и PA_{dyn} . В этом случае отклонения PA_{dyn} от принятого позиционного угла линии узлов диска PA_0 характеризуют тип некруговых движений. В частности, в баре движение газовых облаков происходит таким образом, что наблюдаемый угол PA_{dyn} перестает совпадать с направлением линией

узлов диска. Причем поворот динамической оси происходит в противоположную относительно линии узлов сторону по сравнению с позиционным углом внутренних изофот (глава 2). Сходный эффект должен наблюдаться и в поле скоростей звезд, что показывают как результаты численного моделирования (Вотрен, Дейонг, 1997), так и аналитические расчеты движения звезд в трехосном гравитационном потенциале (Монне и др., 1992).

Остается открытым вопрос о поиске оптимальных параметров ориентации диска. В качестве системной скорости использовались оценки V_{sys} , усредненные по всем радиусам. В качестве первого приближения для x_0, y_0 брались координаты центра симметрии поля лучевых скоростей. Если определяемый таким образом динамический центр находился на расстоянии не более $1''$ от центра симметрии внутренних изофот на изображении в континууме, то именно последний (фотометрический) центр и использовался как центр кругового вращения при анализе поля скоростей. Однако в NGC 470 смещение динамического центра относительно фотометрического заведомо превышало ошибки измерений (раздел 3.5). В этой галактике за центр вращения принимался именно динамический центр.

Наибольшие проблемы возникают при точном определении позиционного угла линии узлов диска PA_0 и наклона диска i . Использовать усредненные величины параметров внешних изофот в предположении проекции тонкого круглого диска не всегда корректно. Во-первых, даже на больших расстояниях от центра изофоты могут быть искажены внешней спиральной структурой и не ясно в каком диапазоне расстояний производить усреднение PA и ϵ . Во-вторых, некоторые галактики (NGC 3368, NGC 3945) содержат внешние слабые кольца, которые, вообще говоря, могут иметь в плоскости диска эллиптическую форму (Бута, 1986). В-третьих, ошибки, возникающие при делении на плоское поле и при вычитании окружающего фона (частно неравномерного для JHK'-изображений), искажают форму слабых внешних изофот.

Поэтому для выбора оптимальных величин PA_0 и i в большинстве галактик мы использовали "критерий спиральности предложенный Фридманом, Хоружим (2001). Идея метода состоит в разложении двумерного распределения поверхностной яркости $I(R, \varphi)$ в ряд Фурье по азимутальному углу φ в плоскости галактики:

$$I(R, \varphi) = A_0(R) + \sum_{m=1}^N A_m(R) \cos(m\varphi + \phi_m(R)) \quad (3.1)$$

Здесь A_m , ϕ_m – амплитуда и фаза гармоники с номером m , а $N = 8 - 12$ – максимальное число гармоник. Если на изображении присутствует спиральная структура с числом рукавов m , то линия максимума соответствующей гармоники в разложении (3.1) также будет иметь спиральную форму. Очевидно, что в области бара линия максимума гармоники $m = 2$ будет вытянута вдоль соответствующего азимутального угла. Форма спиралей достаточно чувствительна к выбору параметров ориентации. Легко показать, что для двухрукавной галактики в случае недооценки i , линия максимума гармоники $m = 2$ на больших радиусах будет совпадать с линией узлов, на практике – осциллировать вокруг направления большой оси. Если наклон переоценен, то линия максимума $m = 2$ будет вытягиваться вдоль малой оси галактики. Аналогично, если принятый угол PA_0 отличается от истинного, то линия максимума 2-й гармоники во внешних частях будет отклоняться в направлении правильной величины позиционного угла. Практика показала, что при умеренных углах наклона $i = 30 - 70^\circ$ параметры ориентации определяются с точностью в несколько градусов.

Параметры ориентации дисков галактик приводятся в таблице 3.7. При их поиске мы старались, что бы все три метода их определения (изофотный анализ, анализ полей скоростей газа с ИФП и Фурье-анализ) давали взаимно непротиворечивые результаты. Но по вышеизложенным соображениям предпочтение отдавалось "методу спиральности". В частности, ошибки в таблице 3.7 указывают, в большинстве случаев, на доверительный интервал возможных значений, полученных этим методом. Более подробно о выборе параметров ориентации говорится в описании отдельных галактик.

3.5 Описание отдельных галактик

3.5.1 Атлас (Приложение А.)

Результаты анализа изображений и полей скоростей представлены в Приложении на рис. А.1-А.18. На левой половине рис. А.1- А.13 приведены результаты наблюдений с MPFS. В верхнем ряду – изображение в континууме вблизи указанной длины волны, поле скоростей звезд и карта дисперсии скоростей звезд (σ_*). В следующем ряду – изображение в самой яркой эмиссионной линии ионизованного газа, поле скоростей и карта дисперсии скоростей (σ_{gas}) в этой линии. В NGC 2950, NGC 3368, NGC 4736 и NGC 5566 на спектрах MPFS линии ионизованного газа отсутствуют и поэтому соответствующие карты на рисунках не приводятся. Серые шкалы

Таблица 3.7: Параметры ориентации дисков галактик

Имя		PA_0 , ($^\circ$)		i , ($^\circ$)	
NGC	470	157	± 1	55	± 1
NGC	2273	58	± 2	50	± 2
NGC	2681	120	± 10	20	± 5
NGC	2950	119	± 1	50	± 2
NGC	3368	135	± 5	48	± 3
NGC	3786	247	± 5	61	± 2
NGC	3945	157	± 2	52	± 2
NGC	4736	31 ¹		298	± 6
NGC	5566	30	± 3	64	± 2
NGC	5850	335	± 10	37	± 5
NGC	5905	130 ²		40 ²	
NGC	6951	140	± 6	41	± 4
NGC	7743	270	± 5	40	± 3
¹ измерения Малдер (1995)					
² измерения ван Моорвел (1982)					

– в км/с для полей скоростей и дисперсии скоростей; для карт в континууме и в линиях – обычно в $\text{эрг с}^{-1} \text{см}^{-2}/\square''$, а для NGC 5850 (наблюдения в [NII]) – в относительных единицах. Крестиком отмечено принятое положение динамического центра. Ниже приведены радиальные зависимости скорости вращения (V_{rot}) и положения динамической оси измеренные по полям скоростей звезд и газа в разных линиях (PA_{dyn}). Пунктиром отмечен принятый позиционный угол линии узлов.

На правой половине рис. А.1- А.13 приводятся примеры изображений галактики и результаты изофотного анализа. Здесь в левой колонке – наземные изображения с большим полем зрения. В правой колонке – аналогичные результаты для околядерной области $r < 5 - 20''$, полученные с HST. В случае галактик, для которых не было данных в HST-архиве, приводятся наземные данные с лучшим пространственным разрешением. Вверху – изображение в логарифмической шкале и его изофоты. Ниже – остаточные интенсивности после вычитания изображения аппроксимирующих эллипсов из исходных изображений в линейной шкале. Для наземных изображений жирным пунктиром показано положение линии максимума гармоника $m = 2$ (результат применения вышеописанного "критерия спиральности"). Ниже – позиционный угол и эллиптичность в зависимости от большой полуоси изофот для всех имеющихся изображений. Разброс значений от фильтра к фильтру дает наглядное представление об ошибках

эллиптической модели. Горизонтальным пунктиром отмечен принятый позиционный угол линии узлов. Вертикальным пунктиром на левых графиках отмечен диапазон радиусов, показанный на графиках справа.

На рис. А.14-А.18 приводятся результаты наблюдений с ИФП – изображения в континууме и в эмиссионной линии в шкале квадратного корня из интенсивности; поле скоростей с линиями равных лучевых скоростей, проведенными через каждые 50 км/с относительно системной скорости центра; радиальные зависимости скорости вращения и положения динамической оси. Пунктиром отмечен принятый позиционный угол линии узлов. Для NGC 3368, NGC 4736 и NGC 6951 отдельно приведены данные для каждой линии (H_α и $[NII]$).

Необходимо сделать небольшое замечание об ошибках нахождения круговой скорости вращения галактик. Поскольку в каждом эллиптическом кольце в полях скоростей содержится от нескольких десятков до сотен точек (для наблюдений с ИФП), то формальные ошибки определения круговой скорости составляют обычно 1 – 5 км/с. Однако, как отмечалось Ляховичем и др. (1997), кривая вращения определяемая в рамках чисто круговых движений, может иметь систематические ошибки порядка величины остаточных скоростей. Поэтому в качестве ошибок для V_{rot} приводится дисперсия отклонений наблюдаемых лучевых скоростей от модели кругового вращения в каждом кольце – т.е. средняя величина некруговых движений. Такое представление является более корректным, чем использование формальных ошибок определения параметра V_{rot} , поскольку реальная кривая чисто кругового вращения должна соответствовать приводимой нами кривой с точностью до приведенных на рис. А.14-А.18 боксов ошибок.

3.5.2 NGC 470

Параметры ориентации диска несколько отличаются от приводимых Гарсиа-Гомес, Атанасуллой (1991): $PA_0 = 149 \pm 3^\circ$, $i = 51 \pm 4^\circ$, но позволяют получить гладкие спирали для линий максимума гармонике $m = 2$. Позиционный угол в фильтре SED755 совпадает с данными ИК-фотометрии Фридли и др. (1996) и отличается более чем на 25° от измерений в фильтрах V и R_c, что, видимо, связано с влиянием пылевого поглощения на оптических изображениях. Воздействием внешнего бара на поле скоростей газа объясняется отклонение PA_{dyn} от линии узлов в области $r = 8 - 20''$ по данным ИФП-наблюдений (рис. А.14). Отклонение происходит в противоположную сторону относительно PA изофот, в согласии с существующими

моделями движений газа в барах (см. раздел 3.1). В ту же сторону на $r > 4''$ отклоняется и динамическая ось в поле скоростей звезд по данным MPFS.

Центр вращения (динамический центр) в полях скоростей газа и звезд, построенных с MPFS, смещен на $\sim 4''$ (0.6 кпк) к NW от фотометрического центра, что подтверждают как наши наблюдения с ИФП, так и результаты Эмселлема (2002). Смещение центра может быть обусловлено пекулярным развитием азимутальной гармоники $m=1$ в поле скоростей газа (Эмселлем и др., 2001a; Эмселлем, 2002). Согласно Турнбулл и др. (1999), близкая галактика NGC 474 демонстрирует следы взаимодействия с NGC 470, причем вероятно, что обе галактики погружены в общее облако HI. Тогда возбуждение асимметричной гармоники может быть вызвано приливным взаимодействием с компаньоном. Но не менее вероятно и альтернативное объяснение смещения центра рассматриваемое в разделе 4.2.2 и связанное с эволюцией крупномасштабного бара.

Объяснение Фридли и др. (1996) поворота изофот на $r < 7''$ влиянием второго бара или трехосного балджа довольно проблематично. Здесь позиционный угол изофот близок к линии узлов диска, при этом наблюдаемая эллиптичность $\epsilon = 0.3 - 0.45$ соответствует проекции круглого диска, лежащего в плоскости галактики, с учетом ошибок депроекции из-за вклада балджа и внешнего бара. Поэтому разумно предположить, что здесь мы видим диск внутри бара. Поворот динамической оси, измеренной по полю скоростей газа, в ту же сторону, что и PA изофот на $r < 5 - 7''$ также соответствует круговому вращению в выделенном диске, возможно несколько наклоненном к плоскости галактики (глава 2). В таком случае асимметричная гармоника $m = 1$ развивается в этом внутреннем диске, отличающимся также высокой концентрацией молекулярного газа (София и др, 1993) и ионизованного водорода (см. изображение в H_α на рис. А.14). Выделенность центрального диска может быть обусловлена его расположением внутри области внутреннего линдбладовского резонанса большого бара.

Вега Белтран и др. (2001) дают оценку центральной дисперсии скоростей $\sigma_* = 56 \pm 31$ км/с. Столь малая величина σ_* сомнительна, поскольку тогда трудно объяснить тот факт, что скорость вращения для звезд по данным MPFS в центре на ~ 50 км/с меньше, чем скорость вращения газа. Наши измерения центральной дисперсии скоростей $\sigma_* \approx 140 - 150$ км/с выглядят более реалистичными и согласуются с данными Хейдау и др. (1999).

В поле скоростей в линии H_α на расстоянии $12 - 20''$ к востоку от центра расположена область, в которой отклонения от скорости кругового вращения превышают $50 - 60$ км/с. Профиль линии H_α здесь имеет сложную многокомпонентную форму, что указывает на существование не менее чем двух систем газовых облаков. Эти локальные некруговые движения скорее всего не связаны с динамическими особенностями бара, так как иначе они были бы симметричны относительно центра. Возможно, что здесь наблюдается падение внешнего газового облака на диск галактики. Подобная картина эмиссионных профилей, правда на больших расстояниях от центра, наблюдалась автором в галактике NGC 1084 (Моисеев, 2000).

3.5.3 NGC 2273 (Mrk 620)

Галактика со сложной фотометрической морфологией: здесь, согласно ван Дрил, Бута (1991), существует бар диаметром около $50''$ и две системы спиральных рукавов, заканчивающиеся на расстояниях от $1'1$ и $1'6$ от центра. В поле скоростей в линии H_α , построенном по данным с ИФП, четко проявляется влияние этого крупномасштабного бара, так как на $r = 3 - 45''$ динамическая ось отклоняется от линии узлов более чем на 20° (рис. А.14). Отклонения происходят в противоположную сторону относительно PA изофот (рис. А.2), как это и должно быть внутри крупномасштабного бара (пункт 3.1). Вдоль малой оси галактики остаточные скорости газа после вычитания модели кругового вращения составляют более $50 - 80$ км/с на расстоянии от центра $\pm 10 - 13''$. Они соответствуют радиальным движениям газа в баре к ядру.¹

Поведение PA_{dyn} в поле скоростей в линии H_β по данным MPFS согласуется с измерениями в H_α . Однако скорость вращения в H_β на $r = 1 - 6''$ меньше, чем в H_α на ~ 50 км/с и почти совпадает со скоростью вращения звезд (рис. А.2). Вероятно, это обусловлено тем, что относительно слабая эмиссия H_β искажается широкой звездной абсорбцией. Поле скоростей газа в [OIII] резко отличается от измерений в водородных линиях. Градиент лучевой скорости в [OIII] значительно меньше чем в H_β , а PA_{dyn} резко поворачивается с радиусом почти на 50° . Эти некруговые движения могут быть связаны с джетом из сейфертовского ядра, который выделяется на ионизационных картах, вытянут на $\sim 2''$ к востоку от ядра и совпадает по положению с радиоструктурой (Ферро и др., 2000). Пространственная гео-

¹Здесь использовано предположение о том, что спиральные ветви – отстающие. В таком случае NW-половина галактики является ближайшей к нам.

метрия этих движений не ясна, скорее всего, они происходят не в плоскости диска галактики.

Поле скоростей звезд, в отличие от газового, не показывает заметных некруговых движений. В поле дисперсии скоростей σ_* видна вытянутая с запада на восток структура. В самом центре вращения наблюдается небольшое уменьшение σ_* на $\sim 10 - 15$ км/с.

Мульчи и др. (1997), исходя из своих фотометрических данных, предположили существование второго бара на расстояниях $r < 8''$ от центра. Однако на изображениях, сделанных с высоким разрешением, этот "бар" распадается на несколько эллиптических дуг радиусом $r = 3 - 4''$, хорошо заметных на карте остаточных интенсивностей с HST (рис. А.2). Феррюи и др. (2000) назвали их "псевдокольцом но на наш взгляд, структура больше напоминает симметричную спираль, закручивающуюся в кольцо. Этот вывод совпадает и с мнением Эрвина и Спарк (2002).

3.5.4 NGC 2681

Резкие изменения параметров ориентации изофот на рис. А.3 отражают очень сложную фотометрическую структуру этой линзовидной галактики. Фридли и др. (1996) предложили в качестве параметров ориентации диска $PA_0 = 50^\circ$, $i = 32^\circ$, а повороты внутренних изофот объяснили двумя барами, впервые заподозренными в работе Возняк и др. (1995). Однако Эрвин, Спарк (1999), используя более глубокие снимки нашли для внешних изофот диска $PA_0 = -130^\circ$, а внутреннюю структуру галактики описали с помощью трех (!) вложенных друг в друга баров с позиционными углами $PA_1 = 30^\circ$ ($r < 60''$), $PA_2 = 75^\circ$ ($r < 20''$) и $PA_3 = 20^\circ$ ($r < 4''$) соответственно. Последний, самый маленький "бар хорошо различим на HST-изображениях с NICMOS. Все эти выделенные значения позиционных углов различимы и в используемых нами изображениях, однако вызывает сомнение само существование системы из трех баров — в данном случае это скорее попытка хоть как-то объяснить изменения параметров изофот. На оптических изображениях (как с 6-м телескопа, так и из работ Возняк и др., 1995; Эрвин, Спара, 1999) в области "среднего бара" ($r = 10 - 20''$) хорошо различимы две короткие сильно закрученные спиральные ветви и многочисленные пылевые прожилки. Пылевые полосы расположены в основном к югу от ядра и вытянуты параллельно рукавам.

Мы попробовали использовать Фурье-анализ для получения парамет-

ров ориентации диска, но результаты оказались противоречивы. Так, при $PA_0 = -130^\circ$ (ориентация внешних изофот) не удается получить спиральную структуру линии максимума гармонике $m = 2$. Четкая спираль с баром получается при $PA_0 = 15^\circ - 40^\circ$, $i = 20^\circ - 35^\circ$, однако эта спираль закручена в противоположную сторону относительно вышеописанных внутренних спиралей, т.е. параметры ориентации выбраны неверно.

Еще более странно выглядят данные по кинематике с MPFS. На $r > 4''$ и газ и звезды обладают круговым вращением с $PA_{dyn} = 150^\circ - 160^\circ$. Однако на $r < 2''$ наблюдается резкий поворот динамической оси звезд к $40^\circ - 50^\circ$. В газе поворот не так ярко выражен, но если за положение динамического центра принять не центр в континууме а точку симметрии поля скоростей, смещенную на $\sim 2''$ к северу, то мы получим величины PA_{dyn} , близкие к определяемым по полю скоростей звезд. Этот резкий поворот линий равных лучевых скоростей хорошо заметен на $r < 1 - 2''$ (40-80 пк), но нам не хватает пространственного разрешения MPFS для более уверенных выводов. На этих расстояниях от центра PA_{dyn} близок к позиционному углу внутренних изофот $PA = 25 - 35^\circ$. Такое поведение характерно не для бара, а для внутреннего диска, полярного (наклонного) к плоскости внешнего диска галактики. Этот диск виден на изображениях с HST, полученных как в ультрафиолете, так и в ближнем ИК. Именно его Эрвин, Спарк (2002) и приняли за третий внутренний бар.

Капшелари и др. (2000) показали, что в ядре NGC 2681 произошла вспышка звездообразования с возрастом $\sim 10^9$ лет. В качестве наиболее вероятного механизма ее возникновения предлагалось поглощение небольшого газового спутника. Если спутник имел направление момента вращения не совпадающее с хозяйской галактикой, то его "остаток" мы и видим в качестве наклонного диска. Однако наклонный диск со временем должен прецессировать к плоскости галактики. Если же диск полярный, то он вполне может оказаться достаточно долгоживущим (см. к примеру Арнаболди, Спарк, 1994). Подобная структура несколько напоминает известные галактики с внутренними полярными кольцами, такими как IC 1689 (Гаген-Торн, Решетников, 1997), хотя с еще более малыми размерами полярного диска.

В рамках гипотезы поглощения спутника можно объяснить и спиральные рукава с пылевыми прожилками на $r < 20''$, форма которых не похожа на обычные пылевые полосы в крупномасштабных спиральных рукавах. Кстати, эмиссия ионизованного газа в линиях $H_\alpha + [NII]$ наблюдается также только внутри $15''$ от центра (Возняк и др., 1995). Создается впечатление

чатление, что внутри "спокойной" и бедной газом линзовидной галактики на $r < 15 - 20''$ (600-900 пк) расположен звездно-газовый диск со своими спиральными рукавами и недавно произошедшей вспышкой звездообразования. Асимметрия в видимом распределении пыли, расположенной практически с одной стороны от ядра, также указывает на возможный наклон (изгиб) газопылевого диска относительно звездного. Возможно, что все эти структуры – внутренний наклонный диск, спиральные рукава, изгиб пылевого диска индуцированы недавним поглощением спутника.

Наклон галактики к лучу зрения не превосходит $30 - 40^\circ$, так как эллиптичность изофот на $r > 40''$ нигде не превышает 0.25. При этом, положение динамической оси $PA_{dyn} = 150 - 160^\circ$ на $r > 4''$ не согласуется ни с одним характерным направлением на радиальной зависимости позиционного угла изофот, но ближе всего к PA самых внешних изофот. Если, согласно Эрвину и Спарк (1999), принять, что на $r = 80 - 110''$ виден внешний диск галактики, то получим $PA_0 = 120 \pm 10$ и $i_0 = 20 \pm 3$.

Предлагается следующая интерпретация глобальной структуры NGC 2681. На $r = 50 - 60''$ преобладает крупномасштабный бар. Внутренний линдбладовский резонанс бара находится на $r \approx 30''$. Внутри резонанса наблюдается выделенный газопылевой диск со спиральной структурой. Диск в плоскости галактики не круглый, а вытянутый, что возможно, поскольку звездные орбиты на резонансах бара меняют свою эллиптичность (см. Линдблад, 1999). Именно этот диск Эрвин, Спарк (1999) приняли за второй бар. А недавнее поглощение карликового спутника, как уже отмечалось, объясняет как структуру самого килопарсекового диска, так и наклонные (полярные) орбиты внутри центральных 100 пс. Отличие положения динамической оси в полях скоростей газа и звезд на $r > 4''$ $PA_{dyn} = 150^\circ$ от ориентации линии узлов $PA_0 = 120$ обусловлено либо некруговыми движениями в баре, либо возмущением центральной области, вызванным поглощением спутника.

Интересно, что согласно наблюдениям Танигучи и др. (1994) молекулярный газ в NGC 2681 сконцентрирован в основном внутри области диаметром $25'' - 55''$, а в области диаметром $15''$ его концентрация резко падает. На наш взгляд, это свидетельствует о существовании кольца молекулярного газа с возможным радиусом от $8''$ до $15''$. Совпадение этих расстояний с размерами газопылевого диска является дополнительным аргументом в пользу существования описанного выше центрального газопылевого диска, расположенного внутри крупномасштабного бара.

3.5.5 NGC 2950

Найденная нами величина PA_0 примерно на 10° отличается от принятого Фридли и др. (1996). Параметры изофот во всех фильтрах хорошо согласуются как между собой, так и с оценками Фридли и др. (1996). Крупномасштабный бар размером $r \approx 30 - 40''$ хорошо виден в распределении максимума гармоник $m=2$, также он выделяется по повороту изофот и пику их эллиптичности (рис. А.4). Возняк и др. (1995) и Фридли и др. (1996) объясняли поворот изофот и пик эллиптичности на $r < 6''$ существованием второго внутреннего бара. Однако странно, что этот предполагаемый бар никак не влияет на движение звезд в околоядерной области. Так PA_{dyn} , измеренный по полю скоростей звезд, совпадает с направлением линии узлов диска. В поле скоростей звезд отсутствуют заметные некруговые движения, несмотря на резкие повороты изофот на этих радиусах. В поле дисперсии скоростей звезд на $r = 1 - 5''$ четко выделяется эллипсоидальная структура, вытянутая вдоль $PA \approx 150^\circ$, т.е. вдоль направления внешнего (первого) бара.

3.5.6 NGC 3368 (Messier 96)

Подробное исследование этой галактики на основе полученных наблюдательных данных приведено в отдельной работе (Сильченко и др., 2003). Здесь мы лишь кратко опишем ее основные особенности. Согласно наблюдениям с ИФП (рис. А.15) газовый диск в этой галактике – члене группы Leo I – сильно искривлен и, по-видимому, имеет внешнее происхождение, в полном согласии с радионаблюдениям Шнейдера (1989) в нейтральном водороде. Позиционный угол газового диска $PA_{dyn} = 170^\circ$ заметно отличается от линии узлов звездного диска $PA_0 = 135^\circ$. Только при такой величине PA_0 линия максимума гармоник $m = 2$ имеет форму правильной спирали, хорошо описывающей распределение остаточных интенсивностей на изображениях в ближнем ИК (рис. А.5). Искажения изофот, связанные с этой мощной спиральной структурой, были ошибочно приняты в работе Джунгвет и др. (1997) за проявление внешнего бара. В то же время в галактике присутствует небольшой мини-бар размером около $5''$, вытянутый вдоль $PA = 120^\circ - 125^\circ$. Некруговыми движениями в этом баре и объясняются отклонения PA_{dyn} в поле скоростей звезд на $\sim 25^\circ$ от линии узлов диска, происходящие в противоположную сторону по сравнению с PA изофот мини-бара. Асимметричное относительно центра распределение дис-

персии скоростей звезд по данным MPFS совпадает с наблюдениями Вега Белтран и др. (2001).

С помощью ИФП были построены крупномасштабные поля скоростей сразу в двух эмиссионных линиях (рис. А.15). Эмиссия в линии H_α сконцентрирована в основном в кольце звездообразования на расстоянии $50-70''$ от центра. В линии [NII] нам удалось построить поле скоростей внутри этого кольца. Скорость вращения в азоте систематически меньше на ~ 50 км/с, чем в H_α . Возможно, что уменьшение скоростей в [NII] связано с торможением газа на фронте ударной волны в спиралях с последующим излучением на фронте ударной волны в запрещенных линиях. Следует заметить, что это различие полей скоростей в разных линиях не может быть обусловлено инструментальными эффектами, поскольку для NGC 4736, которая наблюдалась в те же ночи, скорости, измеренные по H_α и [NII], близки между собой.

Резкий поворот изофот на изображениях с HST внутри $r = 2''$ связан с мощной пылевой полосой, проходящей почти через ядро галактики и заметной как на оптических, так и на изображениях в ближнем ИК, полученных с NICMOS (рис. А.5). На этих масштабах вдоль малой оси бара расположен полярный газопылевой мини-диск. К сожалению, наши спектральные наблюдения имеют низкое пространственное разрешение и не позволяют выделить эту структуру по ее кинематическим проявлениям.

3.5.7 NGC 3786 (Mrk 744)

Измеренные параметры ориентации диска практически совпадают с результатом Афанасьева и Шаповаловой (1981). Афанасьев и др. (1998) предположили, что согласно их фотометрическим данным в галактике существуют два бара с размерами больших полуосей $7''$ и $25''$. Однако Фурье-анализ распределений поверхностной яркости показывает, что в NGC 3786 на радиусах $r = 7 - 20''$ расположена правильная двухрукавная спираль, хорошо заметная также и на карте остаточных интенсивностей (рис. А.6). Искажения формы изофот, вносимые спиральной структурой, были ошибочно приняты Афанасьевым и др. (1998) за внешний бар.

В поле скоростей звезд на $r < 6'' PA_{dyn}$ отклоняется от линии узлов более чем на 10° , отклонения происходят в противоположную сторону, по сравнению с центральными изофотами (рис. А.6). Такое поведение характерно для динамически выделенного центрального мини-бара диаметром

около 2 кпс. Существование этого мини-бара было заподозрено Афанасьевым и Шаповаловой (1981) при изучении кинематики газа в NGC 3786 и фотометрически подтверждено Афанасьевым и др. (1998). Поля скоростей ионизованного газа, построенные по линиям $H\beta$ и [OIII], заметно различаются. Положения динамической оси в полях скоростей звезд и газа в $H\beta$ совпадают, а позиционные углы, измеренные по скоростям в линии [OIII], систематически от них отличаются. Такие различия могут быть связаны с присутствием на краях перемычки ударных фронтов, возникающих в газовом диске под действием гравитационного потенциала бара. Газ за фронтом тормозится и излучает в запрещенных линиях (Афанасьев и Шаповалова, 1981 и 1996). Дополнительным подтверждением этой гипотезы является то, что средняя скорость вращения в линии [OIII] действительно меньше, чем в $H\beta$.

Интересно распределение дисперсии скоростей звезд. В ядре наблюдается уменьшение σ_* на ~ 50 км/с, по сравнению с $r = 3 - 4''$. Подобные центральные "провалы" (dip) в распределении σ_* наблюдались недавно Эмселлемом и др. (2001) внутри нескольких галактик с перемычками. Простые модели перемычек (глава 2, а также Эмселлем и др., 2001) не воспроизводят этой особенности звездной кинематики. Возможно, она связана с существованием выделенного "холодного" звездного диска внутри бара, но для уверенных выводов требуются новые модельные расчеты.

3.5.8 NGC 3945

Радиальные изменения ориентации изофот в разных фильтрах совпадают с предыдущими наблюдениями Фридли и др. (1996) и Эрвина и Спарк (1999). В галактике отсутствует глобальный спиральный узор, поэтому параметры ориентации определялись по внешним изофотам. Если внешнее кольцо на $r = 120 - 150''$ считать круглым, то значения PA_0 , i_0 в пределах ошибок согласуются с Эрвин и Спарк (1999). PA изофот на $r = 4 - 18''$ совпадает с направлением линии узлов, на основании чего Эрвин, Спарк (1999) заключили, что здесь наблюдается диск внутри крупномасштабного бара, вытянутого вдоль малой оси галактики. Эти же авторы обнаружили малоконтрастное кольцо радиусом около $7''$, оно заметно и на приводимой нами карте остаточных интенсивностей, полученной из изображений с HST (рис. А.7).

Поле скоростей звезд в этом внутреннем диске следует круговому вращению, поскольку PA_{dyn} совпадает с направлением линии узлов. Небольшое

различие в амплитуде кривых вращения в наблюдениях 2000 и 2002 гг., видимо, связано с тем, что худшее качество изображений в 2000 г. сгладило градиент лучевой скорости (рис. А.7). Кривая вращения звезд близка к полученной Бертолой и др. (1995).

В поле скоростей газа ситуация более сложная. Бертола и др. (1995) измерили скорости газа только внутри $r < 3''$ и нашли там нормальное вращение в линии [OI]. Наши измерения в [NII] противоречат этому утверждению. Во-первых, по данным MPFS эмиссии видны вплоть до $10''$ от центра. Во-вторых, 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! На больших расстояниях направление вращения газа резко меняется и совпадает с вращением звездного компонента. Поле скоростей, построенное с ИФП (рис. А.16), подтверждает факт нормального вращения на больших радиусах от центра, вплоть до $140''$ (~ 11 кпк). Вариации PA_{dyn} на $r = 5-35''$ скорее всего не являются реальным динамическим эффектом, а связаны с трудностями точного измерения слабой эмиссии [NII]. Профиль эмиссионной линии искажается широкой звездной абсорбцией H_α из соседнего порядка интерференции. Ограниченный спектральный диапазон при наблюдениях с ИФП не позволяет уверенно учесть этот эффект.

Следует заметить, что феномен противовращения газа достаточно часто наблюдается в галактиках ранних типов, обычно его связывают с поглощением галактикой внешнего газового облака (раздел 4.2.3).

3.5.9 NGC 4736 (Messier 94)

Мы не смогли определить параметры ориентации диска по фотометрии, поскольку внешние изофоты на изображениях SAMPLA доходят только до $r \approx 50''$. Величина PA_0 была оценена по внешним областям поля скоростей в линии [NII] ($r = 80 - 120''$). В пределах ошибок оно совпадает с измерениями Малдера (1995). Поскольку угол наклона диска к лучу зрения невелик, мы не смогли его уверенно определить по полю скоростей и приняли величину $i_0 = 30^\circ$, определенную Малдером (1995) по внешним изофотам.

Поле скоростей звезд (рис. А.8) демонстрирует регулярное вращение. Положение динамической оси несколько отклоняется от линии узлов диска и составляет $PA_{dyn} = 300 - 305^\circ$. Однако с учетом неопределенности оцен-

ки PA_0 мы не можем уверенно говорить о значимых некруговых движениях звезд. Малдер (1995), используя несколько разрезов с длинной щелью, получил для звезд $PA_{dyn} = 105^\circ - 110^\circ$ ($285^\circ - 290^\circ$), т.е. отклонения происходят в другую сторону относительно линии узлов. Но это усредненный результат по всему диску, который может отличаться от наших измерений внутри $r < 10''$.

Поле скоростей в линии H_α близко к полученному Малдером (1995), измерения внутри $r < 25''$ отсутствуют – здесь эмиссия H_α пропадает на фоне широкой звездной абсорбции. В поле скоростей в линии $[NII]$ наблюдаются значительные некруговые движения (рис. А.17), на которые указывает поворот PA_{dyn} на расстояниях $r = 5-30''$. Возможно, они связаны с бароподобной структурой, выделяемой по повороту изофот и пику эллиптичности на $r < 15-20''$. Шоу и др. (1993), также отмечали поворот ИК изофот в области $r < 5-7''$, приписываемый внутреннему бару. Интересно, что именно на этих расстояниях на оптических изображениях с HST (рис. А.8) видна наиболее контрастная часть внутренней мини-спирали, детально изученной в недавней работе Элмегрин и др. (2002). Пылевые спиральные прожилки различимы на изображениях с Космического телескопа вплоть до расстояний $r = 20 - 30''$ от центра. Поэтому отклонение PA_{dyn} измеренного по полю скоростей газа от линии узлов на этих радиусах может быть связано и с некруговыми движениями во внутренней мини-спирали.

3.5.10 NGC 5566

Хотя измеренная нами величина угла наклона значительно меньше, чем $i_0 = 80^\circ$ у Джунгвет и др. (1997), она значительно лучше соответствует эллиптичности внешних изофот как по нашим данным (рис. А.9), так и по наблюдениям Кента (1984). Крупномасштабный бар размером около $25''$ вытянут в направлении $PA \approx 155^\circ$. От бара отходят две мощные спиральные ветви, хорошо различимые на карте остаточных интенсивностей. Поле скоростей звезд не показывает заметных некруговых скоростей, так как PA_{dyn} в пределах ошибок совпадает с направлением линии узлов. Уже на расстоянии $r = 10 - 14''$ (~ 1 кпк) скорость вращения звезд достигает 250 км/с, что с учетом проекции равно амплитуде кривой вращения по данным в HI Хеллоу и др. (1987).

Джунгвет и др. (1997) объясняли пик эллиптичности и поворот PA изофот в области $r < 5''$ присутствием второго бара. Такая интерпретация вызывает сомнение. Во-первых, позиционный угол этого бара бли-

зок к линии узлов диска. Во-вторых, остаточные интенсивности на ЖК'-изображениях образуют два симметричных спиральных рукава, что для бара не характерно. Особенно хорошо эта двухрукавная спираль, окруженная многочисленными пылевыми прожилками, видна в остаточных интенсивностях на изображении с HST (рис. А.9). Поэтому нам представляется, что внутри крупномасштабного бара на $r < 5 - 8''$ расположен выделенный диск, содержащий мини-спиральную структуру. Параметры изофот диска ($PA = 205 - 210^\circ$, $\epsilon_{max} = 0.55$) указывают на то, что этот внутренний килопарсековый диск лежит в плоскости галактики.

3.5.11 NGC 5850

Нами были получены только изображения с малым полем зрения, поэтому для поиска параметров ориентации использовалось изображение в фильтре R из цифрового атласа Фрей и др. (1996). За пределами кольца вокруг внешнего бара ($r > 80''$) спиральные ветви малоконтрастные, кроме двухрукавной спирали здесь присутствуют моды с большим числом рукавов (Хигдон и др., 1998). Однако параметры ориентации диска, полученные нами из анализа поведения максимума гармоник $m=2$, находятся в хорошем согласии как с оценками Фридли и др. (1996), так и с данными по кинематике нейтрального водорода с учетом возможного изгиба HI-диска (Хигдон и др., 1998). Резкий поворот изофот на $r < 10''$ Фридли и др. (1996) интерпретировали как проявление второго бара.

По данным MPFS, позиционный угол динамической оси звездного компонента близок к линии узлов диска, а в ионизованном газе отличается от линии узлов более чем на $50 - 60^\circ$ (рис. А.10). Интересно, что при этом PA_{dyn} практически совпадает с позиционным углом центральных изофот. Такое поведение характерно для диска, наклоненного к плоскости галактики (глава 2). Кроме того, если все же принять, что движения газа происходят в плоскости галактик, то они должны соответствовать радиальному истечению из ядра² со скоростями около $50 - 70$ км/с. Подобные особенности характерны для галактик Сейферта, но оптический спектр галактики не содержит эмиссионных линий, указывающих на активное ядро, не наблюдается здесь и вспышки звездообразования (Хигдон и др., 1998). Более естественным является предположение о том, что движения газа на $r < 6 - 7''$ происходят в полярной к диску галактики плоскости. При этом

²Здесь использовано утверждение Хигдон и др. (1998) о том, что наиболее вероятна ориентация диска галактики, при которой ее западная половина – ближайшая к наблюдателю.

полярный газовый диск лежит почти точно вдоль малого сечения внешнего бара. В последние годы подобные полярные мини-диски, связанные с крупномасштабным баром или с трехосным балджем, обнаружены в окрестностях ряда галактик (раздел 4.2.4).

Каков наклон этого диска к картинной плоскости? Легко показать, что угол между плоскостями внутреннего диска и диска галактики Δi определяется выражением:

$$\cos \Delta i = \pm \sin i_1 \sin i_0 \cos(PA_1 - PA_0) + \cos i_1 \cos i_0,$$

где i_1 и PA_1 – наклон внутреннего диска к лучу зрения и позиционный угол его большой оси. Подставив в это выражение $PA_0 = 335^\circ$, $i_0 = 37^\circ$ и $PA_1 = PA_{dyn} = 35^\circ$ получим, что диск будет полярным ($\Delta i = 90 \pm 5^\circ$) если $i_1 = 65^\circ - 74^\circ$. Кривая вращения газа на рис. А.10 построена для $i_1 = 65^\circ$. На $r = 4 - 7''$ скорость вращения газа систематически меньше скорости вращения звезд, что довольно необычно. Заметим однако, что экстраполяция кривой вращения нейтрального водорода (Хигдон и др, 1998) дает для расстояния $r = 5 - 8''$ скорость вращения газа $\sim 30 - 45$ км/с в полном согласии с нашими оценками по ионизованному газу.

3.5.12 NGC 5905

К сожалению, нам не удалось получить изображение внешних изофот галактики за пределами крупномасштабного бара размером $r \approx 37''$ (согласно Фридли и др., 1996). Поэтому были приняты значения $PA_0 = 130^\circ$, $i_0 = 40^\circ$, измеренные ван Моорвел (1982) по полю скоростей HI. Эта величина PA_0 прекрасно согласуется с результатами глубокой ПЗС-фотометрии Кента (1984).

В полях скоростей звезд и газа в линии H_β на $r = 1 - 9''$ наблюдаются отклонения динамической оси от линии узлов. Отклонения происходят в сторону, противоположную внутренним изофотам, и таким образом отражают некруговые движения внутри внешнего бара (см. пункт 3.1). Замедление вращения газа в [OIII] по сравнению с H_β и различие в положении PA_{dyn} в этих линиях скорее всего вызваны ударной волной на кромках бара, аналогично случаю NGC 3786.

Фридли и др. (1996) утверждали, что поворот изофот на $r < 10''$ связан с внутренним баром, но эти авторы использовали $PA_0 = 45^\circ$, что явно ошибочно. Небольшая эллиптичность изофот на $r < 5''$ и совпадение их PA с

линией узлов не позволяют нам интерпретировать эту структуру как внутренний бар. Скорее всего, поворот изофот на $r = 5 - 10''$ вызван переходом от бара к сплюснутому балджу, либо к выделенному околядерному диску, поскольку на $r < 5''$ изофоты практически совпадают с направлением линии узлов.

3.5.13 NGC 6951

Параметры ориентации внешнего диска, определенные из анализа поведения максимума гармоник $m = 2$, согласуются в пределах ошибок с результатами Перез и др. (2000). Лучевые скорости ионизованного газа, измеренные этими авторами вдоль отдельных разрезов, хорошо совпадают с нашими полями скоростей. Однако нам не удалось выделить два кинематических компонента во вращении звезд в околядерной области. Это, видимо, связано с более низким спектральным разрешением MPFS, по сравнению с используемым в работе Перез и др. (2000). В то же время, отклонения PA_{dyn} измеренного по полю скоростей звезд от положения линии узлов происходит в противоположную сторону в сравнении с PA изофот внешнего бара, что указывает на некруговые движения в нем.

Поля скоростей в H_α и [NII] на больших расстояниях согласуются друг с другом (рис. А.18). Но внутри центрального кольца звездообразования, на $r = 5 - 10''$, скорость вращения, измеренная в [NII], резко уменьшается. В то же время отклонения PA_{dyn} от линии узлов внутри $r < 15''$ близки как в этих двух линиях, так и в линии H_β по наблюдениям с MPFS. Поле скоростей в линии [OIII] демонстрирует значительно большие некруговые движения. На $r < 3''$, динамическая ось поворачивается на $\sim 30^\circ$, а скорость вращения в этой линии в два раза меньше, чем измеренная по H_β . За пределами этой центральной области интенсивность дублета [OIII] резко падает. Наиболее естественным объяснением такого поля скоростей является предположение о том, что здесь присутствуют радиальные движения ионизованного газа, по амплитуде сравнимые со скоростями кругового вращения на $r = 1 - 3''$. Поскольку эти движения наблюдаются только в запрещенной линии [OIII], то скорее всего они связаны с истечением из активного ядра, которое разные авторы относят либо к типу LINER либо к Sy2 (см. дискуссию у Перез и др., 2000). Также Сайкиа и др. (2002) на изображениях в радиоконтинууме обнаружили джетоподобную структуру длиной около 80 пс, выходящую из активного ядра NGC 6951. Заметим однако, что MPFS-изображение в [OIII] не обладает значимой асимметрией.

На изображении в линии H_α прежде всего привлекает внимание околоядерное кольцо радиусом $5 - 7''$, расположенное внутри внешнего бара размером $r \approx 60''$. Поворот изофот на оптических наземных изображениях NGC 6951 внутри $r < 6''$ Возняк и др. (1995) интерпретировали как возможный внутренний бар. Однако уже Фридли и др. (1996), опираясь на результаты фотометрии в ближнем ИК, высказали сомнение в подобном объяснении, считая, что поворот изофот может быть вызван сложным распределением пыли и областей звездообразования внутри центрального килопарсека. Действительно, на изображениях с HST присутствует кольцо из областей звездообразования эллиптическое в картинной плоскости, но практически круглое в плоскости галактики. Эти изображения высокого разрешения подтверждают отсутствие бара как вытянутой эллипсоидальной структуры. На карте остаточных интенсивностей здесь выделяется многорукавная флоккулентная спираль, описанная также Перез и др. (2000). Мини-спираль в NGC 6951, видимо, связана только с распределением газопылевой материи, а не со звездным компонентом. Как показывают Перез и др. (2000) эта внутренняя спиральная структура, хорошо заметная в фильтре V, полностью исчезает в фильтре H, где влияние пылевого поглощения значительно меньше.

Выше отмечалось, что позиционный угол динамической оси, построенный по полю скоростей ионизованного газа в линиях H_α , H_β и [NII] в области $r = 0 - 8''$ отличается на $10 - 15^\circ$ от линии узлов внешнего диска, что говорит о значительной роли некруговых движений. Поскольку внутренний бар здесь отсутствует, то можно предложить следующую интерпретацию наблюдаемой картины. Внутри крупномасштабного бара находится газопылевой диск радиусом $6 - 8''$ (500-600 пк), в котором развивается многорукавная спиральная структура, возмущающая околоядерное вращение газа. В пользу динамической выделенности этого диска также говорят высокая концентрация молекулярного газа (Кохно и др., 1999) и расположение двух внутренних линдбладовских резонансов крупномасштабного бара, согласно Перез и др. (2000). Когда наши статьи об этой галактике (Моисеев, 2002б; Моисеев и др., 2002) сдавались в печать, вышла работа Розас и др. (2002), в которой авторы приходят к выводу о динамически выделенном диске на основании собственных наблюдений с ИФП.

3.5.14 NGC 7743

На наземных изображениях галактики выделяется правильная двухрукавная спираль, особенно хорошо заметная на карте остаточных интенсивностей. Повороты изофот внутри центральных $50''$ Возняк и др. (1995) объясняли совместным влиянием бара и трехосного балджа, преобладающего на $r < 10''$. На наш взгляд (судя по остаточным интенсивностям и поведению максимума гармоник $m = 2$), бар может иметь и меньший размер, а на $r > 20 - 30''$ поворот изофот связан со спиральной структурой. Резкий поворот изофот на $r < 3''$ заметен как на наземных изображениях, так и на данных с HST. На карте остаточных интенсивностей, полученных из изображения с WFPC2, видна сложная многорукавная спираль. Однако эта спираль почти полностью исчезает на изображении с NICMOS в фильтре F160W. Скорее всего, как и в NGC 6951, она имеет пылевую природу и не связана с распределением звезд.

Поле скоростей звезд демонстрирует регулярное вращение с PA_{dyn} на $\sim 30^\circ$ отличающимся от линии узлов. Это отклонение происходит в ту же сторону, что и поворот внутренних изофот. Такое поведение характерно для наклонного диска, однако на изображениях область $r < 9''$ никак не выделяется, за исключением вышеупомянутой мини-спирали на $r < 3''$. Пока мы затрудняемся дать однозначное объяснение движению звезд в этой галактике.

К сожалению, данные по кинематике ионизованного газа в области мини-спирали ($r < 3 - 4''$) с MPFS очень неопределенные. Линия [OIII] сильно зашумлена. В поле скоростей газа на $r < 2 - 4''$ преобладает регулярное вращение, близкое к направлению вращения звезд. На больших расстояниях к югу от ядра расположена область некруговых движений. Возможно, что последующие наблюдения в "красном" диапазоне в линии [NII] помогут разобраться с движениями газа в NGC 7743.

Хотя поле дисперсии скоростей звезд сильно зашумлено, однако оно демонстрирует хорошее согласие с измерениями Корменди (1982) вдоль $PA = 80^\circ$. Совпадают как центральная дисперсия скоростей, так и положение пика максимума σ_* , смещенного на $3 - 4''$ относительно фотометрического центра.

Основные выводы главы 3

1. На 6-м телескопе выполнена панорамная спектроскопия выборки объектов – кандидатов в галактики с двойными барами. Построены двумерные распределения лучевых скоростей и дисперсии скоростей звезд в околоядерных областях, крупномасштабные поля скоростей ионизованного газа, кривые вращения газа и звезд. Данные поверхностной фотометрии для этих галактик, получены на 6-м телескопе в фильтрах V и R и на 2.1-м телескопе в фильтрах J, H и K', а также взяты из архива Космического телескопа HST.
2. В исследованных галактиках обнаружены различные типы некруговых движений звезд и ионизованного газа, связанные как с крупномасштабным баром, так и с другими особенностями структуры отдельных галактик, такими как:
 - различие в положении динамического и фотометрического центра в NGC 470.
 - противовращение газа и звезд в центре NGC 3945.
 - полярный газовый диск в NGC 5850 и звездно-газовый полярный диск в NGC 2681.
 - мини-бары в NGC 3368 и NGC 3786.
 - динамически выделенный околоядерный газопылевой диск с мини-спиральной структурой в NGC 4736 и NGC 6951.
3. Все некруговые движения газа и звезд, наблюдающиеся в галактиках выборки, могут быть объяснены без привлечения второго внутреннего бара в качестве дополнительного динамического компонента.

Глава 4

Анализ общих особенностей проявлений баров.

"Итак, вы видите, что ничего не видно. А почему ничего не видно – вы сейчас увидите"
(приписывается Э. Резерфорду)

В этой главе проверяется возможность того, что объекты выборки, рассмотренной в предыдущей главе, обладают некоторыми общими признаками, которые могут быть связаны с динамически выделенным вторым баром. В разделе 4.1 двухмерные распределения дисперсии лучевых скоростей звезд анализируются путем разложения в ряд Фурье по азимутальному углу. В разделе 4.2 обсуждается природа некруговых движений в окрестностях полей скоростей в галактиках выборки. В разделе 4.3 изучаются мини-спиральные структуры, обнаруживаемые внутри крупномасштабных баров на изображениях галактик. Здесь рассматриваются как объекты описанные в главе 3, так и другие кандидаты в галактики с двойными барами известные по литературе. В разделе 4.4 критически рассматривается морфология всех известных галактик – кандидатов в объекты с двойными барами. В разделе 4.5 суммируются результаты наблюдательного изучения галактик с двойными барами.

4.1 Распределения дисперсии скоростей звезд

В главе 2 на основе карт дисперсии лучевых скоростей звезд, построенных для различных углов ориентации диска и бара было показано, что внутри бара дисперсия лучевых скоростей звезд σ_* распределена симметрично относительно большой оси перемычки.

К сожалению, наблюдаемые свидетельства проявления анизотропии дис-

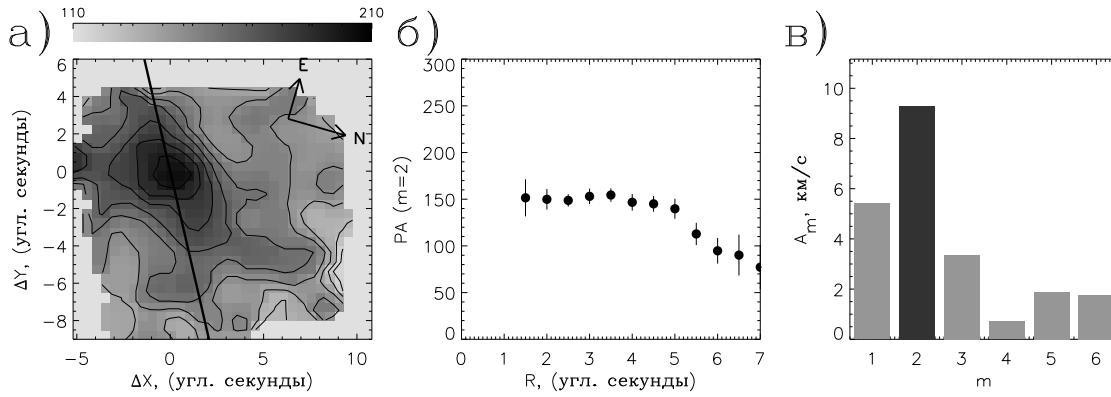


Рис. 4.1: Фурье-анализ распределения поля дисперсии лучевых скоростей звезд в галактике NGC 2950: (а) – поле дисперсии скоростей, (б) – радиальная зависимость позиционного угла максимума 2-й гармоника в Фурье-спектре σ_* , (в) – средняя амплитуда гармоник Фурье-спектра σ_* .

персии скоростей в распределении σ_* крайне немногочисленны. Серия работ Корменди (1982, 1983) представляет собой пример наиболее последовательного подхода к проблеме изучения анизотропии дисперсии скоростей в галактиках с перемычками. Большинство же авторов ограничивается измерением σ_* вдоль одного-двух направлений щели спектрографа. Двухмерные карты σ_* , используемые в настоящей работе, значительно более информативны. На рис. 4.1 (а) показаны изолинии распределения σ_* в центре NGC 2950, которые образуют вытянутую структуру, несимметричную относительно линии узлов. Другие примеры наблюдаемых распределений σ_* приведены в Приложении А на рисунках А.1-А.13.

Для количественного описания отклонения распределения σ_* от осесимметричного в работе Моисеева (2002б) было предложено использовать разложение наблюдаемого поля дисперсии скоростей в ряд Фурье по позиционному углу PA :

$$\sigma_*(r, PA) = A_0(r) + \sum_{m=1}^N A_m(r) \cos(m PA + \phi_m(r)) \quad (4.1)$$

Здесь r – расстояние от центра в картинной плоскости, A_m , ϕ_m – амплитуда и фаза гармоника с номером m , а $N = 6 - 8$ – максимальное число гармоник. Применяемая методика близка к используемой Ляховичем и др. (1997) для анализа полей скоростей, но отличается от нее тем, что разложение в ряд проводится по PA , а не по азимутальному углу в плоскости галактики. Кроме того, в упомянутой статье и в последующих работах (к примеру, Фридман и др., 2001) показано, что для поля скоростей газового

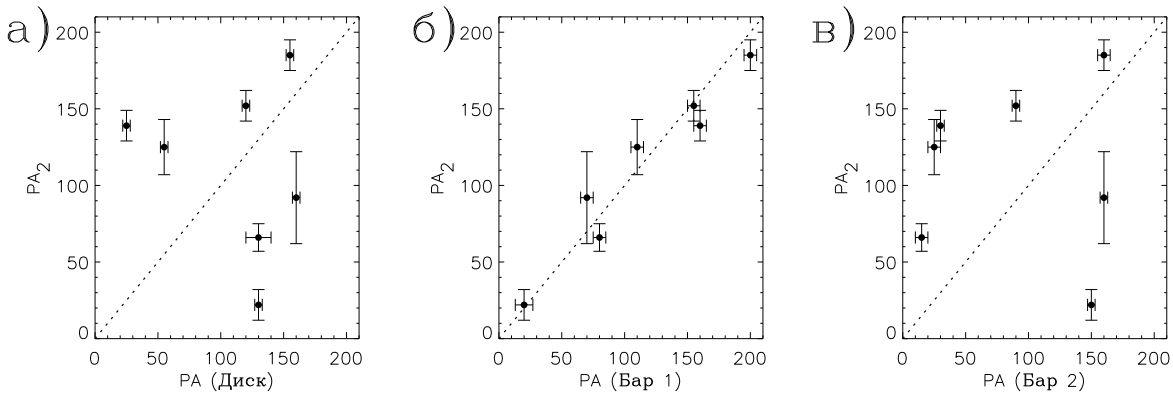


Рис. 4.2: Соотношение между позиционным углом 2-й гармоники в распределении дисперсии скоростей и позиционным углом диска (а), и обоих баров – (б), (в). Пунктир соответствует линейной зависимости.

диска спиральной галактики основные гармоники разложения связаны с пространственными компонентами вектора скорости. В случае анализа полей σ_* автор пока не может предложить столь ясную физическую интерпретацию Фурье-спектра, хотя бы потому, что в изучаемых центральных областях наблюдается суммарный вклад балджа и диска с баром. Но так как моделирование показывает, что в баре изоконтур σ_* образуют некоторую эллипсоидальную структуру, то это должно соответствовать ситуации, когда максимальную амплитуду в (4.1) имеет гармоника $m = 2$ и, возможно, последующие четные гармоники. А направление большой оси этой структуры соответствует линии максимума 2-й гармоники: $PA_2 = -\phi_2/2 \pm 180^\circ$.

Поля дисперсии скоростей разбивались на кольца с центром, совпадающим с фотометрическим центром изображения в континууме. Чтобы обеспечить достаточное количество точек в соотношении (4.1), каждый элемент изображения разбивался на четыре, размером $0.5 \times 0.5''$. Эксперименты с анализом различных изображений показали, что подобная процедура не вносит существенных искажений в спектр первых гармоник, во всяком случае для $m < 4 - 5$. Позиционный угол оси симметрии в распределении дисперсии скоростей определялся как среднее значение на зависимости PA_2 от r , при условии, что существует участок с примерно постоянным PA_2 , а 2-я гармоника доминирует в Фурье-спектре на данных r . Для NGC 2950 это диапазон радиусов $r = 1 - 5''$ (рис. 4.1б, в). Последующее изменение PA_2 на больших расстояниях связано с тем, что галактика расположена не точно по центру поля зрения MPFS (рис. 4.1а), поэтому для $r > 5''$ в поле дисперсии скоростей мало пар диаметрально противоположных точек из-за чего и нарушается спектр четных гармоник.

На изображении галактики с двойным баром можно выделить три основных направления ориентации изофот – это позиционный угол диска $PA(\text{диск})$ и позиционные углы баров $PA(\text{Бар 1})$ и $PA(\text{Бар 2})$, показанные на рис. 1 (см. Введение). В соответствии с вышеизложенными соображениями, если имеется два динамически независимых бара, то каждое из этих направлений должно являться осью симметрии в видимом распределении σ_* на соответствующей шкале расстояний. Что же реально определяет распределение дисперсии скоростей в центральной области? Для ответа на этот вопрос были рассмотрены соотношения между позиционным углом оси симметрии поля дисперсии скоростей PA_2 и этими тремя направлениями (рис. 4.2). На этом рисунке приведены данные только для тех 7-ми объектов выборки, в которых на радиусах $r = 1 - 6''$ доминирует 2-я гармоника в Фурье-спектре азимутального распределения σ_* . (NGC 470, 2273, 2681, 2950, 3945, 5566 и 5905). Видно, что в этих галактиках направление PA_2 в околоядерной области ($r < 5 - 6''$) совпадает (в пределах ошибок) только с позиционным углом внешнего бара и не связано ни с ориентацией большой оси внутреннего бара (рис. 4.2в), ни с линией узлов диска (рис. 4.2а).

Поскольку наблюдались центральные области галактик в основном ранних морфологических типов, то значительный вклад в дисперсию скоростей должны вносить звезды сферической составляющей – балджа. Но если балдж точно сферический, то он будет влиять только на амплитуду 0-й гармоники, поскольку разложение (4.1) проводится по углу в картинной плоскости. Если балдж сплюснутый, но сфероидальный, то это приведет к увеличению амплитуды 2-й гармоники, линия максимума которой должна совпадать с линией узлов диска, поскольку тип симметрии наблюдаемого распределения σ_* будет аналогичен случаю диска с другим значением видимого отношения осей. Но рис. 4.2а показывает отсутствие корреляции между PA_2 и направлением линии узлов. Если же балдж трехосный, то в проекции на картинную плоскость он будет давать поворот изофот в центральной области (Возняк и др., 1995) и будет трудно отличим от внутреннего бара. Но рис. 4.2в показывает отсутствие корреляции между направлениями оси симметрии дисперсии скоростей и позиционным углом внутренних изофот.

Итак, оказывается, что положение линии максимума 2-й гармоники в разложении поля дисперсии скоростей связано только с внешним баром. И этот крупномасштабный бар определяет динамику звездной составляющей даже в тех областях, где наблюдается поворот изофот, который приписы-

Таблица 4.1: Структура околоядерных областей галактик выборки

Name	тип некруговых движений		присутствие мини-спиралей
	звезды	газ	
NGC 470	смещение динам. центра + РДБ		–
NGC 2273	ЭПДС	РДБ	+
NGC 2681	ЭПДС	РДБ+мерджинг	–
	полярный диск на $r < 2''$		–
NGC 2950	ЭПДС	–	–
NGC 3368	РДБ	РДБ+изгиб газового диска	–
NGC 3786	РДБ	РДБ	–
NGC 3945	ЭПДС	противовращение на $r < 5''$	+
NGC 4736		РДБ + мини-спираль	+
NGC 5566	ЭПДС	–	+
NGC 5850	–	полярный диск	–
NGC 5905	ЭПДС, РДБ	РДБ	–
NGC 6951	РДБ	мини-спираль	+
NGC 7743	РДБ(?)	–	+

Обозначения:
РДБ – радиальные движения в баре
ЭПДС – эллипсоидальный пик в поле σ_*

вается второму бару.

4.2 Поля скоростей

Во всех наблюдавшихся на 6-м телескопе галактиках были обнаружены различные типы некруговых движений газового и (или) звездного компонентов, детально описанные в главе 3. В разделах 2.2 и 3.4 было показано, что в качестве основного критерия, характеризующего природу некруговых скоростей удобно использовать радиальные зависимости позиционного угла динамической оси PA_{dyn} с привлечением результатов изофотного анализа.

В качестве иллюстрации метода на рис. 4.3 приведены наиболее характерные радиальные зависимости позиционных углов динамической оси и большой оси внутренних изофот в нескольких объектах. Ориентация изофот в NGC 2950 и NGC 3786 определялась по изображениям с HST, полученным камерой WFPC2 в фильтре F814W и камерой NICMOS 1 в фильтре F160W соответственно. Изображение NGC 5850 в фильтре R взято из цифрового атласа Фрэй и др. (1996).

В таблице 4.1, построенной по результатам раздела 3.5, для каждой га-

лаптики приводятся сведения о некруговых движениях звездного и газового компонентов, а также о наличии околядерных мини-спиралей. Ниже рассматриваются все, перечисленные в таблице 4.1, типы некруговых движений.

4.2.1 Влияние бара

Звездный компонент

В NGC 2950 ориентация изофот меняется более чем на 50° (рис. 4.3а), но PA_{dyn} для звездного компонента практически совпадает с линией узлов. И ни внешний, ни внутренний бар не оказывают заметного влияния на поле скоростей звезд. Это, видимо, связано с тем, что здесь вдоль луча зрения наблюдаются как движения звезд в баре, так и вращение балджа, вклад которого в этой линзовидной галактике должен быть значителен. Низкое спектральное разрешение не позволило разделить два динамических компонента в распределении скоростей вдоль луча зрения (LOSVD), поэтому среднее поле скоростей соответствует круговому вращению. В NGC 2950 звездный компонент, связанный с внешним баром, проявляет себя в распределении дисперсии лучевых скоростей (раздел 4.1). Существование пика в распределении σ_* как раз и указывает на уширения LOSVD в области бара.

Аналогичная картина вращения звезд (отсутствие значимых отклонений PA_{dyn} от направления линии узлов) также наблюдается в NGC 2273, NGC 3945, NGC 4736, NGC 5566, NGC 5850. В полях скоростей других галактик выборки (NGC 470, NGC 2681, NGC 3368, NGC 3786, NGC 5905, NGC 6951 и NGC 7743) присутствуют значительные ($7 - 20^\circ$) отличия PA_{dyn} звезд от линии узлов внешнего диска. Причем в большинстве объектов отклонения динамической оси от линии узлов не связаны с ориентацией изофот внутреннего бара, но происходят строго в противоположном направлении по сравнению с изофотами внешнего бара. Здесь, как и в случае с дисперсией скоростей, движения звезд подчиняются влиянию внешнего бара, а не внутреннего, как это должно быть в модели независимо вращающихся баров.

Исключением являются NGC 3368 и NGC 3786 (рис. 4.3б). В их полях скоростей отклонения PA_{dyn} от линии узлов происходят в противоположную сторону по сравнению с центральными изофотами (рис. 4.3б), что указывает на динамически выделенный центральный мини-бар. Однако и здесь нельзя говорить о динамически выделенном втором баре, поскольку

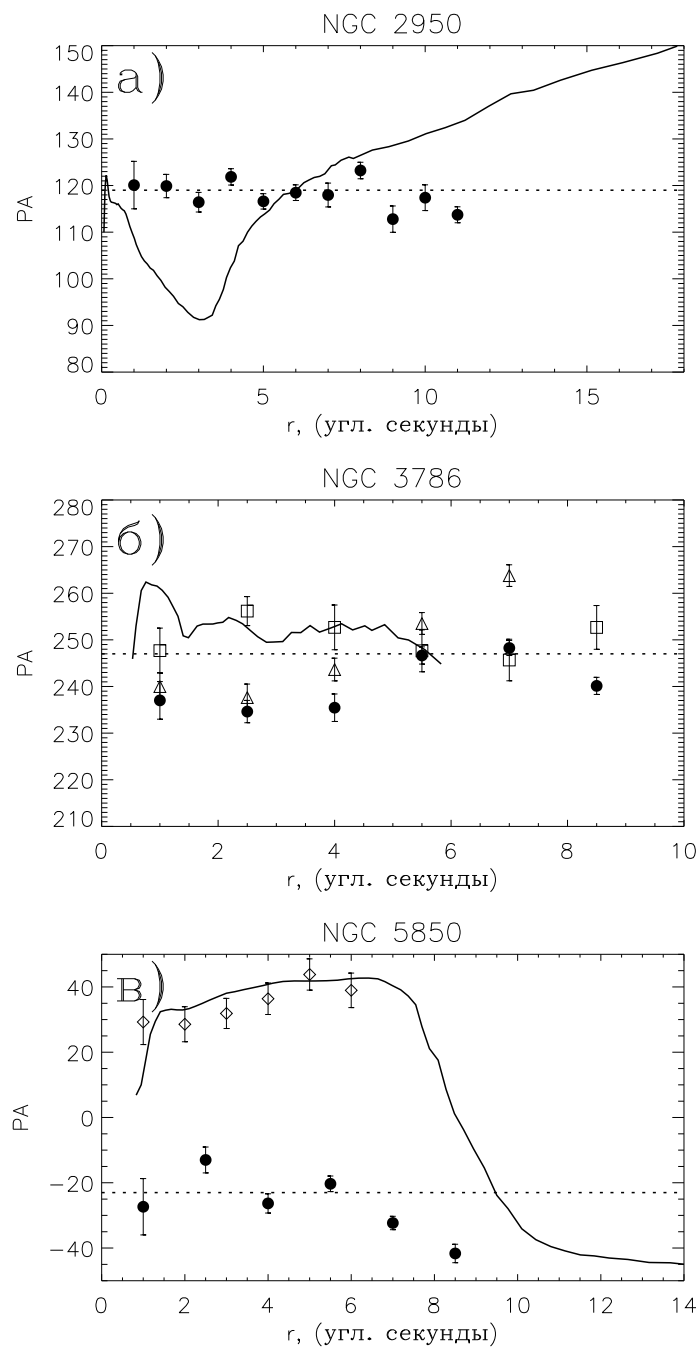


Рис. 4.3: радиальное поведение позиционного угла внутренних изофот (сплошная линия), и динамической оси, определяемой по полям скоростей звезд (точки), и ионизованного газа в линиях $H\beta$ (треугольники), [OIII] (квадратики) и [NII] (ромбики). (а) – NGC 2950, (б) – NGC 3786, и (в) – NGC 5850. Пунктиром отмечено положение линии узлов внешнего диска.

Фурье-анализ распределения поверхностной яркости показывает, что повороты изофот, интерпретируемые предыдущими исследователями как бар, на самом деле вызваны двухрукавной спиральной структурой, отходящей от мини-бара (см. разделы 3.5.6, 3.5.7 и рис. 4.4а).

Ионизованный газ

Во всех галактиках выборки, в которых наблюдались достаточно яркие эмиссии, измеренный по полям скоростей ионизованного газа угол PA_{dyn} не совпадает с линией узлов внешнего диска, что указывает на присутствие некруговых движений в области центрального килопарсека. При этом везде наблюдается различие в кинематическом поведении газовой и звездной подсистем. Дисперсия скоростей у звезд обычно значительно выше, чем у подсистемы газовых облаков, поэтому наблюдаемые кривые вращения звезд в большинстве галактик имеют меньшую амплитуду (см. Засов, 1993). Отклонения PA_{dyn} от линии узлов, связанные с крупномасштабным баром (или мини-баром в NGC 3368 и NGC 3786) в полях скоростей газа обычно имеют большую величину и заметны даже в тех галактиках, в которых звезды следуют круговому вращению (NGC 2273). Более того, поля скоростей ионизованного газа, измеренные по разрешенным (H_α , H_β) и запрещенным ([OIII], [NII]) линиям, могут заметно отличаться как по амплитуде кривых вращения так и по радиальным зависимостям PA_{dyn} (см. рис. 4.3б для случая NGC 3786).

Различия кинематики в разных линиях могут быть обусловлены несколькими причинами, но в любом случае следует признать, что здесь вдоль луча зрения наблюдается две подсистемы газовых облаков. Как уже отмечалось, в NGC 2273, NGC 6951 и NGC 7743 аномальные движения газа в линии [OIII] связаны с радиальными истечениями из активного сейфертовского ядра. А в NGC 470, NGC 3786 и NGC 5905 разный характер движения газовых облаков в разрешенных и запрещенных линиях скорее всего связан с существованием на краях бара ударных фронтов, возникающих в результате попадания газа в яму гравитационного потенциала переемычки. Природа различия лучевых скоростей в разных эмиссионных линиях лежит почти на поверхности и вытекает из современных представлений о динамике переемычек, однако, к немалому удивлению автора, этот эффект практически не описан в литературе, за исключением буквально нескольких работ, сделанных на 6-м телескопе (Афанасьев и др., 1988; Афанасьев, Шаповалова, 1981 и 1996)

4.2.2 Смещение центра вращения

Как уже отмечалось, в одной из галактик (NGC 470) центр вращения газа и звезд смещен относительно фотометрического центра более чем на 600 пк ($4 - 5''$), что заведомо превосходит все возможные ошибки измерений, включая и искажения, вносимые пылевым поглощением в изображения внутренних изофот (см. раздел 3.5.2). Подобные несовпадения фотометрического и динамического центров или центров внешних и внутренних изофот (асимметричность или lopsided) – довольно часто наблюдаются в галактиках (Рихтер, Санциси, 1994). Природа этого явления может быть различной в зависимости от масштабов возмущений, начиная от околоядерного диска, прецессирующего вокруг сверхмассивной черной дыры, и кончая развитием спирального возмущения с модой $m = 1$ в крупномасштабном звездно-газовом диске (Джункуе, Комб, 1996). Выше в разделе 3.5.2. говорилось о том, что подобное возмущение могло быть вызвано приливным воздействием компаньона.

Но с другой стороны, масштабы возмущенной области невелики – она целиком находится внутри крупномасштабного бара. Поэтому более вероятно другое объяснение смещения центра вращения, непосредственно связанное с баром. Как указывают Засов и Хоперсков (2002) на определенных этапах эволюции галактик с перемычками может наблюдаться аномальное развитие развитие асимметричной гармонике в распределении поверхностной плотности, приводящее к эффекту смещения центра изофот относительно центра вращения.

4.2.3 Противовращение газа и звезд

В одной из галактик – NGC 3945 нами был обнаружен околоядерный ($r < 500$ пк) диск ионизованного газа, вращающийся в противоположную сторону относительно звездного компонента (раздел 3.5.8). Согласно Куикен и др. (1996) газовые диски в линзовидных (S0) галактиках демонстрируют эффект противовращения относительно звезд в $24 \pm 8\%$ случаев¹. Таким образом, противовращение представляет из себя достаточно распространенное явление в галактиках ранних типов. Поэтому не должен сильно удивлять факт противовращения газа в центре NGC 3945 – одной из четырех S0-галактик в рассматриваемой выборке (таб. 1), в трех из которых (NGC 2681, NGC 3945 и NGC 7743) наблюдаются диски ионизованного га-

¹Здесь и далее ошибки даны на уровне 1σ биномиального распределения.

за. Феномен противовращения газа и звезд обычно связывают с падением на диск галактики внешнего газового облака с соответствующим направлением момента вращения (Бертола и др., 1992).

4.2.4 Полярные околядерные диски

Анализ радиальных изменений PA_{dyn} позволил обнаружить околядерные полярные диски (вращающиеся в ортогональной к основному диску плоскости) в двух галактиках NGC 2681 и NGC 5850. Основным критерием отбора являлись значительные (более чем на 50°) отклонения PA_{dyn} в ту же сторону от направления линии узлов, что и PA внутренних изофот (рис. 4.3в). Более подробная аргументация того, что мы имеем дело именно с полярными дисками уже приводилась в разделах 3.5.4 и 3.5.11. Каково же происхождение этих дисков?

Возникновения компактного ($r < 80$ пк) звездно-газового диска в центре NGC 2681, по-видимому, обусловлено внешними причинами – поглощением галактикой карликового спутника. Тем более, что последствия этого события прослеживаются и по другим признакам, таким как возмущенный газопылевой диск килопарсекового размера, недавняя вспышка звездообразования (раздел 3.5.4).

Аналогично, возникновение более протяженного ($r \approx 1$ кпк) газового полярного диска в NGC 5850 могло быть вызвано внешними причинами. Газ мог перейти на полярные орбиты в результате столкновения галактик или поглощения спутника. Действительно, согласно Хигдон и др. (1998) NGC 5850 испытала сравнительно недавнее столкновение с близкой галактикой NGC 5846. В результате этого взаимодействия часть газовых облаков могла перейти на полярные орбиты. Но с другой стороны, NGC 5846 – эллиптическая галактика и сомнительно, что она до столкновения содержала необходимое количество газа, даже несмотря на то, что некоторая доля ионизованного газа в ней была обнаружена Плана и др. (1998). Кроме того, за исключением самой центральной области, газ в NGC 5850 вращается нормально, что показывают наблюдения Хигдон и др. (1998) в радиолинии нейтрального водорода.

Поэтому более вероятным представляется предположение о том, что наблюдаемый полярный диск – это собственный газ спиральной галактики NGC 5850, перешедший на полярные орбиты из-за внутренних, а не внешних причин. На эти мысли наводит пространственная ориентация поляр-

ного диска, которую трудно назвать случайной. Он расположен перпендикулярно большой оси бара, т.е. лежит вдоль его малого сечения. Примечательно, что похожие полярные мини-диски внутри крупномасштабного бара или трехосного балджа обнаружены в околядерных областях нескольких галактик, к примеру, в NGC 2841 (Сильченко и др., 1997; Афанасьев и Сильченко, 1999), NGC 6340 (Сильченко, 2000), NGC 4548 (Сильченко, 2002).

Если рассматривать бар как область с трехосным гравпотенциалом, то по аналогии с эллиптическими галактиками, газ в нем будет находиться на устойчивых орбитах, если они лежат в главных плоскостях этого эллипсоида, причем орбиты в плоскости наименьшего сечения обладают минимальным моментом вращения. Разумеется, это только качественная картина, реальная эволюция орбит газовых облаков внутри бара значительно более сложная и отличается от случая эллиптической галактики прежде всего наличием быстрого упорядоченного вращения и существованием массивного звездно-газового диска. Но, к сожалению, существующие на сегодняшний день модельные расчеты поведения газа в баре относятся в основном к двумерным газовым дискам. В то же время, для изучения возникновения полярного диска требуется решать значительно более сложную гидродинамическую задачу в трехмерном расчетном пространстве. В статье Сильченко (2002) приводятся некоторые качественные аргументы в пользу связи полярного диска и бара. Так, согласно Софю, Вакаматсу (1994), в галактиках с крупномасштабными барами, к которым относится и NGC 5850, газ, наращивая радиальную скорость движения к центру, сохраняет при этом вертикальную компоненту скорости. Это может привести к образованию околядерного полярного диска.

Остается надеяться на то, что рост количества наблюдательной информации о подобных объектах стимулирует дополнительные теоретические изыскания в этом направлении. Интересно, что газопылевой полярный мини-диск, различимый на изображениях NGC 3368 с HST, так же располагается перпендикулярно большой оси мини-бара (раздел 3.5.6), т.е. тоже относится к рассматриваемому выше классу объектов – полярным дискам внутри перемычки.

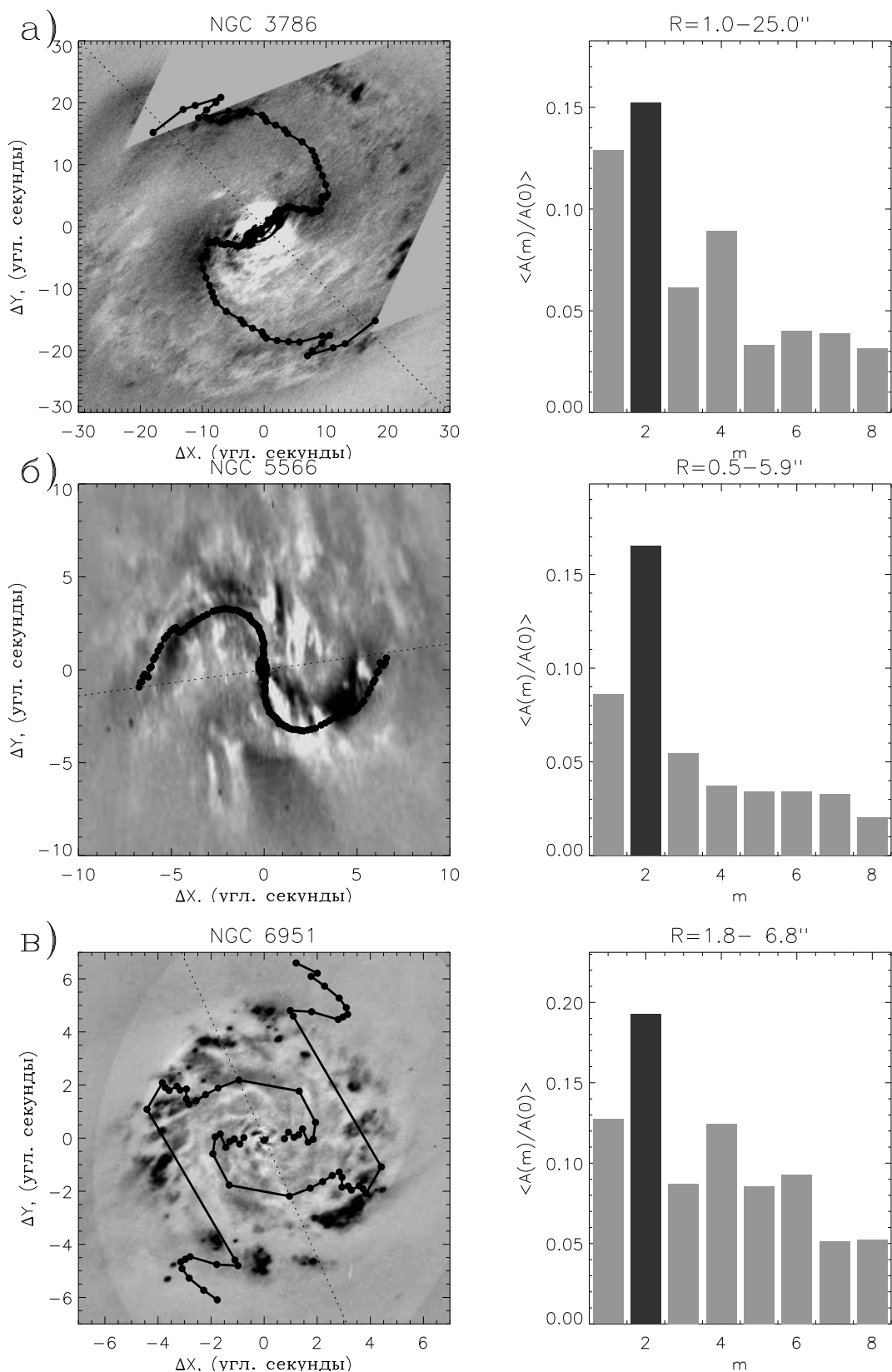


Рис. 4.4: Спиральные структуры, видимые на снимках HST (фильтр F606W). Слева – карты остаточных яркостей в плоскости галактики, с наложенными на них линиями максимума 2-й гармоники в распределении яркости. Справа – средняя амплитуда гармоник, нормированная на A_0 . Вверху указан диапазон радиусов, в котором производилось усреднение. (а) – спираль с мини-баром в NGC 3786, (б) – гранд-дизайн спираль NGC 5566, (с) – пылевая флоккулентная спираль в NGC 6951.

4.3 Мини-спирали

Неожиданным сюрпризом для автора явилось то, что в 5 из наблюдавшихся галактик на масштабах приписываемых второму бару, остаточные интенсивности по данным с Космического телескопа имеют форму небольших спиралей, размером $r < 5 - 15''$ (см таблицу 4.1). Для количественного описания обнаруженных спиралей применялся Фурье-анализ азимутального распределения яркости. Исходные изображения на каждом радиусе раскладывались в ряд согласно (3.1). Полученный фурье-спектр позволяет определить как число рукавов основной спиральной гармоник, так и положение линии ее максимальной амплитуды. Примеры мини-спиралей, их остаточные яркости и средняя амплитуда гармоник в трех галактиках показаны на рис. 4.4.

Особенности применения Фурье-анализа яркости удобно рассмотреть на примере NGC 3786. Здесь линия максимума гармоник $m=2$ на $r < 5 - 6''$ имеет постоянный азимутальный угол, что является дополнительным подтверждением существования мини-бара, динамические проявления которого описаны в разделе 3.5.7. На больших расстояниях от центра эта линия закручивается в правильную спираль, на $r = 20 - 30''$ совпадающую с глобальным двухрукавным узором в диске галактике. В Фурье-спектре доминирует 2-я гармоника, к ней близка по амплитуде гармоника $m=1$ (рис. 4.4а). Большая относительная амплитуда 1-й гармоник объясняется асимметрией в видимом распределении пылевых прожилок, большая часть которых расположена на ближней к наблюдателю стороне диска NGC 3786. Аналогичный эффект описан Фридманом, Хоружим (2000) которые анализировали изображения NGC 157. Спирали, определяемые как максимум гармоник $m=2$, вблизи концов бара меняют направление закрутки (рис. 4.4а). Согласно Фридману, Хоружему (2000) такое поведение должно указывать на то, что бар является "медленным" (в смысле угловой скорости твердотельного вращения).

Три из изученных мини-спиралей уже описаны в литературе, это псевдокольцо в NGC 2273 (Ферро и др., 2000), флоккулентные спирали в NGC 4736 (Элмегрин и др., 2002) и в NGC 6951 (Перез и др., 2000). Найдены и две новые околядерные спирали – двухрукавная спираль в NGC 5566 и трехрукавная – в NGC 7743. Ряд авторов (ссылки в таблице 3.1) указывали на наличие второго внутреннего бара в этих галактиках на основании результатов применения изофотного анализа изображений. Внутри бара линия максимума основной азимутальной гармоник $m=2$ должна быть вытяну-

та вдоль соответствующего постоянного азимута. Но в NGC 5566 эта линия закручена в спираль, идущую практически от самого центра и совпадающую с максимумом остаточных интенсивностей (рис. 4.4б). Т.е. здесь расположена мини-спираль, а не внутренний бар. Причем сама спираль, показанная на рис. 4.4б, находится внутри крупномасштабного бара с размером большой полуоси около $30''$ (~ 3 кпк).

В разделе 3.5.13 уже описывалась пылевая спираль внутри кольца звездообразования в баре NGC 6951. Гармоника $m=2$ является основной в Фурье-спектре внутри этого кольца, но, в отличие от NGC 3786 и NGC 5566, линия ее максимума состоит из отдельных обрывков спиралей, что верно и для более высоких гармоник, имеющих, однако, достаточно высокую амплитуду (рис. 4.4в). Если провести аналогию с общепринятой классификацией крупномасштабных спиральных рукавов, то в NGC 3786 и NGC 5566 наблюдается гранд-дизайн, а в NGC 6951 и в NGC 4736 – флоккулентные спирали. Но мини-спираль в NGC 6951 отличается от крупномасштабных спиралей в дисках галактик тем, что видимая в распределении остаточных интенсивностей (рис. 4.4в) многорукавная спираль связана только с распределением газопылевой материи, а не со звездным компонентом (см. раздел 3.5.13). Выше уже отмечался тот факт, что в полях скоростей газа в NGC 4736 и NGC 6951 обнаруживаются некруговые движения (отклонения PA_{dyn} от линии узлов) связанные с мини-спиралями в этих галактиках.

Интересно посмотреть, насколько часто мини-спирали встречаются во всех галактиках, классифицируемых как объекты с возможными двойными барами. Оказалось, что из 94 галактик представленных в таблице 3.1, 19 обладают внутренними мини-спиральными структурами, которые уже описаны в литературе и, как правило, расположены там, где другие авторы находили внутренние бары по поворотам изофот! Кроме того, используя изображения с высоким пространственным разрешением из архива HST, мы обнаружили еще 14 мини-спиралей в околядерных областях галактик ESO 323-77, NGC 1317, NGC 1433, NGC 1512, NGC 4274, NGC 4303, NGC 4593, NGC 4750, NGC 5383, NGC 5566, NGC 6782, NGC 7742, NGC 7743.

Несколько примеров подобных образований внутри крупномасштабных баров показаны на рис. 4.5. Таким образом, не менее $35 \pm 5\%$ всех кандидатов в двойные бары содержат мини-спиральные структуры. А поскольку для 20 галактик не удалось найти изображений с достаточно высоким пространственным разрешением, то доля внутренних спиралей может быть увеличена до $45 \pm 6\%$.

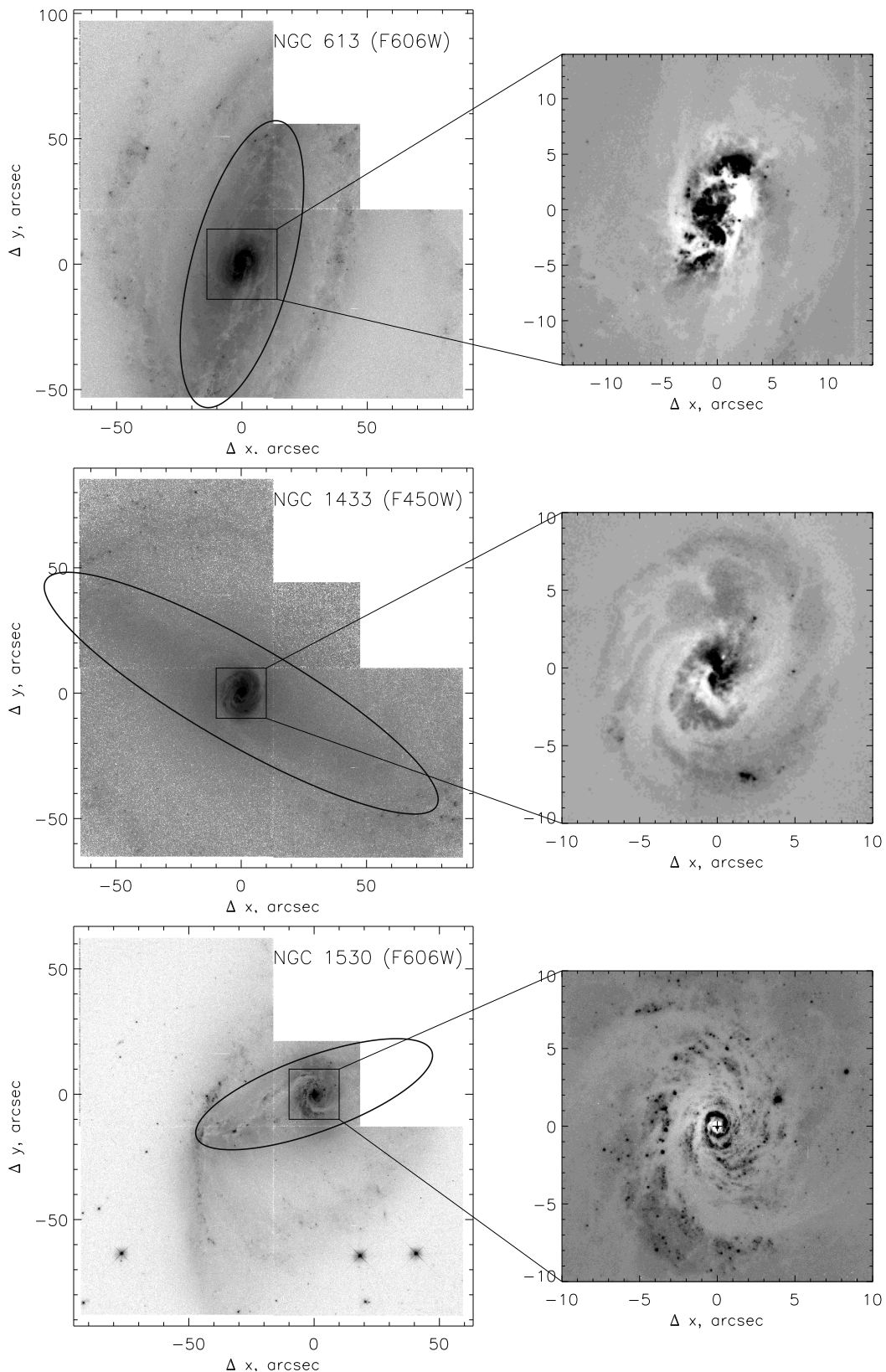


Рис. 4.5: Примеры мини-спиральных структур внутри крупномасштабных баров. Слева – изображения из архива Космического Телескопа полученные камерой WFPC/2. Черным эллипсом схематично показано расположение бара. Справа – увеличенные изображения центральных областей галактик из которых вычтен средний профиль поверхностной яркости.

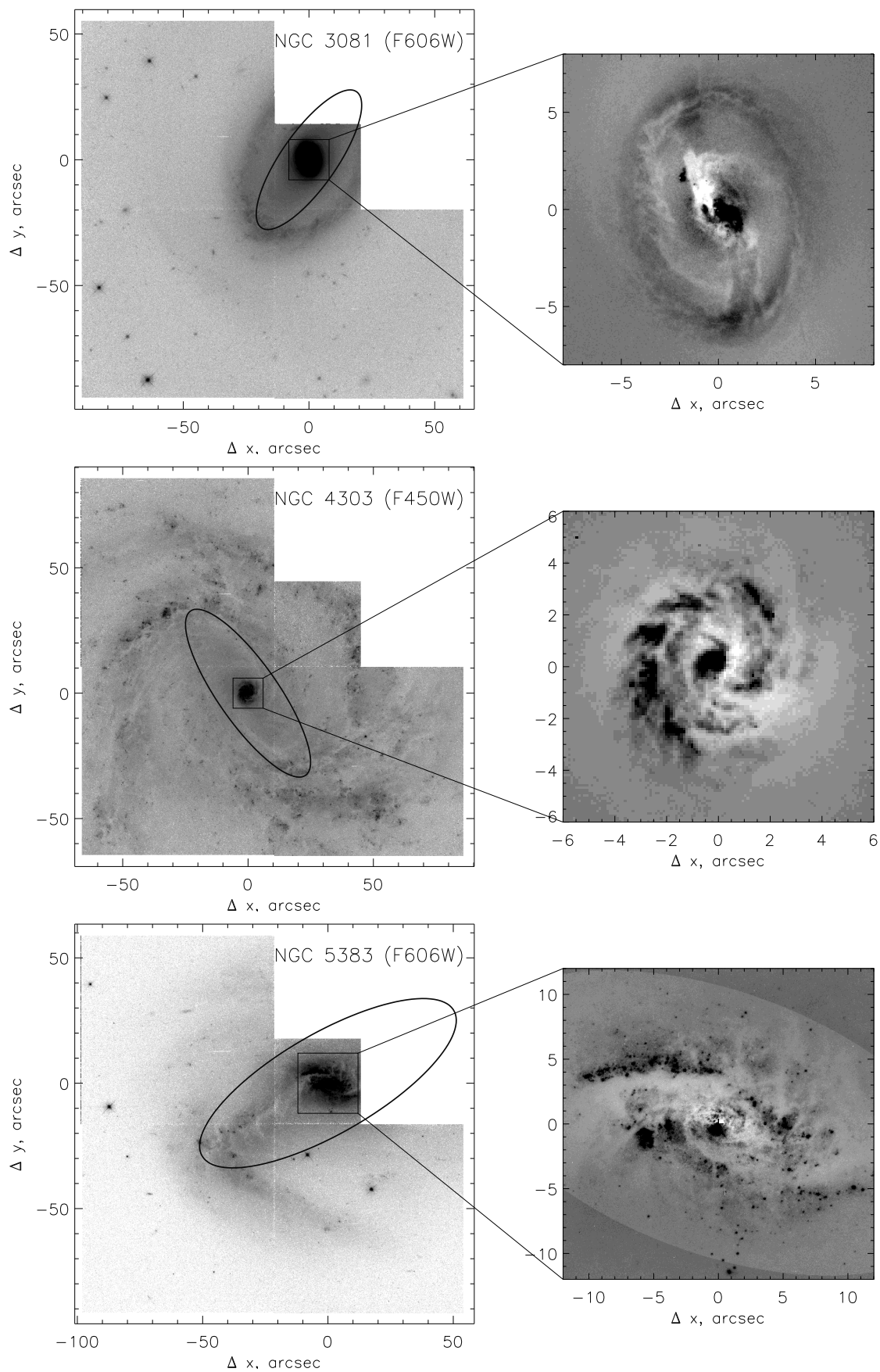


Рис. 4.5: Продолжение

В настоящее время мини-спирали (ядерные спирали размером несколько сотен парсек) обнаружены в околядерных областях многих галактик в результате наблюдений на Космическом телескопе (Каролло и др., 1998; Реган, Мульчи, 1999) и на наземных инструментах (Лайне и др, 2001; Сченнер и др., 2002). Вопрос о природе таких спиралей остается пока открытым, рассматривается по меньшей мере три механизма их возникновения. Во-первых, спирали в околядерных мини-дисках могут расти в результате гравитационной неустойчивости подобно спиральным волнам плотности в галактических дисках. Во-вторых, они могут генерироваться внешним спиральным узором или баром, т.е. являться продолжением глобального спирального узора к центру, за границу внутреннего резонанса ILR (Энглмайер, Шлосман, 2000). В-третьих, околядерные спирали могут расти в результате акустической неустойчивости во внутреннем диске (Элмегрин и др, 1998). В последнем случае должны возникать многорукавные иррегулярные спирали.

Столь большой процент внутренних спиралей, которыми обладает почти каждая вторая галактика в таблице 3.1, однозначно указывает на связь таких спиралей с барами. Довольно странно, что эта сторона проблемы образования мини-спиралей довольно скупо обсуждалась теоретиками, за исключением работы Энглмайера, Шлосмана (2000). Эти авторы показали, что при определенных условиях, внутри бара может возникать газовая двухрукавная спираль, идущая практически до самого ядра. Интересно, что форма спиралей, обнаруженных нами в NGC 5383 (рис. 4.5) и в NGC 5566 (рис. 4.4в), очень напоминает очертания спиралей внутри баров, полученные в модельных расчетах Энглмайера и Шлосмана (2000).

В то же время, большинство рассмотренных нами мини-спиралей больше напоминают вышеописанные структуры в NGC 4736 и NGC 6951. Они представляют из себя многорукавные тугозакрученные спирали с многочисленными пылевыми прожилками (см. NGC 613, NGC 1433, NGC 4303 на рис 4.5). Автору представляется, что связь таких спиралей с барами может объясняться достаточно просто. Как уже многократно отмечалось, бар способствует концентрации газа внутри области ILR (если кривая вращения имеет соответствующую форму), так что в центре образуется газопылевой диск размером несколько сотен парсек. И уже в этом диске срабатывает акустическая либо гравитационная неустойчивость, приводящая к образованию спиральной структуры. В работе Корчагина и др. (2003) показано, что если диск имеет достаточно малую дисперсию скоростей (газопылевой диск в сравнении с "горячим" звездным), то в нем с большей вероятностью

будут возникать именно многорукавные спирали.

В пользу того, что идет речь именно о газопылевых, а не звездных спиралях, говорят следующие наблюдательные данные о двух наиболее исследованных нами многорукавных мини-спиралях в NGC 4736 и NGC 6951:

1. Спирали хорошо различимы в оптике, но практически исчезают на изображениях в ближнем ИК, где мало влияние пылевого поглощения, но велик вклад от старого звездного населения
2. Поля скоростей звезд в мини-спиралях не показывают заметных отличий от кругового вращения
3. В области мини-спиралей в полях скоростей ионизованного газа присутствуют некруговые движения

Представляется, что вышеперечисленные аргументы указывают на то, что хотя бы некоторые из известных мини-спиралей, а именно спирали внутри баров, являются динамически выделенными структурами, своим происхождением обязанные концентрации газа внутри перемычек.

4.4 Остальные кандидаты в галактики с двойными барами

Итак, среди тех галактик, которые детально исследовались в данной работе, не обнаружено доказательств существования двойных баров. Большое же количество разного рода пекулярностей среди этих 13 объектов (мини-спирали, полярные диски и пр.) видимо связано с эффектом селекции. Действительно, кандидатами в галактики с двойными барами традиционно ("по определению") считались объекты со сложной формой центральных изофот. Возникает следующий вопрос: "Можно ли, используя опубликованные параметры внутренних баров понять насколько реальны подобные структуры и не являются ли они плодом ошибочной интерпретации наблюдаемых фотометрических характеристик галактик?"

Некоторые авторы (Фридли и др., 1996; Лайне и др., 2002; Эрвин, Спарк, 2002) пытались найти хоть какие-нибудь статистически значимые соотношения между фотометрическими характеристиками двойных баров, такими как размер большой оси, сплюснутость, угол между обоими барами.

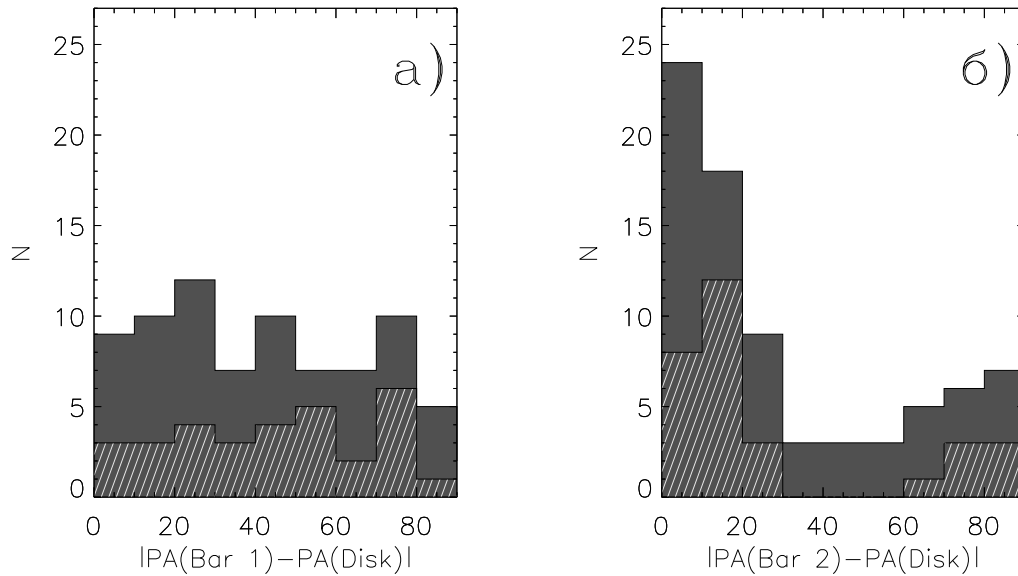


Рис. 4.6: Гистограммы распределения галактик по позиционному углу между линией узлов и Баром 1 (а) и Баром 2 (б). Серым цветом показаны все галактики-кандидаты в объекты с двойными барами (таблица 3.1), штриховкой – только галактик с центральными мини-спиралями.

Полученные результаты можно сформулировать следующим образом. Во-первых, внутренний бар в 5-7 раз меньше внешнего, а во-вторых, угол между ними может быть любым.

Но все авторы предполагали, что они действительно имеют дело с реальной пространственной структурой галактик. Если же внутренний бар – иллюзия, вызванная особенностями проекции тела галактики на картинную плоскость, то должна быть зависимость между параметрами "баров" и параметрами характеризующими проекцию галактики как целого. В качестве этого параметра удобно использовать позиционный угол больших осей баров внешних изофот диска (линии узлов).

На рис. 4.6 приводятся гистограммы распределения всех галактик из таблицы 3.1 по наблюдаемым углам между линией узлов и каждым из баров ($|PA_1 - PA_d|$ и $|PA_2 - PA_d|$). Из рис. 4.6а следует, что наблюдаемый угол между большой осью галактики и изофотами внешнего бара действительно может быть любым. Поскольку изучаемые галактики обладают умеренным наклоном дисков к лучу зрения ($i < 50 - 60^\circ$), то такое распределение наблюдаемых позиционных углов отражает тот факт, что выделяемые по изофотам крупномасштабные бары в большинстве представляют из себя реальные физические объекты в галактиках, случайным

образом повернутые к наблюдателю.

Совершенно иная ситуация с позиционным углом внутренних изофот, который интерпретируют как независимый внутренний бар. На рис. 4.6б заметен четкий максимум вблизи нулевого значения угла. Другими словами, из 79 галактик с известными значениями PA_2 больше чем у половины объектов (у 42-х) позиционный угол внутреннего "бара" совпадает с линией узлов с точностью лучше 20° . Такое соотношение никак не может быть случайным, особенно если учесть те трудности с определением величины позиционного угла линии узлов о которых уже говорилось в разделе 3.4. С учетом того, что, как показывает практика, точные PA_d могут на $10 - 20^\circ$ отличаться от опубликованных (раздел 3.5), получаем, что в половине всех галактик "со вторым внутренним баром изофоты этого "внутреннего бара" вытянуты вдоль линии узлов диска. Такое совпадение никак нельзя назвать случайным.

Чтобы объяснить факт совпадения позиционных углов бара и диска не требуется привлечения гипотезы второго бара. Такое поведение изофот сразу объясняется более "естественными" причинами, такими как сплюснутый сфероидальный (даже не трехосный) балдж, поверхностная яркость которого в околядерной области превалирует над внешним баром, или же выделенный диск внутри резонанса ILR это бара.

Следует заметить, что среди изученных на 6-м телескопе галактик есть несколько объектов, ориентация внутренних изофот которых совпадает с линией узлов (NGC 470, NGC 2273, NGC 3945, NGC 5566, NGC 5905). И ни в одной из этих галактик не было обнаружено динамически выделенного второго бара. Тот факт, что авторы многочисленных статей по фотометрии галактик с перемычками не использовали информацию о внешних изофотах при выделении "вторых баров" вызывает искреннее удивление. Одна из возможных причин, состоит в том, что в работах, где было обнаружено наибольшее число "вторых баров" наблюдения проводились либо на камерах космического телескопа, имеющих малое поле зрения (Лайне и др., 2002), либо с Земли, но с помощью ИК-приемников (Фридли и др., 1996; Джунгвет и др., 1997; Макуез и др., 1999). В последнем случае фон неба не позволяет получить достаточно глубокие снимки внешних краев галактик за относительно небольшие экспозиции. Но почему эти авторы не обращали внимание на опубликованные другими значения PA_2 , по прежнему не понятно.

4.5 Иллюзия второго бара

Основным мотивом к проведению данного исследования являлся поиск каких-либо общих особенностей кинематического проявления структур типа "бар-в-баре с целью доказательства динамической выделенности второго бара. Казалось, что использование методов панорамной спектроскопии позволит разобраться в этом вопросе. Тем неожиданнее выглядят полученные на этом пути результаты.

Во-первых, оказалось, что вид распределения дисперсии лучевых скоростей звезд (раздел 4.1) определяется только внешней перемычкой и не зависит от относительного расположения внутренней бароподобной структуры. Во-вторых, в полях скоростей звезд наблюдаются либо некруговые движения, характерные для внешнего бара, либо хорошее согласие с круговым вращением; последнее, по-видимому, объясняется тем, что здесь вдоль луча зрения складываются движения звезд в баре и балдже (см. раздел 4.2.1). И в третьих, поля скоростей ионизованного газа везде указывают на присутствие заметных некруговых движений. Но они либо соответствуют внешнему бару (на основании анализа радиального поведения PA_{dyn}), либо связаны с внутренней спиральной структурой (NGC 6951), либо с другой индивидуальной пекулярной особенностью галактики (NGC 470, NGC 3945 и NGC 5850). Таким образом, оказывается, что видимый на изображениях галактик второй внутренний бар не влияет на наблюдаемую кинематику как газового, так и звездного компонента во всех объектах выборки.

Этот вывод находится в противоречии с практически общепринятым мнением о динамически независимом втором баре, которое основано на изучении формы изофот и модельных расчетах (глава 1). Может быть, используемые в данной работе методы и ограниченное пространственное разрешение не позволяют оценить кинематические особенности мелкомасштабного внутреннего бара? Но это не так, поскольку мини-бары в NGC 3368 и NGC 3786 по своим видимым размерам не отличаются от вторых баров в остальных наблюдавшихся галактиках, но связанные с ними особенности некругового движения газа и звезд уверенно обнаруживаются. При этом фотометрический анализ указывает на отсутствие внешнего бара в этих двух галактиках.

Отдельно следует рассмотреть три галактики с наиболее пекулярными особенностями в наблюдаемых движениях газа. Развитие асимметричной моды $m=1$ внутри бара NGC 470 и полярные диски в NGC 2681, NGC 3368 и NGC 5850 являются хотя и достаточно редкими явлениями, но все же

они наблюдаются рядом авторов и в других объектах, о чем говорилось в разделе 4.2.

Не удивляет и присутствие мини-спиралей в некоторых галактиках. Так Эрвин, Спарк (2002) обнаружили, что в их выборке галактик с перемычками раннего типа (S0-Sa) содержится $24 \pm 7\%$ объектов с околядерными мини-спиральями, что значительно меньше, чем $35 - 45\%$ в изучаемой выборке (раздел 4.3). Это различие частоты встречаемости мини-спиралей легко объясняется эффектом селекции в выборке галактик с внутренним поворотом изофот. Внутренние спирали искажают центральные изофоты, что может привести к ошибочному заключению о присутствии второго бара.

Основываясь на исследованиях детальной кинематики газа и звезд в галактиках рассматриваемой выборки, можно сделать заключение, что так называемые "галактики с двойными барами" не являются отдельным типом галактик, а представляют собой объединение объектов с существенно различной структурой околядерных областей. И формальное применение изофотного анализа изображений к изучению галактик без привлечения кинематических данных, может приводить к неправильным выводам. Автор считает, что описанные в литературе случаи "галактик с двойными барами" можно условно разделить на три основных класса. К первому относятся галактики ранних типов S0-Sa. Иллюзия второго бара здесь связана со сплюснутой или даже с трехосной формой балджа. Такой балдж в проекции на картинную плоскость будет создавать картину вытянутых изофот. Но в отличие от бара, который является частью галактического диска, трехосный балдж оказывает значительно меньшее влияние на движение газа и звезд в диске. Характерный пример – NGC 2950. Ко второму классу относятся галактики более поздних типов. Здесь внутри крупномасштабных баров могут наблюдаться выделенные газопылевые диски с мини-спиральной структурой, искажающей форму изофот. Характерный пример – NGC 6951. Возможно и третье объяснение наблюдаемой формы изофот. Модельные расчеты показывают, что внутри крупномасштабного бара может существовать так называемое x_2 -семейство устойчивых орбит (Контонпулус, Гросбол, 1989), ориентированных перпендикулярно к большой оси бара. На основе этих орбит может сформироваться бароподобная структура, строго перпендикулярная основному бару и соответствующим образом искажающая наблюдаемые изофоты. Возможность образования такой структуры доказывается и в недавней статье Скокос и др. (2002), посвященной изучению пространственных (трехмерных) орбит звезд в баре. По-

добная же модель была предложена Петипа, Вилсон (2002) для NGC 2273. Однако в этом случае нет выделенного второго бара, а есть некоторая деталь внутренней структуры большого бара, вращающаяся с ним как единое целое.

Предлагаемый автором отказ от традиционного представления о динамически независимых двойных барах позволяет разрешить целый ряд противоречий между существующими моделями вложенных баров и результатами наблюдений.

Во-первых, становится понятным результат раздела 2.3.3 – при определенных начальных условиях второй бар может сформироваться внутри звездной перемишки, но практически сразу распадается. И этот результат вовсе не противоречит многочисленным расчетам долгоживущих внутренних баров, получаемых другими авторами! Дело в том, что практически все цитированные в разделе 3.1 работы по численному моделированию (Мачиевски, Спарк, 2000; Хеллер и др., 2001; Мачиевски и др., 2002) страдают существенным недостатком. В модели *априори* закладывается информация о двух независимых барах. Создается парадоксальная ситуация, когда на выходе моделирования получают то, что собственно изначально и хотели получить. В то же время, Фридли, Мартине (1993) отмечали, что в их самосогласованном трехмерном моделировании не удавалось получить долгоживущие чисто звездные вторые бары – требовалось добавить в модель диссипативный компонент (массивный газовый диск). Но это, в свою очередь, противоречит наблюдениям, так как структуры, похожие на вторые бары находят в основном в галактиках ранних типов бедных газом. Таким образом, критический анализ результатов модельных расчетов показывает, что получить стабильный долгоживущий второй бар в моделях реальных галактик – не удастся.

Во-вторых, находит объяснение тот факт, что согласно статистическим данным, фотометрический "второй бар" никак не связан с присутствием в галактике активного ядра (Лайне и др. 2002; Эрвин, Спарк, 2002), хотя из теоретических соображений корреляция здесь должна быть значительно более тесная, чем для "одинарных" баров. Ответом вновь является то, что "второй бар обнаруживающийся по изменению формы изофот, вообще не является динамически выделенной структурой в галактике.

Основные выводы главы 4

1. Анализ распределений дисперсии лучевых скоростей звезд показывает, что только крупномасштабный бар определяет динамику звездной составляющей даже в тех областях, где наблюдается поворот изофот, который приписывается второму бару.
2. В полях скоростей звезд и ионизованного газа в выборке кандидатов в галактики с двойными барами не удалось обнаружить влияние динамически независимого второго бара
3. Около половины всех кандидатов в галактики с двойными барами содержат внутри крупномасштабного бара газопылевую мини-спираль, размером несколько сотен парсек. Предложен механизм, объясняющий связь баров с этими спиральями.
4. Показано, что "второй бар обнаруживающийся по изменению формы внутренних изофот на изображениях галактик, не является реальной динамически выделенной галактической подсистемой.

Заключение

"... уродливые факты убивают красивые гипотезы..."

(Т. Гексли)

По мнению автора, одной из основных проблем наблюдательной внегалактической астрономии, в отличие от, скажем, исследований Солнечной системы или даже нашей Галактики, является невозможность увидеть изучаемые объекты "в объеме". Действительно, мы видим только двухмерную проекцию трехмерных галактик на картинную плоскость. Аналогичная ситуация и с измерением скоростей – поскольку внутренние собственные движения чрезвычайно малы, то измерениям доступна только проекция скоростей звезд и газовых облаков на луч зрения. И что бы представить себе реальное пространственное строение галактики, нам приходится "додумывать" его, исходя из тех или иных моделей. Поэтому и возникает ряд неопределенностей при изучении строения столь сложных объектов к которым относятся и галактики с перемычками. Проблема так называемых "двойных баров" — яркий пример такого рода неопределенности. В данной работе мы постарались показать, что только использование максимально возможного количества доступной наблюдательной информации, прежде всего, двухмерных распределений лучевых скоростей и дисперсии скоростей позволяет разобраться с пространственной структурой галактик с перемычками.

Кратко перечислим основные результаты, полученные в данной работе.

1. Изготовлен новый многорежимный спектрограф 6-м телескопа SCORPIO, в 4-5 раз превосходящий по эффективности существующие отечественные приборы этого класса и сравнимый с лучшими мировыми аналогами.
2. Исследованы возможности прибора SCORPIO при наблюдениях со сканирующим интерферометром Фабри-Перо. Детально рассмотрены различные источники ошибок измерения лучевых скоростей при подоб-

ных наблюдениях. Разработан пакет программ, позволяющий корректно учесть влияние атмосферы при таких наблюдениях с ПЗС в качестве детектора и этим существенно повысить точность измерения лучевых скоростей.

3. Исследованы возможности спектрографа MPFS для изучения движений звездного компонента галактик. Разработана методика учета вариации аппаратного контура по полю, позволяющая уверенно строить двухмерные карты дисперсии скоростей. Написан пакет программ для построения карт лучевых скоростей и дисперсии скоростей звезд в галактиках.
4. На основе анализа результатов нелинейного численного моделирования течений газа в баре показано, что использование формальной модели движений по круговым орбитам при анализе поля скоростей может привести к неверному выводу о присутствии наклонного диска в центре галактики. Только сравнение взаимных ориентаций фотометрической и динамической осей позволяет отличить бар от наклонного диска.
5. На основе результатов динамического моделирования методом N-тел, построены карты распределения дисперсии скоростей вдоль луча зрения для различных взаимных ориентации диска и бара. В большинстве случаев на картах дисперсии лучевых скоростей четко выделяются вытянутые образования, симметричные относительно большой оси бара.
6. Проведена панорамная спектроскопия выборки объектов – кандидатов в галактики с двойными барами. Использование этого материала, вместе с данными оптической и ИК поверхностной фотометрии позволило обнаружить и изучить различные типы некруговых движений звезд и ионизованного газа, связанные как с крупномасштабным баром так и с другими особенностями структуры отдельных галактик на масштабе центрального килопарсека, такими как полярные мини-диски, противовращающийся газовый диск, мини-спиральные структуры.
7. В полях скоростей звезд и ионизованного газа и в полях дисперсии лучевых скоростей звезд в галактиках рассматриваемой выборки не удалось обнаружить влияния динамически независимого второго внутреннего бара. Оказалось, что только крупномасштабный бар определяет движение звездной и газовой подсистем даже в тех областях, где наблюдается поворот изофот, который приписывается второму бару.

8. Около половины всех кандидатов в галактики с двойными барами содержат внутри крупномасштабного бара газо-пылевую мини-спираль, размером несколько сотен парсек. Предложен механизм, объясняющий связь баров с этими спиральями.
9. Показано, что "второй бар обнаруживающийся по изменению формы внутренних изофот на изображениях галактик, не является реальной, динамически выделенной галактической подсистемой.

И в заключение, необходимо заметить следующее. Когда в 1999 г. мы решили наблюдательно исследовать движения газа и звезд в галактиках с "двойными барами нам казалось, что подтвердить общепринятую модель строения таких галактик достаточно просто – надо только получить двумерные распределения лучевых скоростей и их дисперсии. Эти данные мы надеялись использовать для построения согласованной модели поступления газа в область "центральной машины" активных галактик. Однако в результате проделанной работы оказалось, что, так называемый "второй бар не может претендовать на роль "транспортера" газа к активному галактическому ядру.

Благодарности

Автор считает приятным долгом поблагодарить своего научного руководителя **В.Л. Афанасьева** за помощь и постоянный интерес к данной работе, а также за ту свободу действий, наблюдений и интерпретаций, которой автор пользовался на протяжении всего времени работы над диссертацией. Кроме того, все наблюдения на 6-м телескопе, описываемые в диссертации, выполнялись на приборах, в проектировании и изготовлении которых ведущая роль принадлежала В.Л. Афанасьеву. В то же время, спектрограф SCORPIO не смог бы появиться на 6-м телескопе без согласованных усилий целого коллектива научных работников, инженеров и рабочих САО РАН, из которых особенно хочется поблагодарить **В.В. Веретенова, С.Н. Додонова, С.Р. Желенкова, Е.И. Перепелицына** и **В.И. Фатеева**. Автор благодарен своим коллегам из Мексики **Х.Р. Вальдесу** и **В.О. Чавушяну** получившим столь необходимый в работе наблюдательный материал в ближнем ИК диапазоне. Анализ модельных течений газа в барах проводился совместно с **В.В. Мусцевым**, всегда являвшим автору достойный пример стойкости и целеустремленности в решении поставленных перед собой задач. Описанное в работе динамическое моделирование методом

N-тел было выполнено **А.В. Хоперсковым**, с которым многократно обсуждались различные аспекты наблюдаемой морфологии галактик с перемычками. **В.И. Корчагин** обратил внимание автора на мини-спиральные образования в галактиках. Проблемы, связанные с этими околюдкерными спиральями многократно, и, хочется надеяться, с обоюдной пользой, обсуждались также с **Н.В. Орловой**. Многие спорные проблемы, возникающие при интерпретации наблюдаемых в галактиках структур, обсуждались автором с **О.К. Сильченко**. Хотя далеко не всегда автор с ней соглашался, однако своими статьями она оказала большое влияние на данную работу. Ряду полезных замечаний и дополнений автор обязан **Л.В. Шалапиной** и **А.А. Смироновой**.

Автор благодарит всех своих друзей и коллег из **САО РАН, БАО, ГАИШ, СПбГУ, КГУ** и **ВолГУ**, которые так или иначе помогали в выполнении данной работы. 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 французские базы данных **HYPERCAT** и **LEDA**. В работе использовался наблюдательный материал, полученный на **6-м телескопе** САО РАН, финансируемом Миннауки РФ (регистрационный номер 01-43) и данные **Хаббловского космического телескопа** НАСА/ЕСА, взятые из архива Института космического телескопа, управляемого Ассоциацией университетов для исследований в астрономии Inc. на основании контракта с НАСА. Работа поддерживалась грантами **РФФИ** и федеральной программой "**Астрономия**" (Проект 1.2.3.1).

Литература

- [1] Алонсо-Херреро и др. (Alongso-Herrero A., Simpson, C., Ward, M.J., Wilson, A.S.), 1998, *Astrophys. J.*, 495, 196
- [2] Амрам и др. (Amram P., Marcelin M., Bonnarel F., Boulesteix J., Afanas'ev V. L., Dodonov, S. N), 1992, *Astron. Astrophys.*, 263, 69
- [3] Арнаболди, Спарк (Arnaboldi M., Sparke L.S.), 1994, *Astron. J.*, 107, 958
- [4] Аррибас и др. (Arribas S., Mediavilla E., Fuensalida J. J.), 1998, *Astrophys. J.*, 505, L43
- [5] Аррибас, Медиавилла (Arribas S., Mediavilla E.), 2000, *Imaging the Universe in Three Dimensions*, ASP Conf., 195, 295
- [6] Атанассула (Athanassoula E.), 1992а, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 259, 328
- [7] Атанассула (Athanassoula E.), 1992б, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 259, 345
- [8] Афанасьев В.Л., Шаповалова А.И., 1981, *Астрофизика*, 17, 403
- [9] Афанасьев В.Л., Буренков А.Н., Засов А.В., Сильченко О.К., 1988, *Астрофизика*, 28, 243
- [10] Афанасьев В.Л., Леви В.В., Морозов А.Г., 1989, препринт ВолГУ, № 6-78, Волгоград
- [11] Афанасьев В.Л., Власюк В.В., Додонов С.Н., Сильченко О.К., 1990, препринт САО РАН, № 54, 1
- [12] Афанасьев и др. (Afanasiev V.L., Sil'chenko O.K., Zasov A.V.) 1992, *Astron. Astrophys.*, 213, L9
- [13] Афанасьев и др. (Afanasiev V.L., Burenkov A.N., Shapovalova A.I., Vlasyuk V.V.), 1996, *Barred Galaxies*, (ed Buta R., Crocer D., Elmegreen B.), San Francisco: ASP Con.Ser., 91, 218

- [14] Афанасьев В.Л., Шаповалова А.И., 1996, "Barred Galaxies (ed Buta R., Croser D., Elmegreen B.), San Francisco: ASP Con.Ser., 91, 221
- [15] Афанасьев и др., (Afanasiev V.L., Mikhailov V.P., Shapovalova A.I.), 1998а, *Astron. Astrophys. Trans*, 16, 257
- [16] Афанасьев В.Л., Михайлов В.П., Шаповалова А.И., 1998б, препринт САО РАН, № 136
- [17] Афанасьев, Сильченко (Afanasiev V.L., Sil'chenko O.K.), 1999, *Astron. J.*, 117, 1725
- [18] Афанасьев и др. (Afanasiev V.L., Dodonov S.N., Moiseev A.V.), 2001, *Stellar dynamics: from classic to modern*, (eds. Osipkov L.P., Nikiforov I.I., Saint Petersburg), 103
- [19] Бегеман (Begeman K.G.), 1989, *Astron. Astrophys.*, 223, 47
- [20] Бертола и др. (Bertola F., Buson L.M., Zeilinger W.W.), 1992, *Astrophys. J.*, 401, L79
- [21] Бертола и др. (Bertola F., Cinzano P., Corsini E. M., Rix H.-W., Zeilinger W.W.), 1995, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 448, L13
- [22] Блэнд и Талли (Bland J. & Tully R.B.), 1989, *AJ*, 98, 723
- [23] Блэнд-Хэсон (Bland-Hawthorn J.), 1995, *ASP Conf.Ser.*, 71, 72
- [24] Боттема (Bottema, R.), 1988, *Astron. Astrophys.*, 197, 105
- [25] Браулт и Вайт (Brault, J.W., & White O.R.), 1971, *Astron. Astrophys.*, 13, 64
- [26] Булестекс и др. (Boulesteix J., Georgelin Y., Marcelin M., Fort J.A.), 1982, in "Instrumentation for astronomy with large optical telescopes 223
- [27] Булестекс (Boulesteix J.), 2000, ADHOC manual, <http://www-obs.cnrs-mrs.fr/ADHOC/adhoc.html>
- [28] Бута (Buta R.), 1986а, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 61, 609
- [29] Бута (Buta R.), 1986б, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 61, 631
- [30] Бута (Buta R.), 1990, *Astrophys. J.*, 351, 62
- [31] Бута, Кроке (Buta R., Crocker D.A.), 1993, *Astron. J.*, 105, 1344

- [32] Бэкон и др. (Bacon R., Adam G., Baranne A., Courtes G., Dubet D. et al.), 1995, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 113, 347
- [33] Бэкон и др. (Bacon R., Copin Y., Monnet G., Miller B.W., Allingto-Smith J.R., et al.), 2001, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 326, 23
- [34] Бэмгат, Петерсон (Baumgart C.W., Peterson C.J.), 1986, *Publ. Astr. Soc. Pacific*, 98, 56
- [35] ван Дриел, Бута (van Driel W., Buta R. J.), 1993, *Astron. Astrophys.*, 245, 1991
- [36] ван Моорсел (van Moorsel G.), 1982, *Astron. Astrophys.*, 107, 66
- [37] Вега Белтран и др. (Vega Beltrañ J. C., Pizzella A., Corsini E. M., Funes J. G., Zeilinger W. W., Beckman J. E., Bertola F.), 2001, *Astron. Astrophys.*, 374, 394
- [38] Вейтзел и др. (Weitzel L., Krabbe A., Kroker H., Thatte N., Tacconi-Garman L.E., Cameron M. Genzel R.), 1996, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 119, 531
- [39] Возняк и др. (Wozniak H., Friedli D., Martinet L., Martin P., Bratschi P.), 1995, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 111, 115
- [40] Вотрен, Дейонг (Vauterin P. & Dejonghe H.), 1997, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 286, 812
- [41] Гаген-Торн, Решетников (Hagen-Thorn V.A., Reshetnikov V.P.), 1997, *Astron. Astrophys.*, 319, 430
- [42] Гарсиа-Гомес, Атанасуллой (Garcia-Gomez C., Athanassoula E.), 1991, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 89, 159
- [43] Гебхардт и др. (Gebhardt, K., Bender R., Bower, G., et al.), 2000, *Astrophys. J.*, 539, L13
- [44] Гордон и др. (Gordon S., Koribalski B., Houghton S., Jones K.), 2000, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 315, 248
- [45] Гресад и др. (Greusard D., Friedli D., Wozniak H., Martinet L., Martin P.), 2000, *Astron. Astrophys.*, 145, 425
- [46] де Вокулер (de Vaucouleurs G.), 1975, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 29, 193

- [47] Додонов С.Н., Власюк В.В., Драбек С.В., 1995, "Интерферометр Фабри-Перо. Руководство пользователя Нижний Архыз
- [48] Джевис и др. (Jarvis B.J., Dubath P., Martinet L., Bacon R.), 1988, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 74, 513
- [49] Джунгвет и др. (Jungwiert B., Combes F., Axon. D.J.), 1997, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 125, 479
- [50] Джункуе, Комб (Junquera S., Combes F.), 1996, *Astron. Astrophys.*, 312, 703
- [51] Дюваль, Моне (Duval M.F., Monnet G.), 1985, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 61, 141
- [52] Засов А.В., 1993, "Физика Галактик Москва: издательство МГУ, 68
- [53] Засов, Сильченко (Zasov A.V., Sil'chenko O.K.), 1996, *Barred Galaxies*, (eds Buta R., Crocer D., Elmegreen B.), San Francisco: ASP Con.Ser., 91, 207
- [54] Засов, Моисеев (Zasov A.V., Moiseev A.V.), 1999, "Activity in galaxies and related phenomena (Eds. Terzian Y., Khachikian E., Weedman D.), IAU Symposium 194, 279, (astro-ph/9812121)
- [55] Засов А.В., Хоперсков А.В., 2002, *Астрон. журн.*, 79, 195
- [56] Каппеллари и др. (Cappellari M., Bertola F., Burstein D., Buson L. M., Greggio L., Renzini A.), 2001, *Astrophys. J.*, 551, 197
- [57] Каролло и др. (Carollo C.M., Stiavelli M., Mack J.), 1998, *Astron. J.*, 116, 68
- [58] Кент (Kent S. M.), 1984, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 56, 105
- [59] Кнапен и др. (Knapen J.H., Shlosman I., Heller C.H., Rand R.J., Beckman J.E., Rozas M.), 2000a, *Astrophys. J.*, 528, 219
- [60] Кнапен и др. (Knapen J.H., Shlosman I., Peletier R.F.), 2000б, *Astrophys. J.*, 529, 93
- [61] Комб (Combes F.), 1994, in "The formation and Evolution of Galaxies (eds. Munoz-Tunon, C., Sanchez, F.), Cambridge

- [62] Комб (Combes F.), 2001, in "Advanced Lectures on the Starburst-AGN Connection (Eds. Aretxaga I., Kunth D, Mejica R.) Singapore: World Scientific, 2001., 223, (astro-ph/0010570)
- [63] Контопулус, Гросбол (Contopoulos G., Grosbol P.), 1989, *Astron. Astrophys.Rev.*, 1, 261
- [64] Корменди (Kormendy J.), 1982, *Astrophys. J.*, 257, 75
- [65] Корменди (Kormendy J.), 1983, *Astrophys. J.*, 275, 529
- [66] Корчагин и др. (Korchagin V., Orlova N., Kikuchi N., Miyama S.M., Moiseev A.V.), 2003, *Astrophys. J.*, (готовится к печати)
- [67] Кохно и др. (Kohno K., Kawabe R., Vila-Vilaro B.), 1999, *Astrophys. J.*, 511, 157
- [68] Круз-Гонзалес (Cruz-Gonzalez, I., Carrasco, L., Ruiz, E., Salas, L., Skrutskie, M., et al.), 1994, *Rev. Mex. Astron. Astrofis.*, 29, 197
- [69] Куикен и др. (Kuijken K., Fisher D., Merrifield M.R.), 1996, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 283, 543
- [70] Куртес Ж., 1964, в сборнике "Новые методы в астрофизике Москва, с. 131
- [71] Лайне и др. (Laine S. Knapen, J. H., Perez-Ramirez D., Englmaier P., Matthias, M.), 2001, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 324, 891
- [72] Лайне и др. (Laine S., Shlosman I., Knapen J.H., Peletier R.F.), 2002, *Astrophys. J.*, 567, 97
- [73] Ларсен и др. (Larsen N., Norgaard-Nielsen H.U., P. Kjaergaard, & Dickens R.J.), 1983, *Astron. Astrophys.*, 117, 257
- [74] Леви и др. (Levy V.V., Mustsevov V.V., Sergienko V.A.), 1994, in "Physics of the gaseous and stellar disks of the Galaxy ed. King R., San Francisco:ASP Con.Ser., 66, 93
- [75] Леви и др. (Levy V.V., Mustsevov V.V., Sergienko V.A.), 1996, *Astron. Astrophys.Trans.*, 1996, 11, P.1
- [76] Лин, Шу (Lin C.C., Shu F.H.), 1964. *Astrophys. J.*, 140, 646
- [77] Линдبلاد (Lindblad B.), 1963, *Stockholm Obs. Ann.*, 22, N 5

- [78] Линдблад и др. (Lindblad P.A.B., Lindblad P.O., Athanassoula E.), 1996, *Astron. Astrophys.*, 313, 65
- [79] Линдблад (Lindblad P.O.), 1999, *Astron. Astrophys.Rev.*, 9, 221
- [80] Линден-Белл (Linden-Bell D.), 1979, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 187, 101
- [81] Ляхович В.В., Фридман А.М., Хоружий О.В., Павлов А.И., 1997, *Астрон. журн.*, bf 74, 509
- [82] Майя и др. (Mayya Y.D., Ravindranath S, Carrasco L.), 1998, *Astron. J.*, 116, 1671
- [83] Малдер (Mulder P.S.), 1995, *Astron. Astrophys.*, 303, 57
- [84] Макуез и др. (Márquez I., Durret F., Delgado R.M.G, Marrero I., Masegosa J., Maza J., Moles M., Pérez E., Roth M.), 1999, *Astron. Astrophys.*, 140, 1
- [85] Макуез и др. (Márquez I., Durret F., Delgado R.M.G, Marrero I., Maza J., Pérez E., Roth M.), 2000, *Astron. Astrophys.*, 360, 431
- [86] Матсуда и др.(Matsuda T., Inaoue M., Sawada K., Shima E., Wakamatsu K.), 1987, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 1987, V.229, P.295
- [87] Мачиевски, Спарк (Maciejewski W., Sparke L.S.), 2000, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 313, 745
- [88] Мачиевски и др. (Maciejewski W., Teuben J., Sparke L.S., Stone, J.M.), 2002, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 329, 502
- [89] Миллер, Смит (Miller R.H., Smith B.F.), 1979, *Astrophys. J.*, 227, 785
- [90] Минковский (Minkowski R.), 1954, *Carnegie Yrb.*, 26
- [91] Моисеев А.В., 1998, препринт САО РАН, № 134, 1
- [92] Моисеев, (Moiseev A.V.), 2000, *Astron. Astrophys.*, 363, 843
- [93] Моисеев А.В., Муцевой В.В., 2000, *Письма в Астрон. журн.*, 26, 657
- [94] Моисеев и др. (Moiseev A.V., Afanasiev V.L., Dodonov S.N., Mustsevoi V.V., Khrapov S.S.), 2000, (astro-ph/006323)
- [95] Моисеев (Moiseev A.V.), 2001a, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.*, 51, 11, (astro-ph/0111219)

- [96] Моисеев (Moiseev A.V.), 2001б, Bull. Spec. Astrophys. Obs., 51, 140, (astro-ph/0111220)
- [97] Моисеев А.В., 2002а, препринт САО РАН, № 166, 1
- [98] Моисеев А.В., 2002б, препринт САО РАН, № 173, 1 (принято к печати в письма в Астрон. журн., 28)
- [99] Моисеев А.В., Валдес Х.Р., Чавушян В.О, 2002, препринт САО РАН, N 171, 1
- [100] Моне и др. (Monnet G., Bacon R., Emsellem E.), 1992, Astron. Astrophys., 253, 366
- [101] Мульчи и др. (Mulchaey J.S., Regan M.W., Kundu A.), 1997, Astrophys. J. Suppl. Ser., 110, 299
- [102] Нельсон и Вайтл (Nelson, C.H., & Whittle M.), 1995, Astrophys. J. Suppl. Ser., 99, 67
- [103] Остерброк и др. (Osterbrock D.E., Fulbright J.P., Martel A.R., Keane M.J., Trager S.C., Basri G.), 1996, Publ. Astr. Soc. Pacific, 108, 277
- [104] Острикер, Пиблз (Ostriker J.P., Peebles P.J.E.), 1973, Astrophys. J., 186, 467
- [105] Перез и др. (Pérez, E., Márquez, I., Durret F., González D.R.M., Masegosa J., Maza J., Moles M.), 2000, Astron. Astrophys., 353, 893
- [106] Петипа, Вилсон (Petitpas G.R., Wilson C.D.), 2002, Astrophys. J. (принято к печати), (astro-ph/0204413)
- [107] Писе (Pierce M.J.), 1986, Astron. J., 92, 285
- [108] Плана и др., (Plana H., Boulesteix J., Amram P., Carignan C., Mendes de Oliveira C.), 1998, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 128, 75
- [109] Поге, де Робертис (Pogge R.W., De Robertis M.M.), 1995, Astrophys. J., 451, 585
- [110] Поляченко В.Л., 1992, Астрон. журн., 69, 10
- [111] Пфеннигер, Норман (Pfenninger D., Norman C.A.), 1990, Astrophys. J., 363, 391
- [112] Реган, Мульчи (Regan M.W., Mulchaey J.S.), 1999, Astron. J., 117, 2676

- [113] Рихтер, Санциси (Richter O.-G., Sancisi R.), 1994, *Astron. Astrophys.*, 290, L9
- [114] Розас и др. (Rozas M., Relano M., Zurita A., Beckman J.E.), 2002, *Astron. Astrophys.*, 386, 42
- [115] Сайкиа и др. (Saikia D. J., Phookun B., Pedlar A., Kohno, K.), 2002, *Astron. Astrophys.*, 383, 98
- [116] Сакамото и др. (Sakamoto K., Okumura S. K., Ishizuki S., Scoville N. Z), 1999, *Astrophys. J.*, 525, 691
- [117] Саджент и др. (Sargent, W. L. W., Schechter, P. L., Boksenberg, A., & Shortridge, K.), 1977, *Astrophys. J.*, 212, 326 (SSBS)
- [118] Сильченко и др. (Sil'chenko O.K., Burenkov A.N., Vlasyuk V.V), 1997, *Astron. Astrophys.*, 326, 941
- [119] Сильченко (Sil'chenko O.K.), 2000, *Astron. J.*, 120, 741
- [120] Сильченко О.К., 2002, Письма в Астрон. журн., 28, 243
- [121] Сильченко и др. (Sil'chenko O.K., Moiseev A.V., Afanasiev V.L., Valdés J.R., Chavushan V.O.), 2003, *Astron. J.*, готовится к печати
- [122] Скокос и др., (Skokos Ch., Patsis P.A., Athanassoula E.), 2002, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 333, 861
- [123] Софю и др. (Sofue, Y., Wakamatsu K.I., Taniguchi Y., Nakai N.), 1993, *PASJ*, 45, 43
- [124] Софю, Вакаматсу (Sofue, Y., Wakamatsu K.I.), 1994, *Astron. J.*, 107, 1018
- [125] Сэлвуд, Вилкинсон (Selwood J.A., Wilkinson A.), 1993, *Rep.Prog.Phys.*, 56, 173
- [126] Талли (Tully B.R.), 1974, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 27, 415
- [127] Танигучи и др. (Taniguchi Y., Murayama T., Nakai N., Suzuki M., Kameya O.), 1994, *Astron. J.*, 108, 468
- [128] Терлевич и др. (Terlevich, E., Diaz A.I., Terlevich, R.), 1990, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 242, 271
- [129] Тонри, Дэвис (Tonry, J., & Davis M.), 1979, *Astron. J.*, 84, 1511 (TD)

- [130] Турнбулл и др. (Turnbull A.J., Bridges A.J., Carter D.), 1997, Mon. Not. R. Astron. Soc., 307, 967
- [131] Феррюи и др. (Ferruit P., Wilson A. S., Mulchaey J.), 2000, Astrophys. J. Suppl. Ser., 128, 139
- [132] Фобес и др. (Forbes D.A., Ward M.J., DePoy D.L., Boisson C., Smith M.S.), 1992, Mon. Not. R. Astron. Soc., 254, 509
- [133] Фридли (Friedli D.), 1999, (astro-ph/9903143)
- [134] Фридли, Мартине (Friedli D., Martinet L.), 1993, Astron. Astrophys., 1993, 277, 27
- [135] Фридли и др. (Friedli D., Wozniak H., Rieke M., Martinet L., Bratschi P.), 1996, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 118, 461
- [136] Фридман, Хоружий (Fridman A.M., Khoruzhii O.V.), 2000, Physics Letters A, 276, 199
- [137] Фридман А.М., Хоружий О.В., 2001, частное сообщение
- [138] Фридман и др. (Fridman A.M., Khoruzhii O.V., Polyachenko E.V., Zasov A.V., Sil'chenko O.K., Moiseev A.V., Burlak A.N., Afanas'ev V.L., Dodonov S.N., Кнапен J.), 2001, Mon. Not. R. Astron. Soc., 323, 651
- [139] Фрэй и др. (Frei Z., Guhathakurta P., Gunn J. E., Tyson, J. A.), 1996, Astron. J., 111, 174
- [140] Хейдау и др. (Heraúdeau P., Simien F., Maubon G., Prugniel P.), 2001, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 136, 509
- [141] Хеллер и др. (Heller C., Shlosman I., Englmaier P.), 2001, Astrophys. J., 553, 661
- [142] Хелоу и др. (Helou G., Salpeter E.E., Terzian Y.), 1987, Astron. J., 87, 1443
- [143] Хернандес и др. (Hernandez O., Gach J.-L., Boulesteix, J., Amram P., Boissin O., Carignan C., Garrido O., Marcelin M., Oslin G., Rampazzo R.), 2001, in "Galaxies: the Third Dimension (eds Rosado M., Binette L., & Arias L.), to be published in ASP Conf. Series
- [144] Хигдон и др. (Higdon J., Buta R., Purcel G.B.), 1998, Astron. J., 115, 80

- [145] Хоперсков А.В., Засов А.В., Тюрина Н.В., 2002а, Письма в Астрон. журн., 78, 1
- [146] Хоперсков и др. (Khoperskov A.V., Moiseev A.V., Chulanova E.A.), 2002б, Bull. Spec. Astrophys. Obs., 52, 135
- [147] Швейзе (Schweizer F.), 1980, Astrophys. J., 237, 303
- [148] Шевалье, Фуренлид (Chevalier R.A., Furenlid I.), 1978, Astron. J., 225, 67
- [149] Шиннерер и др. (Schinnerer E., Maciejewski W., Scoville N., Moustakas L.A.), 2002, Astrophys. J. (принято к печати), (astro-ph/0204133)
- [150] Шлосман и др. (Shlosman I., Frank J., Begeman M.C.), 1989, Nature, 338, 45
- [151] Шлосман, Хеллер (Shlosman I., Heller C.), 2002, Astrophys. J., 565, 921
- [152] Шоу и др. (Shaw M.A., Combes F., Axon D.J., Wright G.S.), 1993, Astron. Astrophys., 273, 31
- [153] Шоу и др. (Shaw M.A., Axon D., Probst R., Galtey I.), 1995, Mon. Not. R. Astron. Soc., 274, 369
- [154] Элмегрин и др. (Elmegreen B.G., Elmegreen D.M., Brinks E., Yuan C., Kaufman M., Klaric M., Montenegro L., Struck C., Thomasson M.), 1998, Astrophys. J., 503, L119
- [155] Элмегрин и др. (Elmegreen, D.M., Elmegreen B.G., Eberwein K.S), 2002, Astrophys. J., 564, 234
- [156] Эмселлем, Фридли (Emsellem E., Friedli D.), 2000, in "Dynamics of Galaxies: from the Early Universe to the Present (Eds. Combes F., Mamon G.A., Charmandaris V.), ASP Conference Series, 197, 51, (astro-ph/9910260)
- [157] Эмселлем, Феррюи (Emsellem E., Ferruit P.), 2000, Astron. Astrophys., 357, 111
- [158] Эмселлем и др. (Emsellem E., Greusard D., Combes F., Friedli D., Leon S., Pecental E., Wozniak H.), 2001а, Astron. Astrophys., 368, 52
- [159] Эмселлем и др. (Emsellem E., Greusard D., Friedli D., Combes, F.), 2001б, Astrop. and Space Science, 277 (Suppl.), 455

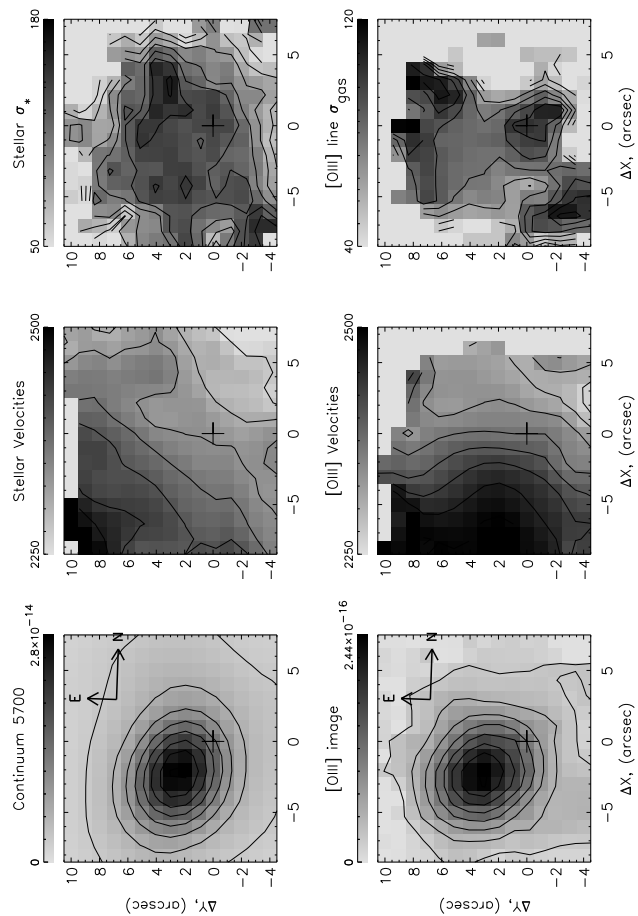
- [160] Эмселлем (Emsellem E.), 2002, (astro-ph/0202522)
- [161] Энглмайер, Шлосман (Englmaier, P., Shlosman, I.), 2000, *Astrophys. J.*, 528, 677
- [162] Эрвин, Спарк (Erwin P., Sparke L.S.), 1998, (astro-ph/9811345)
- [163] Эрвин, Спарк (Erwin P., Sparke L.S.), 1999, *Astrophys. J.*, 521, L37
- [164] Эрвин, Спарк (Erwin P., Sparke L.S.), 2002, *Astron. J.*, 124, 65

Приложение А

Атлас галактик с перемычками

Атлас содержит результаты спектральных и фотометрических наблюдений выборки галактик с двойными барами и состоит из 18 рисунков. Описание представленных иллюстраций приведено в разделе 3.5.1.

NGC 470 MPFS data



NGC 470: Image data

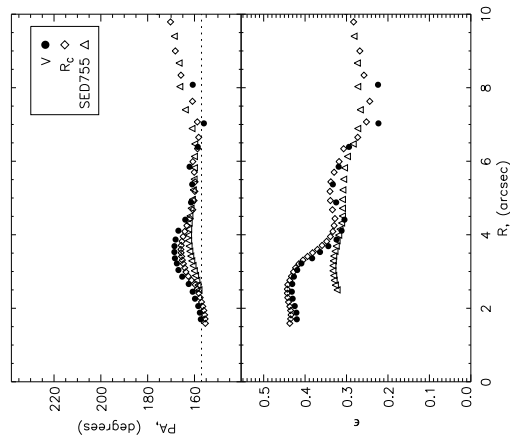
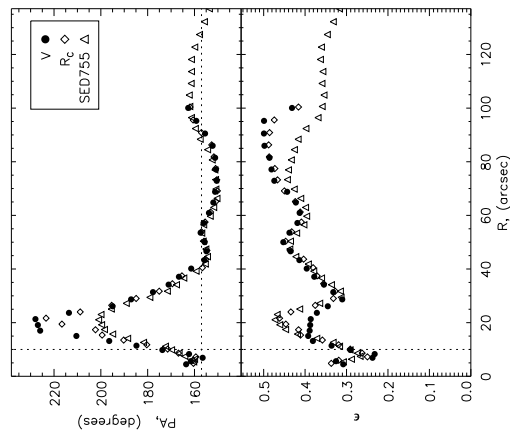
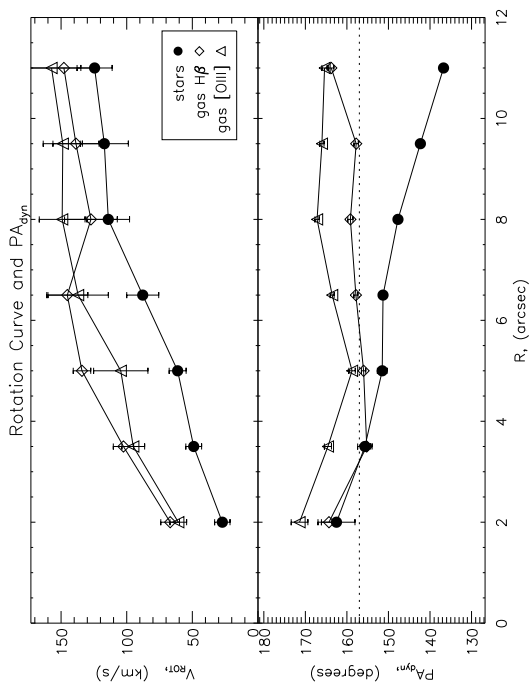
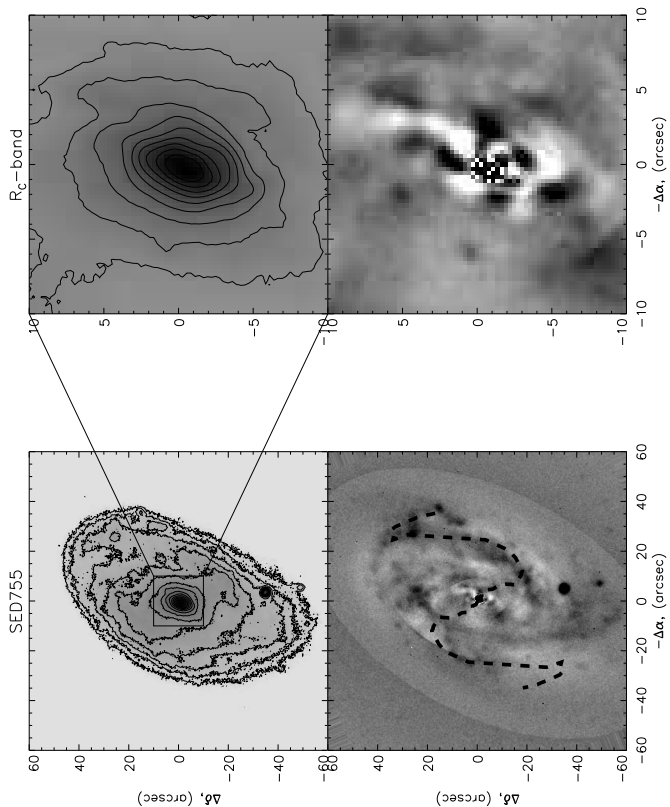
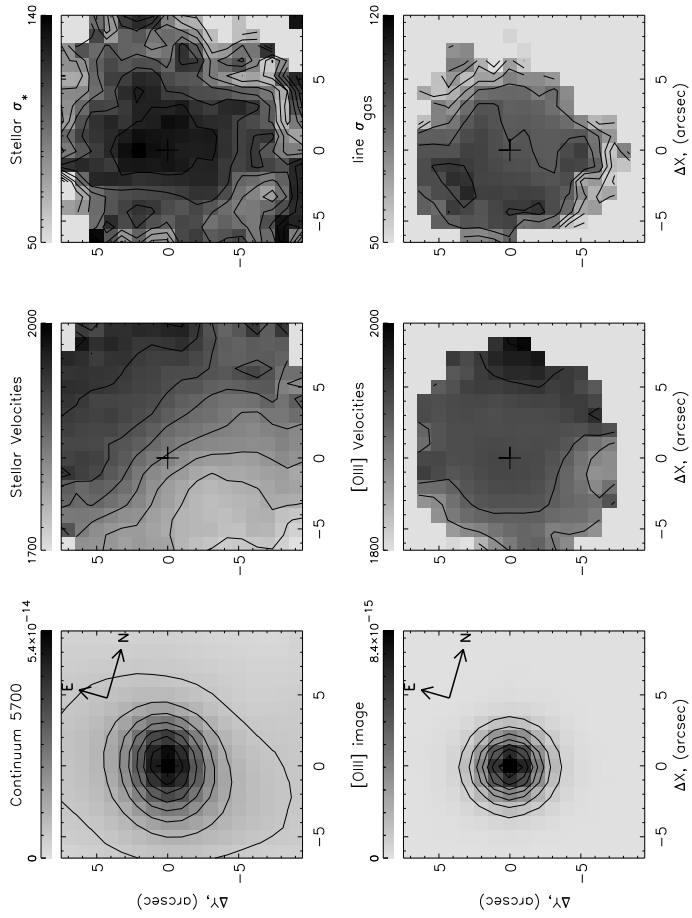


Рис. А.1: NGC 470. Слева – результаты наблюдений с MPFS, справа – изотопный анализ изображений

NGC 2273 MPFS data



NGC 2273: Image data

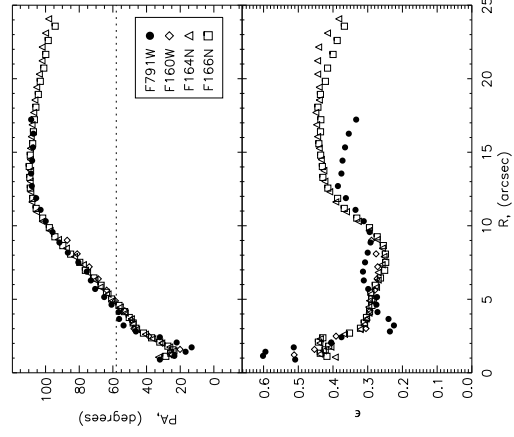
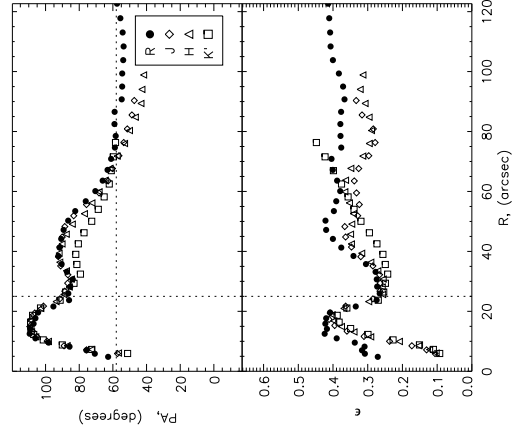
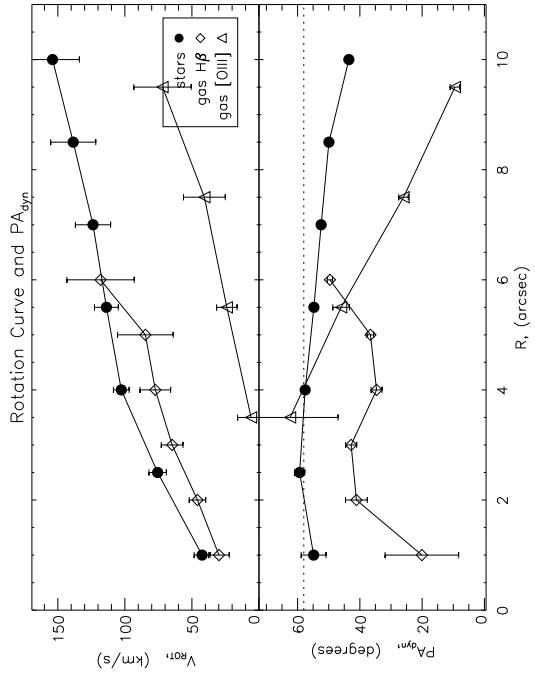
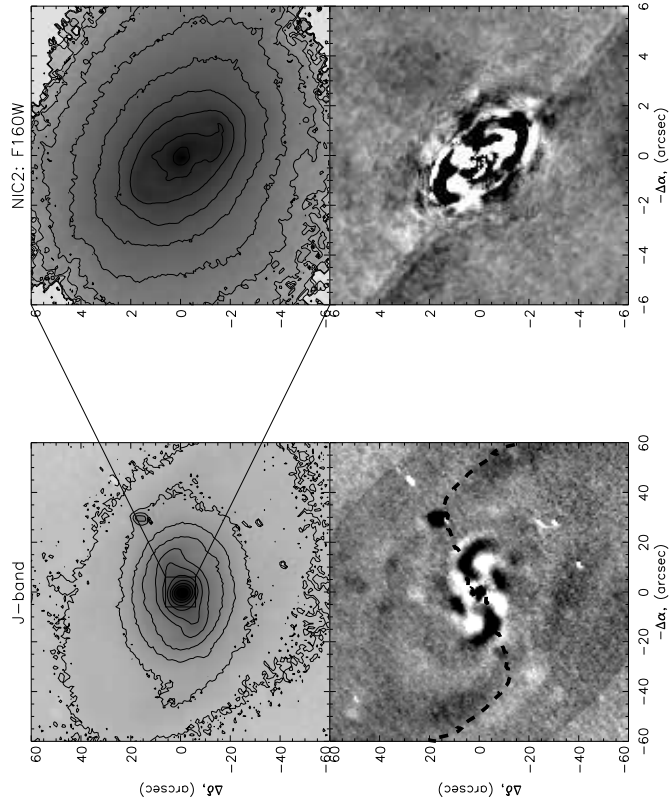
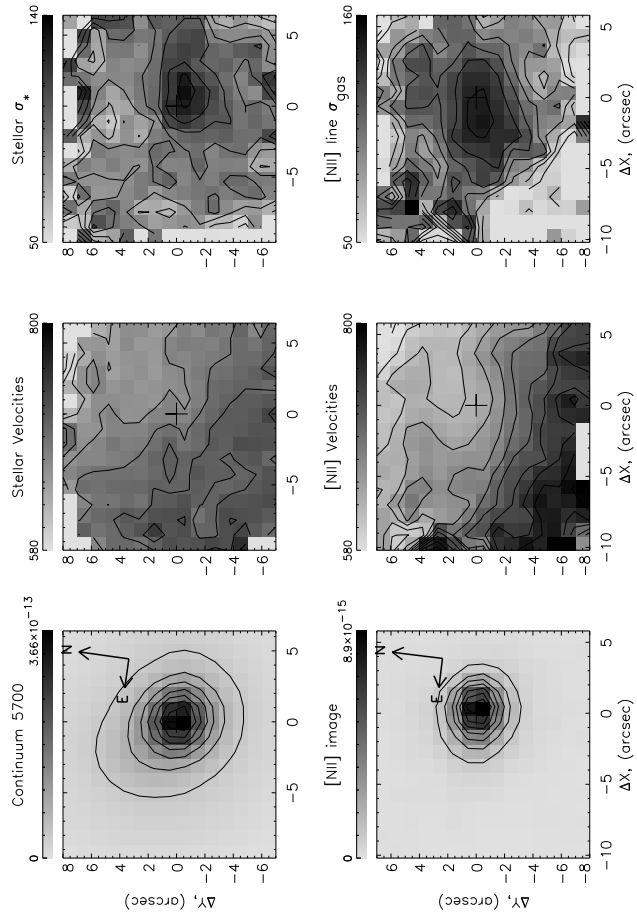


Рис. А.2: NGC 2273. Слева – результаты наблюдений с MPFS, справа – изотопный анализ изображений

NGC 2681 MPFS data: continuum center



NGC 2681: Image data

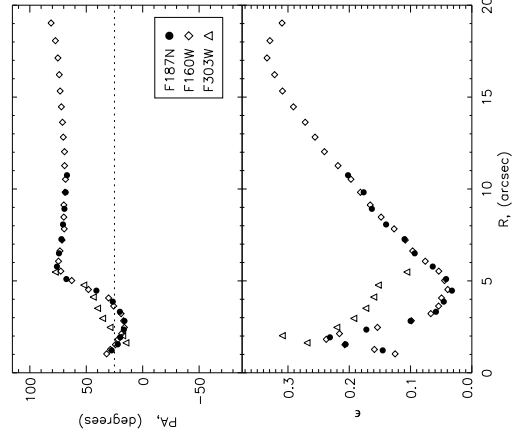
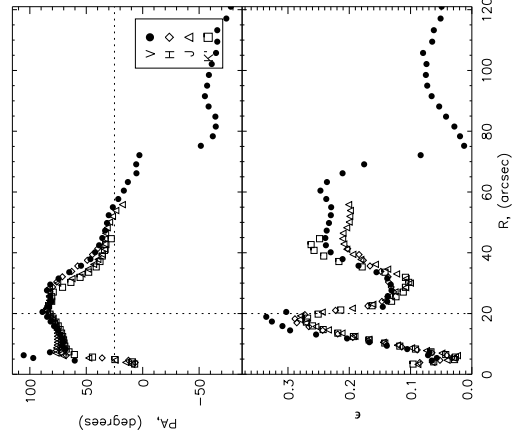
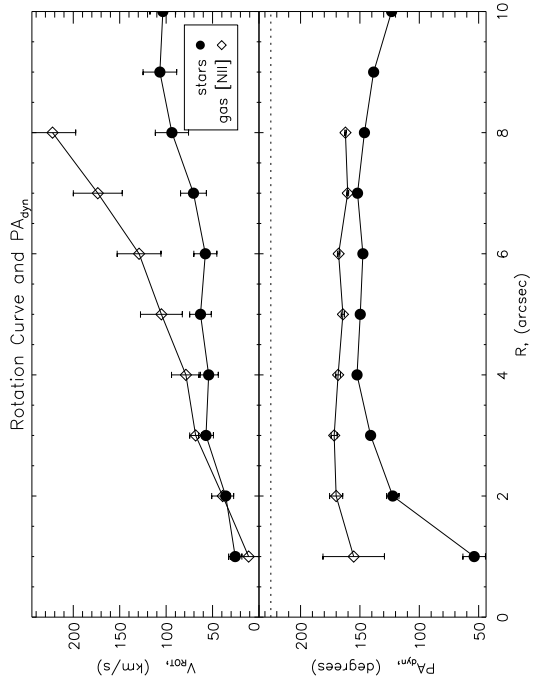
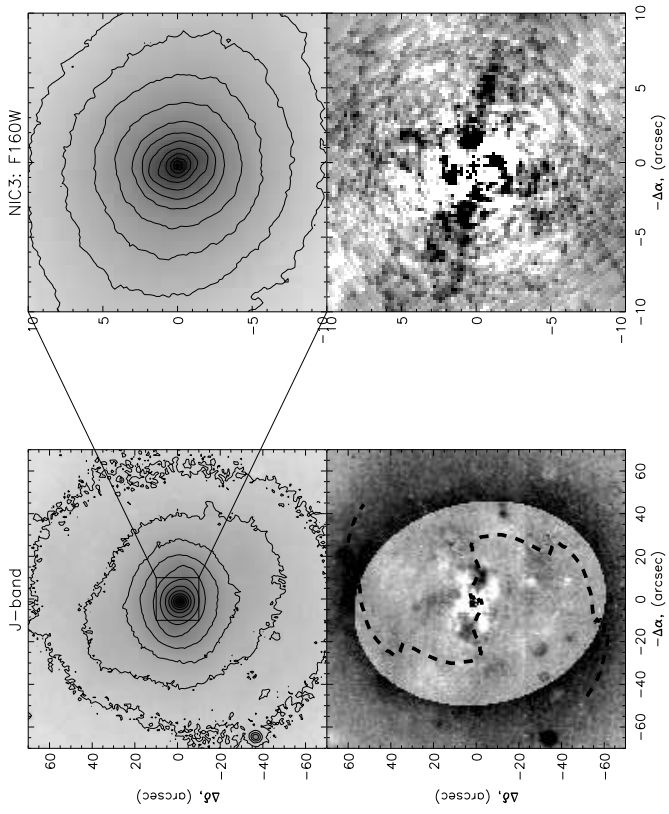
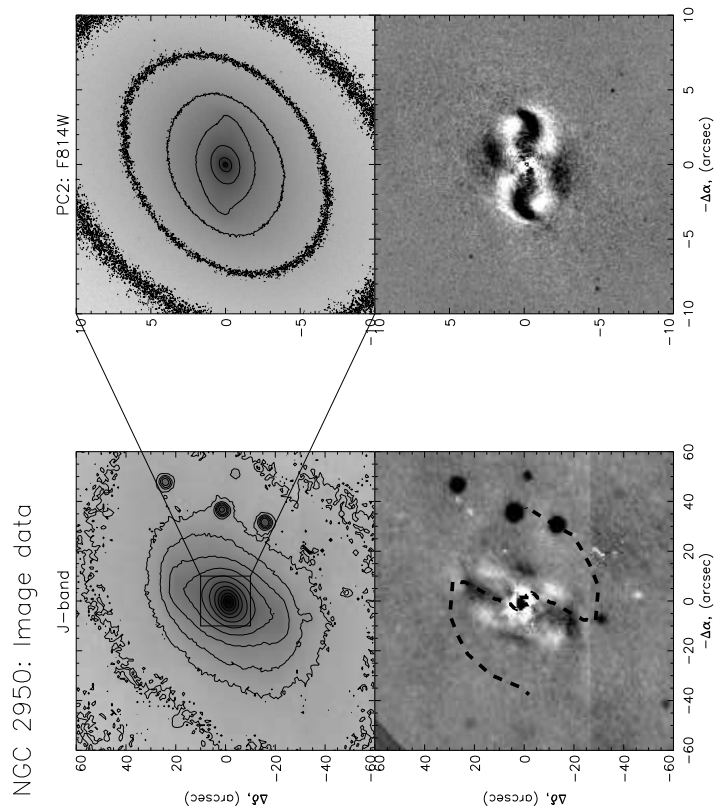


Рис. А.3: NGC 2681. Слева – результаты наблюдений с MPFS, справа – изотопный анализ изображений



NGC 2950 MPFS data

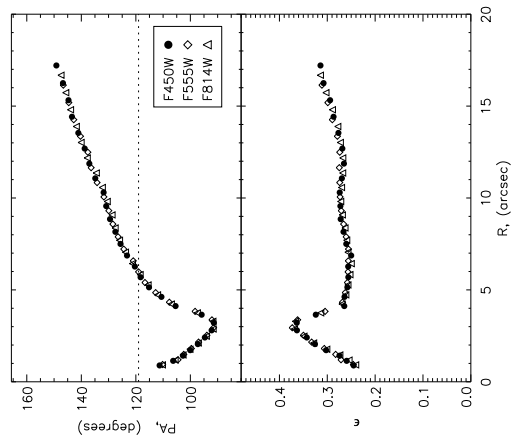
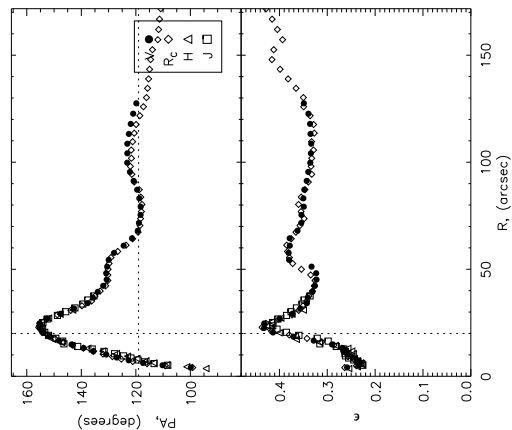
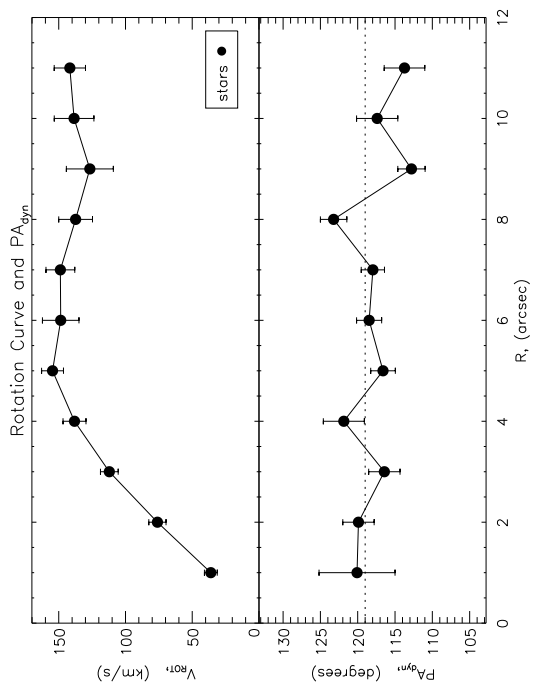
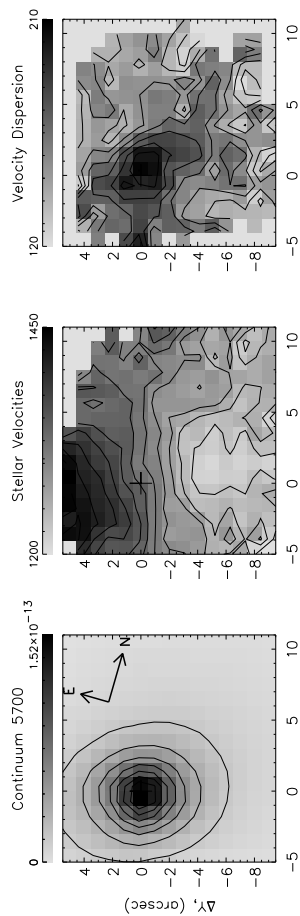


Рис. А.4: NGC 2950. Слева – результаты наблюдений с MPFS, справа – изотопный анализ изображений

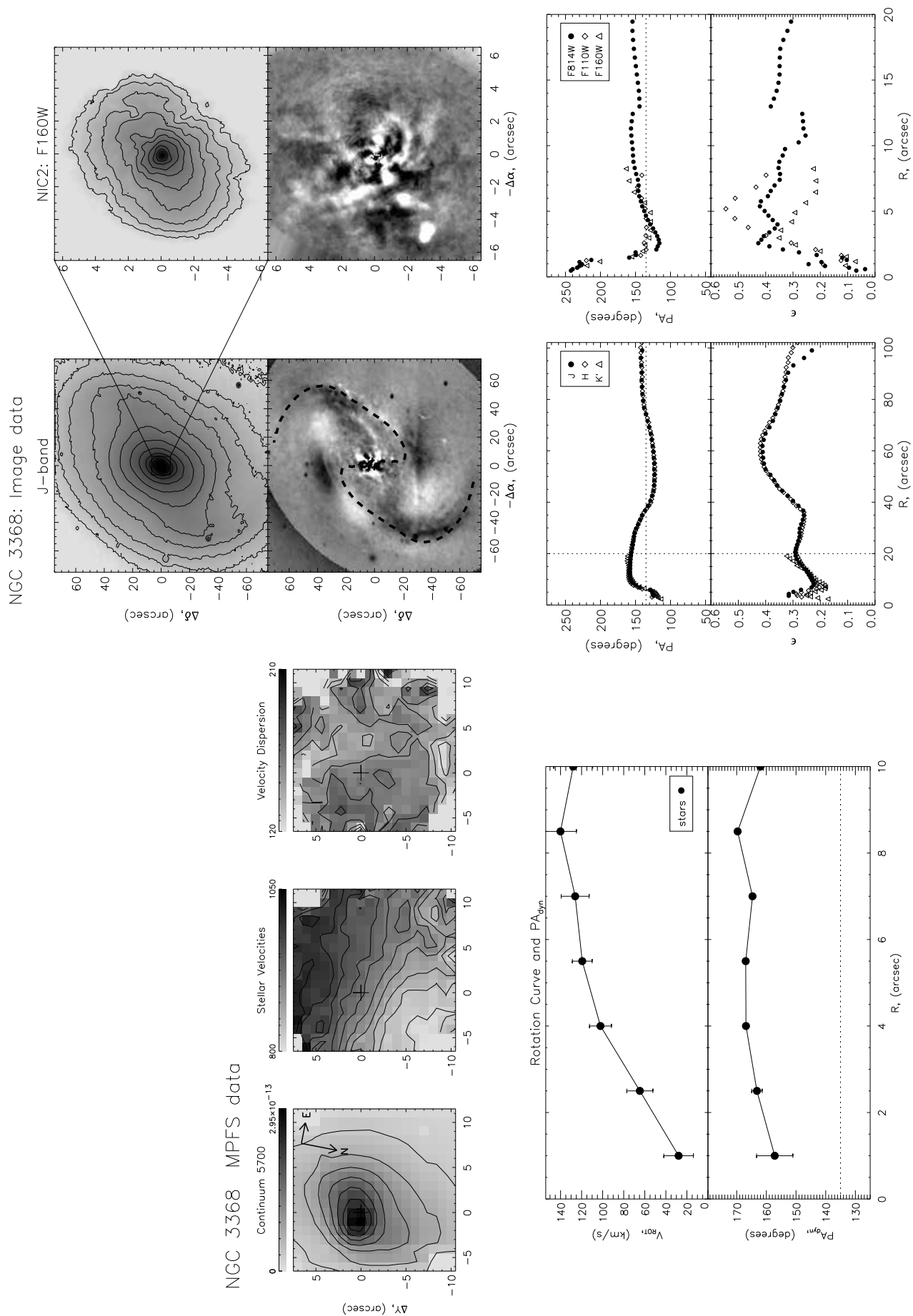
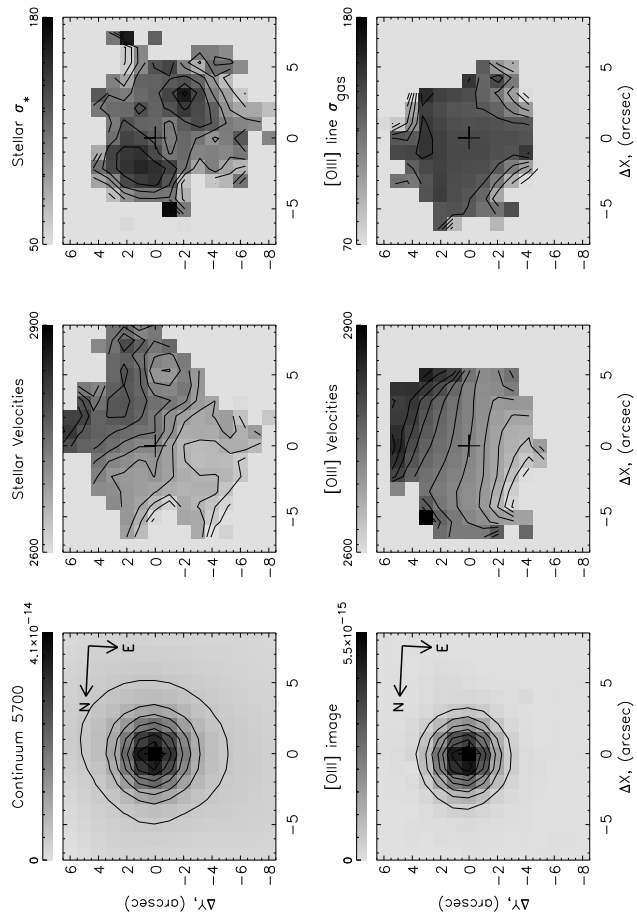


Рис. А.5: NGC 3368. Слева – результаты наблюдений с MPFS, справа – изотопный анализ изображений

NGC 3786 MPFS data: different centers



NGC 3786: Image data

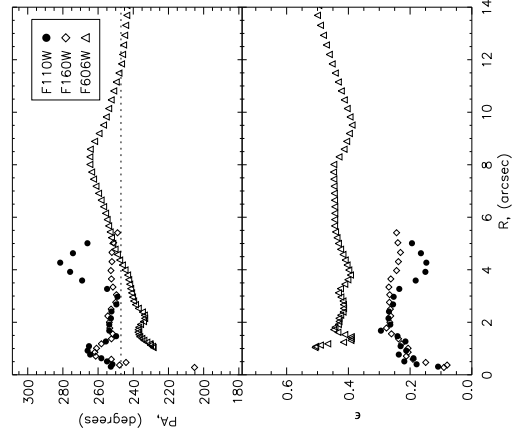
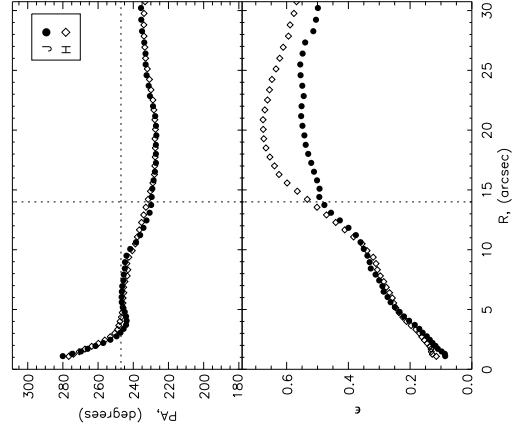
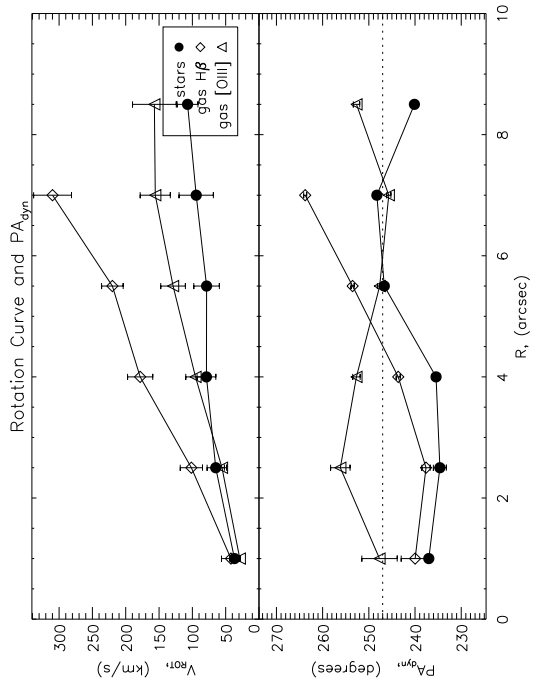
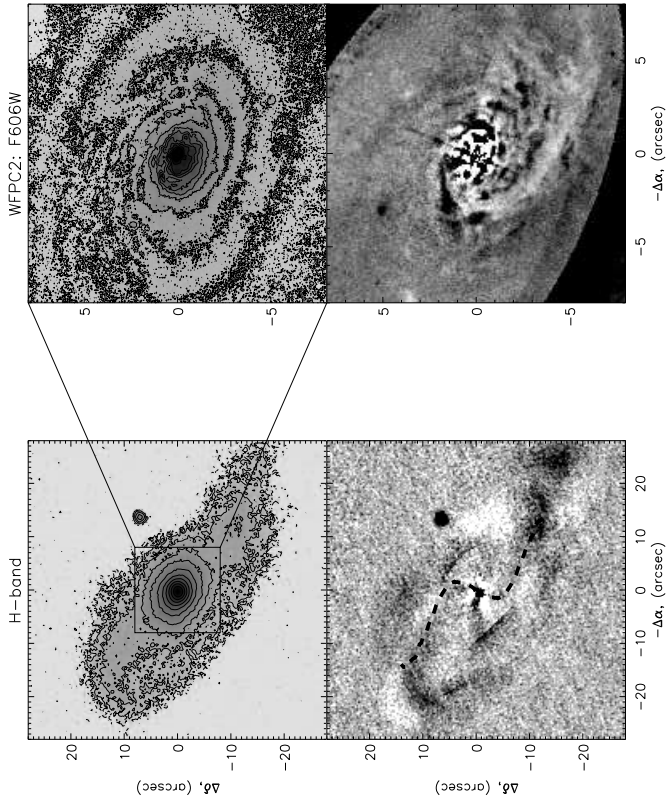
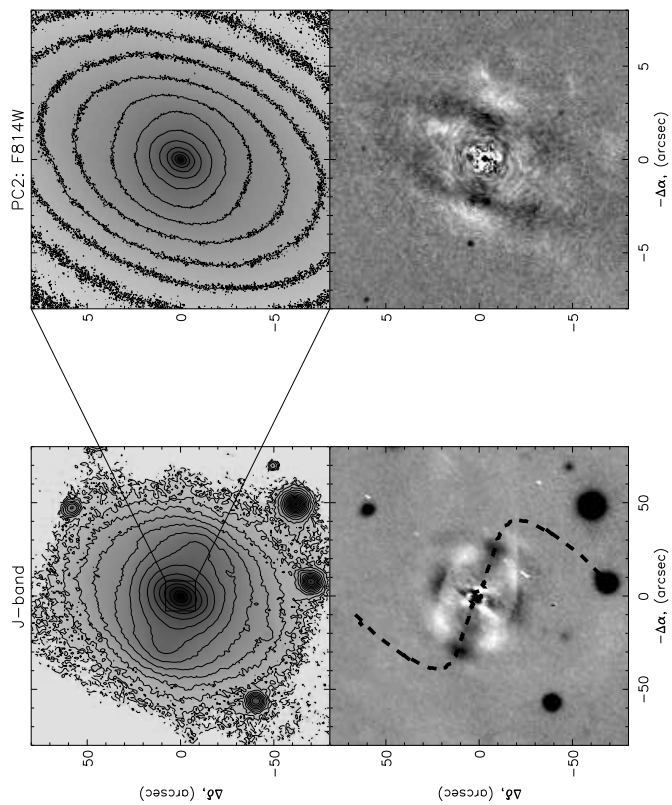


Рис. А.6: NGC 3786. Слева – результаты наблюдений с MPFS, справа – изотопный анализ изображений

NGC 3945: Image data



NGC 3945 MPFS data

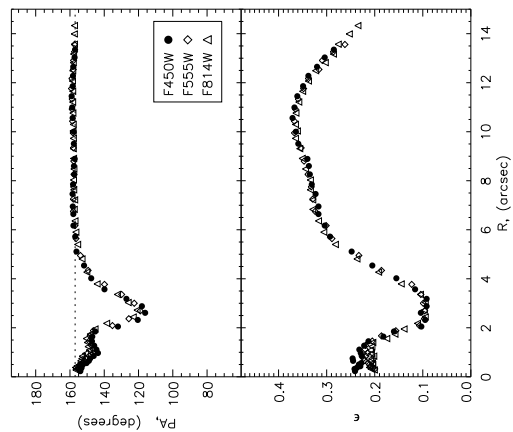
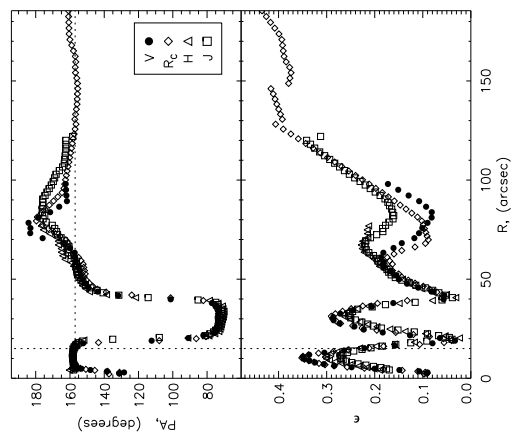
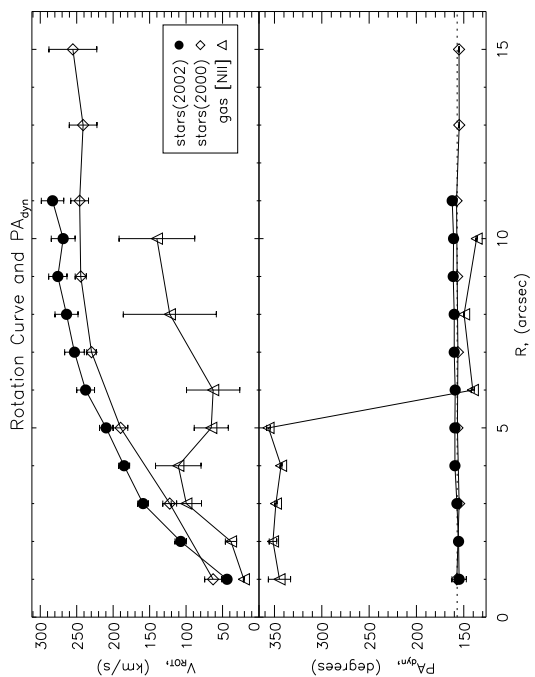
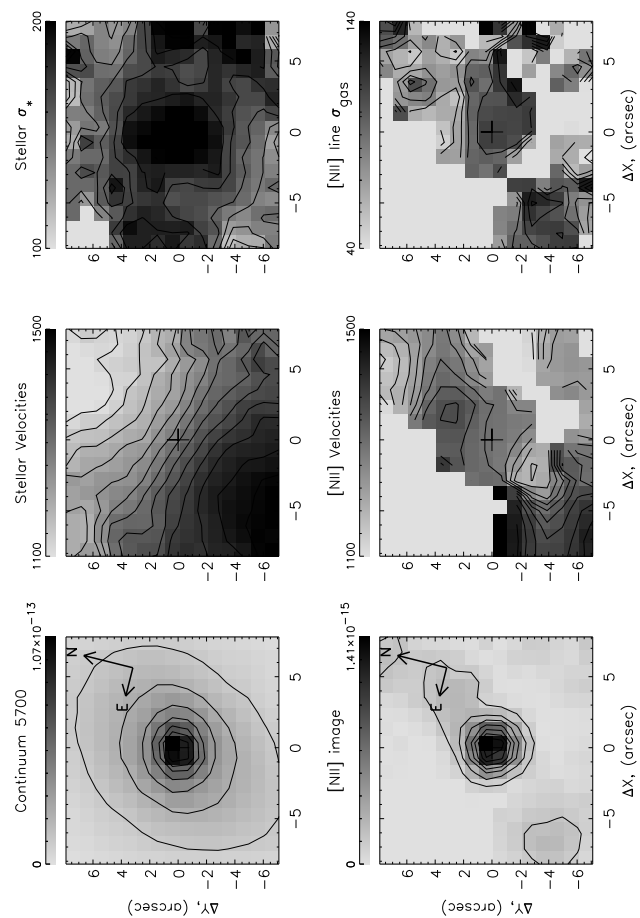


Рис. А.7: NGC 3945. Слева – результаты наблюдений с MPFS, справа – изотопный анализ изображений

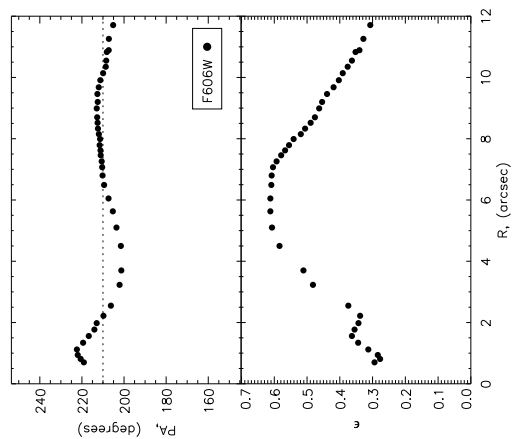
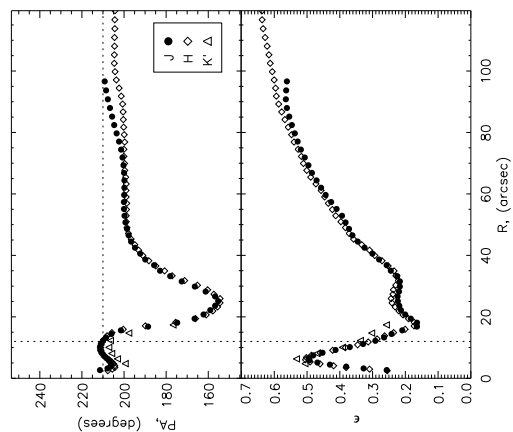
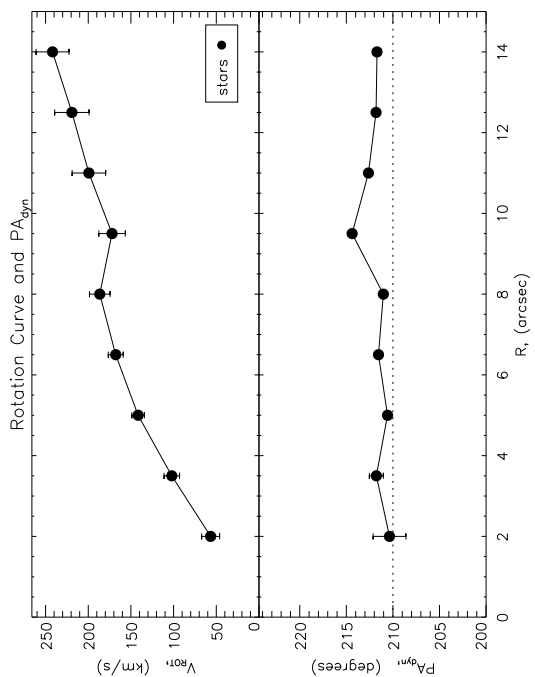
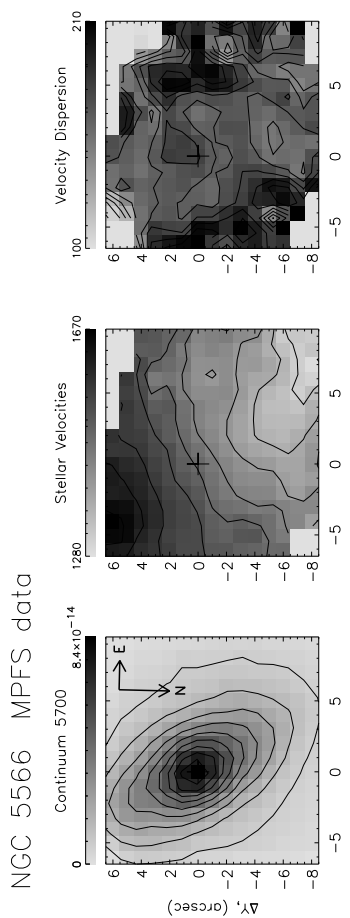
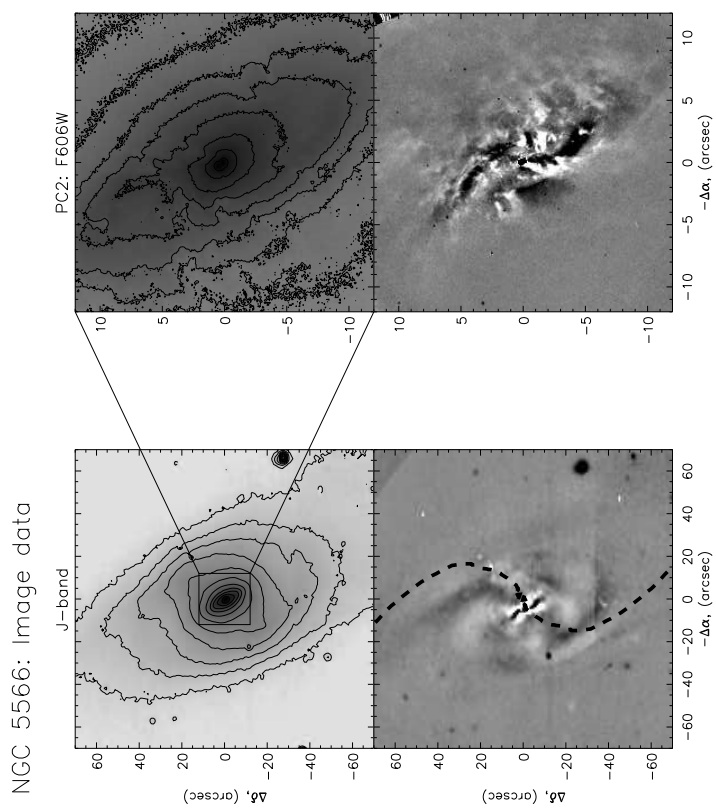
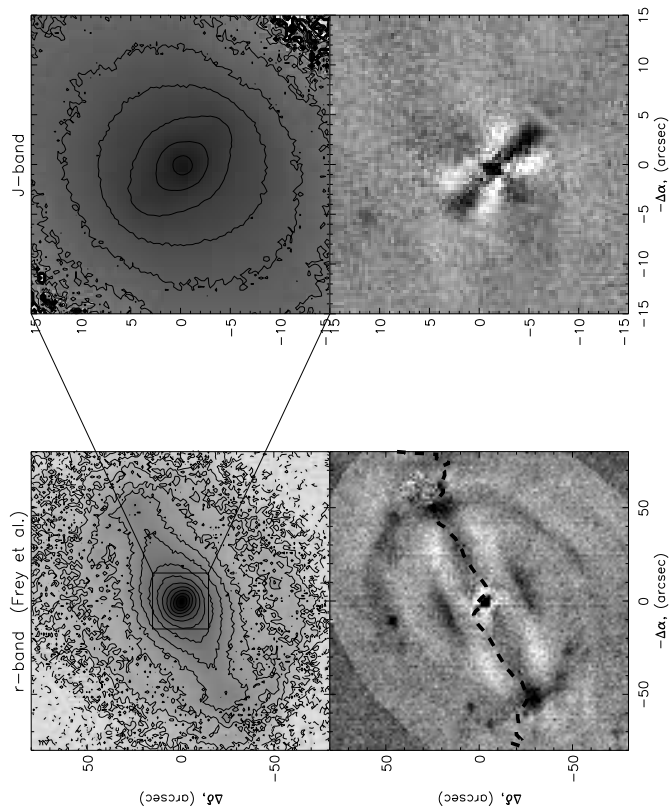
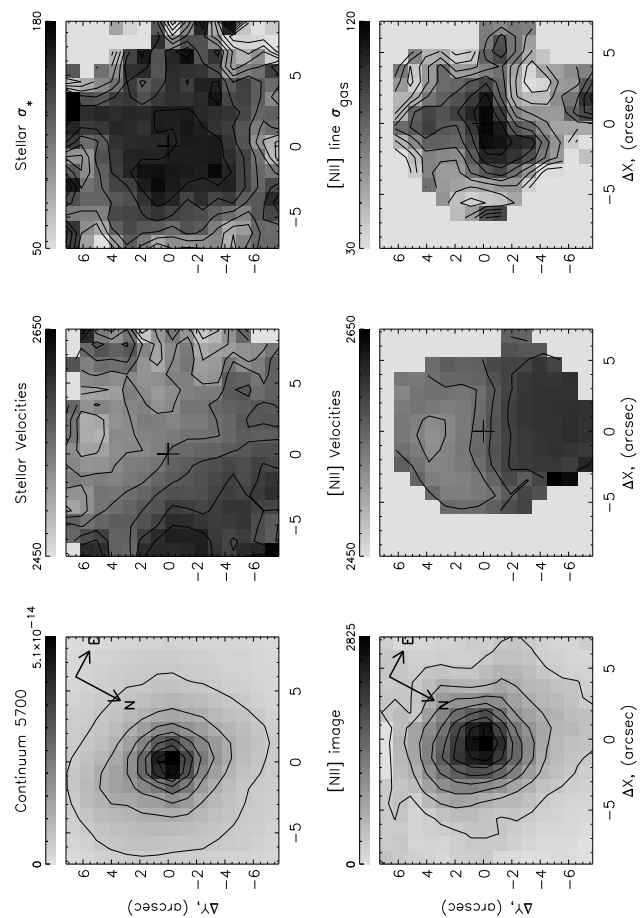


Рис. А.9: NGC 5566. Слева – результаты наблюдений с MPFS, справа – изотопный анализ изображений

NGC 5850: Image data



NGC 5850 MPFS data



NGC 5850: Image data

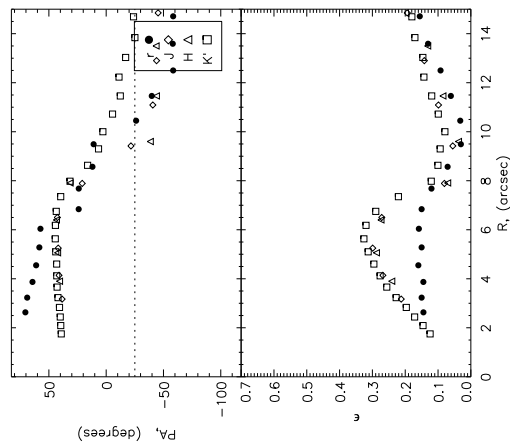
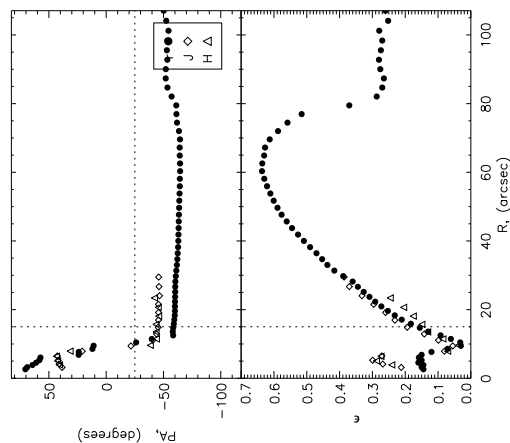
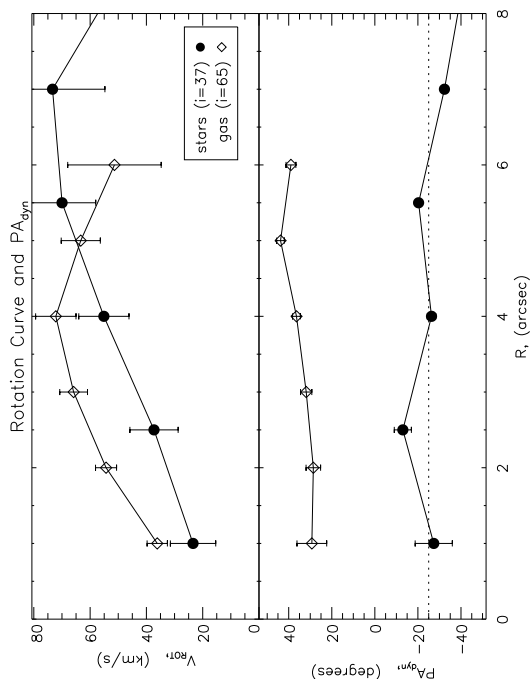
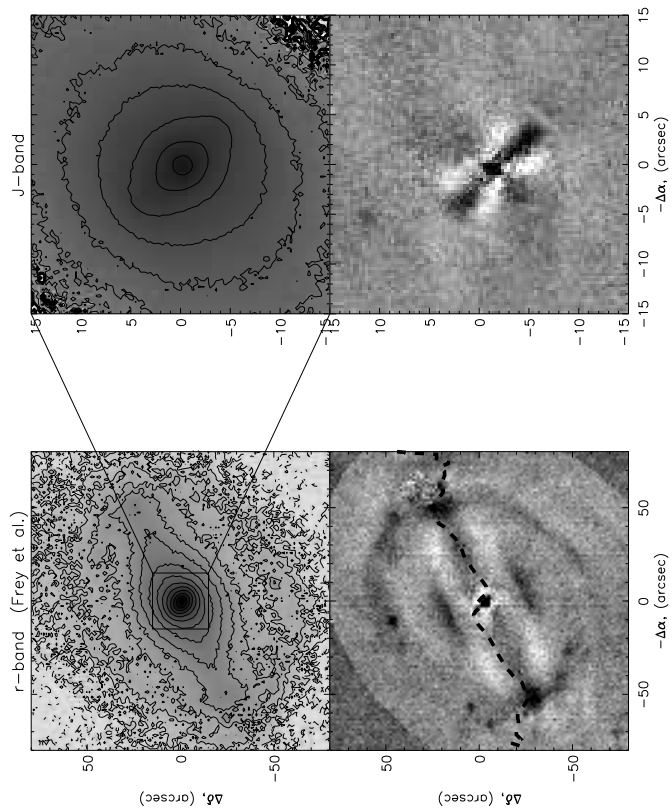


Рис. А.10: NGC 5850. Слева – результаты наблюдений с MPFS, справа – изотопный анализ изображений

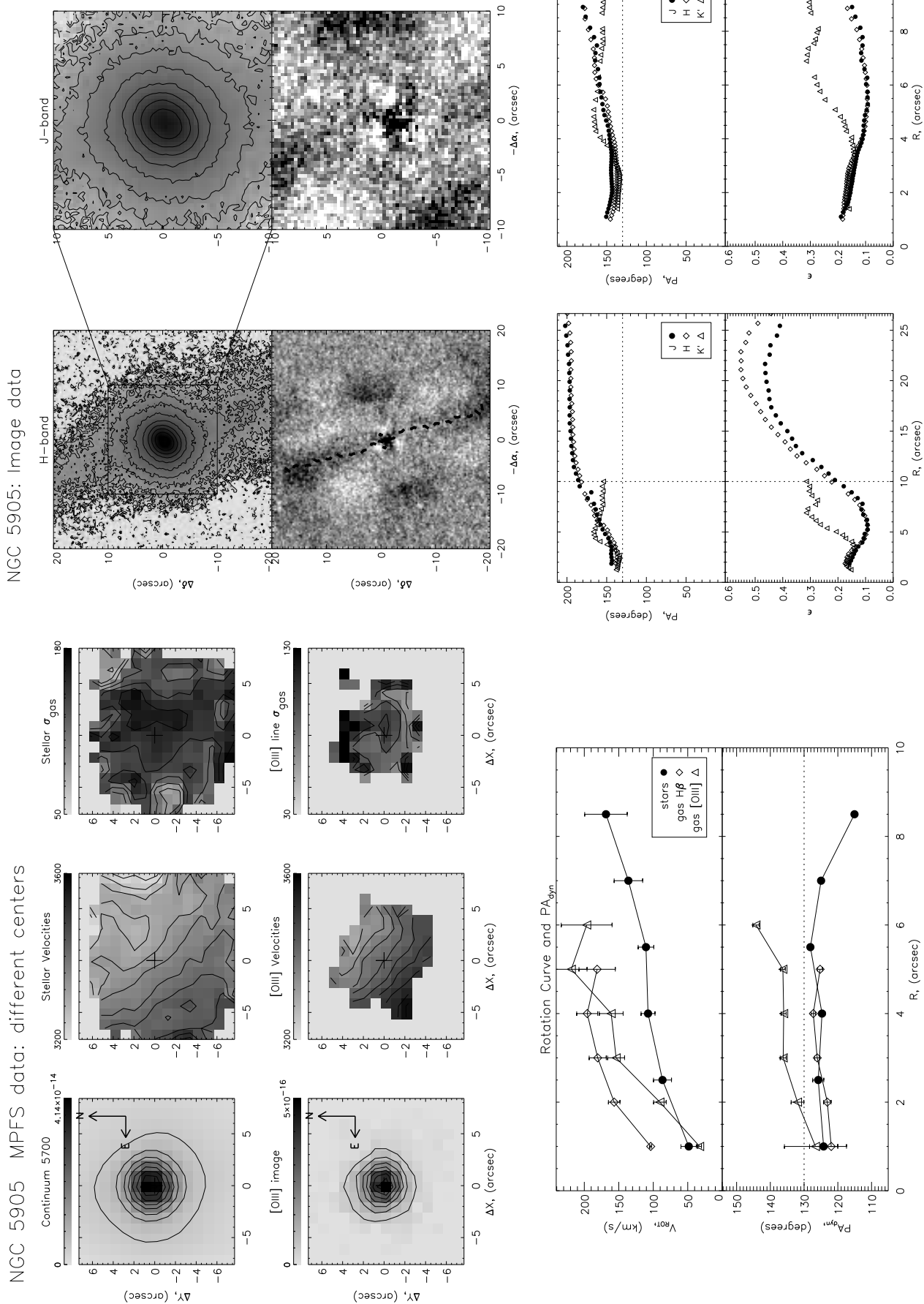


Рис. А.11: NGC 5905. Слева – результаты наблюдений с MPFS, справа – изотопный анализ изображений

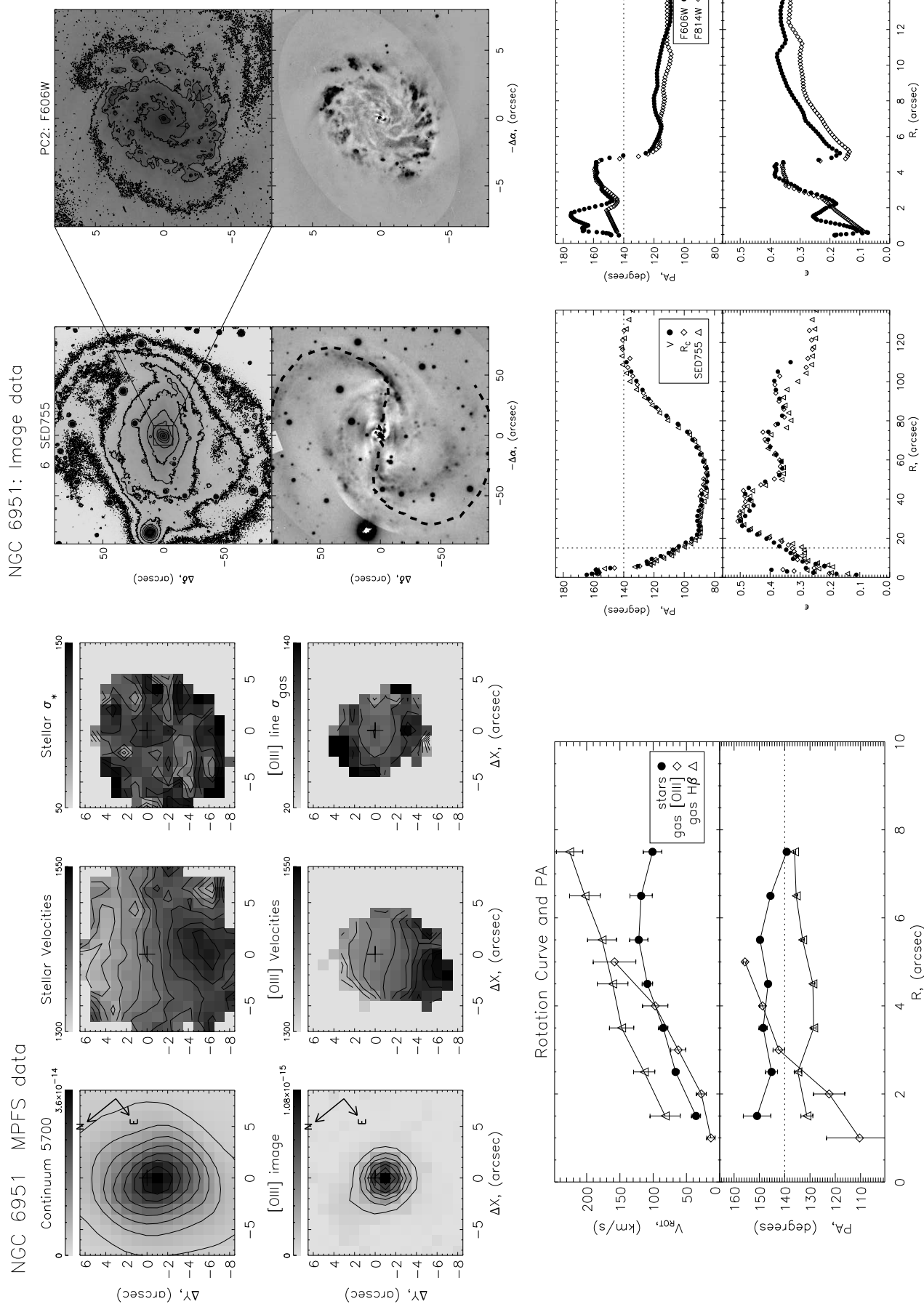
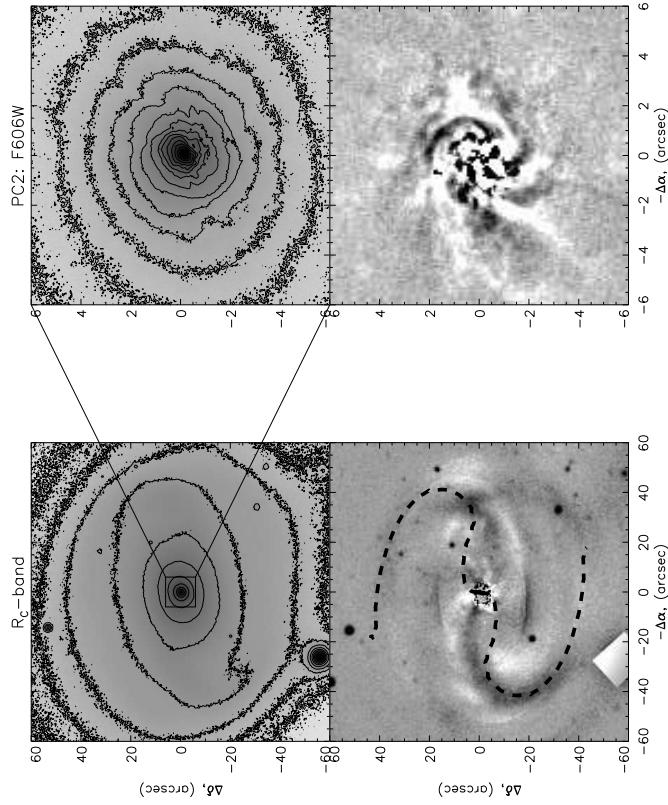


Рис. А.12: NGC 6951. Слева – результаты наблюдений с MPFS, справа – изотопный анализ изображений

NGC 6951: Image data

NGC 6951 MPFS data

NGC 7743: Image data



NGC 7743 MPFS data

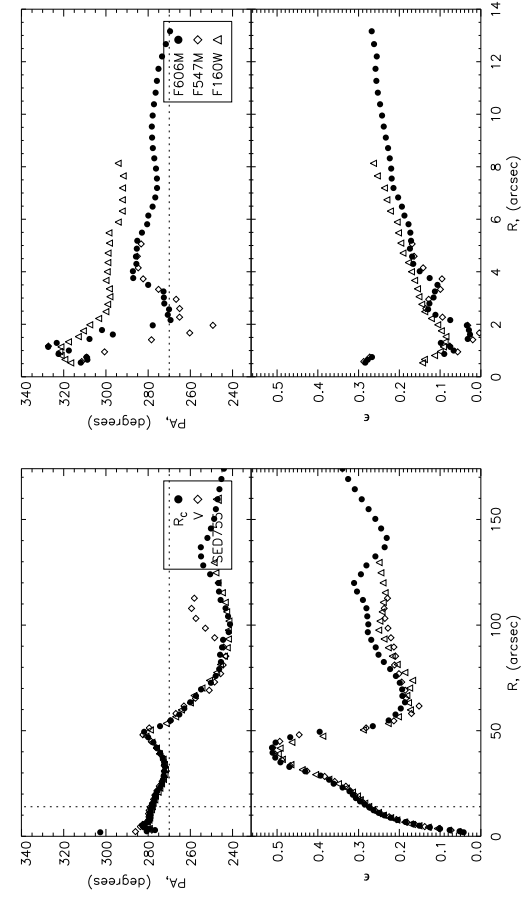
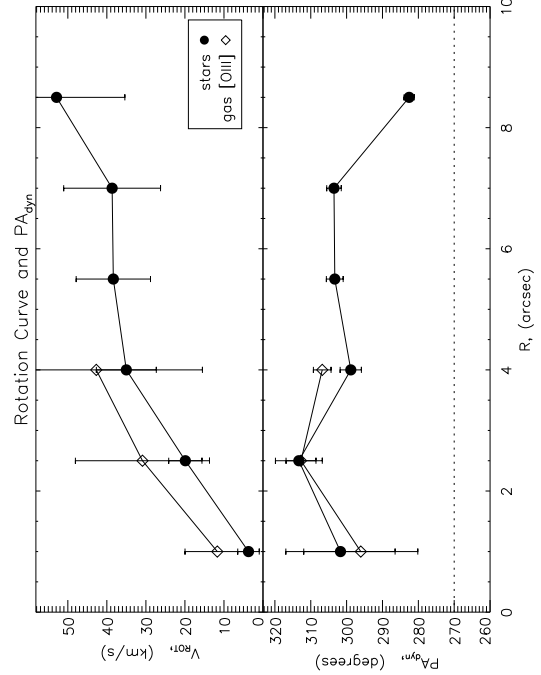
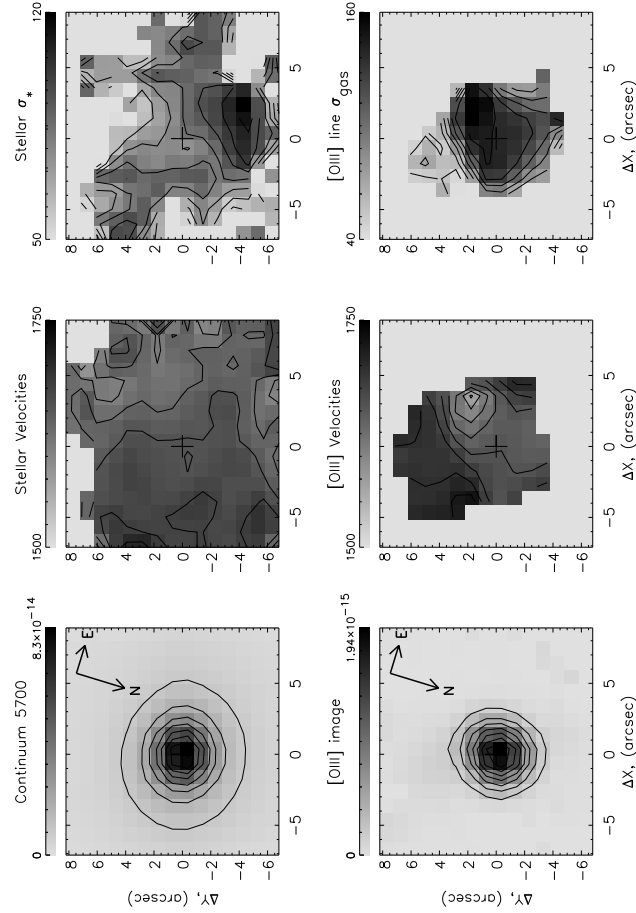
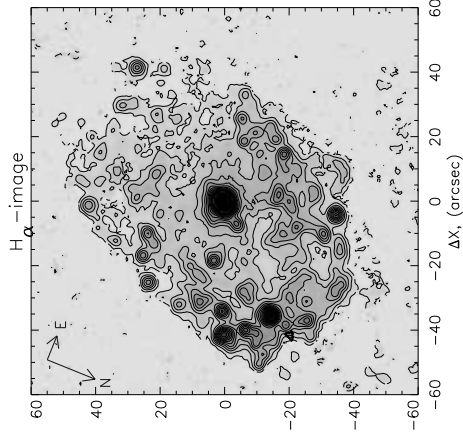
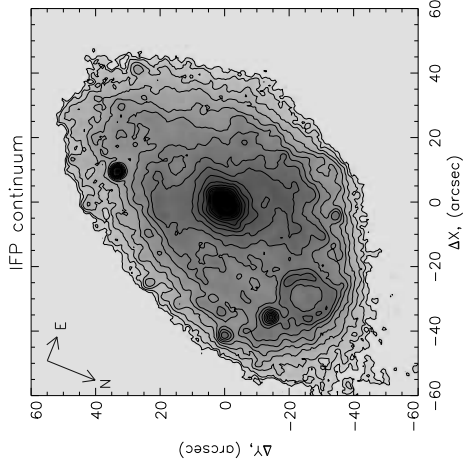


Рис. А.13: NGC 7743. Слева – результаты наблюдений с MPFS, справа – изотопный анализ изображений

NGC 470: Fabry–Perot data



NGC 2273: Fabry–Perot data

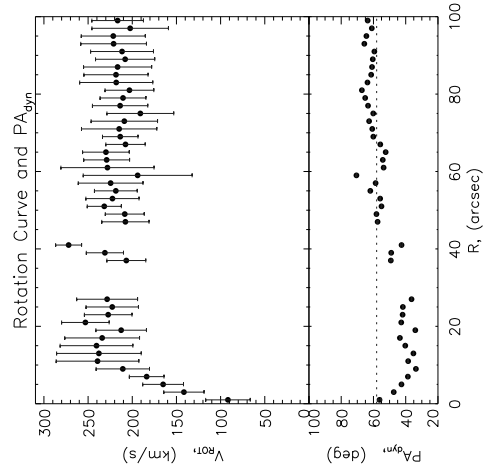
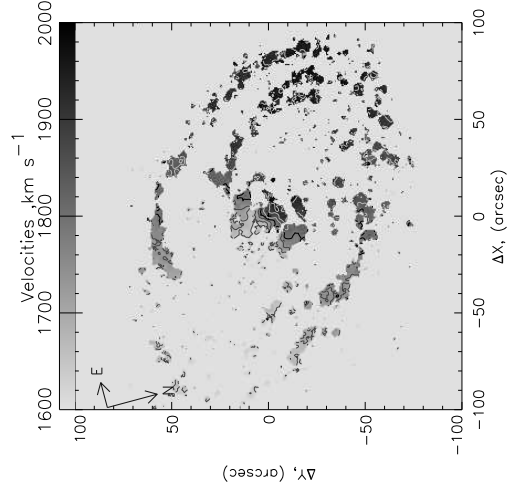
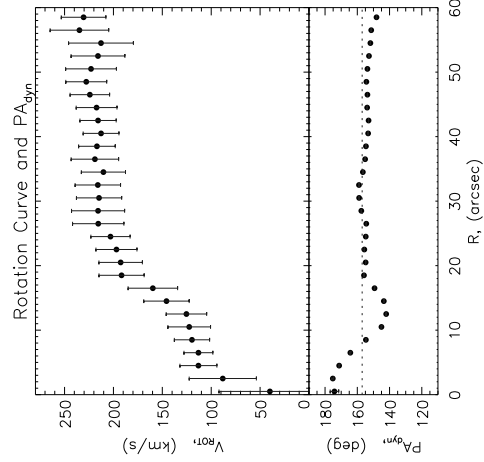
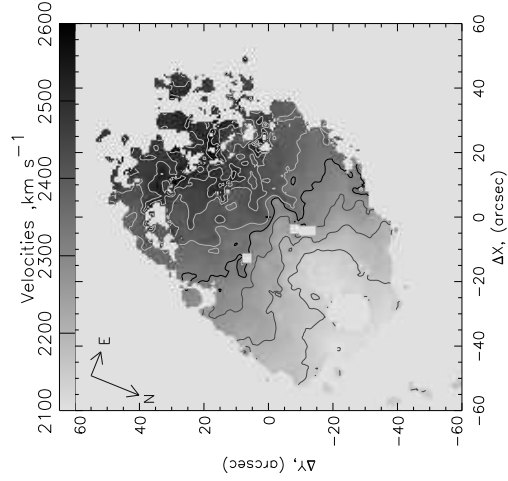
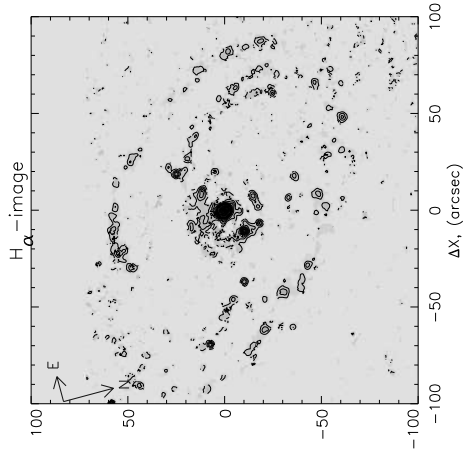
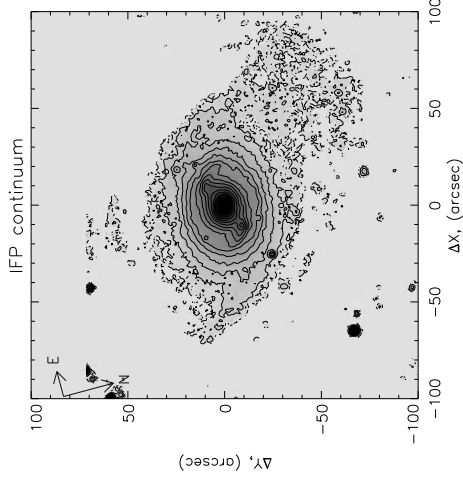
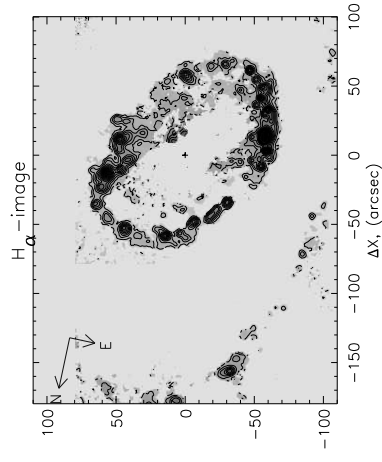
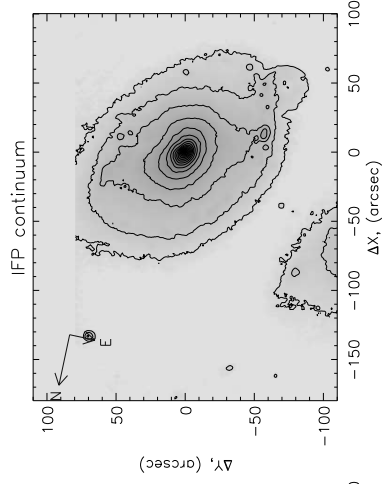
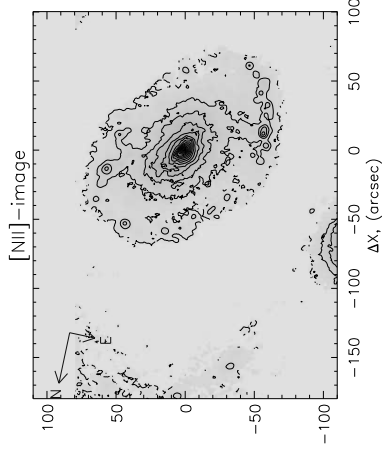
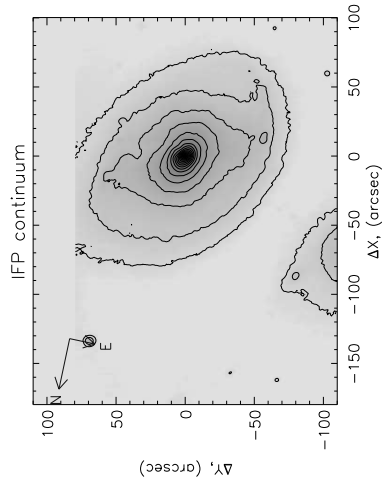


Рис. А.14: Наблюдения с ИФП в линии H_{α} . Слева – NGC 470, справа NGC 2273. В области с координатами $(-30'', -25'')$ на изображениях NGC 470 – блик от яркой звезды.

NGC 3368: Fabry–Perot data



NGC 3368: Fabry–Perot data

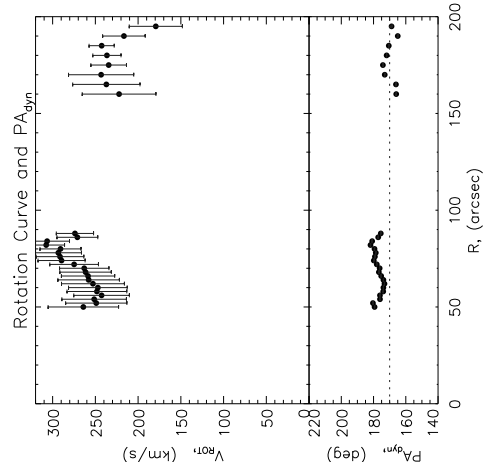
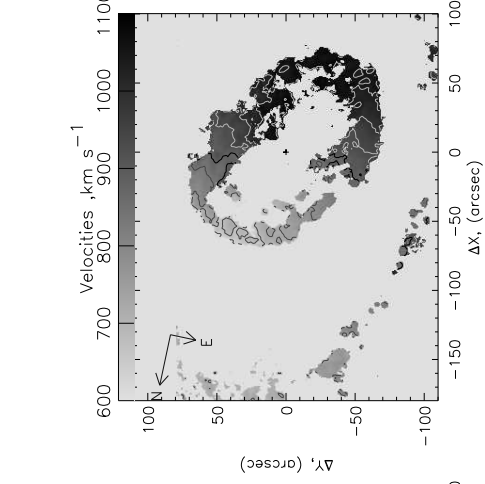
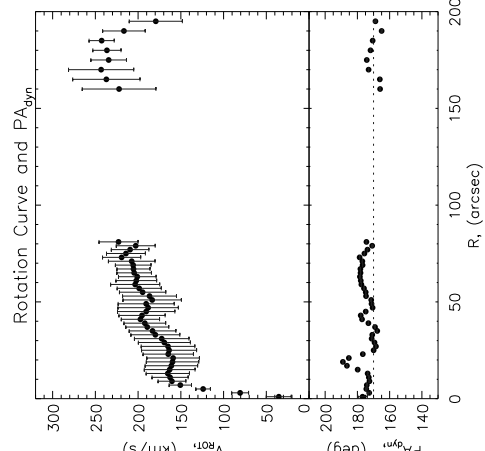
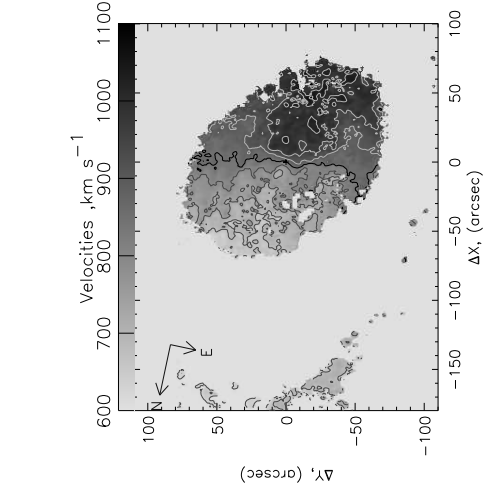


Рис. А.15: NGC 3368. Наблюдения с ИФП в линии [NII] (слева) и H_{α} (справа) На изображениях в континууме и в эмиссии снизу виден блик от галактики. Отмеченное пунктиром значение $PA_0 = 170^{\circ}$ соответствует ориентации газового диска (см. текст).

NGC 3945: Fabry–Perot data

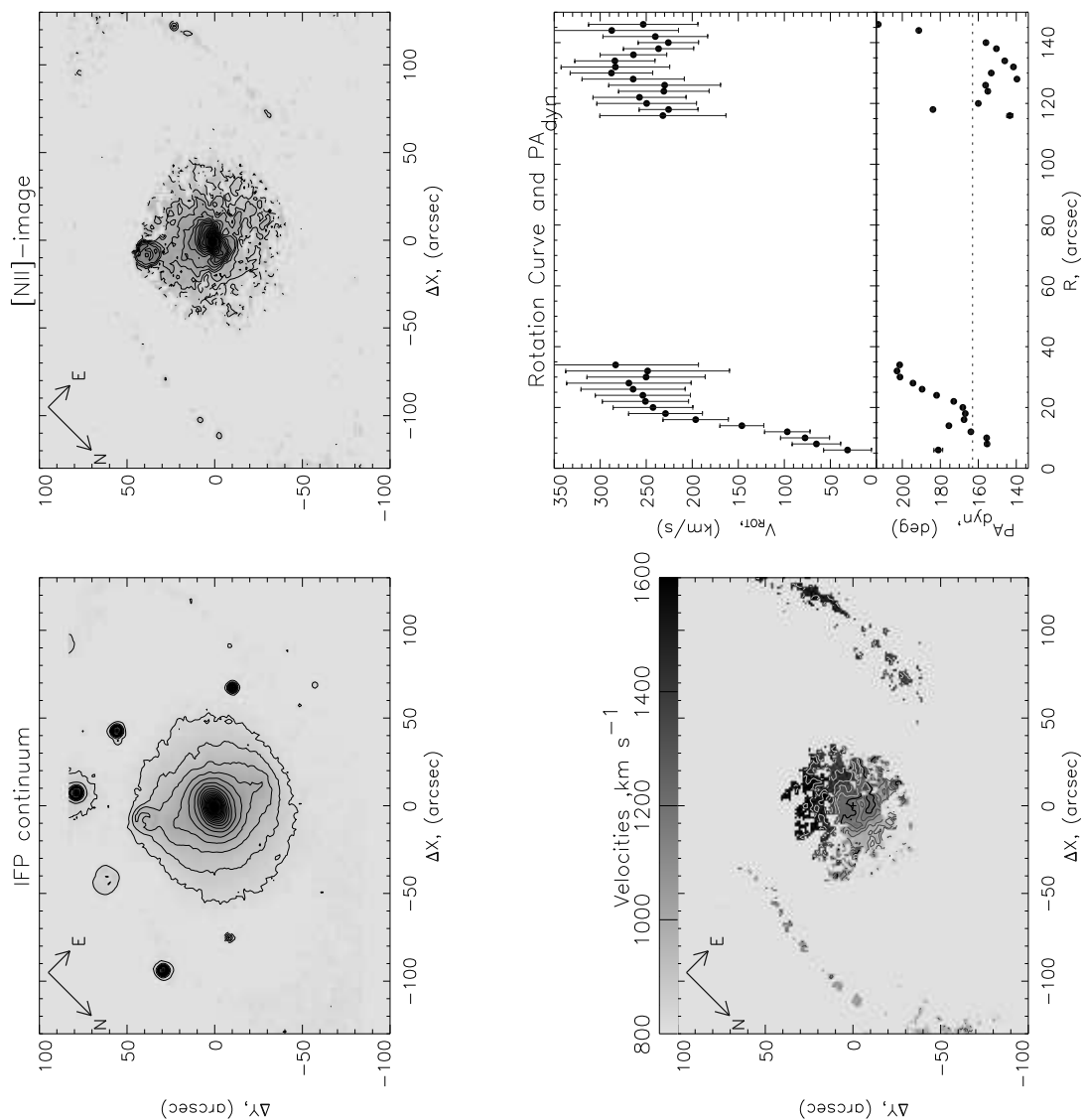
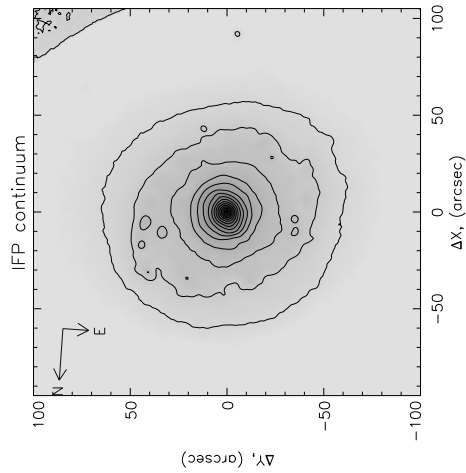


Рис. А.16: NGC 3945. Наблюдения с ИФП в линии [NII]

NGC 4736: Fabry–Perot data



NGC 4736: Fabry–Perot data

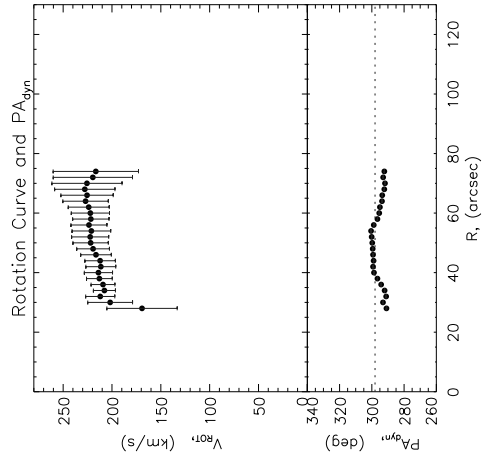
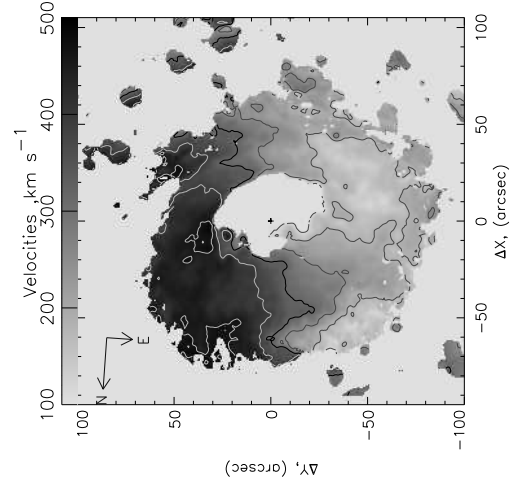
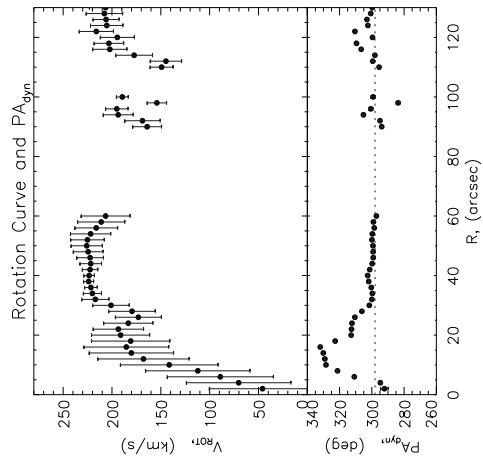
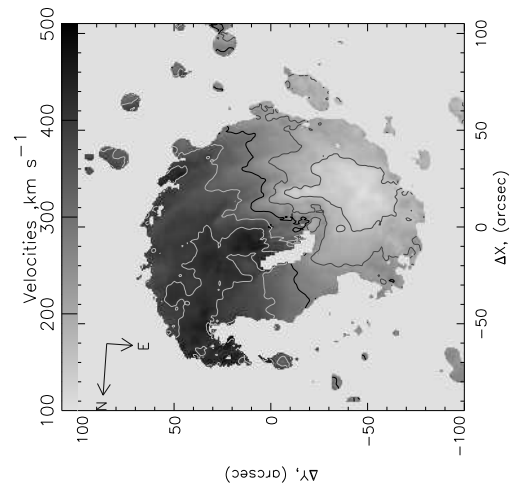
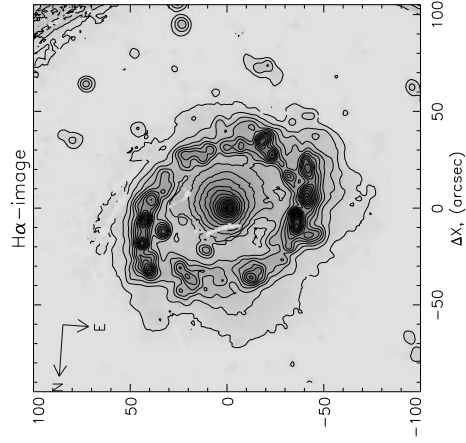
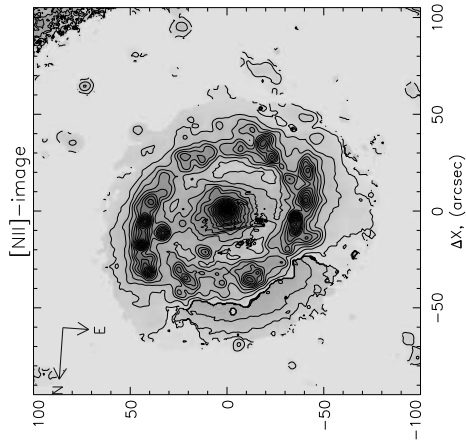
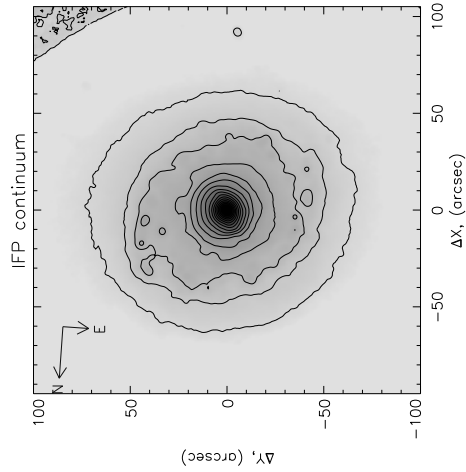
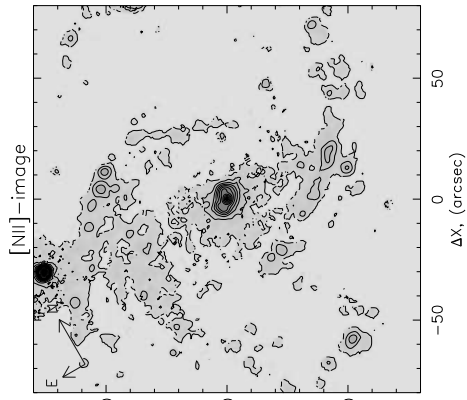
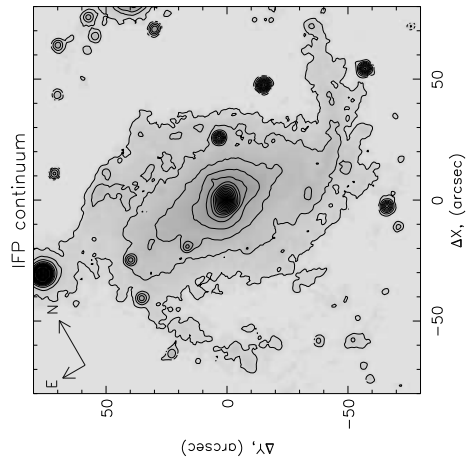


Рис. А.17: NGC 4736. Наблюдения с ИФП в линии [NII] (слева) и H α (справа)

NGC 6951: Fabry–Perot data



NGC 6951: Fabry–Perot data

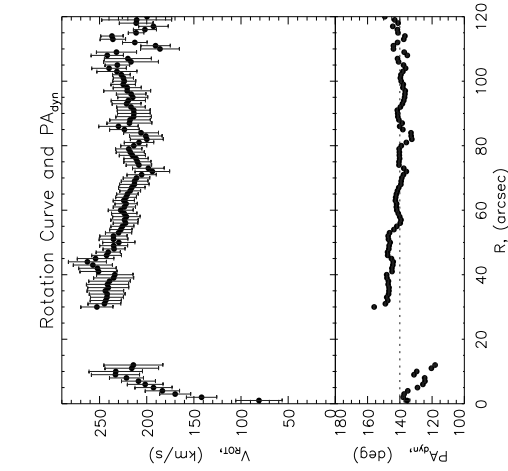
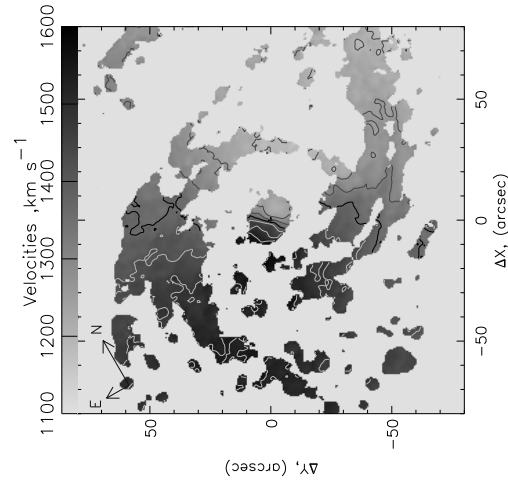
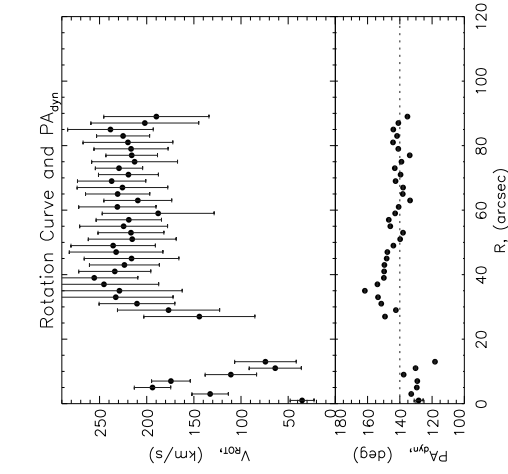
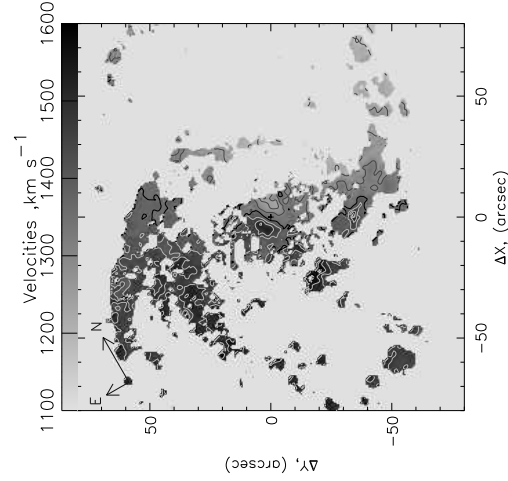
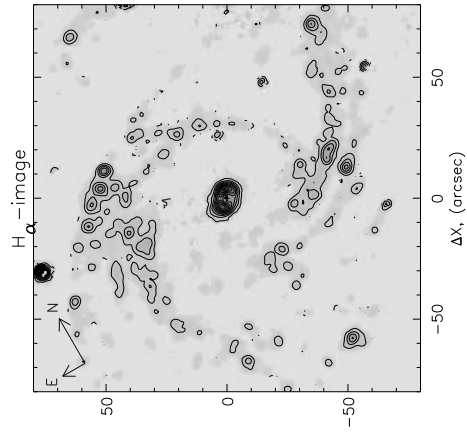
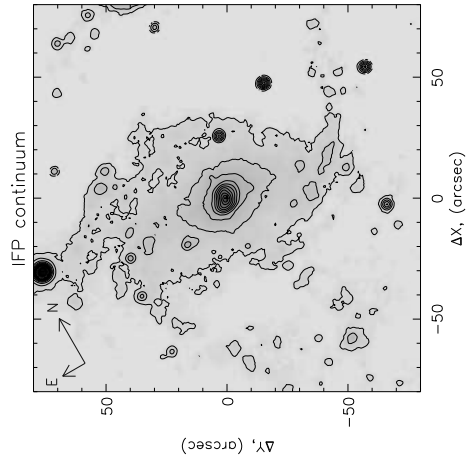


Рис. А.18: NGC 6951. Наблюдения с ИФП в линии [NII] (слева) и H α (справа)