Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова Государственный Астрономический Институт им. П. К. Штернберга

На правах рукописи УДК 524.7/524.82

Чилингарян Игорь Владимирович

ЭВОЛЮЦИЯ ГАЛАКТИК РАННИХ ТИПОВ: НАБЛЮДЕНИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ВИРТУАЛЬНАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

Специальность: 01.03.02 – астрофизика, звездная астрономия

Д И С С Е Р Т А Ц И Я на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

> Научный консультант: д.ф.-м.н. Сильченко О.К.

Москва – 2010

Оглавление

Введение

1	Me	годы а	анализа спектральных и фотометрических данных	20	
	1.1	Метод	ц аппроксимации спектров NBURSTS	20	
		1.1.1	Описание метода	23	
		1.1.2	Аппаратная функция спектрографа	24	
		1.1.3	Проверка метода и анализ ошибок	25	
		1.1.4	Стабильность решения	30	
		1.1.5	Возможные систематические ошибки	36	
		1.1.6	Информация о звездном населении в абсорбционных линиях	41	
	1.2	Деком	ипозиция профилей яркости галактик	45	
	1.3	Аналитические аппроксимации k-поправок			
		1.3.1	Введение	48	
		1.3.2	Эмпирическое вычисление k-поправок	49	
		1.3.3	Результаты	52	
		1.3.4	Дискуссия и выводы	56	
2	Kar)ЛИКОЕ	зые эллиптические и линзовидные галактики	59	
	2.1	Внутр	ренний звездный диск в IC 3653	61	
		2.1.1	Спектральные наблюдения и обработка данных	61	
		2.1.2	Возраст и металличность, полученные с помощью анализа Ликских		
			индексов	65	
		2.1.3	Звездные населения и внутренняя кинематика, полученные из ап-		
			проксимации спектров	69	
		2.1.4	Фотометрия и морфология на основе изображений HST	70	
		2.1.5	Обсуждение	73	
	2.2	Молод	дые ядра dE галактик скопления Дева	78	
		2.2.1	Наблюдения и обработка данных	79	
		2.2.2	Звездные населения и внутренняя кинематика	79	
		2.2.3	Обсуждение	84	
	2.3	Иссле	дование галактик в скоплении Abell 496	86	
		2.3.1	Наблюдения и обработка данных	86	
		2.3.2	Результаты	89	
		2.3.3	Обсуждение	102	
		2.3.4	Выводы	106	
		2.3.5	Параметры 46 галактик в скоплении Abell 496	107	

 $\mathbf{5}$

	2.4	Профили кинематики и звездных населений выборки карликовых галактик				
		ранних типов в скоплении Дева				
		2.4.1 Выборка и использованные данные				
		2.4.2 Анализ данных				
		2.4.3 Результаты				
		2.4.4 Заключение и выводы				
9	Kar	126				
ა	N ON 3 1	омпактные эллиптические и ультракомпактные галактики 130				
	0.1	Пець (анализ архивных данных) 138				
		3.1.1 Ланные источники данных релукция анализ				
		3.1.2 Результаты 139				
		313 Обсуждение 142				
	3.2	Звезлные населения 24 ультракомпактных карликовых галактик в скопле-				
	0.2	нии Печь (спектроскопия высокого разрешения) 148				
		3.2.1 Ланные: источники данных релукция анализ 148				
		3.2.2 Результаты и обсуждение 153				
	3.3	SDSS J124155.33+114003.7 – объект перехолного класса межлу ультраком-				
	0.0	пактными карликовыми и компактными эллиптическими галактиками 163				
		3.3.1 Открытие SDSSJ124155.33+114003.7: данные и метолы				
		3.3.2 Свойства SDSSJ124155.33+114003.7				
		3.3.3 Обсуждение и выводы				
	3.4	Открытие компактной эллиптической галактики в скоплении Abell 496 172				
		3.4.1 Свойства вновь открытого объекта				
		3.4.2 Обсуждение				
	3.5	SDSS J150634.27+013331.6 – вторая компактная эллиптическая галактика в				
		группе NGC 5846				
		3.5.1 Использовавшиеся данные и методы их анализа				
		3.5.2 Обсуждение				
	3.6	Открытие компактных эллиптических галактик с помощью Виртуальной				
		Обсерватории				
		3.6.1 Наблюдения, обработка и анализ данных				
		3.6.2 Результаты				
		3.6.3 N-body моделирование приливного взаимодействия				
4	Cne	елние по светимости и гигантские галактики ранних типов 203				
	4.1	База данных GalMer: моделирование взаимодейтсвующих галактик 206				
		4.1.1 Начальные условия				
		4.1.2 Численный метод				
		4.1.3 База данных GalMer				
		4.1.4 Сервисы онлайн анализа данных				
		4.1.5 Астрофизические приложения				
		4.1.6 Заключение				
		4.1.7 Модели галактик: профили плотности				
		4.1.8 Модели изолированных галактик				

4.2	Исследования E+A галактики SDSS J230743.41+152558.4				
	4.2.1	Наблюдения и обработка данных			
	4.2.2	Анализ данных			
	4.2.3	Результаты			
	4.2.4	Эволюция в прошлом и будущем			
4.3	Истор	рия звездообразования в галактике NGC 4245			
	4.3.1	Наблюдения			
	4.3.2	Кинематика и структура центральной части NGC 4245 246			
	4.3.3	Характеристики звездного населения центральной части NGC 4245 . 247			
	4.3.4	Обсуждение результатов			
4.4	Истории звездообразования в 7 дисковых галактиках ранних типов по дан-				
	ным і	анорамной спектроскопии			
	4.4.1	SAURON: наблюдения и обработка данных			
	4.4.2	Химически выделенные ядра в SB0-галактиках с экспоненциальными			
		дисками			
	4.4.3	Обсуждение результатов			
4.5	Цвета	близких галактик в оптическом и ИК диапазонах			
	4.5.1	Создание каталога галактик			
	4.5.2	Восстановленные звездные величины на $Z=0$ и яркие красные га-			
		лактики			

Заключение

 $\mathbf{278}$

Введение

Понимание процессов происхождения и эволюции галактик является одной из наиболее актуальных задач современной астрофизики. Существенный прогресс был достигнут в описании эволюции галактик ранних типов. Массивные эллиптические галактики, наблюдаемые преимущественно в скоплениях, присутствуют уже на $z \simeq 1$ (см. Ziegler, 2000 и ссылки в ней). Современные большие обзоры поддерживают следующие идеи: (1) концепция "downsizing" (период звездообразования тем длиннее, чем меньше масса галактики, что впервые было предложено в работе Matteucci (1994), основываясь на вариациях отношения [Mg/Fe] в эллиптических галактиках, затем в работе Cowie et al., 1996); (2) идее формирования "сверху-вниз" (top-down), где "сборка" масс галактик осуществляется на меньших красных смещениях для менее массивных галактик (Bundy et al., 2006; Cimatti et al., 2006). Однако, в то время как консенсус достигнут в исследованиях характерных времен звездообразования и химической эволюции, до сих пор не понятно даже для массивных эллиптических галактик, соответствует ли время роста их масс протяженности эпохи звездообразования (Bell et al., 2006; Pozzetti et al., 2007; Scarlata et al., 2007). К тому же, многочисленные слияния небольших галактик не являются единственным механизмом, оставляя место для быстрого коллапса газа в далеком прошлом. Более того, эволюция галактик в скоплениях отличается от эволюции в менее плотном окружении. Локальное соотношение морфология-плотность (Dressler, 1980) было подтверждено в более широких пределах плотности галактик, используя обзор SDSS (Goto et al., 2003b), а затем расширено на более высокие красные смещения (Capak et al., 2007). Эти работы, а также модель ослабления яркости диска для объяснения формирования S0-галактик (Christlein & Zabludoff, 2004), указывают на то, что морфология и звездообразование могут подвергаться влиянию различных процессов: увеличение доли галактик ранних типов в большей части обусловлено процессами слияния и взаимодействия галактик (в т.ч. "harassment", Moore et al., 1996), а также приливными эффектами, вызванными пересечением галактиками потенциала скопления, включая динамическое трение; замедление или прекращение звездообразования может вызываться выметанием межзвездной среды динамическим давлением (Gunn & Gott, 1972; Abadi et al., 1999) или "удушением" звездообразования (strangulation), которое предотвращает аккрецию путем устранения внешнего резервуара нейтрального газа (Larson et al., 1980). Также имеется предположение, что балджи линзовидных галактик в скоплениях являются результатами приливных взаимодействий.

Подобные сценарии морфологической трансформации галактик, перемещающихся к центру (или падающих на центр – "infalling") скопления также вызывают преобразование карликовых неправильных или слабых спиральных галактик в карликовые галактики ранних типов, составляющих наиболее представительный класс объектов в близких скоплениях. Однако, до настоящего времени как модели внешних факторов, так и классическая модель отклика на звездообразование ("галактические ветра", Dekel & Silk, 1986) не в состоянии воспроизвести наблюдаемые положения карликовых эллиптических галактик на фундаментальной плоскости (Djorgovski & Davis, 1987), связывающей внутреннюю кинематику и структурные свойства галактик (De Rijcke et al., 2005). В работах Geha et al. (2003) и van Zee et al. (2004a) у авторов возникли схожие сложности в объяснении средних возрастов и достаточно высоких металличностей dE галактик, полученных с помощью Ликских индексов: ни один из эволюционных сценариев не мог быть ни подтвержден, ни устранен из рассмотрения. Еще более усложнила ситуацию работа Lisker et al. (2007), где было показано, что карликовые галактики ранних типов (dE/dS0) не являются одним классом объектов. По крайней мере пять подклассов были найдены в скоплении Дева, в том числе: dE(di) с внутренними дисками; dE(bc) с голубыми центральными областями, где имеются признаки недавнего либо текущего звездообразования. При этом яркие галактики с ядрами dE(N), формирующие динамически неравновесное население дисковых карликовых галактик и, по-видимому, являющихся результатами трансформации галактик, относительно недавно прибывших в скопление, отличаются от dE галактик без ядер, формирующих динамически равновесное население в скопление, которые скорее всего оказались в скоплении уже очень давно, а возможно и сформировались в нем.

Карликовые эллиптические (dE) и линзовидные (dS0) галактики – звездные системы низкой светимости ($M_B > -18.0 \text{ mag}$), имеющие регулярную морфологию, оказываются численно доминирующим населением в близких скоплениях и группах галактик (Ferguson & Binggeli, 1994). В моделях холодной темной материи и иерархического сценария формирования галактик они рассматриваются как строительные блоки более крупных звездных систем, наблюдаемых ныне (см. например White & Frenk, 1991). Таким образом, их происхождение и эволюция становится одними из важнейших вопросов современной астрофизики. Одна из специфических характеристик, отличающая карликовые dE/dS0 галактик от карликовых неправильных галактик – отсутствие межзвездной среды и текущего звездообразования. Предлагаются несколько сценариев устранения межзвездной среды из карликовых неправильных галактик и, как следствия, их морфологической трансформации в галактики ранних типов (см. подробный обзор в работе De Rijcke et al., 2005): взрывы сверхновых типа core collapse на раннем этапе вспышки звезообразования выметают газ из маломассивных объектов, гравитационное поле которых слишком слабое, чтобы удержать его (Dekel & Silk, 1986); выметание лобовым давлением межгалактического газа (Gunn & Gott, 1972; Abadi et al., 1999) в скоплениях и группах, которое также более эффективно для маломассивных объектов; гравитационные взаимодействия с соседями (так называемый "gravitational harassment", Moore et al., 1996, 1998). Однако ни один их них не в состоянии полностью объяснить все наблюдательные проявления этих объектов одновременно. Возможное многообразие сценариев эволюции было предложено в работе van Zee et al. (2004a) и позднее исследовано в работе Lisker et al. (2008) для объяснения свойств различных подклассов карликовых эллиптических галактик.

На диаграмме средняя поверхностная яркость – абсолютная звездная величина, а также на Фундаментальной плоскости (FP, Djorgovski & Davis, 1987), карликовые и гигантские галактики формируют две отдельные последовательности, соединяющиеся в районе $M_B =$ -18 mag (см. Kormendy et al., 2009 и ссылки там). Однако, это бимодальное распределение может быть объяснено как проекция двух известных монотонных зависимостей других структурных параметров галактик ранних типов как функций их светимости: (а) индекса концентрации профиля яркости и (b) центральной поверхностной яркости (Graham & Guzmán, 2003; Hilker et al., 2003; Karick et al., 2003; Ferrarese et al., 2006). Вопросы: (1) "есть ли плавный переход структурных параметров между гигантскими и карликовыми галактикам ранних типов?" и (2) "Связаны ли эти свойства со сходствами/различиями в путях их эволюции?" в настоящее время являются предметом активного обсуждения.

Звездные населения dE/dS0 галактик разительным образом отличаются от гигантских галактик, указывая на отличия в историях формирования и химической эволюции галактик разных светимостей. Гигантские эллиптические галактики обычно содержат очень старые (> 10 Gyr) высокометалличные ([Fe/H]> 0 dex) звезды высокими отношениями обилия а-элементов (например, магний) к элементам железного пика (например, железо), что указывает на короткую продолжительность эпохи звезообразования в них (Matteucci, 1994). В то же время, dE/dS0 галактики обычно беднее металлами (-1.0 < [Fe/H] < -0.2 dex) и имеют солнечные отношения α /Fe, соответствующие протяженным историям звездообразования. Средние возрасты звезд в карликовых галактиках ранних типов антикоррелируют со светимостью. Карликовые и гигантские галактики формируют единое монотонное отношение металличность-светимость, покрывающее диапазон в 14 звездных величин по светимости без каких либо признаков излома в районе $M_B = -18$ mag, поддерживая тем самым сценарий отклика на звездообразование (Dekel & Silk, 1986). Как следствие, продолжительность вспышки звездообразования должна коррелировать с массой, что вступает в противоречие с интерпретацией наблюдаемых свойств звездных населений в карликовых галактиках ранних типов. В то же время, внешние каналы формирования dE/dS0 могут объяснить такие особенности, как увеличение разброса возрастов для слабых галактик и наличие вложенных структур в более ярких, но не в состоянии воспроизвести соотношение масса-металличность.

Исторически dE/dS0 галактики в скоплении Дева были классифицированы на два основных подкласса по присутствию заметного ядра на их фотометрических изображениях (Binggeli et al., 1985). Однако, недавние исследования с использованием космического телескопа им. Хаббла (HST) показали (Ferrarese et al., 2006), что все карликовые эллиптические галактики содержат ядра, в том числе те, которые были ранее классифицированы как объекты без ядер. Часто утверждается, что массы звездных ядер dE/dS0 следуют соотношению между дисперсией скоростей в галактики и массой черной дыры (M_{BH} vs σ_0), установленное для гигантских галактик, если вместо массы черной дыры брать массу звездного ядра, однако данные доступные в данный момент не позволяют однозначно сделать этот вывод. В то же время, происхождение ядер в карликовых галактиках остается открытым вопросом – они могут формироваться как на месте ("*in situ*"), так и являться шаровыми скоплениями, упавшими на центр галактики из-за динамического трения.

Новый класс галактик был открыт около 10 лет назад в скоплении Печь (Drinkwater et al., 2003), названный ультракомпактными карликовыми галактиками (ultracompact dwarfs, UCD). Из-за своей экстремальной компактности объекты выглядели точечными источниками при наземных наблюдениях, однако они оказались существенно крупнее, чем типичные шаровые скопления. Рассматривается несколько альтернативных сценариев их происхождения: (1) UCD являются результатом эволюции первичных флуктуаций плотности (Phillipps et al., 2001); (2) они формируются путем [возможно многократных] слияний шаровых скоплений или просто представляют собой экстремально яркий конец функции светимости шаровых скоплений (Mieske et al., 2002); (3) UCD – ядра карликовых эллиптических галактик (dE,N), ободранных приливными силами (Bekki et al., 2003) или карликовые эллиптические галактики с ядрами с очень низкой поверхностной яркостью самой галактики; (4) UCD формируются как приливные суперскопления в процессе слияния галактик (Fellhauer & Kroupa, 2005; Kissler-Patig et al., 2006). Основные вопросы, до сих пор не получившие ответа: "содержат ли UCD темную материю?"; "как их звездные населения соотносятся с населениями ядер dE галактик?"; "что мы можем сказать о внутренней динамике UCD: вращаются ли они, содержат ли они центральные черные дыры?"

Если процесс приливного обдирания действует на более массивные галактики, то следует ожидать результатов этого процесса, которые будут крупнее и массивнее, чем UCD. Пример такого объекта – М 32, компактная эллиптическая (сЕ) галактика – спутник туманности Андромеды М 31. Ее светимость соответствует типичным dE/dS0 галактикам в скоплениях ($M_B = -15.34 \text{ mag}$), но эффективный радиус в 10 раз меньше, т.е. объемная звездная плотность в 1000 раз выше. В течение нескольких десятилетий эти галактики считались уникальными объектами, поскольку их было известно всего 3, включая М 32, а различные проекты по их поискам не приносили результатов. Поэтому даже весомые доказательства в пользу того, что М 32 является линзовидной галактикой, испытавшей сильное обдирание приливными силами (Graham, 2002) не позволяло рассматривать этот механизм как важный фактор эволюции галактик. Для того, чтобы понять важность эффектов приливной потери массы в жизни галактик, необходимо изучать структурные свойства, внутреннюю динамику и звездные населения сЕ галактик. Определение масс черных дыр позволит получить дополнительную информацию об этих объектах, поскольку процесс приливного обдирания должен вызвать их смещение относительно отношения M_{BH} vs σ_0 .

К исследованиям процессов формирования и эволюции галактик, разумеется, можно подходить с различных сторон. Два традиционных глобальных подхода включают в себя: (1) наблюдательные проекты, нацеленные на исследование кинематики и звездного населения как отдельных объектов, так и целых весьма крупных выборок галактик; (2) детальное численное моделирование эволюции галактик с использованием наших знаний о физике различных процессов, играющих важные роли в жизни галактик.

Однако существует и третий подход, принципиально отличный от двух упомянутых. В настоящее время, увеличивающийся объем высококачественных данных из различных проектов (как наблюдательных, так и связанных с моделированием) становится доступным в архивах крупных обсерваторий и центров данных, которые представляют собой один из важнейших компонентов новой концепции, называемой "Виртуальная Обсерватория".

Что же такое Виртуальная Обсерватория? Виртуальная Обсерватория представляет собой реализацию концепции электронной науки в астрономии; это *мощная виртуальная среда*, предназначенная для увеличения возможностей астрономических исследований и научного выхода данных. Она сформирована архивами данных и средствами их анализа, скрепленными воедино набором однородных стандартов и технологий, которые внедряет и поддерживает Международный Альянс Виртуальной Обсерватории¹ (International Virtual Observatory Alliance, IVOA).

В несколько упрощенном описании увеличение научного выхода данных означает полу-

¹http://ivoa.net

Введение

чение большего количества научных результатов (например, опубликованных статей или представленных докладов на конференциях) с каждого гигабайта данных, приходящих с данного конкретного инструмента. Это в конечном счете означает увеличение влияния каждого гигабайта данных на общее развитие науки – в точности так же, как публикация научной работы помимо журнала еще и на сервере препринтов увеличивает ее влияние и роль в отрасли.

В традиционном подходе к научной работе львиная доля времени и усилий исследователя затрачивается на разнообразные низкоуровневые операции конвертации форматов, редукции данных и подготовке их к научному анализу, поиску информации, написанию сценариев автоматизированной обработки для многократных операций и других действиях, повторное использование которых зачастую ограничено или вовсе не представляется возможным, тогда как собственно интеллектуальные усилия, анализ и интерпретация подготовленного научного материала, имеющие решающее значение во всем процессе, занимают несравнимо меньшее время. Миссией Виртуальной Обсерватории в широком смысле является разделение творческого, интеллектуального, высокоуровневого процесса от низкоуровневых операций, которые должны либо происходить прозрачно (незаметно) для исследователя, либо быть максимально пригодными для повторного использования в ходе работы над последующими научными задачами. При таких целях на первое место выходят абстрагированные от конкретных инструментов и наблюдателей данные, готовые к научному использованию, сервисы для доступа к ним и широкий набор соглашений для обеспечения прозрачности рутинных операций. Всем этим в той или иной степени занимается Виртуальная Обсерватория и ее успехи к настоящему моменту и само текущее положение дел уже несет в себе новые возможности для эффективных научных исследований, обходящихся без рутинной низкоуровневой составляющей. Виртуальную Обсерваторию иногда называют всемирной сетью (World Wide Web, WWW) для астрономов.

В последние годы Виртуальная Обсерватория достигла существенного прогресса (Chilingarian, 2009b; Zolotukhin, 2009). Со стороны IVOA мы имеем достаточно широкий набор стандартов, которые охватывают форматы данных (VOTable), описания метаданных ресурсов (Resource Metadata), модель данных для одномерных спектров (Spectrum Data Model) и значительно более сложную и емкую Characterisation Data Model, язык запросов к данным (ADQL), протоколы доступа к спектрам и изображениям (SIAP, SSAP), протокол коммуникаций между различными приложениями на рабочей станции пользователя (SAMP), механизмы аутентификации и авторизации, и другие. Многие стандарты находятся еще на разных стадиях разработки. К настоящему моменту в Виртуальной Обсерватории стало возможным работать даже с чрезвычайно сложными наборами данных – например, 3D-спектроскопией (Chilingarian et al., 2006, 2008a) и результатами N-body симуляций.

В то же самое время, разработчики приложений создали впечатляющий набор VOинструментов, начиная от самых общих и заканчивая узкоспециализированными клиентскими средствами. Поставщики данных и сервисов внесли свой вклад в VO, предоставляя доступ к огромным коллекциям и архивам данных в диапазоне длин волн от радио до гамма. Совсем недавно стали появляться сервисы доступа к теоретическим моделям (например, коллекция теоретических спектров звездных атмосфер в Spanish-VO или синтетические модели PEGASE.2 / PEGASE.HR звездных популяций (Fioc & Rocca-Volmerange, 1997; Le Borgne et al., 2004) в VO-France, доступ к результатам космологических симуляций в Italian VO). Также нельзя не упомянуть первые прототипы сервисов для анализа данных и научно-значимых сервисов, ассоциированных с архивами данных, например моделирование спектрофотометрических свойств взаимодействующих галактик в базе данных GalMer (Chilingarian et al., 2010a).

Виртуальная Обсерватория используется для научных исследований с 2004 года. Первой работой с научно-значимым результатом стало открытие оптически слабых запыленных квазаров в работе Padovani et al. (2004), которая стала примером исследования во многих диапазонах длин волн, выполненного полностью в рамках инфраструктуры VO. Три года спустя исследования запыленных AGN (Active Galaxy Nuclei, активные ядра галактик) были продолжены (Richards et al., 2007). В ближайшее время должны появиться работы, эксплуатирующие VO на качественно более сложном уровне, с применением более утонченных и общих моделей данных и технологических достижений.

Общая характеристика работы

Диссертация посвящена исследованиям механизмов происхождения и эволюции галактик ранних типов различных светимостей – от ультракомпактных карликовых галактик, имеющих светимости всего лишь в несколько раз превышающие светимости ярких шаровых скоплений, до гигантских галактик крупнее и ярче Млечного Пути. В ходе исследований используются результаты наблюдений и численного моделирования, а также беспрецедентные возможности, предоставляемые Виртуальной Обсерваторией. Традиционная парадигма астрономических исследований подразумевает изобретение, создание и использование новых телескопов и наблюдательных методов. Виртуальная Обсерватория (Virtual Observatory, VO) позволяет видоизменить эту парадигму, поскольку для новых открытий используются существующие данные из архивов и каталогов.

В работе сделан акцент на исследование эволюции галактик низких светимостей. Несмотря на то, что карликовые галактики ранних типов составляют более 70 процентов населения плотных областей Вселенной (скоплений, богатых групп), их происхождение и эволюция до сих пор остаются не до конца понятными, особенно механизм потери холодного газа и, как следствие, остановки звездообразования. Рассматриваемые в настоящее время сценарии: (1) выметание газа лобовым давлением горячей межгалактической среды, (2) выметание газа галактическими ветрами, возникающими вследствие нагрева межзвездной среды звездным ветром массивных звезд и вспышеками сверхновых звезд, (3) потеря газа вследствие приливного воздействия со стороны соседных галактик и общего потенциала скопления или группы галактик.

Недавние исследования показали огромное разнообразие наблюдательных проявлений диффузных эллиптических галактик: встречаются вращающиеся и невращающиеся галактики (по-видимому поддерживаемые анизотропными дисперсиями скоростей), многие из них содержат вложенные структуры – диски, бары, некоторые показывают наличие межзвездной среды, ряд объектов обнаруживает кинематически выделенные ядра. Все эти проявления позволяют связать происхождение карликовых эллиптических галактик с дисковыми карликовыми галактиками поздних типов, испытавшими морфологическую трансформацию и потерявшими газ за время жизни в скоплениях или группах.

Для аргументированного выбора сценария эволюции карликовых эллиптических галактик было решено исследовать связь звездной кинематики и параметров звездного населения (возраст, металличность, обилие α-элементов), применяя панорамную спектроскопию близких галактик, мультиобъектную спектроскопию большой выборки более далеких объектов и заново проанализировав опубликованные данные для близких галактик, доступные в Виртуальной Обсерватории.

Компактные эллиптические (cE) и ультракомпактные карликовые (UCD) галактики представляют собой два класса звездных систем, предположительно формирующихся путем приливного "обдирания" более массивных объектов. Оба класса представлены всего несколькими десятками известных членов, включая недавно открытые объекты переходного типа. Поскольку все эти объекты очень маленькие и плотные, для поддержания их в равновесии требуются гораздо более высокие значения внутренних дисперсий скоростей по сравнению с карликовыми эллиптическими и сфероидальными галактиками схожих светимостей. Для исследования механизмов приливного обдирания было решено проанализировать свойства звездных населений и внутренней кинематики известных UCD, а также предпринять поиск новых сЕ галактик методами Виртуальной Обсерватории, после чего назрела необходимость численного моделирования процессов потери звездной массы дисковыми галактиками за счет приливного взаимодействия с потенциалом центральной доминирующей сD галактики скопления.

Для исследования более массивных систем, помимо наблюдений было решено численно промоделировать "продукты" взаимодействия галактик различных морфологических типов, для чего потребовалась разработка методов моделирования цветов и спектров "синтетических" галактик, которые можно было бы напрямую сравнивать с результатами наблюдений.

В результате исследований, выполненных автором за период с 2003 г. по 2010 г., разработан ряд оригинальных методов анализа спектральных и фотометрических данных. Главным достижением является метод восстановления кинематических параметров (лучевые скорости, дисперсии скоростей) и определения параметров звездного населения (возраст, металличность) по спектрам, интегрированным вдоль луча зрения. Приложение этой методики к спектральным данным для карликовых галактик ранних типов позволило впервые получить пространственно разрешенную информацию о звездных населениях в этих объектах для статистически значимой выборки галактик. С использованием методов Виртуальной Обсерватории были открыты многочисленные компактные эллиптические галактики в близких скоплениях, которые до этого считались уникальными объектами; их спектры были исследованы той же методикой, что позволило судить о сценариях их эволюции.

Актуальность темы

В настоящее время исследование эволюции галактик является одной из основных и наиболее популярных задач современной астрофизики. Галактики ранних типов представляют основное население скоплений галактик и некоторых массивных групп, в соответствии с известной зависимостью морфология-плотность. Механизмы эволюции галактик весьма разнообразны, но в общем все они могут быть разделены на две категории. Внутренние механизмы связаны с процессами, происходящими в самой галактике вне связи с окружением, такими как, к примеру, обогащение межзвездной среды металлами в процессе звездообразования, формирование баров и спиральных ветвей в дисках галактик в ре-

Введение

зультате развития неустойчивостей. Внешние механизмы обусловлены гравитационным или газодинамическим взаимодействием галактики с соседями в скоплении или группе, потенциалом самого скопления, либо межгалактической средой в нем. Очевидно, что эффективность различных эволюционных механизмов будет сильно отличаться для галактик разных масс и в разном окружении.

Механизмы эволюции карликовых галактик ранних типов, являющихся самым многочисленным населением в скоплениях, исследованы гораздо хуже, чем для гигантских систем (как эллиптических, так и спиральных). Принимая во внимание последние данные о параметрах звездного населения в dE/dS0 галактиках, а именно: относительно высокие металличности и молодые возрасты, первоначальная идея о том, что они являются прошедшим пассивную эволюцию "строительным материалом" для более крупных звездных систем, не выдерживает критики. Таким образом, вопрос о происхождении и эволюции карликовых галактик ранних типов является краеугольным камнем для понимания эволюции звездных систем в целом.

Известно, что взаимодействия галактик играют важнейшую роль в их эволюции, однако роль процессов приливного "обдирания" галактик, приводящего к образованию компактных звездных систем, была не столь очевидна из-за очень малого числа известных объектов данного типа. Таким образом, поиск новых компактных и ультракомпактных галактик и исследование их динамики и характеристик звездного населения является актуальной проблемой для понимания влияния окружения на эволюцию галактик.

Классическая методика определения параметров звездного населения путем измерения Ликских индексов была предложена как эмпирическая более 25 лет назад, а ее первое астрофизическое обоснование было дано в 1994 году. С того времени компьютерные методы эволюционного моделирования шагнули далеко вперед, и появилась возможность синтеза распределений энергии в спектрах целиком с высоким спектральным разрешением, а не только параметров отдельно взятых спектральных деталей. Соответственно, учитывая также прогресс в методиках наблюдений и инструментальной базе, создание качественно нового способа оценки параметров звездного населения, использующего полную информацию, содержащую в спектрах, является актуальной проблемой для анализа современных спектральных данных.

Исследование и интерпретация оптических и инфракрасных цветов близких галактик является одной из важнейших задач современной наблюдательной космологии в связи с вводом в эксплуатацию новых телескопов для крупных фотометрических обзоров. Однако до текущего момента не существовало надежных способов приведения звездных величин и цветов галактик в единую систему отсчета, то есть учета так называемых *k*-поправок, в особенности в случае ограниченного набора наблюдательных данных.

Цель работы

Разработка методов анализа фотометрических и спектральных данных, необходимых для изучения эволюции галактик: создание методики анализа абсорбционных спектров, в т.ч. с низкими отношениями сигнал-шум; создание гибкой методики декомпозиции профилей яркости галактик; поиск простой и достаточно точной аналитической зависимости для вычисления *k*-поправок в зависимости от минимального набора параметров, известных о галактике.

Разработка методов доступа к результатам численного TreeSPH моделирования эволюции изолированных и взаимодействующих галактик; алгоритмов визуализации этих результатов; создание методики моделирования цветов и спектров, применение этой методики для сравнения результатов численного моделирования и наблюдательных данных.

Проведение анализа кинематики и звездного населения выборки карликовых галактик с целью выбора сценария их формирования и эволюции из существующих в настоящее время.

Поиск и исследование компактных звездных систем – компактных эллиптических и ультракомпактных карликовых галактик – в близких скоплениях и группах галактик, моделирование их происхождения и эволюции.

Исследование звездного населения гигантских галактик ранних типов с целью сравнить влияние внутренних и внешних факторов эволюции на галактики разных масс.

Научная новизна работы

- 1. Разработан ряд оригинальных методов анализа данных, в том числе: оценка параметров звездного населения и кинематики с помощью анализа спектров, интегрированных вдоль луча зрения; многокомпонентная декомпозиция профилей яркости галактик; аналитические приближения k-поправок для галактик на малых красных смещениях.
- 2. Впервые получены данные панорамной спектроскопии для карликовых эллиптических и линзовидных галактик в скоплениях; получены поля скоростей и пространственные распределения параметров звездного населения; впервые получены профили параметров звездного населения для карликовых галактик ранних типов; получены параметры звездного населения, оценки химического состава и центральные дисперсии скоростей для статистически значимой выборки карликовых эллиптических галактик в скоплении Abell 496.
- 3. Открыты химически- и эволюционно-выделенные ядра, а также несколько новых кинематически-выделенных ядер в карликовых эллиптических галактиках; на основе полученных результатов сделан вывод о наиболее вероятном сценарии формирования dE галактик – выметании газа лобовым давлением межгалактической среды и гравитационным взаимодействием с другими членами скопления ("gravitational harassment").
- 4. Получены оценки параметров звездного населения для выборки ультракомпактных эллиптических галактик в скоплении Печь, впервые получены оценки количества темной матери в этих объектах и сделан вывод о несовместимости начальной функции масс Солпитера с результатами наблюдений.
- 5. В скоплении Дева открыта галактика (М59сО) нового типа переходный объект от ультракомпактных карликовых к компактными эллиптическим галактикам.
- 6. С помощью методов Виртуальной Обсерватории в близких скоплениях открыты более 20 компактных эллиптических галактик, что превращает этот класс объектов из "уникальных" в "обычные в некоторых условиях окружения"; сделан вывод о важности

потери звездной массы галактиками ранних типов за счет приливных взаимодействий с потенциалом скопления.

- 7. Предложена новая концепция научного исследования в астрономии последовательное применение "Виртуальная Обсерватория – наблюдательная программа – численное моделирование".
- 8. Предложен качественно новый, эффективный метод моделирования спектрофотометрических свойств изолированных и взаимодействующих галактик по результатам Tree-SPH моделирования (проект GalMer), позволяющий напрямую сравнивать результаты моделирования с фотометрическими и спектральными наблюдениями близких галактик.
- 9. Впервые получены данные панорамной спектроскопии для галактики типа E+A (галактики после вспышки звездообразования, "poststarburst"); из наблюдений восстановлены параметры звездного населения и внутренняя звездная кинематика объекта.
- 10. Путем комбинации публичных архивов данных SDSS и UKIDSS составлен каталог галактик, содержащий оптические спектры, цвета в области от ультрафиолетового до инфракрасного диапазона спектра, наилучшие аппроксимации спектров моделями звездных населений, k-поправки для 200 тыс. галактик с красными смещениями 0.03 < z < 0.6.</p>

Совокупность представленных в диссертации результатов составляет основу нового направления "исследования эволюции галактик с помощью нового поколения методов анализа данных и численного моделирования".

Практическая ценность

- 1. Предложенная методика аппроксимации спектров дает такую же точность параметров звездного населения, как существующие методики (Ликские индексы), но для данных с отношением сигнал-шум в 2-5 раз ниже, что позволяет существенно сократить продолжительность экспозиции и делает возможным исследования объектов низкой поверхностной яркости, недоступных ранее; разработанная методика позволила успешно анализировать наблюдения карликовых эллиптических галактик, имеющих низкие поверхностные яркости, и в будущем позволит провести переобработку уже существующих абсорбционных спектров на качественно новом уровне.
- Предложенные алгоритмы вычисления k-поправок имеют важнейшее значение в современных внегалактических исследованиях в связи с простотой их использования и достигаемой высокой точностью коррекции звездных величин на красных смещениях z < 0.5.
- 3. Представленная база данных результатов Tree-SPH моделирования изолированных и взаимодействующих галактик GalMer имеет широкие перспективы использования во внегалактических исследованиях, основанных как на наблюдениях, так и на моделировании; предложенный высокоэффективный алгоритм моделирования спектрофотометрических свойств галактик можно применять к результатам Tree-SPH моделирования, выполняемых в рамках других проектов и научных задач.

4. Предложенная в данной диссертации концепция научного исследования "Виртуальная Обсерватория – наблюдательная программа – численное моделирование" имеет междисциплинарный аспект, поскольку данный подход может применять в любой отрасли науки, где к данным эксперимента или моделирования предоставлен свободный доступ через Интернет.

Апробация результатов работы

Результаты работы докладывались автором на 25 научных семинарах в 20 российских и зарубежных институтах и на 45 международных научных конференциях в период с 2004 по 2010 годы, в том числе:

- Spectroscopy for Cosmology and Galaxy Evolution 2005-2015 (Гранада, Испания, 3-5 октября 2007)
- Nuclear Star Clusters Across the Hubble Sequence (Гайдельберг, Германия, 25-27 февраля 2008)
- Gas and Stars in Galaxies: a Multi-Wavelength 3D Perspective (ESO, Германия, 10-13 июня 2008)
- Multi-wavelength Astronomy and the Virtual Observatory Workshop (Виллафранка дель Кастильо, Испания, 1-3 декабря 2008)
- ESO Star Cluster Workshop (Сантьяго, Чили, 9-11 марта 2009)
- Galaxy wars: star formation and stellar population in interacting galaxies (Джонсон-Сити, Теннесси, США, 20-23 июля 2009)
- Nearby Dwarf Galaxies (САО РАН, Россия, 14-18 сентября 2009)
- ADASS-XIX (Саппоро, Япония, 4-7 октября 2009)

Публикации и личный вклад автора

Основные результаты диссертации изложены в 24 работах, опубликованных в отечественных и зарубежных изданиях, а также трудах международных конференций. В работах [19, 20] автору принадлежит создание методики анализа спектров NBURSTS и ее реализация в виде программного пакета, в работе [13] – аналитические аппроксимации k-поправок, в работах [9, 16] – разработка базы данных GalMer, создание алгоритмов визуализации и моделирования спектрофотометрических свойств галактик, в работах [1, 22–24] – создание необходимых инфраструктурных компонент Виртуальной Обсерватории для проведения исследований. В оставшихся работах из списка и работе [1] автору принадлежит применение методики NBURSTS для анализа спектральных данных, а в тех работах, где фамилия автора присутствует первой или единственной в списке – постановка задачи, интерпретация полученных результатов, и доведение их до публикации.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и содержит: 294 страниц, 101 рисунок, 41 таблицу. Список литературы насчитывает 434 наименований. В начале каждого раздела приводится ссылка на опубликованный вариант результатов.

В первой главе содержится краткий обзор существующих методов оценки параметров звездного населения и приводится описание разработанной методики NBURSTS, использующей аппроксимацию наблюдений модельными спектрами. Исследованы точность, устойчивость, возможные систематические ошибки метода. Описан метод декомпозиции профилей яркости галактик, предназначенный для определения структурных параметров галактических подсистем по фотометрическим данным. Представлен метод аналитической аппроксимации k-поправок для часто используемых фотометрических полос.

Вторая глава посвящена исследованиям карликовых эллиптических и линзовидных галактик в скоплениях и группах, выполненным с помощью наблюдений на различных телескопах, а также с использованием данных, доступных в Виртуальной Обсерватории. Приводятся результаты анализа панорамной спектроскопии (спектрограф MPFS на БТА САО РАН) четырех карликовых эллиптических галактик в скопления Дева: IC 783, IC 3468, IC 3509, IC 3653. Представлено открытие эволюционно-выделенных ядер в галактиках IC 783, IC 3509 и IC 3468. Далее приводятся результаты исследования большой выборки галактик ранних типов в скоплении Abell 496 (мультиобъектная спектроскопия на FLAMES/Giraffe ESO VLT и глубокая многоцветная фотометрия с CFHT MegaCam). После этого приводятся результаты анализа архивных данных для 30 карликовых эллиптических и линзовидных галактик в скоплении Дева (Двойной спектрограф на 5-м телескопе Хейла, Паломарская обсерватория и спектрограф CARELEC на 2-м телескопе Обсерватории Верхнего Прованса), представлены радиальные профили кинематических параметров и параметров звездного населения.

В третьей главе представлены результаты исследования компактных эллиптических (cE) и ультракомпактных карликовых (UCD) галактик. Приводятся результаты исследования кинематических параметров, внутренней динамики и свойств звездных населений для выборки ультракомпактных галактик в скоплении Печь по данным мультиобъектной спектроскопии на FLAMES/Giraffe (телескоп ESO VLT). Затем представлено открытие объекта переходного типа cE/UCD и его исследования, осуществленные с помощью анализа данных, доступных в Виртуальной Обсерватории. После этого представлены открытия компактных эллиптических галактик в скоплении Abell 496 и группе NGC 5846, для второго объекта приводятся результаты детального исследования внутренней кинематики и звездного населения по результаты детального исследования внутренней кинематики и звездного населения по результаты детального исследования внутренней кинематики и звездного объекта приводятся результаты панорамной спектроскопии. В заключительной части главы представлено открытие 21 сЕ галактики в близких скоплениях, сделанное при помощи Виртуальной Обсерватории, результаты последующих наблюдений на БТА САО РАН и численного моделирования процесса формирования сЕ галактик за счет потери звездной массы большими дисковыми галактиками путем приливного воздействия потенциала скопления.

В четвертой главе приводятся результаты моделирования и наблюдательных исследований гигантских галактик ранних типов. Представлена база данных GalMer, содержащая результаты комплексного моделирования изолированных и взаимодействующих галактик, включающего эффекты гравитации и газодинамики а также продвинутые механизмы визуализации данных и реализацию алгоритма моделирования спектрофотометрических свойств галактик. Приводятся примеры научного использования базы данных, в том числе интерпретация сложного наблюдаемого профиля плотности в линзовидной галактике NGC 6340. Затем описываются исследования E+A галактики SDSS J230743.41+152558.4 методом панорамной спектроскопии, определение ее массы и динамического статуса, кратко обсуждаются проблемы эволюции цветов галактик ранних типов. После этого представлены результаты исследования звездных населений в галактике раннего типа промежуточной массы NGC 4245 и семи линзовидных галактиках с барами и чисто экспоненциальными внешними дисками по данным панорамной спектроскопии. В заключительной части описывается процедура построения каталога спектральных распределений энергии для сотен тысяч галактик по данным фотометрических обзоров и приводятся примеры использования этих данных для изучения эволюции галактик ранних типов.

В заключении приводятся выводы, выносимые на защиту.

Основные результаты опубликованы в следующих работах:

- A population of compact elliptical galaxies detected with the Virtual Observatory / I. Chilingarian, V. Cayatte, Y. Revaz et al. // Science. - 2009. -December. - Vol. 326. - Pp. 1379-1382.
- 2. Молодые ядра в карликовых эллиптических галактиках / И. В. Чилингарян, О. К. Сильченко, В. Л. Афанасьев, Ф. Прюньэль // Письма в астрономический экурнал. 2007. Май. Том 33. Стр. 292–298.
- История звездообразования в центральной области галактики с баром NGC 4245 / О. К. Сильченко, И. В. Чилингарян, В. Л. Афанасьев // Письма в астрономический журнал. — 2009. — Февраль. — Том 35. — Стр. 75-86.
- 4. Kinematics and stellar populations of the dwarf elliptical galaxy IC 3653 / I. V. Chilingarian, P. Prugniel, O. K. Sil'chenko, V. L. Afanasiev // MNRAS 2007. April. Vol. 376. Pp. 1033-1046.
- 5. Discovery of a new M 32-like "compact elliptical" galaxy in the halo of the Abell 496 cD galaxy / I. Chilingarian, V. Cayatte, L. Chemin et al. // A&A 2007. May. Vol. 466. Pp. L21-L24.
- SDSSJ124155.33+114003.7 a missing link between compact elliptical and ultracompact dwarf galaxies / I. V. Chilingarian, G. A. Mamon // MNRAS - 2008. - March. - Vol. 385. - Pp. L83-L87.
- 7. Kinematics and stellar populations of low-luminosity early-type galaxies in the Abell 496 cluster / I. V. Chilingarian, V. Cayatte, F. Durret et al. // A&A - 2008. – July. – Vol. 486. – Pp. 85–97.
- Stellar population constraints on the dark matter content and origin of ultracompact dwarf galaxies / I. V. Chilingarian, V. Cayatte, G. Bergond // MNRAS – 2008. – November. – Vol. 390. – Pp. 906–912.

- 9. Evolution of galaxies in pairs: Learning from simulations / P. Di Matteo, F. Combes, I. Chilingarian et al. // Astronomische Nachrichten. 2008. Vol. 329. P. 952.
- 10. Evolution of dwarf early-type galaxies I. Spatially resolved stellar populations and internal kinematics of Virgo cluster dE/dS0 galaxies / I. V. Chilingarian // MNRAS - 2009. - April. - Vol. 394. - Pp. 1229-1248.
- 11. Internal kinematics and stellar populations of the poststarburst galaxy SDSS J230743.41+152558.4 / I. V. Chilingarian, S. De Rijcke, P. Buyle // ApJ - 2009. – June. – Vol. 697. – Pp. L111–L115.
- 12. NGC 6340: an old S0 galaxy with a young polar disc. Clues from morphology, internal kinematics, and stellar populations / I. V. Chilingarian, A. P. Novikova, V. Cayatte et al. // A&A - 2009. - September. - Vol. 504. - Pp. 389-400.
- 13. Analytical approximations of k-corrections in optical and near-infrared bands / I. Chilingarian, A. Melchior, I. Zolotukhin // MNRAS - 2010. - July. - Vol. 405 - Pp. 1409-1420.
- 14. SDSSJ150634.27+013331.6: the second compact elliptical galaxy in the NGC5846 group / I. Chilingarian, G. Bergond // MNRAS 2010. June. Vol. 405 Pp. 11-15.
- 15. Истории звездообразования в центрах линзовидных галактик с барами и чисто экспоненциальными внешними дисками по данным SAURON / О. Сильченко, И. Чилингарян // Письма в астрономический журнал, в печати. — 2010. — Март.
- 16. The GalMer database: Galaxy mergers in the virtual observatory / I. Chilingarian, P. Di Matteo, F. Combes et al. // A&A in press. - 2010. - March. -P. arXiv:1003.3243.
- Dynamical versus stellar masses of ultracompact dwarf galaxies / I. Chilingarian, S. Mieske, M. Hilker, L. Infante // MNRAS in press. - 2010. - March.
- 18. Internal kinematics and stellar populations of dE galaxies: clues to their formation/evolution / P. Prugniel, I. Chilingarian, O. Sil'chenko, V. Afanasiev // IAU Colloq. 198: Near-fields cosmology with dwarf elliptical galaxies / Ed. by H. Jerjen, B. Binggeli. 2005. Pp. 73–76.
- NBursts: Simultaneous extraction of internal kinematics and parametrized SFH from integrated light spectra / I. Chilingarian, P. Prugniel, O. Sil'chenko, M. Koleva // Stellar Populations as Building Blocks of Galaxies / Ed. by A. Vazdekis, R. R. Peletier. — Vol. 241 of *IAU Symposium*. — Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. — August. — Pp. 175–176, arXiv:0709.3047.
- 20. Validation of stellar population and kinematical analysis of galaxies / M. Koleva, N. Bavouzet, I. Chilingarian, P. Prugniel // Science Perspectives for 3D Spectroscopy / Ed. by M. Kissler-Patig, J. R. Walsh, M. M. Roth. - 2007. - P. 153.

- 21. Low luminosity early-type galaxies in the NGC 128 group / I. Chilingarian, O. Sil'chenko, V. Afanasiev, P. Prugniel // Pathways Through an Eclectic Universe / Ed. by J. H. Knapen, T. J. Mahoney, A. Vazdekis. Vol. 390 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series. 2008. June. P. 296.
- 22. Middleware for data visualization in VO-enabled data archives / I. Zolotukhin, I. Chilingarian // Astronomical Data Analysis Software and Systems XVII / Ed. by R. W. Argyle, P. S. Bunclark, J. R. Lewis. — Vol. 394 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series. — 2008. — August. — Pp. 393-+.
- 23. Visualization of complex observational and theoretical datasets in the virtual observatory / I. Chilingarian, I. Zolotukhin // Astronomical Data Analysis Software and Systems XVII / Ed. by R. W. Argyle, P. S. Bunclark, J. R. Lewis. Vol. 394 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series. 2008. August. Pp. 351-+.
- 24. Virtual observatory for astronomers: Where are we now? / I. V. Chilingarian // Multi-wavelength Astronomy and Virtual Observatory / Ed. by D. Baines & P. Osuna. — 2009. — July. — Pp. 165–+.

Глава 1

Методы анализа спектральных и фотометрических данных

Данная глава содержит описание трех не связанных между собой методов анализа спектральных и фотометрических данных, которые используются в следующих главах.

1.1 Метод аппроксимации спектров NBURSTS

Результаты, представленные в данном разделе, опубликованы в работах Chilingarian et al. (2007c); Koleva et al. (2007a). Часть методических результатов содержится в приложениях в работах Chilingarian et al. (2007d, 2008d); Chilingarian (2009a).

Мощные вспышки звездообразования и сменяющие их периоды спокойной эволюции образуют различные поколения звезд, которые мы можем наблюдать в настоящее время. Таким образом, звездное население хранит отпечаток эволюции галактики в прошлом, и его изучение сможет помочь в наложении дополнительных ограничений на сценарии эволюции галактик.

Существует ряд методов изучения звездного населения. Для ближайших галактик, которые могут быть разрешены на звезды, используя глубокие наземные наблюдения или прямые снимки с Космического Телескопа (разрешенные звездные населения), наиболее эффективный способ – построение и исследование так называемых диаграмм цветвеличина (CMD, см. например, Da Costa & Armandroff, 1990; Aparicio, 1994). В зависимости от глубины CMD, различные детали могут быть использованы для определения возраста и металличности звездного населения: точка поворота главной последовательности, положение и ширина ветви красных гигантов, асимптотическая ветвь гигантов и т.п. Иногда возможно полное восстановление истории звездообразования в течение нескольких Gyr путем аппроксимации моделей, основанных на эволюционных треках звезд. К тому же, возможно получение высокоточных расстояний до ближайших галактик (Makarov & Makarova, 2004). С использованием анализа CMD было показано разнообразие историй звездообразования в карликовых сфероидальных галактиках местной группы (Carraro et al., 2001), в то же время все они содержат значительное количество относительно старых звезд.

Для более далеких галактик, где распределение звезд на диаграмме Г-Р не может быть построено прямыми методами (неразрешенные звездные населения), различные способы были предложены для восстановления SFH либо из широко-, средне- или узко-полосных цветов, либо из спектров, интегрированных вдоль луча зрения. Фотометрические методы имеют дело с зависимостями цвет-величина для определенного набора фильтров, либо для более крупных наборов многоцветных данных, представленных как распределения энергии в спектрах (SED). Было показано, что эффекты возраста и металличности сильно вырождены для индивидуальных цветов в оптическом диапазоне спектра, например, старое бедное металлами население шаровых скоплений будет выглядеть примерно так же, как средневозрастное богатое металлами население (как во многих dE галактиках). С другой стороны, распределения энергии в спектре (SED) могут покрывать существенные диапазоны длин волн от дальнего УФ до среднего ИК, давая возможность разделить роли возраста и металличности.

Спектральные данные могут содержать значительно большие объемы информации, что вызывало множество попыток их использования. Для того чтобы минимизировать эффекты возможных ошибок в абсолютной калибровке потоков и для работы с данными, имеющими различное спектральное разрешение, в начале 80х (Burstein et al., 1984) было введено понятие "индекса" – параметризованного представления силы спектральной линии (сродни эквивалентной ширине). Методы, использующие спектральные индексы, значительно проэволюционировали в течение последних 20 лет, и в настоящее время являются наиболее широко используемыми.

Все методы работы с неразрешенными звездными населениями основываются на сравнении наблюдений с моделями: эмпирическими или теоретическими. Существует два основных способа построения моделей – популяционный и эволюционный синтезы. В отличие от разрешенных звездных населений, обычно здесь невозможно восстановить SFH в деталях, возможно лишь определить некоторые ее параметры, например, возраст и металличность, взвешенные по светимости.

В случае популяционного синтеза, модель является суперпозицией нескольких "популяций", к примеру, спектр галактики моделируется линейной комбинацией нескольких звездных спектров. На практике необходимо решить обратную задачу – восстановить вклад каждой "популяции". Эта проблема неустойчива по отношению к ошибкам наблюдений, таким образом приходится накладывать различные астрофизические ограничения, чтобы найти решения, имеющие физический смысл. Первые приложения популяционного синтеза к анализу звездного населения галактик были сделаны в работах Wood (1966) и Faber (1972).

Эволюционный синтез является альтернативным подходом, основанном на наших представлениях о теории звездой эволюции (Tinsley, 1968, 1972a,b). Спектр (или цвет) галактики вычисляется как двойной интеграл:

$$L(\lambda) = \int_0^T \int_{M_{min}}^{M_{max}} L(\lambda, M, \tau) N(M, \tau) dM d\tau, \qquad (1.1)$$

где $L(\lambda)$ - светимость галактики на длине волны λ , $L(\lambda, M, \tau)$ - светимость звезды массы Mи возраста τ на той же длине волны, $N(M, \tau)$ – число таких звезд в галактике, T – возраст звездного населения – свободный параметр; M_{min} и M_{max} – минимальная и максимальная звездные массы. Из теории звездной эволюции мы знаем различные параметры звезды (например, T_{eff} и g) данной массы на данный момент времени (эволюционный трек). Из библиотеки наблюдаемых звездных спектров, для которых измерены атмосферные параметры, либо из теоретических спектров можно получить $L(\lambda, M, \tau)$. $N(M, \tau)$ может быть вычислено, используя какую либо начальную функцию масс звезд, например, Солпитеровскую (Salpeter, 1955), и используя зависимость темпа звездообразования от времени.

Здесь мы сошлемся на докторскую диссертацию Sil'chenko (1992), где содержится исторический обзор работ, посвященных популяционному и эволюционному синтезу, опубликованных на тот момент. Здесь же мы отметим фундаментальные шаги в эволюционном синтезе, сделавшие возможной данную работу.

Исследование Worthey et al. (1994) представляло собой одну из самых удачных попыток применения метода эволюционного синтеза к моделированию спектральных индексов (Ликские индексы). Была представлена сетка моделей для широкого диапазона возрастов и металличностей. Было показано, что, применяя различные пары индексов, стало возможным разделить эффекты возраста и металличности (см. пример применения в следующих главах). В продолжении этой работы (Worthey & Ottaviani, 1997) были определены несколько дополнительных индексов и немного подкорректированы определения уже существующих. Стало понятно (Worthey et al., 1992), что гигантские галактики ранних типов обычно демонстрируют несолнечные (положительные) обилия α -элементов [α /Fe]. Этот факт стимулировал создание новых моделей для несолнечных отношений элементов. Наиболее цитируемая работа этого класса – Thomas et al. (2003). В Главах 2–4 мы применяем их модели к большой выборке галактик ранних типов для изучения механизмов обогащения α -элементами.

Другое семейство методов, где синтезировались спектры целиком, а не отдельные спектральные детали, базировалось на доступных библиотеках звездных спектров (наблюдаемых или теоретических): Fioc & Rocca-Volmerange (1997); Leitherer et al. (1999); Vazdekis (1999); Eisenstein et al. (2003); Bruzual & Charlot (2003).

В этой работе мы будем работать с эволюционными моделями, предоставляющими синтетические спектры в широком диапазоне длин волн с высоким спектральным разрешением (R=10000), которые рассчитаны с помощью нового программного пакета PEGASE.HR (Le Borgne et al., 2004). В этой главе мы представим метод определения параметров звездного населения, основанный на аппроксимации наблюдательного спектра целиком, а не только специфических спектральных деталей, для оптимизации использования информации, содержащейся в наблюдениях.

Существует ряд методов для восстановления кинематики из абсорбционных спектров. Исторически, первым методом был Fourier Quotient (Sargent et al., 1977). Производится деконволюция спектра галактики со спектром опорной звезды в Фурье-пространстве. Этот метод учитывает инструментальное уширение линий в спектрографе, однако, он работает не очень хорошо для низких отношений сигнал-шум (Bottema, 1988), и достаточно чувствителен к несоответствию моделей наблюдениям (Bender, 1990).

Второй метод – кросс-корреляция (Tonry & Davis, 1979), где строится и анализируется в пиксельном пространстве кросс-корреляционная функция двух спектров – галактики и звезды (или набора звезд). Метод работает достаточно хорошо для низких отношений сигнал-шум и он менее чувствителен к несоответствию моделей, чем FQ метод. В то же время, для получения высокого контраста корреляционного пика необходимо удалить континуум, что не всегда просто и очевидно. Еще одна практическая проблема заключается в том, что необходимо аппроксимировать только небольшой участок вокруг корреляционного пика, изменения которого могут привести к смещенным оценкам дисперсии скоростей.

Третий метод, предложенный в работе Bender (1990), представляет собой комбинацию

первых двух. Он называется Fourier Correlation Quotient, и его основная идея – деконволюция корреляционного пика корреляционной функции галактика-опорный спектр и пиком автокорреляционной функции опорного спектра.

В 1992-1994 появилась тенденция к разработке методов для аппроксимации LOSVD в пиксельном пространстве (Rix & White, 1992; Kuijken & Merrifield, 1993; van der Marel, 1994; Saha & Williams, 1994). Главные причины – в пиксельном пространстве проще исключать из аппроксимации эмиссионные линии газа, либо плохие пиксели, и сравнивать континуумы напрямую.

В работе van der Marel & Franx (1993) авторы ввели отличия LOSVD галактики от гауссианы путем использования полиномов Эрмита 3-го и 4-го порядков, ответственных за асимметрию профиля (h_3) и его симметричное отклонение от гауссианы (сужение для положительных и расширение для отрицательных h_4 соответственно), и даже отклонения более высоких порядков (h_5, h_6) . По математическому определению, h_3 коррелирует с лучевой скоростью, а h_4 антикоррелирует с дисперсией скоростей. Это заставляет усомниться в несмещенности оценок кинематических параметров для случая низких отношений сигнал-шум, либо недостаточной дискретизации LOSVD.

Для того чтобы улучшить ситуацию, к χ^2 было предложено применить фактор пенализации, зависящий от h_3 и h_4 (Cappellari & Emsellem, 2004), чтобы аппроксимировать их только в случае статистической значимости. Качество определения параметров радикальным образом улучшилось, что было продемонстрировано авторами в упомянутой работе. Метод penalized pixel fitting (ppxf) а настоящее время является одним из наиболее продвинутых способов экстракции кинематики из абсорбционных спектров, и он начал широко применяться в сообществе (e.g. Emsellem et al., 2004).

1.1.1 Описание метода

Существуют различные метода для восстановления истории звездообразования (SFH) из наблюдаемых спектров (Moultaka et al., 2004; De Bruyne et al., 2004; Ocvirk et al., 2006). Методика, которую мы представляем в этой работе является расширением метода penalized pixel fitting (ppxf), используемого для восстановления распределения лучевых скоростей вдоль луча зрения (LOSVD).

Наблюдаемый спектр аппроксимируется в пиксельном пространстве моделью звездного населения, свернутой с параметризованным LOSVD. Модель состоит из нескольких эпизодов звездообразования, каждый из которых описывается какими-либо характеристиками, обычно возрастом и металличностью звезд "простого звездного населения" (SSP), в то время как остальные характеристики, такие как начальная функция масс (IMF), остаются фиксированными. В результате нелинейной оптимизации метод возвращает параметры LOSVD и модели звездного населения.

В идеале, мы бы хотели восстановить полную SFH за все время жизни галактики. Это означает, разделить внутреннюю кинематику и распределение звезд на диаграмме Г-Р. Эта задача обсуждалась в ряде работ (De Bruyne et al., 2004; Ocvirk et al., 2006), очевидно, что ее она очень сильно вырождена, и решения можно найти только для упрощенной модели.

В этой работе мы обсуждаем только простейший случай одного эпизода звездообразования, представленного в виде SSP и характеризуемого двумя параметрами: возрастом и металличностью. Мы не обсуждаем более сложные истории звездообразования, поскольку отношение сигнал-шум в наблюдательных данных, используемых нами, не достаточен для таких детальных исследований.

Значение χ^2 вычисляется согласно формуле (без пенализации):

$$\chi^{2} = \sum_{N_{\lambda}} \frac{(F_{i} - P_{1p}(T_{i}(t, Z) \otimes \mathcal{L}(v, \sigma, h_{3}, h_{4}) + P_{2q}))^{2}}{\Delta F_{i}^{2}},$$
(1.2)

где \mathcal{L} – LOSVD (распределение скоростей вдоль луча зрения); F_i и ΔF_i – наблюдаемые потоки и их ошибки; T_i – поток от модельного звездного населения, свернутый с аппаратной функцией спектрографа; P_{1p} и P_{2q} – мультипликативный и аддитивный континуумы, характеризуемые полиномами Лежандра порядков p и q; t – возраст, Z – металличность, v, σ , h_3 и h_4 – лучевая скорость, дисперсия скоростей и 3-й и 4-й коэффициенты разложения по полиномам Эрмита (van der Marel & Franx, 1993) соответственно. Обычно мы не использовали аддитивный континуум, и аппроксимировали мультипликативный полиномами 5-й (для MPFS) и 9-й (для FLAMES-Giraffe) степеней. Поскольку карликовые галактики, наблюдавшиеся с MPFS имеют довольно низкие дисперсии скоростей, так что дискретизация LOSVD не достаточна, а световоды спектрографа Giraffe были направлены на центры галактик, где не ожидается асимметрии профиля LOSVD, мы исключили h_3 и h_4 из рассмотрения. Для включения мультипликативного континуума в процедуру минимизации существует две основных причины: (1) внутреннее поглощение в наблюдаемой галактике, (2) неидеальность абсолютной спектрофотометрической калибровки потоков. Аддитивный континуум следует включать, чтобы избавиться от эффектов не очень качественного вычитания спектра излучения ночного неба либо рассеянного света в спектрографе.

Задача может быть частично линеаризована, в частности, аппроксимация аддитивных полиномов и относительных вкладов различных звездных населений T_i (в случае истории звездообразования более сложной, чем модель SSP) производится линейно для каждого вычисления значения функционала. Таким образом, процедура минимизации возвращает следующие параметры: t, Z, 6 или 10 коэффициентов для P_{mult5} (P_{mult9}), v и σ .

Основная техническая часть метода – процедура нелинейной минимизации среднеквадратичной разницы между наблюдаемым спектром и моделью, заданной параметрами LOSVD и SFH. Параметризованное звездное население получается в результате интерполяции сетки синтетических спектров SSP высокого спектрального разрешения (R = 10000), вычисленных с помощью PEGASE.HR. Сетка содержит 25 шагов по возрасту (от 10 Муг до 20 Gyr, шаг увеличивается от 5 Муг до 2 Gyr) и 10 по металличности ([Fe/H] от -2.5 до 1.0). Минимизация проводится по логарифму возраста. Поскольку процедура минимизации требует непрерывных производных минимизируемой функции, мы используем интерполяцию двумерными сплайнами. Для нелинейной минимизации используется программный пакет MPFIT (автор Craig B. Markwardt, NASA¹), реализующий ограниченный вариант алгоритма Levenberg-Marquardt. Таким образом, мы можем фиксировать и ограничивать любые параметры LOSVD/SFH.

1.1.2 Аппаратная функция спектрографа

Перед тем, как сравнивать синтетический спектр с наблюдениями, необходимо трансформировать его специальным образом, имитируя наблюдения в том же самом режиме того же

¹http://cow.physics.wisc.edu/ craigm/idl/fitting.html

спектрографа, что использовался для наблюдений, т.е. обычно ухудшить его спектральное разрешение (R = 10000) до реального разрешения наблюдений. В реальности, спектральное разрешение изменяется как с позицией в поле зрения (или вдоль щели), так и по ходу диапазона длин волн. Таким образом, операция свертки модели с аппаратной функцией спектрографа (line-spread-function, LSF) не является тривиальной операцией. Учет этих эффектов особенно критичен, когда реальная дисперсия скоростей в галактике того же порядка или меньше, чем ширина аппаратного контура (как в случае этой работы).

Процедура корректного учета LSF выполняется в два этапа. Вначале производится определение LSF как функции положения в поле зрения и длины волны. Затем параметризованная LSF вводится в сетку SSP моделей.

Для измерения изменений LSF по полю зрения мы используем спектры стандартных звезд (HD 135722 и HD 175743) и утреннего неба (т.е. солнечный спектр). Спектры анализируются при помощи процедуры ppxf (Cappellari & Emsellem, 2004). При этом в качестве опорных используются спектры тех же самых звезд (и Солнца) из библиотеки ELODIE.3 (Prugniel & Soubiran, 2001). Поскольку именно ELODIE.3 используется для спектрального синтеза PEGASE.HR, свертка с "относительным" инструментальным контуром, который мы определим, будет в точности соответствовать наблюдениям. Мы параметризуем аппаратную функцию следующими параметрами: $v, \sigma, h3$ и h4.

Полный диапазон длин волн спектрографа был разделен на несколько сегментов, перекрывающихся на 10 процентов, и параметры LSF были определены в каждом из них независимо для определения зависимости LSF от длины волны.

В заключение, для введения LSF в сетку моделей звездного населения, мы применили следующую процедуру для каждого пространственного элемента (зрачка MPFS, световода FLAMES-Giraffe):

- Путем свертки с параметрами LSF для каждого из сегментов по длинам волн были получены несколько сеток SSP моделей
- Окончательная сетка вычисляется методом линейной интерполяции на каждой длине волны между соседними сетками моделей

Этот метод дает в результате сетку моделей звездного населения для каждого пространственного элемента, имеющую точно такие же параметры LSF, как и наблюдения.

1.1.3 Проверка метода и анализ ошибок

В этом разделе мы исследуем вопросы, связанные с анализом ошибок, стабильностью решений и возможной их систематикой в случае данных MPFS или Giraffe для галактик с относительно старыми звездными населениями (около 5 Gyr). Полное описание этих аспектов для любого спектрографа и с существенно более широким пространством параметров будет детально описано в одной из будущих статей. Здесь мы опишем только анализ ошибок, необходимый для подтверждения результатов, представленных в этой диссертации и последующих статьях, основанных на данных MPFS и Giraffe для карликовых галактик.

Анализ ошибок

Оценка ошибок параметров звездного населения для нелинейной процедуры, которую мы используем, является довольно нетривиальной задачей. Полное и детальное описание од-

ного из возможных подходов к поиску альтернативных решений при использовании родственного нашему подхода, даны а работе Moultaka et al. (2004).

Мы провели Монте-Карло моделирование (около 10000 на каждый из спектров 3-роіпт разбиения для IC 3653) чтобы продемонстрировать соответствие между ошибками параметров, получаемыми из процедуры минимизации, и реальным распределением ошибок. Это моделирование показало, что в случае наших данных, где нет ни серьезного несовпадения моделей из-за несолнечных отношений элементов, ни существенных ошибок с вычитанием аддитивных констант (рассеянный свет спектрографа или ночное небо), ошибки, найденные методом Монте-Карло, совпадают со значениями, возвращенными процедурой нелинейной минимизации, умноженными на значения χ^2 . Отличия χ^2 (нормированного на количество степеней свободы системы, DOF) от 1 может быть вызвано либо плохим качеством аппроксимации (несовпадение моделей), либо неправильными оценками абсолютных ошибок во входных данных. Мы считаем, что в некоторых случаях наши оценки абсолютных ошибок потоков, основанные на фотонной статистике, не идеальны, что не покажется странным, если учесть всю сложность процедуры обработки данных. Однако, значения χ^2 от 0.7 до 1.3 указывают на неплохое качество оценки ошибок.

Для более аккуратной оценки ошибок, обнаружения возможных альтернативных решений и поиска вырождения различных параметров кинематики и звездного населения, мы осуществили прямое сканирование пространства χ^2 для возраста, металличности и дисперсии скоростей. Здесь мы представляем процедуру, которой мы следовали, анализируя данные MPFS для IC 3653 (см. следующую главу для описания данных и процедуры разбиения). Для данных Giraffe анализ был сделан похожим образом. Процедура включает следующие шаги:

- Была выбрана сетка значений возраста, металличности и дисперсии скоростей, покрывающая разумную область пространства параметров, в которой мы могли ожидать решений. В случае MPFS сетка была определена как: 2 Gyr < t < 14 Gyr с шагом 200 Myr, -0.45<[Fe/H]<0.40 с шагом 0.01 dex, 30 km s⁻¹ < σ < 100 km s⁻¹ с шагом 0.5 km s⁻¹
- В каждом узле сетки t-Z мы выполняли процедуру аппроксимации с целью определения мультипликативного континуума, соответствующего наилучшей аппроксимации данной модели звездного населения.
- Затем вычислялись значения χ^2 на сетке значений σ путем фиксирования всех остальных параметров решения, найденных на предыдущем шаге

Этот метод сканирования пространства χ^2 обусловлен частотными эффектами параметров (см. Таб. 1.1): полиномиальный континуум и звездные населения влияют на низкие Фурье-частоты модельных спектров, поэтому мы должны производить аппроксимацию континуума, если мы хотим избежать сканирования дополнительных N + 1 пространства χ^2 для случая мультипликативного континуума порядка N. В то же время σ – "высокочастотный" параметр, что делает безопасным простое сканирование по сетке σ , фиксируя остальные параметры.

Другими словами, используя описанный метод, мы вычисляем срез пространства χ^2 гиперповерхностью, определенной как набор минимальных значений χ^2 для мультипликативного континуума и лучевой скорости, и затем проектируем его на гиперплоскости

Parameter	v	σ	t	Ζ	P_{1p}
Low-frequency	no	no	yes	yes	yes
High-frequency	yes	yes	yes	yes	no

Таблица 1.1: Частотные эффекты минимизируемых параметров при аппроксимации спектров (см. описания параметров в пояснении к формуле 1.2).

"t-Z" и "t-Z-σ". Результат содержит два массива: двумерную карту возраст-металличность, и трехмерную возраст-металличность-дисперсия скоростей.

Все значения лучевой скорости, полученные в результате аппроксимации на сетке t-Z, совпадают в пределах ошибок определения. Это указывает на необязательность сканирования пространства χ^2 по сетке значений v, хотя сделать это довольно просто, заменим сканирование одномерной сетки (σ) на двумерную (v, σ) в каждом узле t-Z.

На Рис. 1.1 (верхний ряд) представлены карты χ^2 на плоскости "t-Z" (остальные параметры фиксированы) для 3-points разбиения данных MPFS для IC 3653 (см. следующую главу). Заметна вытянутая форма минимумов, соответствующая известному вырождению возраста и металличности. Три рисунка в нижнем ряду Рис. 1.1 представляют срезы результатов сканирования 3-мерного пространства χ^2 (t-Z- σ) для бина "P1". Заметно, что ширина минимума на срезе "t-Z" уменьшилась из-за вырождения между металличностью и дисперсией скоростей, который четко виден на срезе "Z- σ ". Этот эффект можно легко объяснить: если металличность модели выше, чем у наблюдаемого объекта, то абсорбционные линии в модели будут глубже, чем в наблюдениях, что можно скомпенсировать, сильнее их уширив (т.е. увеличив дисперсию скоростей). Этот результат очень важен. Таким образом, если используется кросс-корреляция либо аппроксимация в пиксельном пространстве, а опорный и наблюдаемый спектры имеют разную металличность, измерения дисперсии скоростей будут содержать систематическую ошибку. Это может привести к искусственным деталям полей (или профилей) дисперсий скоростей, в случае, если один и тот же опорный спектр используется для областей галактики, имеющих различные металличности, например, в случае градиента металличности.

Чтобы проиллюстрировать как вырождение $Z - \sigma$ может повлиять на измерения дисперсии скоростей, мы представляем 2-мерные карты дисперсии скоростей для галактики NGC 3412, полученные путем аппроксимации спектров в пиксельном пространстве в двух случаях: (а) параметры звездного населения фиксированы (t = 4.5 Gyr, [Fe/H]=-0.05 dex) и определяются только кинематические параметры (v, σ, h_3, h_4); (b) параметры звездного населения определяются совместно с кинематикой. Приведенные данные получены на спектрографе MPFS в рамках исследований выборки линзовидных галактик и были любезно предоставлены руководителем исследований (О. К. Сильченко).

NGC 3412 – гигантская линзовидная галактика с относительно высокой металличностью ядра (до [Fe/H]=+0.2) и солнечным отношением [Mg/Fe] (Sil'chenko, 2006), так что аппроксимация ее спектра моделями PEGASE.HR не должна приводить к систематическим ошибкам, связанным с несолнечным обилием элементов. Известно, что галактика содержит противовращающееся ядро (Aguerri et al., 2003). NGC 3412 была одним из первых объектов, где был обнаружен центральный провал в распределении дисперсии скоростей. Распределение возраста (согласно нашим измерениям) в галактике практически однородное со средним возрастом 4.5 Gyr. В то же время, во внутренней области галактики (3 arcsec),



Рис. 1.1: 2-мерные карты распределения χ^2 для 3-роіnts разбиения (верхний ряд), и срезы 3-мерного распределения χ^2 (t-Z- σ) для бина "P1".

наблюдается резкий градиент металличности, от -0.05 до +0.21.

На Рис. 1.2 показаны 2-мерное поле скоростей (Рис. 1.2а), карта металличности (Рис. 1.2b) и два поля дисперсий скоростей для изменяемых (Рис. 1.2c) и фиксированных (Рис. 1.2d) параметров звездного населения. Аппроксимация сделана для адаптивного разбиения (Voronoi adaptive binning) данных для отношения сигнал-шум 40 (см. следующую главу). Легко заметить значительный центральный "провал" в распределении дисперсий скоростей (до 95 km s⁻¹), полученном в случае фиксированного звездного населения, в то время как значения остаются выше 110 km s⁻¹, если параметры звездного населения определяются совместно с кинематикой.

Мы проверили еще три галактики, входящие в выборку SAURON, демонстрирующие провалы в распределениях дисперсий скоростей (Emsellem et al., 2004): NGC 2768, NGC 3384 (анализ наблюдений MPFS) и NGC 4150 (архивные данные со спектрографа GMOS-N, Gemini Observatory). Во всех трех случаях понижения в полях дисперсий скоростей либо исчезли совсем (NGC 3384 и NGC 4150), либо стали менее значимыми в случае NGC 2768 – 70 km s⁻¹ в сравнении с 120 km s⁻¹. В последнем случае центральная металличность достигает +0.5 dex. Для таких высоких значений качество моделей звездного население далеко от идеального из-за отсутствия высоко-металличных звезд в окрестностях Солнца, а именно такие звезды содержатся в спектральных библиотеках, используемых для спектрального синтеза. Таким образом, мы не исключаем дальнейшего увеличения значения дисперсии скоростей в центральной части NGC 2768, когда качество синтетических спектров улучшится.



Рис. 1.2: Кинематика и металличность NGC 3412. Поле лучевых скоростей и карты SSPэквивалентной показаны на панелях (а) и (b) соответственно; (c) и (d) представляют карты дисперсий скоростей звезд для случая изменяющегося (включенного в аппроксимацию) и фиксированного звездного населения. Проявление противовращающегося ядра четко видно на поле скоростей.

1.1.4 Стабильность решения

Стабильность решений является одним из важнейших моментов для каждого метода, использующего многопараметрическую нелинейную минимизацию. Мы исследовали стабильность по отношению к начальному приближению, используемому диапазону длин волн и степени мультипликативного полиномиального континуума.

Начальное приближение

Мы провели несколько десятков экспериментов с различными начальными приближениями для того чтобы исследовать стабильность сходимости метода. Мы не обнаружили никаких проблем со сходимостью в отношении начального приближения по возрасту, металличности и дисперсии скоростей в достаточно широком диапазоне значений. Единственный критический параметр – v; начальное приближение должно быть примерно в пределах утроенной дисперсии скоростей (что в случае IC 3653 соответствует 100-150 km s⁻¹) от реального значения.

Для интегральных спектров 3-points разбиения IC 3653 решения не сходятся к строго одной точке пространства параметров, но разброс значений (стандартное отклонение) пренебрежимо мало: около 3 Myr для возраста, 0.0003 dex для металличности, 0.02 km s⁻¹ для дисперсии скоростей и 0.002 km s⁻¹ для лучевой скорости.

Спектральный диапазон

Было выполнено две дополнительных серии экспериментов: первая для $\lambda > 4700$ Å, и вторая для полного диапазона длин волн MPFS (от 4200 до 5600Å) но с исключенными регионами вблизи бальмеровских линий водорода (Н γ и Н β). Причина для проведения первого эксперимента следующая: область 4150Å < $\lambda < 4700$ Å содержит большое количество спектральных деталей, относящихся к металлам, соответственно возможно возникновение систематических ошибок в определении металличности в случае каких-либо неизвестных проблем с алгоритмом и/или присутствием аддитивного континуума, изменяющегося с длиной волны (к примеру, в связи с некорректным вычитанием спектра ночного неба или рассеянного света в спектрографе). Похожая причина и для проведения второй серии экспериментов, но она связана с оценками возраста, поскольку известно, что бальмеровские линии являются хорошими индикаторами возраста (Worthey et al., 1994; Vazdekis & Arimoto, 1999).

Можно заметить, что удаление синей части спектра не оказывает влияния на результаты, однако увеличивает ошибки определения параметров. Вторая серия экспериментов показывает похожие результаты. Ошибки определения возраста значительно увеличиваются и становятся сравнимыми с результатами, полученными с помощью анализа Ликских индексов (см. следующую главу, Таб. 2.4). Однако, сами значения совпадают с результатами аппроксимации для полного диапазона длин волн в пределах ошибок (1 σ). Этот результат весьма важен, поскольку он показывает возможность определения возраста звездного населения при отсутствии бальмеровских линий, поскольку при аппроксимации спектра целиком использование информации содержащейся в нем существенно оптимальнее, чем при традиционном подходе, использующем Ликсие индексы.

	Ρ1	P2	Ρ3
$v, \mathrm{km} \mathrm{s}^{-1}$	601.8 ± 1.0	603.4 ± 1.4	$603.8 \pm \ 3.0$
	$600.9 \pm \ 1.0$	$603.1{\pm}~1.7$	$603.7 \pm \ 3.4$
σ , km s ⁻¹	70.9 ± 1.6	67.3 ± 2.2	52.1 ± 5.0
	$71.8 \pm \ 1.6$	65.3 ± 2.6	52.1 ± 5.7
t, Gyr	4.855 ± 0.218	4.728 ± 0.289	4.629 ± 0.694
	4.714 ± 0.235	4.448 ± 0.403	4.238 ± 0.930
Z, dex	0.01 ± 0.02	-0.14 ± 0.02	-0.15 ± 0.05
	0.03 ± 0.01	-0.13 ± 0.02	-0.15 ± 0.05

Таблица 1.2: Стабильность решения для 3-points разбиения по отношению к диапазону длин волн. Первые строки для каждого параметра соответствуют $\lambda > 4700$ Å, вторые – к полному диапазону с исключенными бальмеровскими линиями. См. также Таб. 2.4

Порядок мультипликативного полиномиального континуума

Мы также исследовали стабильность метода по отношению к порядку мультипликативного полиномиального континуума. Результаты (для данных MPFS) показаны на Рис. 1.3. Легко заметить, что для n>5 не наблюдается никаких существенных изменений ни в оценках кинематики и параметров звездного населения, ни значения χ^2 . Время расчета быстро возрастает с увеличением n, поскольку коэффициенты полиномов мультипликативного континуума минимизируются нелинейно. Поэтому мы выбрали n = 5 для анализа всех данных полученных с MPFS. Используя аналогичную процедуру мы заключили, что $n = 9 \dots 15$ – оптимальное значение порядка мультипликативного континуума для данных со спектрографа Giraffe, анализируемых в Главе 2 и Главе 3.

Процедура аппроксимации включает мультипликаивную функцию, чья роль заключается в коррекции ошибок калибровки потоков как в данных, так и в библиотеке спектров звезд, использующихся для моделирования звездного населения, а также эффектов поглощения (внутреннего в объекте и Галактического). В случае, когда можно доверять калибровке по потокам, эта функция может быть использована для определения экстинкции. Поскольку данные FLAMES/Giraffe, широко используемые в данной работе (Глава 2 и Глава 3) не калибруются по потокам, использование мультипликативного континуума совершенно необходимо. Этот момент делает наш метод похожим на спектрофотметрические индексы, которые также не чувствительны к глобальной форме континуума (этим они напоминают эквивалентные ширины).

Степень мультипликативного полинома выбирается таким образом, чтобы избавиться от проблем несовпадения континуума на масштабах свыше 60 Å. Эффект континуума подробно рассматривается в работе Koleva et al. (2008). Изменение степени не приводит к систематическим ошибкам параметров (возраста, металличности или кинематики), но при увеличении степени полинома минимум в пространстве χ^2 становится глубже и резче, что позволяет лучше отождествлять абсолютный минимум и дает более точные оценки параметров. Вырождение между коэффициентами полиномиального континуума и другими параметрами, даже возрастом и коэффициентами низших порядков, отсутствует.

В работе Koleva et al. (2008) отмечается, что в отличие от процедур "ректификации" или фильтрации спектра (Mathis et al., 2006; Wolf et al., 2007), в случае использования полиномиального континуума информация, содержащаяся в широких спектральных де-



Рис. 1.3: Стабильность параметров по отношению к порядку мультипликативного полиномиального континуума. Различные значки соответствуют трем бинам 3-point разбиения куба данных IC 3653 (см. Главу 2).



Рис. 1.4: Невязки аппроксимации спектра звезды позднего спектрального класса, объекта с сильной молекулярной полосой MgH (5208Å). Врехняя панель представляет спектр звезды (черный) и ее аппроксимацию моделью PEGASE.HR для n = 15 (синий), нижняя панель показывает невязки аппроксимации для трех разных степеней мультипликативного континуума (n = 3, 9, 15). Визуальный масштаб оси потоков для нижней панели удвоен по сравнению с верхней. Ошибки потоков 1 σ показаны черными пунктирными линиями. И спектры, и невязки сглажены скользящим средним с окном 15 пикселей.

талях таких, как полосы MgH, TiO или CN, не искажается. Для данных FLAMES/Giraffe мы демонстрируем это на Puc. 1.4, где спектр звезды позднего спектрального класса с глубокой молекулярной полосой MgH 5208Å показан вместе с невязками от его аппроксимации моделью звездного населения PEGASE.HR для трех различных значений порядка континуума n = 3, 9 и 15. Cnektp звезды был получен в рамках другого наблюдательного проекта, но в том же режиме FLAMES/Giraffe-LR04, что использован нами в Главе 3 и Главе 4. Подобная аппроксимация не имеет физического смысла, поскольку индивидуальный звездный спектр не может быть представлен спектром звездного населения, однако этот тест хорошо демонстрирует, что невязки аппроксимации в полосе MgH совершенно не изменяются при широких вариациях степени мультипликативного полиномиального континуума.

Используя описанный выше метод, мы определили минимальную степень полиномиального континуума, достаточного для работы с данными FLAMES/Giraffe.



Рис. 1.5: Стабильность оценок дисперсии скоростей (слева внизу), металличности (справа вверху) и возраста (справа внизу) как фунция степени мультипликативного континуума (n) для галактик с тремя разными звездными населениями. Значение χ^2 (слева вверху) нормировано на значение, соответствующее n = 20 для каждого объекта.

Для этого мы взяли три объекта из нашей выборки галактик в скоплении Abell 496 (см. Главу 2) – молодую (G-01), галактику среднего возраста (G-07) и старую галактику (G-24) и аппроксимировали их спектры, изменяя степень полиномиального континуума от n = 3 до n = 20. Помимо старого населения, объект G-24 также имеет очень высокое отношение [Mg/Fe], давая возможность проверить, как степень континуума может сократить несовпадение между моделью и данными. На Рис. 1.5 показано относительное изменение χ^2 а также тренды параметров кинематики и звездного населения.

Для $n \ge 15$ ни один из параметров не показывает существенных изменений. Для двух галактик (G-01 и G-07) с примерно солнечными отношениями [Mg/Fe] изменения возраста, металличности, дисперсии скоростей и χ^2 пренебрежимо малы уже для n > 3, однако для третьей галактики поведение параметров стабилизируется лишь для n > 8, хотя χ^2 показывает довольно резкое падение на уровне 10% на n = 12. В то же время, нормированное значение χ^2 остается примерно вдвое выше, чем для G-01 и G-07.

Анализ невязок аппроксимации для G-24 показывает, что увеличение степени континуума позволяет существенно скомпенсировать несовпадение модели и данных в областях спектра с многочисленными блендами линий железа либо α -элементов. На Рис. 1.6 представлены невязки аппроксимации спектра G-24 для трех различных порядков мультипликативного континуума: 5, 10 и 20. Хорошо видно, что область, доминируемая линиями железа районе от 5005 до 5050 Å хорошо заметна в невязках для n = 5, но практически исчезает на n = 10. Изменения невязок становятся незначительными для n > 14, поэтому мы выбрали n = 15 как оптимальное значение порядка мультипликативного полиномиального континуума для данных FLAMES/Giraffe в режиме LR04.



Рис. 1.6: Невязки аппроксимации G-24, галактики с высоким отношением [α /Fe]. Верхняя панель показывает спектр галактики в покоящейся системе отсчета. Нижняя панель показывает невязки аппроксимации для различных степеней мультипликативного континуума (n = 5, 10, 20). Визуальный масштаб нижней панели увеличен в 8 раз по сравнению с верхней. Ошибки потоков 1 σ показаны черными пунктирными линиями. И спектры, и невязки сглажены скользящим средним с окном 15 пикселей.

1.1.5 Возможные систематические ошибки

Существует несколько возможных источников систематических ошибок: (1) аддитивные ошибки абсолютных потоков из-за недо- или перевычитания спектра излучения ночного неба; (2) несовершенства моделей, наиболее важное из которых – несолнечные отношения обилий элементов.

Аддитивные ошибки

Аккуратное вычитание спектра излучения ночного неба – один из сложных этапов при обработке спектральных наблюдений объектов низкой поверхностной яркости. Спектр излучения ночного неба включает в себя излучение в континууме, которое может включать рассеянный солнечный свет, и несколько ярких эмиссионных линий (в спектральном диапазоне $\lambda < 6000$ Å). Недо- или перевычитание фона ночного неба привносит аддитивную ошибку, вызывающую изменение глубин абсорбционных линий объекта (изменение эквивалентной ширины). Это будет влиять на результаты метода аппроксимации, как впрочем и на оценки параметров, основанные на измерениях Ликских индексов.

Мы провели две серии численных экспериментов: (1) добавляя постоянную величину, либо (2) сам спектр после сильного размывания по спектральной координате (с окном порядка 300 пикселей), чтобы смоделировать наличие рассеянного света в спектрографе. В каждой серии вклад аддитивной компоненты изменялся от -20 до +50 процентов чтобы смоделировать пере- и недовычитание. Минимизация производилась без аддитивного континуума. Результаты двух серий оказываются практически совпадающими. Для первой серии экспериментов, где постоянный уровень рассчитывался как вклад в континуум на длине волны 5000Å, результаты показаны на Рис. 1.7. Можно заметить, что χ^2 достигает минимума на немного отрицательных вкладах постоянной добавки (моделирующей перевычитание). Это легко объяснить, учитывая то, что мы не меняли ошибки потоков во время наших экспериментов. Наиболее важный результат – стабильность оценок возраста на довольно широком диапазоне значений аддитивной ошибки (от -25 до +15 процентов). Он является важным преимуществом техники аппроксимации спектров в пиксельном пространстве по сравнению с Ликскими индексами, поскольку все измерения индексов, в том числе для индикаторов возраста, таких как $H\beta$, будут иметь одинаковую систематику при наличии аддитивной ошибки. Металличность и дисперсия скоростей демонстрируют ожидаемое поведение: рост σ и падение Z. Тем не менее, в при вкладе аддитивной константы от -5 до +5 процентов (что соответствует неплохой точности вычитания ночного неба) изменения достаточно малы (~ 8 процентов для σ и ~ 0.1 dex для Z) хотя и значительны.

Для того чтобы проверить последствия плохого вычитания ночного неба мы провели два дополнительных эксперимента: (1) мы попробовали аппроксимировать спектр, в котором излучение ночного неба было представлено в виде полиномиального континуума низкого порядка и (2) совсем без вычитания излучения ночного неба. Мы исключили четыре маленьких области, содержащих яркие эмиссионные линии: HgI λ =4358Å, 5461Å, [NI] λ = 5199Åu [OI] λ = 5577Å. Эксперименты были проделаны для интегральных спектров 3-points разбиения IC 3653, чтобы продемонстрировать эффекты вычитания неба для высокой, средней и низкой поверхностных яркостей (см. Таб. 2.2). Мы не обнаружили существенных различий значений параметров в бинах "P1" и "P2" для корректного вычитания спектра ночного неба и вычитания модели ночного неба полиномом низкого


Рис. 1.7: Влияние аддитивных компонент на результат. По оси абсцисс – вклад в уровень континуума на длине волны λ =5000Å. Различные значки соответствуют трем бинам 3-роіnt разбиения куба данных IC 3653.

	Ρ1	P2	P3
$v, \mathrm{km} \mathrm{s}^{-1}$	604.3 ± 1.0	606.0 ± 1.5	609.4 ± 3.2
	$604.4 \pm \ 1.0$	$605.9 \pm \ 1.6$	610.3 ± 3.7
σ , km s ⁻¹	71.5 ± 1.5	64.9 ± 2.4	54.4 ± 5.2
	$80.5{\pm}~1.5$	88.3 ± 2.2	105.5 ± 4.6
t, Gyr	4.868 ± 0.210	4.547 ± 0.310	3.956 ± 0.731
	4.972 ± 0.185	7.203 ± 0.390	12.982 ± 1.641
Z, dex	0.04 ± 0.01	-0.10 ± 0.02	-0.06 ± 0.04
	-0.08 ± 0.01	-0.50 ± 0.02	-0.94 ± 0.03

Таблица 1.3: Определение параметров кинематики и звездного населения для случая моделирования излучения ночного неба полиномом низкого порядка (первая строка для каждого параметра) и без вычитания излучения ночного неба (вторая строка).

порядка (см. Таб. 1.3). В бине "Р3" возраст оказывается моложе, а металличность выше, но оценки согласуются с корректным вычитанием излучения ночного неба в пределах 2σ . Однако, как и ожидалось, если излучение ночного неба не вычиталось совсем, появляются значительные систематические отклонения в оценках σ , возраста, металличности и дисперсии скоростей для бина "Р2" и еще более сильный эффект для "Р3". Из-за аддитивного континуума металличности оказываются ниже, возрасты старше, а дисперсии скоростей выше, чем при корректном вычитании неба. Наши эксперименты показывают, что при поверхностных яркостях выше, чем $\mu_B = 20$ mag arcsec⁻² детали спектра ночного неба не оказывают существенного влияния на результаты процедуры аппроксимации спектров, и даже очень грубое вычитание неба достаточно для реалистичных оценок параметров кинематики и звездного населения.

Несолнечные отношения $[\alpha/Fe]$

Достаточно часто массивные галактики имеют значения отношений [Mg/Fe] выше солнечного, в частности значительная часть объектов из нашей выборки галактик скопления Abell 496, обсуждаемые в Главе 2, компактные эллиптические галактики из Главы 3 и более крупные галактики ранних типов из Главы 4. Поэтому встает ряд принципиальных вопросов, связанных с качеством наших результатов: (1) появляются ли систематические ошибки параметров звездного населения (возраста и металличности) при аппроксимаций спектров объектов с [Mg/Fe]> 0 dex моделями PEGASE.HR; (2) чувствительны ли наши результаты к присутствию $H\beta$ в диапазоне; (3) если появляется какая-то систематика, то насколько она стабильна и возможно ли ее эмпирически скорректировать?

В настоящее время в публичном доступе отсутствуют модели звездного населения, основанные на эмпирических спектрах звезд для несолнечных обилий α /Fe. Поэтому для проверки метода мы используем опубликованные спектральные данные, где возраст и металличность могут быть определены как с использованием Ликских индексов, так и с помощью методики NBURSTS. Мы выбрали 1200 спеткров галактик на красных смещениях z < 0.033 и с цветами $(g' - r')_{\rm fib} > 0.9$, имеющие отношения сигнал-шум S/N > 20 из обзора SDSS DR6 (Adelman-McCarthy et al., 2008). Информация о спектральном разрешении инструмента (инструментальная ширина аппаратного контура, представленного в виде гауссианы) доступна для каждого индивидуального спектра. Для длин волн $\lambda < 5900$ Å

резрешение плавно возрастает из синей части спектра в красную со средними значениями порядка $\sigma_{inst} \approx 75 \text{ km s}^{-1}$.

Мы не применяли никакие критерии отбора, основанные на морфологии галактик. Большинство объектов (около 95%) обнаруживают по крайней мере слабые эмиссионные линии, самая сильная из которых обычно [OIII] ($\lambda = 5007$) Å. Если эквивалентная ширина линии [OIII], приведенная в обзоре SDSS, оказывалась больше 0, мы подменял наблюдаемые потоки значениями из наилучших аппроксимаций моделями PEGASE.HR в областях шириной 8Å вокруг линий $H\delta$, $H\gamma$, [OIII] λ 4363, [NI] λ 5199, и 10Å в линиях $H\beta$, $[OIII]\lambda\lambda4959/5007$. Эта процедура позволяет избежать влияния эмиссионных линий на измерения Ликских индексов. Мы используем этот подход вместо коррекций значений Ликских индексов путем применения эмпирических поправок, основанных на отношениях потоков эмиссионных линий, поскольку данные методы могут приводить к систематическим ошибкам из-за: (а) внутреннего поглощения в объекте, приводящего к изменению Бальмеровского декремента и, как следствие, отношения $H\alpha/H\beta$; (b) возможной активности ядер галактик, влияющей на отношение [OIII]/H β , на которое эффекты поглощения не влияют. Хотя замена 30% диапазона в областях расчета Ликских индексов будет смещать их оценки в сторону значений, ожидаемых из моделей PEGASE.HR, мы будем в состоянии оценить систематику, связанную с отношением [Mg/Fe] по крайней мере на качественном уровне.

Для измерения Ликских индексов, мы ухудшали спектральное разрешение данных SDSS путем сверки оригинальных спектров с гауссианой шириной $\sigma_{degr} = \sqrt{\sigma_{Lick}^2 - \sigma_{SDSS}^2 - \sigma_g^2}$, где σ_g – дисперсия скоростей галактики, σ_{SDSS} – ширина инструментального контура SDSS, а σ_{Lick} – ширина контура, соответствующая разрешению Ликской системы (последние два значения зависят от конкретного индекса, который необходимо рассчитать). Если значение под квадратным корнем оказывалось меньше 0, мы не проводили ухудшения разрешения. Вместо этого применялась σ -поправка согласно работе (Kuntschner, 2004) для значения дисперсии скоростей $\sigma_{corr} = \sqrt{\sigma_{SDSS}^2 + \sigma_g^2 - \sigma_{Lick}^2}$. Качество калибровки по потокам спектров SDSS DR6 намного лучше, чем у SDSS DR5 (Adelman-McCarthy et al., 2008, Schlegel 2007, частное сообщение), и оказывается лучше 1% для относительных потоков. Поэтому мы можем доверять не только относительным трендам Ликских индексов, как в работе Clemens et al. (2006), основанной на SDSS DR3, но и абсолютным значениям.

Значения возрастов, металличностей и отношений [Mg/Fe] были получены путем инверсии сеток SSP моделей для индексов H β , Mgb и \langle Fe \rangle из работы Thomas et al. (2003). Мы вначале инвертировали сетку \langle MgFe \rangle - H β для определения возраста и средней металличности, после чего использовались найденные значения возраста для инверсии сетки Mgb - \langle Fe \rangle для определения отношений [Mg/Fe]. В окончательной выборке мы оставили 848 спектров SDSS со значениями индексов 1.4<H β <2.6 Å и 2.0< \langle MgFe \rangle <4.2 Å, что соответствует средним и старым звездным населениям.

Аппроксимация спектров проводилась в следующих трех интервалах длин волн (в системе restframe): (1) 4100 – 5800 Å, (2) 4800 – 5600 Å, (3) 4880 – 5680 Å. Мы выбрали первый интервал, покрывающий широкий диапазон длин волн, часто используемый в наземных спектральных исследованиях кинематики и звездного населения близких галактик (GMOS на Gemini, MPFS на БТА САО РАН и т.п.) Второй и третий диапазон примерно соответствуют режиму LR04 спектрографа FLAMES/Giraffe для объектах на красных смещениях скопления Abell 496, включая и исключая линию $H\beta$.

Лучевые скорости, предоставленные обзором SDSS и найденные нашей процедурой, совпадают в пределах ошибок измерений, редко превышающих несколько km s⁻¹. Дисперсии скоростей (присутствующие в SDDS для 824 из 1200 объектов) соответствуют друг другу в пределах ошибок для объектов с $\sigma < 170$ km s⁻¹, но для больших значений σ наблюдается систематика: значения SDSS оказываются ниже, чем наши измерения, достигая $\Delta \sigma \sim 20$ km s⁻¹ для $\sigma \sim 300$ km s⁻¹. Этот эффект можно объяснить вырождением σ – металличность, описанным выше – галактики с высокими дисперсиями скоростей имеют более высокие металличности, но качество моделей, используемых в обзоре SDSS для оценки дисперсий скоростей, хуже, чем моделей РЕGASE.HR, что приводит к недооценкам дисперсий скоростей на высоких металличностях. Корреляция между $\Delta \sigma$ и металличностью подтверждает эту гипотезу.

Левая панель Рис. 1.8 показывает сравнение между определением возраста, основанном на Ликских индексах, и методикой NBURSTS. Согласие между измерениями достаточно хорошее. Разброс точек имеет две основных причины: (1) статистические ошибки измерения Ликских индексов и результатов аппроксимации спектров; (2) вырождение возраст-металличность. Дл того чтобы продемонстрировать согласие между двумя методами оценки параметров звездного населения, на правой панели Рис. 1.8 мы приводим сравнение для комбинации возраста и металличности, нечувствительной к этому вырождению: 0.4 log₁₀ t + 0.6Z (Worthey, 1994). Наблюдается очень хорошее согласие между результатами аппроксимаций спектров в двух диапазонах длин волн и из инверсии диаграммы для Ликских индексов Н β и (MgFe)).

Особенно важным результатом данного исследования является факт, что значения возраста и металличности, полученные с помощью аппроксимации спектров не зависят от несолнечных отношений [Mg/Fe] в объекте. Это проиллюстрировано на Рис. 1.9. Ось ординат показывает разницы ("fit" - "Lick") между десятичным логарифмом возраста (верхняя панель) и металличности (нижняя панель) для объектов с различными отношениями [Mg/Fe]. Можно видеть полное отсутствие корреляции между [Mg/Fe] и разницами измерений как возраста, так и металличности, хотя виден небольшой сдвиг (~0.1 dex) из-за эффектов вырождения возраста и металличности. Похожий результат был найден для спектров звездных скоплений в работе Koleva et al. (2007b). Поскольку черные линии, показывающие средние разницы для полного диапазона длин волн, близки к нулю, мы можем утверждать, что измерения Ликских индексов не страдают от систематических ошибок. Результаты аппроксимации в узких спектральных диапазонах 4800 – 5600 Å и 4880 – 5680 Å полностью согласуются, не показывая систематики ни в измерениях возрастов, ни металличностей.

Также мы применили процедуру сканирования пространства параметров возрастметалличность, чтобы найти абсолютные минимумы χ^2 для 600 спектров SDSS путем фиксации значений возраста и металличности и аппроксимируя только кинематику и мультипликативный континуум (см. выше). Исследовались все три диапазона длин волн. Мы провели эту операцию для проверки того, как нелинейная процедура аппроксимации спектров работает в случае сложной формы минимума в пространстве параметров t - Z. Согласие результатов очень хорошее как для возраста, так и для металличности. В 99 процентах случаев значение наилучшего сканирования совпадает со значением наилуч-



Рис. 1.8: Сравнение SSP-возрастов (левая панель) и комбинации возраста и металличности, стабильной к вырождению возраст-металличность (справа), полученных с помощью анализа Ликских индексов и аппроксимации спектров методом NBURSTS. Черные и красные точки соответствуют аппроксимации в следующих диапазонах: 4100 – 5800 Å и 4800 – 5600 Å.

шей аппроксимации. В оставшемся 1 проценте случаев определения возраста лежат на пределе значений сетки моделей, поэтому совпадению значений нельзя полностью доверять.

Главный вывод этого подраздела заключается в том, что мы показали, что процедура аппроксимации спектров NBURSTS работает устойчиво и дает несмещенные оценки возрастов и металличностей даже для несолнечных отношений [Mg/Fe], хотя сам метод основан на моделях с [Mg/Fe]=0. Это позволяет нам использовать предложенный метод не только для карликовых галактик, но и для галактик средней светимости и гигантских галактик ранних типов, а также балджей спиралей, где значения [Mg/Fe] обычно существенно положительные.

1.1.6 Информация о звездном населении в абсорбционных линиях

В некоторых случаях для анализа характеристик звездного населения полезно использовать пространство параметров, предложенное в Section 3 работы Chilingarian et al. (2008d):

$$\eta = (3Z + 2\log_{10} t) / \sqrt{13};$$

$$\theta = (-2Z + 3\log_{10} t) / \sqrt{13}$$
(1.3)

В этой системе координат ось η параллельна направлению вырождения возрастметалличность для старых звездных населений, описанную в работе Worthey (1994) как "если проценты изменения $\Delta age/\Delta Z \sim 3/2$ для двух населений, то они будут выглядеть практически идентично в большинстве индексов".



Рис. 1.9: Различия в определениях возрастов (сверху) и металличностей (снизу) методом аппроксимации спектров и путем анализа Ликских индексов в зависимости от отношения [Mg/Fe]. Черные и красные цвета аналогично Рис. 1.8.



Рис. 1.10: Спектральное распределение информции, чувствительной к свойствам звездных населений для 4 звездных населений в отрезках шириной 20 Å. Соответствующие моделям возрасты, металличности и дисперсии скоростей указаны на каждой панели. SSP-модели показаны черным, синиме и красные гистограммы показывают относительную важность (в процентах) каждого из отрезков для определения параметров звездного населения η и θ . Зеленые полосы указывают диапазоны определения Ликских индексов H β , Mgb, Fe₅₂₇₀ и Fe₅₃₃₅, а желтые по бокам – области определения псевдоконтинуумов.

В работе Koleva et al. (2008) было показано, что что параметры звездных населений, полученные методом NBURSTS согласуются с измерениями Ликских индексов, но оказывают в несколько раз более точными. Здесь мы также отметим, что (1) определение возраста нечувствительно к маскированию бальмеровских линий (см. выше); (2) дисперсии скоростей могут быть точно определены вплоть до знаений в 2–3 раза ниже, чем спектральное разрешение прибора и эти измерения не подвержены систематическим ошибкам; (3) более оптимальное использование информации, содержащейся в спектре, в методе NBURSTS в сравнении с индексами абсорбционных линий, приводит к намного более точному определению параметров звездных населений или, с другой стороны, требует блее низких значений отношения сигнал-шум на Å для получения схожего качества измерений (см. например Koleva et al., 2007а); (4) определение значений возрастов и металличностей не зависит от отношения α /Fe в объекте даже при использовании моделей PEGASE.HR.

Мы предлагаем численный эксперимент для оценки количества информации, чувствительной к возрасту и металличности в абсорбционных спектрах, чтобы проиллюстрировать пункты (1) и (3) из предыдущего абзаца. Поскольку потоки на каждой длине волны вносят вклад в общее значение χ^2 и этот вклад зависит от многих параметров, возможно определить чувствительность процедуры аппроксимации $S(\lambda, p_0, \ldots, p_n)$ к изменению данного параметра p_i на данной длине волны λ путем расчета частной производной от сетки SSP-моделей, учитывая вариации мультипликативного континуума. В нашем случае чувствительность процедуры к параметру η (и аналогично, θ) в точке пространства параметров (t_0, Z_0, σ_0) будет выражаться как:

$$S(\lambda,\eta)|_{(t_0,Z_0,\sigma_0)} = \frac{\partial}{\partial\eta} \chi^2 \{ P_{1p}(\lambda,\eta,\theta)|_{(t_0,Z_0)}(T(\lambda,t,Z) \otimes \mathcal{L}(\sigma_0)) \},$$
(1.4)

где величины определены в Еq. 1.2, 1.3 в предположении истории звездообразования, содержащий одну вспышку (SSP). Это означает, что квадрат невязок аппроксимации спектра $(\eta_0 + \Delta \eta, \theta_0)$ моделью (η_0, θ_0) в каждом пикселе будет отражать его вклад в общее значение χ^2 при изменении параметра η , т.е. чувствительность к этому параметру или, другими словами, меру информации о данном параметре звездного населения. Практически, расчет оказывается тривиальным и проводится следующим образом. Мы выбрали 6 моделей PEGASE.HR "опорные SSP", представляющие звездные населения с возрастами 1.5, 5 и 12 Gyr и металличностями -1.0 и -0.3 dex. Затем для каждого из 6 "опорных SSP" создаются 6 моделей путем свертки SSP с гауссианами, соответствующими дисперсиям скоростей 60, 120 и 180 km s⁻¹ и изменяя параметры η и θ , соответствующие их возрастам и металличностям (см. Eq. 1.3) на 0.05 dex. Например, для "опорного SSP" (5 Gyr, -0.3 dex) две пары будут соответствовать (5.33 Gyr, -0.258 dex) и (5.50 Gyr, -0.328 dex). Затем эти модели аппроксимируются при помощи своих "опорных SSP" методикой PPXF (Cappellari & Emsellem, 2004) с использованием мультипликативного континуума 13-го порядка. Полученные невязки аппроксимации будут соответствовать величине, определенной в Еq. 1.4.

Мы сложили информацию по чувствительности к η и θ в бинах размером 20 Å в диапазоне от 4700 до 5600 Å и нормировали их на общее значение ненормализованного χ^2 , тем самым получив относительную важность каждого из 20 Å интервалов для определения параметров звездного населения. Четыре примера с различными звездными населениями и дисперсиями скоростей приведены на Рис. 1.10. Не следует сравнивать напрямуя красные и синие кривые, поскольку они представляют нормированные величины: абсолютные значения $S(\lambda, \eta)$ в несколько раз выше, чем $S(\lambda, \theta)$, объясняя вытянутые формы контуров значимости 1- σ в пространстве параметров возраст–металличность.

Как и ожидалось, наиболее значимая информация содержится в сильных абсорбционных линиях, таких как $H\beta$ и Mgb, имеющих определения соответствующих Ликских индексов. Однако, замечателен тот факт, что информация, чувствительная как к η , так и θ , содержится во всех частях спектра, хоть и в различных количествах. Для низких металличностей или молодых возрастов, где почти все абсорбционные линии, кроме $H\beta$, оказываются слабыми, наблюдается концентрация информации около синих линий. Увеличение внутренней дисперсии скоростей приводит к похожему эффекту, размывая слабые детали, поэтому спектры высокого разрешения для объектов с низкими внутренними дисперсиями скоростей позволяют использовать всю мощь метода NBURSTS по сравнению с индексами абсорбционных линий.

Стоит особо подчеркнуть, что ни в одном из представленных примеров 20 Å бин вокруг линии $H\beta$ не содержит более 20% информации, чувствительной к параметру θ . Это объясняет тот факт, что мы в состоянии точно оценивать возраста звездного населения даже при отсутствии $H\beta$ и других Бальмеровских линий.

1.2 Декомпозиция профилей яркости галактик

Результаты, представленные в данном разделе, опубликованы в работе Chilingarian et al. (2009с).

В диссертационной работе в нескольких разделах проводится анализ фотометрических данных, полученных на различных телескопах. В ряде случаев требуется разделение компонент одномерного профиля яркости галактики.

Для построения одномерного профиля яркости мы обычно используем процедуру ELLIPSE в программном пакете IRAF, которая аппроксимирует изображение галактики набором эллиптических изофот с возможностью фиксировать/отпускать их центр, ориентацию и параметры формы ("диски/бокси"). Затем, используя амплитуды и размеры изофот, строится одномерный профиль яркости. Для получения реалистичных профилей требуется маскирование ярких точечных объектов фона, проектирующихся на галактику. Для этого применяется следующая процедура:

- Используя процедуру ellipse (IRAF-пакет STSDAS.ANALYSIS.ISOPHOTE) для аппроксимации эллиптическими изофотами создается первичная "грубая" модель галактики, вклад в которую делает не только галактика, но и незамаскированные на данном этапе точечные объекты.
- Далее, из реального изображения вычитается эта первичная модель, в результате чего получаемся изображение, содержащее звезды и шаровые скопления, а так же остаточные отклонения галактики - нерегулярные компоненты, которое мы сглаживаем гауссианой. Последнее действие необходимо для удобства дальнейшего маскирования звезд.
- Далее создается маска для точечных объектов (мы задаем пороговый уровень сигнала так, чтобы в маску попали только маскируемые объекты, но не попали структурные

части галактики – пылевые прожилки и спиральные рукава) и, используя данную маску, создается вторая модель галактики. Она почти не содержит "лишнего" сигнала от звезд поля и шаровых скоплений.

- После этого, разность необработанного кадра и второй эллиптической модели вновь сглаживается
- Затем, задавая новый уровень сигнала, мы отделяем от остатков точечные объекты и маскируем их еще раз. После этого весь цикл может повторяться.

Эти действия повторяются итеративно, пока не будет получена маска достаточно хорошего качества.

Декомпозиция получившегося профиля яркости проводится методом нелинейной оптимизации параметров всех компонент сразу с помощью пакета MPFIT (реализация MINPACK-1 под IDL). При этом модель в процессе минимизации сворачивается с радиально-усредненным профилем PSF, чтобы включить в аппроксимацию даже центральные части галактики, подвергающиеся влиянию неидеального качества изображения.

Модель профиля яркости может включать один, два, либо три компоненты. В случае одно- и двухкомпонентной модели в качестве компонент можно задавать профиль Серсика, в случае трехкомпонентной модели – внутренний профиль Серсика и два экспоненциальных диска, что соответствует в галактиках внутреннему балджу, внутреннему и внешним дискам. Также в процесс аппроксимации можно включать аддитивную константу, которая соответствует неидеальному вычитанию фона неба.

Процедура очень чувствительна к нулевому приближению, поэтому оно выбиралось следующим образом для трехкомпонентного случая (для двухкомпонентных профилей процедура аналогична):

- Вначале аппроксимируется только внешняя часть для определения приблизительных параметров внешнего диска (экспоненциальная шкала и центральная яркость)
- Потом аппроксимируется вместе средняя и внешняя части (>10 arcsec) двухкомпонентной моделью с целью определения параметров внутреннего диска
- После этого эти 4 параметра фиксируются и аппроксимируется трехкомпонентная модель с законом Серсика в центре.
- Получившиеся значения используются как нулевое приближение для фитирования трех компонент с изменением всех 7 параметров модели (2 параметра для каждого диска – экспоненциальная шкала и центральная поверхностная яркость; и 3 параметра для профиля Серсика – эффективный радиус (радиус, содержащий 50% светимости), индекс *n* и эффективная поверхностная яркость, т.е. поверхностная яркость на 1 *r_e* от центра)

В качестве примера использования метода на Рис. 1.11 показана трехкомпонентная декомпозиция сложного профиля яркости линзовидной галактики NGC 6340 из работы Chilingarian et al. (2009с). На верхней панели показан профиль яркости галактики (черная сплошная линия), индивидуальные профили трех компонент (цветные линии) – внутренний профиль Серсика, промежуточный и внешний экспоненциальные диски, а на нижней панели - остаточные уклонения наблюдаемого профиля от суммарного модельного.



Рис. 1.11: Трехкомпонентная декомпозиция профиля яркости галактики NGC 6340 в фильтре r по изображениям SDSS DR6.

1.3 Аналитические аппроксимации *k*-поправок

Результаты, представленные в данном разделе, опубликованы в работе Chilingarian et al. (2010b).

1.3.1 Введение

Внегалактические исследования часто требуют сравнения фотометрических данных разных выборок галактик; в частности, далекие галактики часто сравнивают с локальной Вселенной, где свойства галактик изучены гораздо лучше. При подобном сравнении наблюдаемых величин существует две основные проблемы: (1) астрофизические свойства разных галактик разнятся; (2) сравниваемые фотометрические данные получены в результате разных наблюдений. Первый источник различий связан с эволюционными эффектами: из-за времени, которое требуется свету, чтобы достигнуть наблюдателя, мы видим далекие галактики какими они были несколько миллиардов лет назад, поэтому они просто не успели проэволюционировать в этот последний период времени. Второй набор расхождений связан с принципиальными различиями в наблюдениях, которые выполняются на разных инструментах разными исследователями и всегда существенным образом отличаются друг от друга, даже если данные идеально обработаны и калиброваны. Сюда входят эффекты различия апертур, в которых выполняются измерения, пространственного разрешения наблюдений и семейство эффектов, связанных с использованием различных фотометрических полос.

Фотометрические данные часто происходят из различных наблюдательных исследований, использующих разные фотометрические системы, и для сравнения между собой, таким образом, требуют преобразования цветов (см., например, Fukugita et al., 1995). Но даже если данные получены в ходе одного эксперимента, выборка галактик может содержать объекты на разных красных смещениях.

В широком диапазоне длин волн, от ультрафиолета до ближнего инфракрасного диапазона, спектральные распределения энергии (Spectral Energy Distribution, SED) неактивных галактик в основном определяются свойствами их звездных населений, то есть возрастом и металличностью, и эффектами внутреннего поглощения, сильно возрастающего в сторону более коротких длин волн (Calzetti et al., 1994; Fitzpatrick, 1999). SED звездных населений существенно отличаются от плоских распределений и демонстрируют специфические особенности, такие как скачки (*breaks*), широкие абсорбционные полосы и т.п. (см. Fioc & Rocca-Volmerange, 1997; Bruzual & Charlot, 2003). В то же самое время, красное смещение спектра галактики эквивалентно смещению кривой пропускания соответствующей фотометрической полосы. Этим объясняется различие потоков в одном и том же фильтре двух гипотетических галактик, имеющих в точности одинаковое SED, но расположенных на разных красных смещениях. В силу исторических причин это различие носит название k-поправка (Oke & Sandage, 1968). Формализм, связанный с этой коррекцией, детально представлен в работах Hogg et al. (2002); Blanton & Roweis (2007).

В наше время, в эру больших фотометрических и спектральных внегалактических обзоров, точное, быстрое и простое вычисление *k*-поправок играет ключевую роль в успешной астрофизической интерпретации данных. К настоящему моменту в литературе представлено несколько подходов (Fukugita et al., 1995; Mannucci et al., 2001; Blanton & Roweis, 2007; Roche et al., 2009). Blanton & Roweis (2007) предоставляет программный пакет для вычисления k-поправок для данных в любой фотометрической системе. Однако, поскольку предлагаемый метод основан на технике аппроксимации SED, он требует наличия многоцветных фотометрических измерений. Fukugita et al. (1995) и Mannucci et al. (2001) предлагают лишь качественную зависимость k-поправок от красного смещения и морфологического типа галактик; определение последнего автоматическим способом представляет значительные трудности, а указанные методы таким образом требуют наличия достаточно качественных изображений галактик в дополнение к фотометрическим наблюдениям.

Целью данного исследования стало изучение пространства параметров типичных наблюдаемых свойств галактики и предоставление простой и точной аналитической аппроксимации k-поправок для широко используемых оптических и инфракрасных фотометрических полос на основе минимального набора наблюдательных данных. Для решения поставленной задачи мы исследовали большую однородную базу данных SED галактик в диапазоне длин волн от оптики до ИК, полученную в результате компиляции современных широких фотометрических обзоров. В следующей секции мы опишем создание исследуемой выборки галактик, детально обсудим вычисление k-поправок на основе моделей простого звездного населения (Simple Stellar Population, SSP) PEGASE.2 (Fioc & Rocca-Volmerange, 1997) и сравним полученные результаты со значениями, вычисленными при помощи кода КСОRRECT (Blanton & Roweis, 2007). В секции 1.3.3 дано описание предлагаемого аналитического приближения и сравнение его результатов с k-поправками, вычисленными напрямую на основе имеющихся спектральных данных. В подразделе 1.3.4 приводится сравнение наших результатов с имеющимися в литературе и кратко обсуждается астрофизическая интерпретация предлагаемого метода.

1.3.2 Эмпирическое вычисление *k*-поправок

Мы исследовали k-поправки по большой выборке SED близких галактик в диапазоне длин волн от оптического до ИК. Выборка была создана с применением технологий Виртуальной Обсерватории и объединила в себе фотометрические измерения из обзоров Sloan Digital Sky Survey Data Release 7 (SDSS DR7, Abazajian et al., 2009) и UKIRT Infrared Deep Survey Data Release 5 (UKIDSS DR5, Lawrence et al., 2007).

Вычисление *k*-поправок

Мы использовали два подхода для вычисления k-поправок: (1) программный пакет ксоrrect из работы Blanton & Roweis (2007) и (2) основанные на PEGASE.2 вычисления, которые описаны ниже. Последний метод позволяет приблизительно оценить средние свойства звездного населения галактики вместе с ее внутренним поглощением.

Используя программное обеспечение для эволюционного синтеза PEGASE.2 (Fioc & Rocca-Volmerange, 1997), мы создали сетку SSP для набора из 75 возрастов, равномерно распределенных на логарифмической шкале от 25 млн. до 16.5 млрд. лет, и 10 металличностей в диапазоне -2.5 < [Fe/H] < +1.0 dex. Такая сетка была построена для всех красных смещений между 0 < Z < 0.6 с шагом 0.05. Мы применили закон поглощения Fitzpatrick (1999) для каждого из 750 SSP на каждом красном смещении, варьируя A_V от 0 до 2.25 mag с шагом 0.15 mag, получив в конечном счете 11250 опорных распределений энергии в спектрах (SED) для каждого красного смещения.

Для того, чтобы вычислить k-поправки для каждой конкретной галактики, мы линейно интерполировали сетку SSP, приводя ее к нужному красному смещению, затем выбирали лучшее опорное SED и нормализовали как сами данные, так и опорные SED, на средние потоки во всех фильтрах. Поскольку наши фотометрические неопределенности относительно невелики, подобный метод не имеет сколько-нибудь значимых систематических ошибок. После того, как найдено наилучшее опорное SED, k-поправки во всех фотометрических полосах вычисляются по формуле $K_f(Z) = -2.5 \log(F(0)/F(Z))$, где F(Z) и F(0) представляют собой потоки в данном фильтре на красном смещении Z и в системе отсчета галактики.

Мы сравнили значения, полученные данным методом с теми, что получаются в результате применения программного обеспечения KCORRECT к тем же самым фотометрическим данным. Сравнение всех 9 полос представлено на Рис. 1.12.

В общих чертах результаты двух подходов аналогичны. Однако в некоторых фотометрических полосах заметны статистически значимые отличия. Наихудшим образом ситуация обстоит в SDSS фильтре u и тому есть две основных причины: относительно невысокое качество фотометрии в фильтре и (особенно для объектов на больших красных смещениях) и высокая чувствительность ультрафиолетовых цветов даже к небольшим массовым долям молодых звезд в населениях галактик, практически отсутствующая на больших длинах волн. По этим соображениям метод на основе аппроксимации SSP должен давать не очень хорошие результаты. Вместе с тем, линейная комбинация 5 опорных SED, которая используется в пакете КСОRRECT, в данном случае тоже по всей видимости дает значительные систематические ошибки по причине несоответствия возраста и/или металличности опорных SED и самих галактик. Мы, следовательно, приводим k-поправки для фильтра и с оговоркой, что необходимо использовать эти результаты с осторожностью, из-за отсутствия возможности независимой проверки в указанной полосе. То же относится и к k-поправкам в фильтре K, хотя оба подхода и дают здесь аналогичные результаты, т.к. расчет основан на экстраполяции SED галактики в ближний ИК-диапазон, где модели звездного населения и, соответственно, опорные спектры имеют существенно худшее качество, чем в оптическом диапазоне длин волн.

Вычисления поправок в фильтрах r, i и J обоими методами великолепно согласуются хорошо друг с другом, за исключением участка высоких красных смещений (Z > 0.5) в конце полосы J. Стоит отметить наличие систематических расхождений между подходами в полосах g, z, Y и H. Их по всей видимости можно объяснить тем, что модели PEGASE.2 SSP построены на основе теоретической библиотеки звездных спектров, которая вносит цветовые различия в наблюдаемых и синтетических спектрах по крайней мере в фотометрической системе SDSS (Maraston et al., 2009). Мы сравним ниже результаты в фильтрах g и r с k-поправками, вычисленными напрямую из спектров; однако для остальных фотометрических полос провести подобный независимый тест не представляется возможным в силу отсутствия достаточных объемов спектральных данных на этих длинах волн. Хочется все же заметить, что расхождения имеют порядок 0.05 mag и, следовательно, оба подхода вполне могут применяться в фотометрических исследованиях. В дальнейшем в ходе нашего анализа мы будем использовать оба метода вычисления k-поправок, обозначив их как BR07 и SSP для КСОRRECT и PEGASE.2 SSP подходов, соответственно.



Рис. 1.12: Сравнение эмпирически вычисленных k-поправок, полученных аппроксимацией фотометрических данных моделями PEGASE.2 SSP (k_{P2}) и кодом КСОRRECT (k_{BR07}) . На каждой из панелей изображена разность двух методов как функция красного смещения. Сплошные линии обозначают медиану расхождений, их стандартные отклонения показаны пунктирными линиями.

1.3.3 Результаты

Аналитическое приближение

Во всех фильтрах кроме *H* и *K* наблюдается большой разброс *k*-поправок как функций красного смещения. Однако исследуя данные в программном обеспечении TOPCAT, мы обнаружили, что, добавив наблюдаемый цвет в качестве второго параметра, появляется возможность аппроксимировать *k*-поправку как поверхность в трехмерном пространстве, что значительно уменьшает разброс, сводя его к качеству вычисления *k*-поправок. Мы аппроксимировали значения *k*-поправок в каждом фильтре полиномиальной поверхностью вида:

$$K_q(Z, m_{f_1} - m_{f_2}) = \sum_{x=0}^{N_Z} \sum_{y=0}^{N_c} a_{x,y} Z^x (m_{f_1} - m_{f_2})^y, \qquad (1.5)$$

где Z представляет собой спектроскопическое красное смещение, m_{f_1} и m_{f_2} – наблюдаемые величины в фильтрах f_1 и f_2 , выбранные для каждого фильтра q, N_z и N_c – эмпирически выбранные степени полинома в измерениях красного смещения и цвета, соответственно. Учитывая, что k-поправки равны нулю по определению на Z = 0, нет необходимости добавлять константу и все $a_{0,y} = 0$.

Поскольку оба метода вычисления k-поправок в нашем исследовании основаны на моделях звездного населения, а предлагаемые аналитические аппроксимации представляют собой простые полиномы без какого-либо итеративного отсеивания выбросов, нам пришлось исключить активные ядра галактик (AGN) и квазары, а также артефакты, присутствующие в SDSS (например, самолеты, искусственные спутники Земли, малые планеты), и объекты с неправильно определенным красным смещением, чтобы не ухудшить качество приближения. Мы аппроксимировали все 190 275 спектров SDSS DR7 с помощью метода NBURSTS (Chilingarian et al., 2007d,c) в диапазоне длин волн от 3900 до 6750Å(в покоящейся системе отсчета, т.е. на Z = 0) и отобрали для дальнейшего анализа лишь 164 108 спектров с хорошими значениями $\chi^2/DOF < 0.9$ (медиана $\chi^2/DOF = 0.67$, что меньше единицы из-за небольшой избыточной дискретизации спектров SDSS). Интерпретация результатов аппроксимации спектров будет представлена в совместно со спектрофотометрическим каталогом (Chilingarian et al., в работе).

Мы вычислили и аппроксимировали k-поправки указанным образом сперва для набора 164 108 галактик из обзора SDSS DR7 с "хорошими" спектрами по 5-полосной фотометрии, доступной в SDSS, а затем и для совместной SDSS-UKIDSS выборки, содержащей фотометрическую информацию в 9 полосах о 74 254 объектах. Результаты в обоих случаях статистически эквивалентны для полос u, g и r; различия становятся существенными в iи особенно в z. Две различных последовательности отчетливо проявляются на графиках зависимости k-поправок от красного смещения в фильтрах i и z, когда аппроксимация основана на 5 фотометрических полосах. Только одна из этих последовательностей остается в каждом фильтре при аппроксимации SED по 9 полосам, что отчетливо свидетельствует о фиктивности одной из последовательностей, связанной с неправильным подбором опорных SED из сетки звездных населений. Этот факт явно демонстрирует важность ближней ИК части SED для вычисления k-поправок при чисто эмпирическом подходе. В связи с этим среднеквадратичное отклонение невязок полиномиальной поверхности в фильтре z



Рис. 1.13: *k*-поправки в 9 фотометрических полосах, вычисленные при помощи PEGASE.2 SSP, и невязки аналитической аппроксимации.

при аппроксимации k-поправок в случае 9 полос в четыре раза меньше, чем при аппроксимации на основании 5 полос.

На Рис. 1.13–1.14 мы приводим аналитические приближения k-поправок в 9 полосах для значений, вычисленных на основе аппроксимации PEGASE.2 и при помощи кода КСОRRECT. На верхних панелях изображены вычисленные значения как функции красного смещения и наблюдаемого цвета, который закодирован цветами от синего до красного в соответствии с полоской, расположенной на рисунке. Нижние панели показывают средние невязки и среднеквадратичные уклонения полиномиальной аппроксимации как функции красного смещения. По причине того, что мы использовали фиксированную сетку опорных SED PEGASE.2 и не проводили интерполяции, на графиках в некоторых фильтрах (например, Y) заметны отдельные последовательности возрастов опорных SED в области высоких красных смещений. Однако ошибки, связанные с подобной дискретизацией, не превышают 0.03 mag. Черные линии на графиках соответствуют поведению галактик с



Рис. 1.14: То же, что и Рис. 1.13, но k-поправки вычислены при помощи кода КСОRRECT.

некоторыми определенными цветами g-r в покоящейся системе отсчета (т.е. после учета k-поправок). Сплошные линии обозначают галактики с 0.73 < g-r < 0.81 mag, пунктирные -0.58 < g-r < 0.70 mag, линии точка-тире -0.4 < g-r < 0.6 mag и, наконец, линии три точки-тире обозначают галактики с g-r < 0.15 mag, что приблизительно соответствует ярким красным галактикам (LRG), спиральным галактикам ранних типов (S-early), спиральным галактикам поздних типов (S-late) и галактикам с активным звездообразованием (SF). Линии соединяют медианные значения внутри ячеек размером в 0.03 mag по красному смещению и указанных диапазонов по цвету. Заметим, что k-поправки для полосы u, вычисленные с помощью кода КСОRRECT, на высоких красных смещениях оказываются больше, чем ожидается у ярких красных галактик исходя из их цвета g-r (в покоящейся системе отсчета), что, вероятно, является признаком несоответствия выбранных опорных SED.

4 упомянутых морфологических типа галактик хорошо разделяются в полосах u, g и r; только самые голубые объекты различимы в полосе i, тогда как в ближнем ИК-диапазоне k-поправки практически перестают зависеть от цвета галактики на Z = 0 (или от ее морфологического типа).

Коэффициенты полиномиальных аппроксимаций k-коррекций доступны на сайте K-corrections calculator².

Проверка на спектрах SDSS DR7

Поскольку для всех галактик нашей выборки доступны SDSS спектры в диапазоне длин волн от 3800 до 9200А, мы имели возможность провести прямую независимую проверку аналитических аппроксимаций k-поправок, приведенных выше. Доступное спектральное покрытие позволяет вычислять потоки явно из спектров для кривых пропускания фильтров q, r и i, как сдвинутых на определенное красное смещение, так и в лабораторной шкале длин волн. Максимальные красные смещения, на которых еще возможны надежные прямые вычисления потоков для фильтров r и i составляют ~ 0.28 и ~ 0.08 соответственно; ограничивающим фактором является верхний предел спектрального покрытия в SDSS. Мы использовали сходную с Roche et al. (2009) технику вычисления k-поправок на основе спектральных данных, с той лишь разницей, что мы (1) смещали в красную сторону кривые пропускания фильтров вместо смещения спектра в синюю сторону, чтобы избежать дефектов, связанных с интерполяцией и сглаживанием спектров; (2) в случае отсутствия данных в нужном диапазоне длин волн, мы линейно интерполировали потоки или экстраполировали их константой по F_{λ} , если красный хвост сдвинутого на данное красное смещение фильтра уходил за 9200Å. Максимальное допускаемый уровень обрезания кривой пропускания фильтра составлял около 1% от максимального значения.

На Рис. 1.15 мы приводим разности между измеренными напрямую из спектров kпоправками в фильтрах g и r и аналитическими аппроксимациями поправок, вычисленными эмпирически из SDSS fiberMag с помощью опорных SED звездных населений PEGASE.2 и кода КСОRRECT, как функции красного смещения и наблюдаемого цвета g - r. В полосе r согласие аналитического приближения и наблюдаемых k-поправок составляет около 0.02 mag. Ситуация аналогична для участка небольших красных смещений (Z < 0.3) в фильтре q, хотя систематические различия достигают здесь 0.06 mag. Однако в диапазоне

²http://kcor.sai.msu.ru/



Рис. 1.15: Различия между аналитическим приближением и измеренными напрямую из спектров k-поправками в фильтрах g (слева) и r (справа). Верхние панели показывают вычисленные значения k-поправок. Пунктирные линии обозначают измеренные по спектральным данным k-поправки для галактик ранних типов, представленные в работе Roche et al. (2009).

больших красных смещений (0.3 < Z < 0.5) ошибки приближенных методов достигают 0.15–0.2 mag. По всей видимости такое несоответствие происходит вследствие недооцененных из-за слабого сигнала в синей части спектра синтетических величин в фильтре g для объектов с Z > 0.3. Формальные ошибки вычислений синтетических величин в этом диапазоне красных смещений достигают 0.2 mag.

1.3.4 Дискуссия и выводы

Сравнение с литературой

Мы провели сравнение k-поправок, вычисленных в данном исследовании, с результатами, опубликованными в литературе. Fukugita et al. (1995) представили k-поправки в фотометрической системе SDSS в своей работе на рис. 20. По той причине, что они не публикуют данных в цифровой форме, мы можем сравнить результаты с нашими только качественно. Поведение k-поправок как функций красного смещения хорошо согласуется в диапазоне Z < 0.5; различные морфологические типы галактик в Fukugita et al. (1995) соответствуют восстановленным цветам на Z = 0. Эллиптическая галактика в Fukugita et al. (1995) ведет себя таким же образом, что и последовательность, обозначенная "LRG" на Puc. 1.13–1.14, которая соответствует ярким красным галактикам. Заметим, что кривые пропускания фильтров, использованные в работе Fukugita et al. (1995), несколько отлича-

ны	ны при помощи моделей звездного населения PEGASE.2.					
		Z^1	Z^2	Z^3	Z^4	Z^5
•	K_u	5.93938	-30.5247	179.473	-380.488	282.011
	K_{g}	2.61617	-4.44391	93.0132	-284.582	252.245
	K_r	0.312233	14.3325	-68.2493	136.254	-87.3360
	K_i	0.234538	14.3162	-97.2754	246.775	-207.028
	K_z	0.897075	3.60112	-34.7890	93.0266	-79.5246
	K_Y	0.402992	5.30858	-18.3172	17.6760	-0.31400
	K_J	-0.076704	-4.48411	27.1585	-45.6481	22.6928
	K_H	0.382926	-1.81590	-13.1657	57.5486	-59.0677
	K_K	-1.75997	5.48023	-56.4175	175.939	-160.754

Таблица 1.4: Коэффициенты наилучшего степенного приближения зависимости *k*-поправок для ярких красных галактик от красного смещения. Изначальные *k*-поправки были вычислены при помощи моделей звездного населения PEGASE.2.

ются от тех, что были получены на телескопе SDSS и опубликованы на сайте SDSS DR7. Наиболее наглядно это заметно в фильтрах g и r, что объясняет невозможность точного и адекватного сравнения двух подходов.

На рис. 7 в работе Mannucci et al. (2001) представлены k-поправки в ближнем ИКдиапазоне, вычисленные при помощи кода PEGASE по опорным спектрам галактик различных морфологических типов. И хотя там полосы JHK несколько отличаются от фильтров UKIDSS, поведение k-поправок как функций красного смещение хорошо соответствует нашим результатам. Авторы замечают, что k-поправки в фильтрах H и K практически нечувствительны к морфологическим типам галактик, что мы наблюдаем как очень слабую зависимость поправок от цветов галактик.

Мы также сравнили наши результаты с k-поправками на основе спектральных данных, представленными в работе Roche et al. (2009). Авторы исследовали только галактики красной последовательности, поэтому в данном случае мы имеем возможность проверить только небольшую, хотя и очень важную, часть всего исследованного пространства параметров. Значения k-поправок из табл. 1–2 в работе Roche et al. (2009) нанесены на Рис. 1.15. Результаты согласуются исключительно точно, что, вообще говоря, ожидаемо, поскольку наши k-поправки на основе спектральных данных были вычислены похожим способом и хорошо аппроксимируются аналитическим приближением.

Особый случай ярких красных галактик весьма важен для понимания процессов формирования и эволюции галактик, поэтому для них мы приводим отдельные аппроксимации. Поскольку разброс цветов LRG на Z = 0 весьма мал, порядка 0.04 mag, k-поправки для них могут быть аппроксимированы зависимостью по единственному параметру – красному смещению. Мы сформировали выборку LRG по их специфическим цветам на Z = 0и аппроксимировали их k-поправки одномерными полиномами по красному смещению во всех 9 фотометрических полосах. Коэффициенты полученного приближения 5 степени без постоянного члена приведены в Таб. 1.4 и Таб. 1.5 для методов PEGASE.2 и KCORRECT, соответственно. Каждый ряд соответствует одной фотометрической полосе и содержит коэффициенты от 1-ой до 5-ой степени по красному смещению.

	Z^1	Z^2	Z^3	Z^4	Z^5
K_u	4.20000	-24.5015	229.149	-574.272	434.901
K_{g}	2.17470	10.3810	1.49141	-76.6656	88.6641
K_r	0.710579	10.1949	-57.0378	133.141	-99.9271
K_i	0.702681	4.27115	-37.2060	112.054	-105.976
K_z	0.643953	-1.88400	13.6952	-35.0960	29.9249
K_Y	-0.245996	21.8772	-137.019	322.051	-257.136
K_J	0.106358	-5.06024	18.4707	-3.73196	-23.9595
K_H	0.268479	3.03488	-35.8994	98.6524	-83.9401
K_K	-2.80894	15.6923	-96.8401	256.235	-220.691

Таблица 1.5: То же, что и Таб. 1.4 но для k-поправок, вычисленных методом КСОRRECT.

Выводы

В разделе представлены степенные приближения k-поправок в 9 широко используемых оптических (ugriz) и инфракрасных (YJHK) широкополосных фильтрах как функции красного смещения и наблюдаемых цветов для галактик на красных смещениях Z < 0.5. Традиционные методы вычисления k-поправок основаны на аппроксимации SED и требуют наличия многоцветной фотометрии, которая доступна далеко не во всех случаях. Предложенный в данной главе подход позволяет вычислять с такой же точностью звездные величины галактики в покоящейся системе отсчета на основе минимального набора наблюдаемых параметров, включающего в себя 2 фотометрических измерения и красное смещение. Для ярких красных галактик мы приводим приближения k-поправок в виде одномерных полиномов по красному смещению.

Глава 2

Карликовые эллиптические и линзовидные галактики

Карликовые эллиптические (dE) и линзовидные (dS0) галактики – звездные системы низкой светимости ($M_B > -18.0$ mag), имеющие регулярную морфологию, оказываются численно доминирующим населением в близких скоплениях и группах галактик (Ferguson & Binggeli, 1994). В моделях холодной темной материии и иерархического сценария формирования галактик, они рассматриваются как строительные блоки более крупных звездных систем, наблюдаемых ныне (см. например White & Frenk, 1991). Таким образом, их происхождение и эволюция становится одними из важнейших вопросов современной астрофизики. Предлагаются несколько сценариев их формирования и эволюции (см. обзор в работе De Rijcke et al., 2005), но ни один их них не в состоянии полностью объяснить все наблюдательные проявления этих объектов одновременно. Возможное многообразие сценариев эволюции было предложено в работе van Zee et al. (2004а) и позднее исследовано в работе Lisker et al. (2008) для объяснения свойств различных подклассов карликовых эллиптических галактик, хотя в работе Boselli et al. (2008а) авторы настаивают на эффектах лобового давления в качестве единственного способа формирования dE/dS0.

Карликовые и гигантские галактик ранних типов образуют две последовательности на диаграмме средняя поверхностная яркость ($\langle \mu \rangle_e$) – абсолютная звездная величина (M_B) (см. например Ferguson & Binggeli, 1994), соединяющиеся в районе $M_B = -18$ mag, и это значение часто указывается как граничная светимость, разделяющая два класса (см. Boselli et al., 2008b и Kormendy et al., 2009). Хотя приводится ряд аргументов (см. например Graham & Guzmán, 2003) в пользу неразрывности последовательности карлики– гиганты на диаграмме M_B vs $\langle \mu_e \rangle$, однозначно, что эффективная поверхностная яркость dE галактик коррелирует с их светимостью, или другими словами галактики более низкой светимости имеют низкие поверхностные яркости, что делает их наблюдения весьма непростой задачей. Также стоит помнить, что в dE галактиках обычно отсутствует межзвездная среда, поэтому в их спектрах нет эмиссионных линий. Это объясняет, почему первые кинематические исследования dE галактик (Bender & Nieto, 1990) появились более, чем через 10 после первых публикаций кинематики гигантских эллиптических галактик, полученной из абсорбционных линий (например, Bertola & Capaccioli, 1975).

Недавно возникли новые дебаты относительно происхождения и эволюции dE галактик: в работах Boselli et al. (2008a,b) утверждается, что выметание газа лобовым давлением является единственным сценарием происхождения dE/dS0, что делает их эволюционно отличными от гигантских звездных систем ранних типов и объясняет их расположение на диаграмме M_B vs $\langle \mu \rangle_e$; в то время как в работе Janz & Lisker (2008) авторам удалось объяснить наблюдаемую неоднородность распределения карликовых и гигантских галактик на отношении размер-светимость путем сравнения результатов, полученных из большого однородного набора фотометрических данных, с предсказаниями полуаналитических моделей формирования галактик, что подразумевает общие механизмы происхождения карликовых и гигантских систем. Таким образом, сравнение структурных свойств карликовых эллиптических галактик с их внутренней кинематикой и звездными населениями становится вопросом большой важности для понимания формирования и эволюции dE/dS0.

Значительный прогресс в разработке астрономических инструментов и появление детекторов с низкими шумами считывания стали краеугольными камнями в достижении успеха несколькими наблюдательными проектами, где исследовалась пространственно разрешенная звездная кинематика карликовых эллиптических галактик в разных окружениях. Кинематические профили, представленные в работах De Rijcke et al. (2001, 2003); Geha et al. (2002, 2003); Pedraz et al. (2002); Simien & Prugniel (2002); van Zee et al. (2004b) показывают разнородность степени поддержки галактик вращением и присутствие кинематически выделенных подсистем в некоторых объектах (De Rijcke et al., 2004; Geha et al., 2005; Prugniel et al., 2005; Thomas et al., 2006). Детальные исследования морфологических свойств dE галактик показали наличие вложенных структур, таких как звездные диски, иногда содержащие низкоконтрастные спирали, и бары во многих галактиках (Jerjen et al., 2000; Barazza et al., 2002; Lisker et al., 2006b). Эти открытия усиливают эволюционную связь между карликовыми эллиптическими галактиками и дисковым карликами поздних типов.

В то же время, исследование свойств звездных населений карликовых эллиптических галактик до сих пор остается сложной задачей с точки зрения как наблюдений, так и анализа данных, поскольку силы абсорбционных линий (см. например описание системы Ликских индексов в работе Worthey et al., 1994) требуют высоких отношений сигнал-шум для достижения разумного качества определения возраста и металличности. Был предпринят ряд попыток определения параметров звездного населения dE галактик из узкополосной фотометрии (Rakos et al., 2001). Однако, калибровки использованные авторами, были основаны на Галактических шаровых скоплениях, поэтому было автоматически сделано предположение о старых возрастах звездных насеений, что привело к очень низким оценкам металличностей (от -1.4 до -0.6 dex). Интегральные измерения звездных населений в dE галактиках путем анализа Ликских индексов были сделаны позже в работах (Geha et al., 2003; van Zee et al., 2004a) и указали на средние возрасты 3–5 Gyr и существенно более высокие значения металличностей. Недавно эти результаты были подтверждены и расширены на более широкие выборки галактик в скоплении Дева (Michielsen et al., 2008).

Недвано появилось новое семейство методов для восстановления свойств звездного населения из спектров, интегрированных вдоль луча зрения (Cid Fernandes et al., 2005; Ocvirk et al., 2006; Chilingarian et al., 2007d). Эти методы основаны на прямой попиксельной аппроксимации наблюдаемых спектров моделями звездных населений. Поскольку каждый пиксель в абсорбционном спектре несет информацию о звездном составе галактики, эти методики потенциально обладают более высокой чувствительностью, чем индексы абсорбционных линий, имеющие дело с индивидуальными спектральными деталями. Другое преимущество при использовании попиксельной аппроксимации заключается в легкости устранения следов космических частиц на спектрах, либо эффектов эмиссионных линий, поскольку соответствующие пиксели можно легко исключить из рассмотрения.

Методика аппроксимации спектров NBURSTS, позволяющая извлекать внутреннюю кинематику одновременно с параметризованной историей звездообразования из абсорбционных спектров, как раз принадлежит к этому семейству. Метод работает стабильно даже на низких отношения сигнал-шум.

В настоящее время, увеличивающийся объем высококачественных спектральных данных для карликовых эллиптических галаткик становится доступным в архивах крупных обсерваторий. Поэтому мы решили заново проанализировать существующие и доступные спектральные данные для dE/dS0 с помощью методики NBURSTS. Целью наших исследований является изучение связи между структурой, кинематикой и звездными населениями dE галактик и попытка понять механизмы их формирования и эволюции, в особенности в плотном окружении, т.е. скоплениях галактик.

2.1 Внутренний звездный диск в IC 3653

Результаты, представленные в данном разделе, опубликованы в работах Chilingarian et al. (2007d); Prugniel et al. (2005).

В этом разделе мы представляем первые наблюдения dE галактики методом панорамной спектроскопии. IC 3653 – яркая dE галактика, принадлежащая скоплению Дева (Binggeli et al., 1985). В Таб. 2.1 мы приводим ее основные характеристики. IC 3653 была выбрана как одна из наиболее ярких dE галактик в скоплении Дева, имеющих достаточно высокую поверхностную яркость. Она расположена 2.7 deg от центра скопления, т. е. 0.8 Мрс в проекции. Ее лучевая скорость 588 ± 4 km s⁻¹ (эта работа) подтверждает ее членство в скоплении, разница скоростей со средней скоростью скопления Дева (1054 km s⁻¹, HyperLeda, Paturel et al., 2003¹) – около -470 km s⁻¹. IC 3653 расположена на расстоянии примерно 100 kpc (в проекции) от NGC 4621, гигантской эллиптической галактики со сходным значением лучевой скорости (410 km s⁻¹, HyperLeda). Вместе с другими слабыми галактиками скопления Девы, в частности, IC 809 и IC 3652, для которых доступны измерения лучевых скоростей, они могут принадлежать к физической подструктуре, пересекающей скопление Девы на скорости 500 km s⁻¹.

Профили лучевой скорости и дисперсии скоростей, опубликованные в работе Simien & Prugniel (2002) показывают некоторое вращение. Для галактики также доступны архивные изображения ACS/HST из обзора Virgo cluster ACS survey (Côté et al., 2004).

2.1.1 Спектральные наблюдения и обработка данных

Анализируемые нами спектральные данные были получены с помощью 3D спектрографа MPFS.

Мультизрачковый спектрограф (MPFS), установленный на 6-м телескопе БТА Специальной Астрофизической Обсерватории Российской Академии Наук – волоконнолинзовый спектрограф с микролинзовым растром, содержащим 16 × 16 квадратных про-

 $^{^{1}\,\}mathrm{http://leda.univ-lyon1.fr/}$

Name	IC3653, VCC1871
Position	$J124115.74{+}112314.0$
В	14.55
Distance modulus	31.15
A(B)	0.13
$M(B)_{corr}$	-16.78
Spatial scale	$82 \text{ pc } \operatorname{arcsec}^{-1}$
Effective radius, R_e	$6.7 \operatorname{arcsec} \equiv 550 \operatorname{pc}$
μ_B , mag arcsec ⁻²	20.77
Ellipticity, ϵ	0.12
Sérsic exponent, n	1.2
Heliocentric cz, km s ^{-1}	588 ± 4
$\sigma_{cent}, \mathrm{km} \mathrm{s}^{-1}$	80 ± 3
V_{max} , km s ⁻¹	18 ± 2
V_{max}/σ	$0.27{\pm}0.08$
t, Gyr (lum. weighted)	5.2 ± 0.2
[Z/H], dex (lum. weighted)	-0.06 ± 0.02

Таблица 2.1: Основные параметры IC 3653. Индекс Sérsic, параметры кинематики и звездного населения получены в данной работе, другие параметры заимствованы из баз данных HyperLEDA и Goldmine, а также работы Ferrarese et al. 2006. Ошибки, приведенные для возраста и металличности, соответствуют измерениям на интегральных спектрах.

странственных элементов и 17 дополнительных световодов для измерения фона ночного неба, который наблюдается в 4 arcmin от объекта. Размер каждого элемента – 1"×1". Мы использовали дифракционную решетку 1200 gr mm⁻¹, предоставляющую дисперсию 0.75 Å pixel⁻¹ с детектором EEV CCD42-40.

Наблюдения IC 3653 были проведены 24 мая 2004 года при хороших атмосферных условиях (качество изображения 1.4"). Общее время накопления составило 2 часа. Спектральное разрешение, определенное в результате анализа спектров сумеречного неба, изменяется от R = 1300 до R = 2200 по полю зрения и выбранному спектральному диапазону (4100Å– 5650Å). Разрешение ниже в центре поля зрения и немного повышается в верхних и нижних частях; также наблюдается плавное повышение спектрального разрешения в красном конце спектрального диапазона (соответствует результатам Moiseev, 2001).

Следующие калибровки были получены во время наблюдений IC 3653 (как и для любых других абсорбционных спектров):

- 1. BIAS, DARK.
- 2. "Эталон": 17 световодов ночного неба подсвечиваются лампой накаливания. Эта калибровка используется для определения положения спектров на кадре.
- 3. "Неон" (спектр сравнения): экспонируя спектральную лампу наполненную Ar-Ne-He для осуществления калибровки по длинам волн.
- 4. Внутренняя лампа плоского поля.

- 5. Спектрофотометрический стандарт (*Feige* 56 для наших наблюдений), используемый для абсолютной калибровки спектров.
- 6. Стандарт Ликских индексов и лучевых скоростей (*HD* 137522 и *HD* 175743), используемый также для измерения инструментального контура: асимметрии и ширины аппаратной функции.
- 7. "SunSky": спектр сумеречного неба для дополнительных коррекций систематических ошибок дисперсионной кривой и разницы пропускания различных световодов.

Обработка данных

Обработка данных для 3D спектроскопии – довольно сложный процесс. Мы используем оригинальный программный пакет на языке IDL, созданный и поддерживаемый В. Афанасьевым. Мы внесли ряд изменений в программный пакет: ошибки отсчетов оцениваются на основе фотонной статистики, затем проходят через все этапы обработки для получения реалистичных оценок ошибок потоков в результирующих спектрах.

Процесс первичной редукции данных (до получения откалиброванного по потокам куба данных) состоит из:

- Вычитание bias, чистки космических частиц. Чистка космических частиц предполагает наличие нескольких изображений. Затем они нормируются и собираются в куб. Затем куб анализируется в каждом пикселе через "Num" слоев. Все отсчеты, превышающие некоторый уровень (5-σ) заменяются робастным средним по колонке. Затем очищенный куб суммируется.
- 2. Создание траекторий спектров в изображении "etalon". Точность траектории обычно составляет от 0.02 до 0.03 пикселей.
- 3. Исправление плоского поля и вычитание рассеянного света. Изображения корректируются за спектральное плоское поле до экстракции спектров. Также создается и вычитается модель рассеянного света. Рассеянный свет оценивается, используя части кадра, не содержащие спектров, и затем интерполируется полиномами низких порядков.
- 4. Создание траектории для каждого световода. На этом шаге определяются траектории для каждого световода в микролинзовом блоке (256 световодов в текущей конфигурации), используя траектории 17 световодов, созданные на 2 шаге, и интерполяцию табулированных положений световодов.
- 5. Экстракция спектров. Используя траектории спектров, определенные на предыдущих этапах, спектры (в т.ч. излучения ночного неба) экстрагируются из наблюдений и калибровок, используя гауссиану фиксированной ширины (обычно FWHM=5 px для текущей конфигурации спектрографа).
- 6. Построение дисперсионных кривых. В кадре спектра сравнения идентифицируются спектральные линии, и независимо для каждого световода строится дисперсионная кривая.

- 7. Линеаризация спектров. Все спектры ночного неба объекта из стандартных звезд линеаризуются с использованием логарифмического шага по длине волны. Дискретизация на оригинальных CCD-изображениях меняется от 0.65 до 0.85 Å а после ее приведения к шагу 40 km s⁻¹ от 0.55 до 0.75 Å.
- 8. Вычитание излучения ночного неба. Средний вектор ночного неба рассчитывается, используя спектры в 17 световодах, упоминавшиеся выше. Затем он вычитается для каждого световода после применения коррекции, рассчитанной с помощью плоского поля и спектра сумеречного неба. Это необходимо, поскольку апертуры световодов ночного неба вдвое больше апертур световодов основного растра.
- 9. Определения спектральной чувствительности. Используя спектрофотометрический стандарт, рассчитывается отношение между отсчетами и абсолютным потоком, которое затем аппроксимируется полиномом высокого порядка по всему диапазону длин волн.
- Калибровка куба данных по потокам. Кривая спектральной чувствительности, рассчитанная на предыдущем шаге, используется для абсолютной калибровки потоков. В результате значения в кубе данных соответствуют F_λ[erg · cm⁻² · s⁻¹·Å⁻¹].

Адаптивное пространственное разбиение

В карликовых эллиптических галактиках наблюдается падение поверхностной яркости к периферии, затрудняя измерение кинематики и Ликских индексов в каждом пространственном элементе. В наших данных μ_B изменяется от 18.5 mag arcsec⁻² в центре до 21.2 mag arcsec⁻² во внешних частях поля зрения. В то же время, отношение сигнал-шум в центральных частях достаточно высоко для детального анализа, так что сглаживание всего поля зрения с одинаковым окном может уничтожить некоторые важные детали. Чтобы избежать этих проблем, можно применить процедуру адаптивного разбиения (Voronoi adaptive binning, Cappellari & Copin, 2003). Эта методика была специально разработана для анализа данных панорамной спектроскопии и ее основная идея заключается в использовании бинов переменных размеров для достижения одинакового отношения сигнал-шум в каждом бине.

Результат процедуры адаптивного разбиения – набор одномерных спектров, для которых все последующие шаги анализа могут быть сделаны независимо. Для анализа кинематики мы используем отношение сигнал-шум 15, а для анализа звездного населения – 30.

Помимо этого, мы будем использовать разбиение, содержащее всего 3 области (здесь и далее "3-points разбиение"): центральная конденсация (область вокруг центра галактики размером 3 на 3 arcsec), вытянутая дисковая подструктура (14 на 7 arcsec), ориентированная согласно кинематике (см. Рис. 2.5, иллюстрирующий положения бинов и демонстрирующие интегральные спектры в них), где центральная область включена, и оставшаяся часть галактики. Подобное физически обусловленное разбиение позволяет достичь высокого отношения сигнал-шум для того, чтобы производить высококачественное измерение параметров звездного населения в областях галактики, где мы ожидаем различие звездных населений. В таблице 2.2 представлены параметры этих областей.

Bin	N_{spax}	m(AB)	$\mu(AB)$	S/N
P1	9	16.3	18.7	69
P2	77	15.2	19.9	49
Ρ3	122	15.7	20.9	21

Таблица 2.2: Параметры "3-роіnts" разбиения: количество пространственных элементов, средняя AB величина, средняя AB поверхностная яркость (mag arcsec⁻²), и среднее отношение сигнал-шум на $\lambda = 5000$ Å.

2.1.2 Возраст и металличность, полученные с помощью анализа Ликских индексов

Классический и достаточно эффективный метод изучения параметров звездного населения использует диаграммы различных пар Ликских индексов (Worthey et al., 1994). Сетка значений, соответствующих различным возрастам и металличностям простых звездных населений (мгновенная вспышка звездообразования, SSP), наносится на график совместно со значениями, полученными из наблюдений. Правильный выбор пар индексов, чувствительных к возрасту или металличности, таких, как, к примеру, Н β и Mgb, позволяет определить SSP-эквивалентный возраст и металличность.

Мы используем сетку моделей, рассчитанных с помощью метода эволюционного синтеза PEGASE.HR (Le Borgne et al., 2004). Эти модели основаны на эмпирической библиотеке звездных спектров ELODIE.3 (Prugniel & Soubiran, 2001) и поэтому привязаны к распределениям [Mg/Fe] в солнечном окружении (см. Wheeler et al., 1989 и ссылки в ней). Чтобы показать, что эти ограничения не являются критическими для IC 3653, на Рис. 2.1 представлены Mgb vs <Fe> и модели Thomas et al. (2003) для различных отношений [Mg/Fe]. Эти данные позволяют заключить, что IC 3653 имеет солнечное отношение [Mg/Fe] с точностью порядка 0.05 dex.

Мы пробовали использовать различные индикаторы металличности среди стандартного набора Ликских индексов для того, чтобы выявить возможные эффекты отношения обилий элементов: Mgb, комбинированный индекс железа $\langle Fe \rangle' = 0.72Fe_{5270} + 0.28Fe_{5335}$ и "нечувствительный к отношениям" [MgFe]= $\sqrt{Mg} \langle Fe \rangle'$ (Thomas et al., 2003). Статистические ошибки измерения Ликских индексов рассчитывались согласно работе Cardiel et al. (1998).

На Рис. 2.1с представлена популярная пара индексов: $H\beta$ -Mgb. Сетка построена из значений соответствующих индексов, измеренных на синтетических спектрах PEGASE.HR.

Одним из важных недостатков Ликских индексов является их высокая чувствительность к пропущенным/неверным значениям в данных, к примеру из-за неидеальности детектора, либо не удаленных следов космических частиц. Простая интерполяция пропущенных значений (линейная или сплайн-) не может быть использована, поскольку если какая-либо важная деталь в спектре, например, абсорбционная линия задета дефектом, окончательное измерение индекса будет содержать систематическую ошибку. Области псевдо-континуумов и индекса определены как средние значения потоков без возможности взвешивания отдельных пикселей (см. формулы 1, 2, 3 в работе Worthey et al., 1994). Из-за дефекта ССD-детектора наши данные содержат широкую область горячих пикселей (3 пиксела) в центре синего псевдо-континуума. Таким образом, строго говоря, мы не можем измерить значение Mgb, впрочем как и Н β на значительной части поля зрения.



Рис. 2.1: Диаграммы Mgb - <Fe>' (a), H β - [MgFe] (b), H β - Mgb (c) и H β - <Fe>' (d). На панели (a) отмечены модели Thomas et al. (2003). Сетки моделей на панелях (b), (c) и (d) составлены из измерений Ликских индексов на синтетических спектрах простого звездного населения (SSP) РЕGASE.HR различных возрастов и металличностей. Жирные крестики со стрелками показывают интегральные измерения индексов для 3-роіпt разбиения (см. текст), тонкие кресты соответствуют индивидуальным бинам адаптивного разбиения для отношения сигнал-шум S/N=30.



Рис. 2.2: Карты возраста и металличности, полученные путем инверсии двухиндексных диаграмм для измерений на модельных спектрах (наилучшая аппроксимация): (a) Mgb - $H\beta$, (b) [MgFe] - $H\beta$, (c) <Fe> - $H\beta$; и на реальных данных: (d) <Fe> - $H\beta$.

Для решения этой проблемы мы заменили все пропущенные значения в кубе данных соответствующими значениями модели наилучшей аппроксимации, получение которой описано в следующем разделе.

В таблице 2.3 представлены измерения некоторых Ликских индексов для 3-points разбиения. Мы не видим существенной разницы звездных населений в 3 регионах в пределах точности, которую мы достигаем. Возраст составляет около 6 Gyr, металличность порядка солнечной для "P1" и немного ниже солнечной для "P2" и "P3".

Помимо Н β и Н γ спектральный диапазон MPFS не содержит индикаторов возраста. Хороший индикатор для спектров среднего разрешения, Н γ +Mg+Fe₁₂₅ (Vazdekis & Arimoto, 1999), не может быть использован в нашем случае поскольку необходимое отношение сигнал-шум порядка 100 в районе $\lambda = 4340$ Å не может быть достигнуто даже после сложения всех спектров в кубе данных из-за снижения эффективности спектрографа в синей части спектрального диапазона.

Измерения индекса $H\beta$ довольно сильно разбросаны, что приводит к широкому диапазону оценок возрастов (от 4 Gyr до 13 Gyr).

Также можно заметить достаточно сильный разброс точек на диаграмме Mgb - H β , вызванный проблемами в данных (не все горячие/темные пиксели были отмечены как плохие данные).

Еще одной причина (кроме не отмеченных плохих значений) может быть присутствие слабых небулярных эмиссионных линий в спектре галактики: индекс Н β может быть подвержен влиянию эмиссии Н β , Mgb – линией [N1] ($\lambda = 5199$ Å), расположенной на области красного континуума. Хотя мы не видим значимых эмиссионных линий в остаточных от-

Name	bin 1	bin 2	bin 3
Ca4227	1.062 ± 0.080	0.874 ± 0.190	0.689 ± 0.700
	1.096	1.020	1.092
G4300	5.106 ± 0.135	5.042 ± 0.313	6.923 ± 1.040
	4.995	4.820	4.979
Fe4383	5.794 ± 0.176	4.940 ± 0.389	6.251 ± 1.243
	4.861	4.458	4.696
Ca4455	1.187 ± 0.089	1.096 ± 0.186	0.750 ± 0.561
	1.336	1.235	1.313
Fe4531	2.858 ± 0.125	2.326 ± 0.260	1.595 ± 0.777
	3.499	3.367	3.457
Fe4668	6.070 ± 0.181	5.776 ± 0.361	5.685 ± 1.025
	5.114	4.602	4.808
${ m H}eta$	1.841 ± 0.067	1.823 ± 0.122	1.800 ± 0.304
	1.908	1.966	1.878
Fe5015	5.121 ± 0.138	4.767 ± 0.246	4.912 ± 0.584
(Ti)	5.491	5.211	5.292
Mgb	3.575 ± 0.065	3.550 ± 0.116	3.771 ± 0.278
	3.361	3.203	3.334
Fe5270	3.016 ± 0.072	2.969 ± 0.132	3.362 ± 0.309
	3.059	2.886	2.963
Fe5335	2.708 ± 0.084	2.551 ± 0.155	2.526 ± 0.367
	2.675	2.524	2.598
Fe5406	1.687 ± 0.065	1.667 ± 0.121	1.542 ± 0.286
	1.840	1.720	1.779
$< \mathrm{Fe} >'$	2.930 ± 0.075	2.852 ± 0.138	3.128 ± 0.325
	2.952	2.785	2.861
[MgFe]	3.236 ± 0.070	3.182 ± 0.127	3.435 ± 0.301
	3.150	2.987	3.089

Таблица 2.3: Измерения некоторых Ликских индексов для 3-роіnts разбиения. Все значения в А. Две строки для каждого индекса соответствуют измерениям сделанным на реальных спектрах и на наилучшей модели (см. текст). Символ "Ті" указывает на то, что индекс Fe5015 сильно подвержен влиянию абсорбции титана (см., к примеру, Silchenko & Shapovalova, 1989).

клонения (наблюдения - модель), мы не можем полностью исключить этот эффект.

Для улучшения ситуации мы решили измерять Ликские индексы на модельных спектрах, которыми аппроксимировались данные. Этот подход может привести к систематическим ошибкам в результатах в случае несоответствия обилия химических элементов в моделях реальному звездному населению, так как измерения Ликских индексов будут привязаны к химическому составу моделей. Однако, IC 3653 демонстрирует в точности солнечное отношение [Mg/Fe] (см. Рис. 2.1а), поэтому мы не ожидаем систематических ошибок.

Мы провели инверсию двухиндексных диаграмм для трех комбинаций индексов: Mgb - H β , [MgFe] - H β , <Fe>' - H β . Результаты представлены на Рис. 2.2. Для адаптивного разбиения использовалось отношения сигнал-шум на $\lambda = 5300$ ÅПоказанные карты представляют интерполированные значения параметров между взвешенными центрами бинов.

Распределение металличности показывает небольшой градиент от -0.15 dex на периферии до +0.10 в самом центре (средние ошибки измерения металличности при использовании [MgFe] - Н β – 0.15 dex).

Карта возраста не содержит существенных деталей, среднее значение для возраста при использовании [MgFe] - Н β пары – 6±2.5 Gyr. Индексы [MgFe] и <Fe>' не очень чувствительны к возрасту, таким образом оценки возраста зависят в основном от значения Н β и они практически идентичны для всех трех пар.

2.1.3 Звездные населения и внутренняя кинематика, полученные из аппроксимации спектров

Результаты: карты кинематики, возраста и металличности

Мы применили процедуру адаптивного разбиения к нашим данным для отношения сигналшум 15. Результат содержит 76 бинов размерами от 1 до 12 зрачков MPFS. Для лучшего представления данных можно интерполировать вычисленное значение каждого параметра по полю зрения, используя взвешенные центроиды бинов как узлы.

Мы получили значение системной лучевой скорости галактики 588 ± 5 km s⁻¹. Эта ошибка включает возможные систематические эффекты, не превышающие 4 km s⁻¹.

Поля лучевой скорости и дисперсии скоростей представлены на рисунке 2.3(d,e,f). В галактике наблюдается значительное вращение и сильно наклоненная дископодобная структура. Ошибки измерений скоростей оценивались, используя метод Монте-Карло, и подтверждены прямым сканирование трехмерного пространства $\chi^2(t, Z, \sigma)$, аппроксимируя только мультипликативный полиномиальный континуум на сетке значения возраста, металличности и дисперсии скоростей (см. главу 1). Они зависят от отношения сигнал-шум и изменяются от 2.5 km s⁻¹ для S/N = 30 до 8 km s⁻¹ для S/N = 10.

Распределение дисперсий скоростей показывает градиент от 45-50 km s⁻¹ около максимумов вращения до 75 km s⁻¹ в ядре. Стоит отметить пик дисперсии скоростей 88 km s⁻¹, немного смещенный к юго-западу от фотометрического ядра. Ошибки измерений дисперсии скоростей – 3.8 km s⁻¹ для S/N = 30, 5.5 km s⁻¹ для S/N = 20 и 11 km s⁻¹ для S/N = 10.

Профили скорости вращения и дисперсии скоростей показаны на рисунке 2.4 (верхняя пара).



Рис. 2.3: Обобщенный вид кинематики и звездного населения IC 3653. (а) карта интенсивности с положением разрезов, для которых приведены кинематические профили: (1) позиция щели в работе Simien & Prugniel (2002), (2) и (3) положения большой и малой осей вложенного звездного диска; (b) карта среднего возраста (в миллионах лет); (c) карта металличности ([Z/H], dex); (d) интерполированное поле скоростей; (e) поле скоростей, полностью соответствующее бинам адаптивного разбиения; (f) поле дисперсий скоростей

Предыдущие исследования IC 3653 были выполнены с использованием длиннощелевой спектроскопии (Simien & Prugniel, 2002). Измеримого вращения обнаружено не было. Это может быть объяснено плохими атмосферными условиями во время наблюдений (качество изображения 6 arcsec). После соответствующего ухудшения пространственного разрешения данных MPFS можно отметить очень хорошее согласие с Simien & Prugniel (2002) как для лучевых скоростей, так и для дисперсий (Puc. 2.4, нижняя пара).

2.1.4 Фотометрия и морфология на основе изображений HST

Мы использовали изображения, полученные с HST (камера ACS) из архива, proposal 9401, "The ACS Virgo Cluster Survey" by Patrick Côté. В работе Côté et al. (2004) приведен предварительный анализ данных, но IC 3653 не рассматривается. Мы перевели отсчеты ACS в соответствующие ST величины, используя ACS Data Handbook, доступную онлайн



Рис. 2.4: Верхняя пара рисунков: профиль лучевых скоростей для разреза "2" (большая ось вложенного диска) и профили дисперсий скоростей для разрезов "2" и "3" (большая и малая оси вложенного диска). Нижняя пара рисунков: сравнение кинематических профилей (разрез "1", большая ось основного сфероида галактики) и работой Simien & Prugniel (2002): лучевые скорости и дисперсии скоростей.



Рис. 2.5: (а)Поле лучевых скоростей с изображенными бинами 3-роіпt разбиения (см. текст); (b) аппроксимация интегрального спектра для бина "P1": показаны спектр, наилучшая модель "PEGASE.HR" (сдвинута на -0.3 по потоку от своего первоначального положения), и остаточные отклонения, показывающие разницу между наблюдаемым спектром и наилучшей моделью; (с) "P1", "P2", и "P3": интегральные спектры для 3-роіпt разбиения.
на веб-сайте STScI.

Мы аппроксимировали изображения галактики двумерным профилем Sérsic, используя программный пакет GALFIT (Peng et al., 2002). При этом остаются существенные положительные остаточные отклонения, представляющие ядро в самом центре галактики (около 1.5 arcsec, центральная поверхностная яркость $ST_{475} \sim 16.25$ mag arcsec², немного асимметричные по отношению к центру профиля Sérsic: n=1.88, R_e =6.9 arcsec, ϵ =0.11 (индекс Sérsic, эффективный радиус и эллиптичность соответственно; наши значения параметров совпадают со результатами Ferrarese et al. (2006)). Также наблюдаются крупномасштабные остатки, которые могут быть объяснены наложением нескольких компонент (по крайней мере двух).

Затем мы моделировали изображения эллиптическими изофотами со свободным центром и ориентацией. Мы видим некоторый поворот изофот, изменение их эллиптичности во внутренней части галактики. Основные параметры модели представлены на Рис. 2.6. Вычитание модели из оригинального изображения не оставляет никаких деталей.

Однако карта цвета F475-F875 обнаруживает удлиненную структуру (a/b ~ 3.5), имеющую размер около 7 агсяес по большой оси, и ориентацию, совпадающую с кинематикой дискообразной детали. На Рис. 2.7 представлена карта цвета F475-F875. Она была получена путем применения метода адаптивного разбиения к изображению в цвете F875, чтобы достичь равного отношения сигнал-шум 80 в каждом бине. Более красный цвет структуры может быть вызван несколько повышенной металличностью звездного населения, содержащегося в ней. В то же время мы не видим удлиненной структуры, но только градиент металличности в картах, полученных с MPFS, поскольку размер бинов, используемых при расчете карт звездного населения больше чем для кинематики из-за большего отношения сигнал-шум, используемого при адаптивном разбиении.

После этого мы снова провели аппроксимацию распределения поверхностной яркости профилем Sérsic, исключая центральную область, соответствующую дископодобной структуре. На этот раз мы не увидели значимых остаточных отклонений и индекс Sérsic уменьшился до 1.22, что близко к экспоненциальному профилю. Это значение приведено в Таб. 2.1.

На правом нижнем графике на Рис. 2.6 профиль яркости в F475 показан крестиками. Сплошная линия представляет наилучшую аппроксимацию законом Sérsic для всей галактики, исключая центральные 1 arcsec, где n=1.9; штриховая линия показывает наилучшую модель (n=1.2) для внешних частей галактики (вне диска, видимого в карте цвета).

2.1.5 Обсуждение

Как поле скоростей, полученное из данных MPFS, так и карты цвета HST предоставляют неоспоримые совпадающие аргументы в пользу присутствия слабого внутреннего звездного диска, вложенного во вращающийся сфероид. Этот результат является основным в наших исследованиях галактики IC 3653, а диск может быть рассмотрен как видимая с ребра структура, аналогичная наблюдавшейся в галактике IC 3328 (dE галактика со вложенным спиральным узором, обнаруженным в работе Jerjen et al., 2000). Авторы считают, что спиральная структура имеет низкую амплитуду около нескольких процентов. Однако оценка общей массы небольшого вложенного звездного диска – гораздо более сложная модельно-зависимая задача. Если похожий звездный диск, наблюдаемый с ребра содержит



Рис. 2.6: Фотометрические характеристики IC 3653: позиционный угол (слева вверху), эллиптичность изофот (слева внизу), параметр a4: disky/boxy (справа вверху) в двух цветах, и профиль яркости в фильтре F475.



Рис. 2.7: Карта цвета F475-F875 (данные HST ACS). Наложены изофоты изображения в фильтре F875. Показано положение поля зрения MPFS.

	"P 1"	"P2"	"P3"
t_{fit}, Gyr	4.93 ± 0.20	$4.95{\pm}~0.30$	4.97 ± 0.70
$t_{H\beta-Mgb}$	7.04 ± 1.56	$6.97{\pm}~1.47$	$11.25{\pm}~6.02$
$\mathbf{t}_{H\beta-<\!Fe>'}$	$7.02{\pm}~1.33$	7.28 ± 2.20	6.08 ± 3.94
$t_{H\beta-}[MgFe]$	$7.11 \pm \ 1.65$	6.88 ± 1.89	6.70 ± 5.11
$t_{H\beta-Mqb}$ mod	5.27 ± 1.56	5.13 ± 1.47	$4.85{\pm}~6.02$
$t_{H\beta-\langle Fe \rangle'} mod$	5.15 ± 1.33	4.30 ± 2.20	$4.23{\pm}~3.94$
$t_{H\beta-}$ [MgFe]mod	5.22 ± 1.65	4.12 ± 1.89	4.15 ± 5.11
Z_{fit} , dex	0.03 ± 0.01	-0.14 ± 0.02	-0.17 ± 0.05
$Z_{H\beta-Mgb}$	-0.05 ± 0.09	-0.18 ± 0.08	-0.34 ± 0.24
$Z_{H\beta-\langle Fe \rangle'}$	-0.02 ± 0.04	-0.10 ± 0.05	$0.03{\pm}~0.13$
$Z_{H\beta-[MgFe]}$	-0.04 ± 0.05	-0.14 ± 0.06	-0.11 ± 0.15
$Z_{H\beta-Mgbmod}$	-0.02 ± 0.09	-0.14 ± 0.08	-0.16 ± 0.24
$Z_{H\beta - 'mod}$	$0.02{\pm}~0.04$	-0.14 ± 0.05	-0.17 ± 0.13
$Z_{H\beta-[MgFe]mod}$	0.00 ± 0.05	-0.13 ± 0.06	-0.16 ± 0.15

Таблица 2.4: Сравнение измерений возраста и металличности для 3-points разбиения, полученных путем аппроксимации спектров и основанных на различных парах Ликских индексах, измеренных на реальных или модельных спектрах.

от нескольких до нескольких десятков процентов массы сфероида, его будет легко обнаружить по кинематическим проявлениям. В то же время фотометрические проявления будут сильно зависеть от различия звездных населений.

В этом разделе мы вначале сравним результаты двух методов оценки параметров звездных населений: Ликские индексы и аппроксимация спектров; затем сравним свойства IC 3653 с другими dE галактиками. В заключение мы рассмотрим различные возможности происхождения этой галактики.

Сравнение способов оценки параметров звездного населения

В таблице 2.4 представлено сравнение значение SSP-эквивалентных возрастов и металличностей, полученных с помощью методов аппроксимации спектров и инверсией диаграмм для: H β -Mgb, H β -<Fe>', H β -[MgFe], используя измерения индексов на наблюдаемых и модельных спектрах.

Можно заметить хорошее согласие между подходами. Возрасты, полученные по Ликским индексам оказываются несколько выше, но разница незначительна. Наилучшее согласие как возрастов, так и металличностей, достигается для измерений $H\beta$ и комбинированного индекса [MgFe] (Thomas et al., 2003). Внутренняя точность параметров, определенных с помощью аппроксимации спектра в 3 – 4 раза лучше, чем для определений Ликским индексом, что может быть объяснено более оптимальным использованием информации, содержащейся в спектрах. Хотя достаточно тяжело оценить надежность этих маленьких значений ошибок, относительным измерениям возраста и металличности можно доверять даже когда отношение сигнал-шум составляет всего 10 на пиксел (для спектрального разрешения и диапазона длин волн MPFS).

Свойства и природа IC 3653

Мы рассчитали положение IC 3653 на фундаментальной плоскости (Djorgovski & Davis, 1987). "Вертикальное" отклонение от FP ($d = -8.666 + 0.314\mu_e + 1.14\log\sigma_0 - \log R_e$, Guzman et al., 1993) составляет d = 0.2. IC 3653 оказывается в центре облака точек, представляющих dE галактики на Puc. 2 (левый) в работе De Rijcke et al. (2005) и точно совпадает с моделями Chiosi & Carraro (2002) и Yoshii & Arimoto (1987), представленных на том же рисунке.

Средний возраст звездного населения IC 3653, t = 5 Gyr, совпадает со средним возрастом dE галактик в скоплении Дева ($t_{mean} = 5$ Gyr, Geha et al., 2003; $t_{mean} = 5...7$ Gyr, van Zee et al., 2004a). Однако металличность основного сфероида, Z = -0.1, несколько выше ($Z_{mean} = -0.3$, Geha et al., 2003; $Z_{mean} = -0.4$, van Zee et al., 2004a), что не кажется странным, учитывая довольно высокую светимость IC 3653 – выше, чем у большинства галактик в выборках Geha et al. (2003) и van Zee et al. (2004a).

Мы видим, что фундаментальные свойства не отличают от типичных dE галактик, хотя ее эффективный радиус один из самых маленьких в выборках галактик скопления Дева, представленных в работах Simien & Prugniel (2002); Geha et al. (2003); van Zee et al. (2004b).

Мы рассчитали отношение масса-светимость (фильтр В), следуя методу Richstone & Tremaine (1986): $M/L_B = 8.0 \pm 1.5 (M/L_B)_{\odot}$. Основываясь на моделях Worthey (1994), найденные нами значения возраста и металличности могут быть переведены в отношение масса-светимость для звезд $(M/L_B)_* = 3.5 \pm 0.4$, предполагая начальную функцию масс Солпитера. Значение более чем вдвое ниже динамической оценки означает то, что либо простая динамическая модель переоценивает массу вдвое, либо IC 3653 обладает темным гало.

Последние теоретические исследования, основанные на N-body моделировании эволюции дисковых галактик внутри Λ CDM скопления, выполненные Mastropietro et al. (2005), указывают на то, что диски никогда полностью не разрушаются в динамическом окружении скопления галактик, даже если морфологическая трансформация оказывается значительной. Наше открытие слабого звездного диска в IC 3653 поддерживает эти результаты. Таким образом, один из возможных сценариев происхождения IC 3653 – морфологическое преобразование в плотном динамическом окружении скопления галактик из дисковой галактики позднего типа. Газ был удален путем лобового давления, что вызвало остановку звездообразования. Этот процесс должен был закончиться по крайней мере 5 Gyr назад, иначе мы бы увидели более молодое население в галактике. Однако продолжительность эпизода звездообразования должна была быть больше 1 Gyr, иначе мы бы наблюдали дефицит железа (переобогащение [Mg/Fe]). В рамках этого сценария, повышенная металличность в диске может быть объяснена слегка большей продолжительностью вспышки звездообразования в сравнении со сфероидом. Но мы не можем увидеть разницу в историях звездообразования (даже в среднем возрасте) из-за недостаточного разрешения по возрастам звездных населений.

Другая возможность формирования диска, имеющего более высокую металличность, чем основная галактика – малое диссипативное слияние (De Rijcke et al., 2004). Это довольно маловероятно для карликовой галактики, но не может быть полностью исключено. В частности, кинематически выделенные ядра, недавно открытые в карликовых галактиках и галактиках низкой светимости (De Rijcke et al., 2004; Geha et al., 2005; Prugniel et al., 2005; Thomas et al., 2006) могут быть объяснены этим явлением (малые слияния).

Наиболее популярный сценарий, который обычно используется, чтобы объяснить формирование вложенных звездных дисков в гигантских галактиках ранних типов – звездообразование после выпадения холодного газа на существующий вращающийся сфероид, например, с богатого газом компаньона (cross-fueling). Этот сценарий был использован в работе Geha et al. (2005), чтобы объяснить противовращающееся ядро NGC 770, карликовой линзовидной галактики, которая немного ярче IC 3653 ($M_B = -18.2 \text{ mag}$) и расположена рядом с массивным спиральным компаньоном NGC 772 ($M_B = -21.6 \text{ mag}$) в группе. В NGC 127 ($M_B = -18.0 \text{ mag}$), другой галактике, являющейся спутником гигантской богатой газом NGC 128, мы наблюдаем процесс перетекания газа в настоящий момент (см. главу 3). Динамическое окружение в группах, где относительные скорости галактик сравнительно низки, благоприятствует процессам взаимодействия на длинных характерных временах, таких как медленная аккреция газа.

Наши данные для IC 3653 не позволяют сделать однозначный выбор между этими альтернативами. Однако из общей точки зрения динамически горячее окружение скопления Дева с высокими относительными скоростями галактик не способствует медленной аккреции холодного газа. IC 3653 не является членом подгруппы, включающей большие галактики, которые могут помочь формированию газового диска. И мы предполагаем, что в этом конкретном случае сценарий медленной аккреции не применим.

В настоящее время выборка объектов, для которых производился поиск дискообразных под-структур по прямым снимкам, либо данным панорамной спектроскопии пока слишком мал для каких-либо статистических выводов. Однако вполне возможно, что dE галактики произошли от дисковых галактик (pre-dIrr или маленькие спиральные галактики) и что затем они эволюционировали благодаря отклику на звездообразование и эффекты окружения. Современные dIrr также испытали отклик звездообразования, но сохранили свой газ. Таким образом, весьма маловероятно, что одно только звездообразование может устранить газ. Поэтому эффекты окружения вероятнее всего управляют эволюцией dE галактик и открытие звездных дисков в них поддерживают эту гипотезу.

2.2 Молодые ядра dE галактик скопления Дева

Результаты, представленные в данном разделе, опубликованы в работе Chilingarian et al. (2007е).

Молодые ядра – достаточно частое явление в гигантских галактиках ранних типов (Sil'chenko, 1997; Vlasyuk & Sil'chenko, 2000), наблюдаемых как в скоплениях, так и в группах (Sil'chenko, 2006). Однако молодые околоядерные структуры в карликовых эллиптических линзовидных галактиках не обнаруживали себя, вероятно из-за трудностей их наблюдения в связи с низкой поверхностной яркостью. Чтобы достичь высоких отношений сигнал-шум, достаточных для анализа звездных населений, используя классический метод измерения Ликских индексов (Worthey et al., 1994), время накопления должно быть порядка нескольких часов с использованием крупных телескопов. К тому же, панорамная спектроскопия – необходимая методика для надежного обнаружения таких структур. Однако на сегодняшний момент не было попыток наблюдения даже небольших выборок dE галактик 3D спектрографами, но только индивидуальных объектов (Geha et al., 2005).

Object	Dates	Total exp.time	Seeing
IC 783	21,23 May 2004	$3.5\mathrm{h}$	2"
IC 3468	20 March 2004	$2.5\mathrm{h}$	1.5"
IC 3509	$10,\!12 { m May} 2005$	$3.5\mathrm{h}$	1.7"

Таблица 2.5: Параметры наблюдений

Object	$t { m Gyr}$	$Z \mathrm{dex}$	$(M/L)_{B*}$
IC 783 (core)	3.3 ± 0.4	-0.35 ± 0.04	2.1 ± 0.2
IC 783 (out.)	12.8 ± 4.0	-0.79 ± 0.12	5.2 ± 1.5
IC 3468 (disc)	5.3 ± 0.4	-0.40 ± 0.05	2.8 ± 0.4
IC 3468 (out.)	8.6 ± 0.9	-0.60 ± 0.05	4.0 ± 0.6
IC 3509 (core)	4.1 ± 0.4	-0.05 ± 0.05	3.1 ± 0.4
IC 3509 (out.)	7.8 ± 0.8	-0.40 ± 0.10	4.3 ± 0.5

Таблица 2.6: Усредненные по светимости параметры звездных населений трех dE галактик: возраст, металличность [Fe/H] и отношение масса-светимость для звездных населений согласно Worthey (1994)

Мы начали проект наблюдения выборки dE галактик в скоплениях и группах с использованием мультизрачкового волоконного спектрографа (MPFS) на 6-м телескопе БТА.

2.2.1 Наблюдения и обработка данных

Спектральные данные, которые мы анализируем, были получены с полевым спектрографом MPFS. Мы использовали тот же самый режим инструмента, что и для наблюдений IC 3653. Параметры наблюдений приведены в таблице 2.5.

Данные обрабатывались и анализировались, используя методики, подробно описанные в предыдущем разделе, посвященном IC 3653. Отношения сигнал-шум использованные для адаптивного разбиения составляли от 15 до 20.

"2-points" разбиение было применено ко всем трем галактикам. Оно содержит 2 бина: центральная молодая вложенная структура и оставшаяся часть галактики.

Для двух галактик: IC 3468 и IC 3509 мы использовали результаты анализа изображений, полученных камерой ACS (Космический телескоп им. Хаббла, proposal 9401, "The ACS Virgo Cluster Survey" (P.I.: P. Côté), представленные в работе Ferrarese et al. (2006). Для IC 783 использовались профили яркости и цвета, доступные в базе данных GOLDMine (Gavazzi et al., 2003).

2.2.2 Звездные населения и внутренняя кинематика

IC 783

В этой галактике была найдена замечательная спиральная структура (Barazza et al., 2002). IC 783 показывает вращение ($v_{rot} \sim 20 \text{ km s}^{-1}$, см. также Simien & Prugniel (2002)). Поле дисперсии скоростей плоское ($\langle \sigma \rangle = 35 \pm 10 \text{ km s}^{-1}$) не показывает никаких значительных деталей.



Рис. 2.8: Кинематика и звездное население IC 783. Карты звездной кинематики и параметров звездного населения построены для адаптивного разбиения для отношения сигнал/шум 15. (а) лучевые скорости; (b) дисперсия скоростей звезд; (c) средний возраст; (d) средняя металличность.

Мы открыли молодое ядро в этой галактике, имеющее следующие средние параметры звездного населения: $t = 3.3 \pm 0.4$ Gyr, $Z = -0.35 \pm 0.04$ dex, в сравнении с основным сфероидом галактики (содержащим спиральную структуру): $t = 12.8 \pm 4.0$ Gyr, $Z = -0.79 \pm 0.12$ dex. Молодое ядро IC 783 не разрешается пространственно. Отношение массы к светимости в фильтре В для звездного населения согласно Worthey (1994): $(M/L)_{B*} = 2.1 \pm 0.2$ для ядра и $(M/L)_{B*} = 5.2 \pm 1.5$ для оставшейся части галактики.

IC 3468

Известно, что галактика содержит вложенную структуру (Barazza et al., 2002). Вопрос о природе этой структуры оставался открытым, поскольку длиннощелевая спектроскопия в работе Simien & Prugniel (2002) не обнаружила вращения в этой галактике. Однако мы видим сложную кинематику – вращение вдоль двух неперпендикулярных направлений (NW-SE и NE-SW, разделенных примерно ~ 60 degrees по позиционному углу), ни одно из



Рис. 2.9: Спектры центральной части и периферии галактик IC 783 и наилучшими моделями простого звездного населения PEGASE.HR SSP: наблюдаемый и синтетический спектры показаны черной и красной сплошными линиями, ±1σ ошибки потоков показаны штриховыми фиолетовыми линиями, остаточные уклонения наблюдения-модель – зеленой сплошной линией соответственно.

которых не совпадает с положением щели из работы Simien & Prugniel (2002). Нерезкая маска изображения частей HST ACS обнаруживает наличие вытянутой структуры в центральной области галактики. Изменяя радиус сглаживания для нерезкой маски, возможно выделить различные части этой структуры.

На карте среднего возраста четко видна вытянутая под-структура возрастом $t = 5.3 \pm 0.4$ Gyr, совпадающая с одним из вращающихся компонентов. Она примерно на 3.3 Gyr моложе, чем оставшаяся часть галактики ($t = 8.6 \pm 0.9$ Gy). Также можно заметить "синюю" полосу в распределении дисперсии скоростей (значения ниже на ~ 10 km s⁻¹ по сравнению со средними значениями), расположенную там же. Основываясь на этих результатах мы заключаем, что вращение вдоль NW-SE соответствует умеренно наклоненному звездному диску ($i \sim 60^{\circ}$). Скорость вращения составляет 17±4 km s⁻¹ на расстоянии 7 агсsec от центра, но мы не можем быть уверены, что достигаем максимумов вращения – необходимы наблюдения с более широким полем зрения.

Интересно, что этот диск практически не затрагивает распределения металличности. Средняя металличность демонстрирует относительно гладкое поведение ($Z = -0.60 \pm 0.05$ dex) с плавным градиентом в сторону центра (до $Z = -0.40 \pm 0.05$ dex).

Отношение массы к светимости для звездного населения в фильтре В: $(M/L)_{B*}$ = 2.8 ± 0.4 для диска и $(M/L)_{B*}$ = 4.0 ± 0.6 для внешних частей. Наши оценки среднего возраста и металличности в центре IC 3468 соответствуют цвету g'-z' компактного ядра (усредненного с галактикой по апертуре, соответствующей качеству изображения), приведенному в работе Ferrarese et al. (2006).

IC 3509

Когда мы выбирали объект для наблюдений, IC 3509 была выбрана как "прототип" dE галактики, классифицированный как объект без ядра в работе Binggeli et al. (1985). Мы не ожидали увидеть необычную кинематику и/или звездное население в звездном объекте. Однако мы обнаружили кинематически выделенную центральную область, вращающуюся $(v_{rot} \sim 10 \text{ km s}^{-1})$ в перпендикулярном направлении к большой оси, где также наблюдается значительное вращение $(v_{rot} \sim 20 \text{ km s}^{-1})$. Эта структура ассоциирована с "провалом" в распределении дисперсии скоростей (50 km s⁻¹ по сравнению с 75 km s⁻¹) и градиентом металличности порядка 0.2 dex на 4 агсяес. Звездное население галактики относительно старое и бедное металлами ($t = 7.8 \pm 0.8 \text{ Gyr}$, $Z = -0.40 \pm 0.10 \text{ dex}$, $(M/L)_{B*} = 4.3 \pm 0.5)$. В самом центре галактики мы видим пространственно неразрешенное молодое ($t = 4.1 \pm 0.4 \text{ Gyr}$), высокометалличное ($Z = -0.05 \pm 0.05 \text{ dex}$) ядро ($(M/L)_{B*} = 3.1 \pm 0.4$).

Мы применили методику нерезкой маски к изображениям HST, полученным в рамках Virgo ACS Survey (Côté et al., 2004) с различными радиусами сглаживания. Вложенные структуры не были обнаружены.

Кинематическое проявление, достаточно похожее на IC 3509 наблюдалось ранее в гигантских галактиках ранних типов, например, в NGC 5982 (Statler, 1991). Было предложено объяснение, которое не требовало присутствия динамически выделенной структуры – проекция орбит при аксиальном потенциале. Основываясь на достаточно регулярных (кроме самого центра) картах звездного населения IC 3509, мы заключаем, что галактика вне ядерной области может быть представлена однокомпонентным триаксиальным эллипсоидом.



Рис. 2.10: Кинематика и звездное население IC 3468. Карты звездной кинематики и параметров звездного населения построены для адаптивного разбиения для отношения сигнал/шум 15. (а) лучевые скорости; (b) дисперсия скоростей звезд; (c) средний возраст; (d) средняя металличность.



Рис. 2.11: Кинематика и звездное население IC 3509. Карты звездной кинематики и параметров звездного населения построены для адаптивного разбиения для отношения сигнал/шум 10. (а) лучевые скорости; (b) дисперсия скоростей звезд; (c) средний возраст; (d) средняя металличность.

Как и в случае IC 3468, для ядра IC 3509 цвет the g'-z', представленный в работе Ferrarese et al. (2006), соответствует нашим оценкам параметров звездного населения.

2.2.3 Обсуждение

С момента первого открытия химически (Sil'chenko et al., 1992) и эволюционно (Sil'chenko, 1997; Vlasyuk & Sil'chenko, 2000) выделенных ядер гигантских галактик ранних типов не предпринималось попыток моделирования их формирования и эволюции. Обычное объяснение этого явления – диссипативное слияние. В то время как слияние – общепринятый сценарий формирования для гигантских галактик ранних типов, обычно он рассматривается как маловероятный для карликов из-за их малых размеров и масс.

Однако присутствие вложенного диска в IC 3468 – важный аргумент в пользу сценария слияния. Кинематически выделенные структуры, связанные с молодым богатым металла-

ми звездным населением, соответствуют гипотезе диссипативного слияния, которое имело место несколько Gyr назад. Подобное диссипативное слияние должно инициировать вспышку звездообразования, которое использует доступный газ и приведет к кинематически выделенному ядру, которое будет моложе, чем основная галактика.

Другая возможность – эффекты выметания газа лобовым давлением. Эффективность этого явления зависит от плотности области в галактике, которая ему подвергается: при высоких плотностях эффективность понижается (Gunn & Gott, 1972; Abadi et al., 1999). Таким образом, может случится, что в плотном ядре карликовой галактики газ не будет удален. Подобное явление усечения газовых дисков наблюдалось в гигантских спиральных галактиках в скоплении Дева (Cayatte et al., 1994; Kenney & Koopmann, 1999) и было промоделировано Abadi et al. (1999).

Возможный сценарий формирования структуры, наблюдаемой в IC 783 (полное отсутствие газа, молодое ядро без очевидных свидетельств кинематической выделенности) – последовательные прохождения через центр скопления. IC 783 расположено на расстоянии (в проекции) 1.1 Мрс от центра скопления Дева. Таким образом, ее орбитальный период составит по крайней мере 4.5 Gyr (предполагая массу скопления 10¹⁴ M_☉). Газ может быть устранен с диска IC 783 при первом проходе, но при этом сохранится в плотном ядре, поскольку плотность межгалактической среды и/или скорость галактики могут оказаться недостаточными для полного удаления газа.

Чтобы удалить газ и остановить звездообразование в ядре, мы можем предположить, что при втором прохождении центра скопления через несколько Gyr орбита галактики в скоплении может трансформироваться в немного более вытянутую, скажем из-за случайного взаимодействия с массивной галактикой, следовательно v_{cross} увеличится (также как и ρ , потому что галактика пройдет ближе к центру скопления), так что лобовое давление $P = \rho v^2$ достигнет достаточного значения, чтобы удалить газ из центральной области галактики и остановить звездообразование.

Альтернативная возможность изменения эффективности лобового давления для IC 783 может быть объяснена принадлежностью к группе Messier 100. IC 783 расположена на расстоянии 90 kpc в проекции от М 100, разница лучевых скоростей в ~ 270 km s⁻¹ – аргумент в пользу взаимодействия. Предполагается, группа М 100 упала на скопление Дева относительно недавно (Binggeli et al., 1987). Предполагая то, что она проходит свой апоцентр в настоящее время, орбитальный период группы М 100 в скоплении составит 5–8 Gyr, таким образом, последнее прохождение через центр скопления произошло 3-4 Gyr назад, а предыдущее – около 8–12 Gyr назад. С другой стороны, орбитальный период IC 783 по отношению к М 100 должен быть около 1 Gyr. Таким образом, если орбитальная скорость IC 783 была противонаправлена орбитальному движению М 100 в скоплении во время первого прохода через центр и сонаправлена во время второго, значение лобового давления $P = \rho v^2$ может меняться до 3.5 раз (предполагая максимальную скорость М 100 по отношению к межгалактической среде скопления $\sim 1000~{\rm km~s^{-1}}$ и орбитальную скорость IC 783 по отношению к M 100 \sim 300 km s⁻¹). Совпадение ожидаемых времен прохождения через центр скопления с возрастами двух населений IC 783 является важным аргументом в пользу этого сценария.

Выметание газа лобовым давлением во время повторных прохождений центра скопления может рассматриваться как возможное объяснение молодых богатых металлами ядер в карликовых галактиках ранних типов. В зависимости от параметров орбиты конкретной галактики в скоплении можно ожидать большого разброса возрастов/металличностей этих подструктур по отношению к населениям галактик.

Хорошее согласие между нашими оценками параметров звездного населения и цветами g'-z' компактных ядер IC 3468 и IC 3509 может рассматриваться как свидетельство присутствия молодого богатого металлами звездного населения во всех компактных ядрах карликовых эллиптических галактик, описанных в работе Ferrarese et al. (2006). Однако эта гипотеза может быть подтверждена только будущими наблюдениями.

2.3 Исследование галактик в скоплении Abell 496

Результаты, представленные в данном разделе, опубликованы в работе Chilingarian et al. (2008d).

Чтобы прояснить эволюционные пути галактик ранних типов средних и малых масс в скоплениях, мы исследовали фотометрические и кинематические характеристики, а также звездные населения выборки карликовых галактик в близком скоплении Abell 496. Нашей задачей являлось выделить объекты, являющиеся результатами различных сценариев эволюции, чтобы определить, какие из свойств являются основополагающими в процессе формирования и эволюции карликовых галактик ранних типов.

Abell 496 – скопление галактик 1-го класса богатства (Abell, 1958) типа cD (Struble & Rood, 1987) имеющее лучевую скорость 9885 km s⁻¹ (z = 0.0330 Durret et al., 2000 и ссылки в ней) или 9707 km s⁻¹ ($z_{corr} = 0.0324$) после коррекции лучевой скорости за движение Местной Группы в направлении скопления Дева. Для значения H₀=73 km s⁻¹ Mpc⁻¹ модуль расстояния составляет 35.70 ($d = 133 \ Mpc$), что соответствует масштабу 0.627 kpc arcsec⁻¹. Abell 496 – скопление галактик с измеренными красными смещения-ми для нескольких сотен объектов (Durret et al., 1999). Анализ распределения красных смещений для 466 галактик в направлении скопления 274 галактик с подтвержденным членством в скоплении позволяют судить, что Abell 496 – скопление с регулярной морфологией и хорошо срелаксировавшей структурой (Durret et al., 2000). Это подтверждается рентгеновскими данными: карты плотности и температуры, полученные из наблюдений с XMM-Newton имеют регулярную структуру в противоположность большинству других скоплений галактик, где достаточно регулярный вид распределения рентгеновского излучения соответствует неоднородной карте температуры горячего газа (Durret et al., 2005).

Здесь мы представляем результаты для 48 галактик низкой светимости в скоплении Abell 496.

2.3.1 Наблюдения и обработка данных

Прямые снимки и выборка галактик

Изображения были получены с Канадо-Франко-Гавайским телескопом с помощью камеры Megacam осенью 2003-го года (program 03BF12, P.I. V. Cayatte). Поле зрения Megacam составляет $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ с размером пикселя 0.187×0.187 arcsec. Мы получили глубокие изображения в фильтрах u^* , g', r', i'. Изображения были обработаны обычным образом (коррекция bias и плоского поля, фотометрические и астрометрические калибровки) в центре данных Тегаріх в Парижском Институте Астрофизики. Программный пакет SEXTRACTOR применялся к изображению в фильтре r' (изображение с наилучшим пространственным разрешением) чтобы найти объекты и измерить их положения и звездные величины. В частности, измерялись звездные величины в апертурах диаметром 1.2 arcsec для подготовки наблюдений с FLAMES/Giraffe (см. ниже). Технические детали обработки данных приведены в работе Boué et al. (2008).

Звезды удалялись из выборки объектов на основе диаграммы апертурная минус полная / полная звездная величина для r<21. Все более слабые объекты были сохранены в нашей выборке галактик. Метод фотометрических красных смещений (программный пакет, любезно предоставленный O. Ilbert) был применен к объектам из результирующего каталога, имеющим апертурные звездные величины в диафрагме d=1.2 arcsec в фильтре r (r_{1.2}) в диапазоне 17.5–22.

Мы взяли галактики из полученного каталога и установили следующие приоритеты: высший для объектов 18.0 $< r'_{1.2} < 20.75$; средний для $20.75 < r'_{1.2} < 21.5$; и низкий для $21.5 < r'_{1.2} < 22$. Таким образом были получены спектры 118 галактик (некоторые из фиберов FLAMES/Giraffe были использованы для звезд гидирования и спектров неба). Фрагмент изображения в фильтре r' с галактиками, для которых были получены спектры FLAMES/Giraffe, показан на Рис. 2.12.

Спектральные наблюдения, обработка и анализ

Спектральные данные были получены на телескопе ESO VLT при использовании спектрографа Giraffe в конфигурации L682.2 в течение двух ночей 8-9/12/2004. Поле зрения спектрографа имеет диаметр 20 агстіп и содержит 120 световодов диаметром 1.3 агсяес. Использовалась дифракционная решетка 600 gr/mm в режиме LR4, обеспечивая спектральное разрешение порядка R = 6300 в диапазоне длин волн 5010-5831Å.

В течение первой ночи были получены 4 экспозиции продолжительностью 2700, 3300, 2351 и 1699 секунд. Во вторую ночь было сделано еще 4 экспозиции в той же самой конфигурации с эффективными продолжительностями: 2700, 2 х 3300 и 4200 секунд. Калибровки (bias, плоские поля, спектры сравнения для обоих волоконных блоков MEDUSA) были сделаны в течение светлого времени. Описание инструмента Giraffe можно найти в работе Pasquini et al. (2002). Экстракция и калибровка спектров была произведена с помощью BLDRS - Baseline Data Reduction Software (girbldrs-1.12), доступной в Интернете по адреcy http://girbldrs.sourceforge.net, используя описания методов работы из BLDRS Software Reference Manual, Doc. No. VLT-SPE-OGL-13730-0040 (Issue 1.12, 20 September 2004). B некоторых случаях, если это было необходимо, проводилась обработка данных вручную, используя IRAF. Процесс обработки данных включает в себя: вычитание bias, оценку и вычитание рассеянного света, локализацию траекторий спектров и последующую экстракцию, коррекцию за пропускание световодов, калибровку по длинам волн, коррекцию за спектр лампы плоского поля и вычитание спектра излучения ночного неба. Полученные спектры не калибровались в абсолютные потоки; мы использовали ошибки потоков в относительных единицах, предоставленные системой обработки BLDRS.

Мы складывали индивидуальные одномерные спектры, используя программный пакет в среде RSI IDL и измеряли красные смещения с помощью пакета RVSAO.XCSAO в IRAF. Также красные смещения измерялись методом аппроксимации спектров, описанном в этой работе. Измерения обоими методами хорошо согласуются между собой.



Рис. 2.12: Фрагмент изображения CFHT Megacam в фильтре r', показывающий центральную часть Abell 496. Галактики из спектральной выборки отмечены различными символами: (1) подтвержденные члены скопления ромбиками с цветами, указывающими на присутствие вложенных структур: красные, зеленые и синии для отсутствующих, слабых и сильных структур соответственно; (2) подтвержденные галактики поля показаны квадратиками; (3) галактики с неизвестными красными смещениями – треугольниками. Карта скопления в рентгеновском диапазоне по данным XMM-Newton показана контурами.

Разделение точечных и протяженных объектов оказалось достаточно хорошим, поскольку ни один из полученных спектров не принадлежал звездам фона. С другой стороны, выделение галактик фона, основанное на применении фотометрических красных смещений, было не очень эффективным, поскольку только 48 из 102 галактик с измеренными красными смещениями оказались членами скопления. 46 из этих 48 имеют отношения сигнал-шум, достаточные для анализа кинематики и звездного населения, для двух оставшихся объектов мы представляем только результаты анализа фотометрии.

Абсолютные величины галактик были рассчитаны, используя указанный выше модель расстояния. Все фотометрические параметры, приведенные для галактик скопления Abell 496 в этой работе, исправлены за поглощение в Галактике (Schlegel et al., 1998). Также мы учитываем эффекты космологического ослабления поверхностной яркости, *k*поправки и переводим все значения в фильтр *B*, используя трансформации из работы Fukugita et al. (1995) для эллиптических галактик.

Для определения параметров кинематики и звездного населения мы используем методику NBURSTS. Как и в одном из предыдущих разделов этой главы, помимо полного цикла минимизации мы используем аппроксимацию только мультипликативного континуума и дисперсий скоростей на фиксированной сетке возрастов и металичностей для построения карт уровней значимости оценок параметров звездного населения (t, Z) для каждого спектра.

Значение χ^2 , нормированное на количество степеней свободы, составляет ≈ 0.45 для объектов, у которых не наблюдается очевидного несовпадения спектров с моделями изза несолнечных отношений [Mg/Fe], откуда мы можем заключить, что ошибки потоков, возвращаемые системой обработки BLDRS переоценены примерно на 50 процентов.

2.3.2 Результаты

Фотометрические и морфологические свойства

Мы приводим интегральные фотометрические параметры и карты цвета для 48 галактик, отождествленных как члены скопления. Поверхностная фотометрия, декомпозиция профилей яркости и фундаментальные соотношения будут подробно исследованы в одной из следующих работ. Как было описано выше, галактики, выбранные внутри вириального радиуса срелаксированного скопления в соответствующем диапазоне лучевых скоростей, с большой вероятностью оказываются галактиками ранних типов, т.е. эллиптическими и линзовидными галактиками.

По изображениям Megacam мы проводили простую визуальную морфологическую классификацию, определяя тип галактики как E, S0, Sa или спираль позднего типа. Так как подобная классификация имеет субъективный характер, в некоторых случаях мы оставляли два возможных типа. Результаты приведены в Таб 2.7. В выборке оказалось всего две галактики с типами более поздними, чем Sa, и одна, которую мы классифицировали как SBa. Оставшиеся 45 галактик принадлежат к ранним типам. Даже если наша выборка и не является полностью репрезентативной для всего населения скопления из-за наблюдательных ограничений (отсутствие ярких объектов и ограничения на положения из-за механизма расстановки световодов FLAMES/Giraffe), морфологическая сегрегация наблюдается, как и ожидается в центрах скоплений галактик.

Поскольку диапазон абсолютных величин в фильтре B [-18.8, -15.0] содержит пере-

ход между карликовыми галактиками и объектами ранних типов, мы разелили всю выборку на три части: яркие представители, соответствующие галактикам средней светимости в работе Bender et al. (1992) со светимостями $M_B < -18.0$ (к этому набору принадлежат 10 галактик из нашей общей выборки); переходная выборка со светимостями $-18.5 < M_B < -17.5$ mag (классификация как dS0/S0 или dE/E в зависимости от морфологии; всего 8 галактик); карликовые галактики $M_B > -17.5$ (28 объектов, т.е. 57 процентов всей выборки). Галактики из всех этих трех наборов оказываются на различных расстояния от сD, которую мы считаем центром скопления. Морфологическая классификация является уместной для ярких объектов, однако для слабых систем мы не будет обсуждать различия между dS0 и dE0, также как было сделано в работе Lisker et al. (2007), где авторы использовали "dE" для описания этого довольно неоднородного класса галактик. Они рассматривали другие подклассы для dE, и мы рассмотрим нашу выборку в этом ключе.

Мы применили процедуру нерезкого маскирования с эллиптическим размыванием (Lisker et al., 2006b) к изображениям CFHT/Megacam для поиска низкоконтрастных вложенных структур в галактиках из нашей выборки. Используя разные радиусы размывания (большие полуоси эллипсов) от 0.3 до 4 arcsec, мы классифицировали все объекты на три категории: без структур, со слабыми структурами и с сильными структурами. Найденные структуры включают в себя бары, диски, спиральные ветви и кольцевые структуры (см. Таб. 2.7). Девять и пять объектов попали в группы с сильными и слабыми структурами структурами структурами и соответственно. Мы отмечаем, что только одна слабая галактика $M_B > -17.5$ имеет сильные подструктуры и три других $-17.5 < M_B < -16.5$ – слабые; с другой стороны более яркие объекты нашей выборки часто показывают сильные и сложные вложенные структуры.

Среди девяти объектов с сильными подструктурами, два набора их трех галактик оказываются довольно близко друг от друга в проекции, но имеют сильно отличающиеся лучевые скорости. Первый набор (ACO496J043308.85-130235.6 (G-02), ACO496J043320.35-130314.9 (G-06) и ACO496J043321.37-130416.6 (G-07)) находится на северном краю рентгеновского гало (см. Fig. 12 в работе Тапака et al. (2006)); второй набор (ACO496J043326.49-131717.8 (G-13), ACO496J043331.48-131654.6 (G-15) и ACO496J043333.53-131852.6 (G-18)) – южнее, вблизи центра скопления, где яркость рентгеновского изображения оказывается выше, чем азимутально-усредненное значение и соответствует положению холодного фронта. Однако второй набор из трех галактик повидимому представляет собой лишь эффект проекции на центр скопления, сами же объекты могут находиться довольно далеко от центра, на что указывает их лучевая скорость. В обоих случаях, физическую связь галактик в "группах" нужно устанавливать отдельно.

Что касается галактик со слабыми вложенными структурами, то одна из них является ярчайшим объектов в группе из четырех галактик с близкими лучевыми скоростями (ACO496J043348.59-130558.3 (G-32), ACO496J043343.04-130514.1 (G-28), ACO496J043345.67-130542.2 (G-30) и ACO496J043349.08-130520.5 (G-33)), расположенными в одной области на небе примерно в 400 kpc к северу от cD галактики Abell 496, которые повидимому образуют физически связанную группу.

Восемь карликовых галактик ($M_B > -18.0 \text{ mag}$) содержат спиральные ветви, бары, кольца, либо диски, видимые с ребра, напоминая по структуры, описанные в работе Lisker et al. (2006b) для карликовых галактик в скоплении Дева. 8 объектов соответствует 24%

общего количества 34 карликовых галактик в нашей спектральной выборке объектов в Abell 496; это значение превосходит оценку доли dE(di) галактик в скоплении Дева, приведенную в работе Lisker et al. (2007), однако в нашем случае могут наблюдаться эффекты селекции из-за работы в основном с яркими галактиками. Другой подкласс из работы Lisker et al. (2006b) – галактики с голубыми центрами со следами недавнего либо текущего звездообразования. В нашей выборке мы видим три объекта с такими свойствами – все они довольно сплюснутые и хорошо соответствуют сплюснутым сфероидам из работы Lisker et al. (2006a), применявшимся для объяснения подкласса dE(bc). Последний из подклассов dE галактик в скоплении Дева был получен разделением "бесструктурных" dE галактик на галактики с заметным звездным ядром и без него. Однако, поскольку Abell 496 находится на значительно большем расстоянии, чем скопление Дева, идентификация звездных ядер оказывается существенно осложнена для тех же значений размера и яркости ядер. Из нерезкого маскирования изображений мы можем лишь выделить галактики с сильными градиентами яркости во внутренних частях; 9 dE галактик ($M_B > -18.0 \text{ mag}$) показывают яркие компактные компоненты в их центрах, ни в одной из них не видно голубого ядра. В сравнении с исследованиями скопления Дева, ожидаемое количество упущенных объектов с ядрами может быть значительно больше, поскольку мы не можем быть уверены, что ядра небольшого размера не потеряются из-за размывания галактик атмосферным качеством изображения. В следующем подразделе мы обсудим результаты, полученные из спектральных данных, в терминах возраста звездного населения центральных частей галактик; будет предложена другая подклассификация для исследования сценариев их формирования и эволюции.

На Рис. 2.13 представлена обновленная версия Рис. 9а, виз работы Graham & Guzmán (2003): связь абсолютной величины в фильтре B эффективного радиуса $\langle \mu \rangle_e$; на диаграммы нанесены параметры объектов из спектральной выборки галактик в скоплении Abell 496. Рисунок содержит только данные для эллиптических галактик и балджей спиральных и линзовидных галактик (где балдж-диск декомпозиция была проведена в оригинальных работах), интегральные измерения для дисковых галактик были исключены. Данные для dE и E галактик из работ Binggeli & Jerjen (1998); Caon et al. (1993); D'Onofrio et al. (1994); Faber et al. (1997); Graham & Guzmán (2003); Stiavelli et al. (2001) и алгоритмы для их приведения к единой системе (гомогенизация) были любезно предоставлены A. Graham. Мы также включили: фотометрические параметры E и dE/dS0 из Virgo Cluster ACS Survey (Ferrarese et al., 2006), фототметрические данные для галактик ранних типов из работы Bender et al. (1992), параметры Серсик-компонента М 32 (Graham, 2002) и данные для 430 эллиптических галактик с лучевыми скоростями меньше 10000 km s⁻¹ и ярче $M_B = -18.0$ mag из базы данных HyperLeda².

Различные последовательности, формируемые диффузными карликовыми галактиками и классическими эллиптическими галактиками и балджами, хорошо видны на обеих частях Рис. 2.13. Последовательность классических эллиптических галактик начинается с ярчайших галактик в центрах скоплений с низкими средними поверхностными яркостями и заканчивается несколькими компактными эллиптическими галактиками типа М 32, имеющими высокие поверхностные яркости. В то же время, видна вторая последовательность для диффузных эллиптических галактик. Мы отмечаем, что имеются серьезные

 $^{^{2} \}rm http://leda.univ-lyon1.fr/$



Рис. 2.13: Абсолютная величина в фильтре B (верхняя панель) и эффективный радиус (нижняя панель, сродни отношению Корменди) как функция средней поверхностной яркости внутри r_e . Гигантские эллиптический галактики и галактики средней светимости, галактики со степенным законом яркости и плоским ядром (power-law и core) показаны синим, балджи дисковых галактик – красным, карликовые галактики ранних типов – черным. Мы сохраняем оригинальную классификацию по светимости (E/dE) для данных из Virgo Cluster ACS Survey и работ Caon et al. (1993); D'Onofrio et al. (1994), поэтому точки показаны двумя цветами. Объекты из Abell 496 показаны голубыми кружками с крестиками.



Рис. 2.14: Соотношение Faber–Jackson для эллиптических и балжей дисковых галактик. Объекты из скопления Abell 496 показаны голубыми кружками. Гигантские эллиптический галактики и галактики средней светимости показаны синим, балджи дисковых галактик – красным, карликовые галактики ранних типов – черным. Конец стрелки для М 32 соответствует измерению с помощью HST STIS, а красный кружок – HST FOS, который также согласуется с измерениями, выполненными с Земли.

аргументы против данной интерпретации диаграмм (например, Graham & Guzmán, 2003). Замечательно, что в большом диапазоне абсолютных величин ($-18 < M_B < -13$ mag) карликовые галактики не показывают корреляции между эффективной поверхностной яркостью и эффективным радиусом: r_{eff} всегда остается в пределах от 0.6 до 2.0 kpc (см. нижнюю панель). Некоторые объекты, ярчайшие из представителей нашей выборки, лежат в переходной области между "нормальными" и "диффузными" эллиптическими галактиками.

Кинематические свойства

Coothomehue Faber-Jackson (Faber & Jackson, 1976), отражающее связь динамической и звездной масс показано на Рис. 2.14. Мы представляем компиляцию данных дла карликовых (Geha et al., 2003; van Zee et al., 2004a; De Rijcke et al., 2005) и более ярких, в т.ч. гигантских галактик ранних типов (Bender et al., 1992).

В работе Matković & Guzmán (2005) была исследована выборка по большей части карликовых эллиптических галактик ($M_B < -18$) в скоплении Сота. Чтобы получить точные звездные величины в фильтре *В* для этих галактик, мы использовали фотометрический каталог в направлении скопления Coma³ (Adami et al., 2006) и провели его кросскорреляцию со списком галактик из работы Matković & Guzmán (2005). Значения для совпавших 66 объектов также приведены на Рис. 2.14.

 $^{^{3}}$ http://cencosw.oamp.fr/

Некоторые объекты из нашей выборки в диапазоне светимостей от $M_B = -17$ до -19 mag оказываются ниже последовательности эллиптических галактик. Обычно это линзовидные галактики с крупными дисками, поэтому их наблюдаемые дисперсии скоростей оказываются ниже (например, ACO496J043306.97-131238.8 (G-01)).

Мы также замечаем популяцию галактик с более высокими дисперсиями скоростей, чем ожидается для из светимостей. Большинство из них находятся во внутренних 80 kpc в проекции от центра скопления и имеют также весьма необычные характеристики звездных населений. Происхождение и эволюция этих галактик будет подробно рассмотрена ниже.

Мы видим, что значительное число объектов из нашей выборки имеют дисперсии скоростей систематически ниже значений, опубликованных для dE галактик в литературе. Поскольку большинство из процитированных исследований (кроме работ Geha et al. (2002, 2003) были выполнены с использованием спектроскопии гораздо меньшего разрешения, чем FLAMES/Giraffe, мы не можем исключать возможности систематических ошибок значений дисперсий скоростей, приведенных в литературе для объектов с низкими σ из-за различных эффектов, в том числе несовпадения спектров галактик с опорными спектрами и вырождения σ -металличность (см. Главу 1).

Свойства звездных населений

Наш метод аппроксимации спектров (как было показано в Главе 1) практически не чувствителен к присутствию линии $H\beta$ в спектральном диапазоне: хотя оценки возраста становятся менее точными, они остаются несмещенными.

Для аппроксимации спектров мы используем модели PEGASE.HR, основанные на звездных спектрах из библиотеки ELODIE.3, включающей только звезды из солнечных окрестностей. Известно, что для этих звезд значение [Mg/Fe] коррелирует с металличностью (см. Wheeler et al. (1989) и ссылки в ней). Поэтому, аппроксимация спектров галактик с положительными [Mg/Fe] для металличностей выше –1.0 dex приводит к несовпадению модели и реальных данных, что может вызвать смещение оценок параметров звездных населений. Для оценки возможных последствий данного подхода и детального изучения этих эффектов, нами был произведен анализ выборки спектров галактик из обзора SDSS DR6 (Adelman-McCarthy et al., 2008) (см. Главу 1).

Для расчета отношений [Mg/Fe] в объектах в скоплении Abell 496 мы использовали модели для Ликских индексов магния и железа (Thomas et al., 2003). Для расчета ликских индексов мы ухудшали спектральное разрешение наших данных до уровня, соответствующего моделям Ликских индексов (Worthey et al., 1994; Thomas et al., 2003), путем свертки спектров с гауссианой, имеющей ширину, соответствующей квадратичной разнице спектрального разрешения Ликской системы (σ_{Lick}), аппаратной функции спектрографа (σ_{inst}) и дисперсии скоростей в галактике (σ_g): $\sigma_{degr} = \sqrt{\sigma_{Lick}^2 - \sigma_{FL}^2 - \sigma_g^2}$. Для объектов с высокими дисперсиями скоростей также следует применять коррекцию получаемых значений в случае, если уширение линий внутренней дисперсией скоростей превышает значения σ_{Lick} . Однако, поскольку все объекты нашей выборки имеют относительно небольшие дисперсии скоростей, применение данной поправки не требуется. Подобный способ расчета Ликских индексов применялся в работе Kuntschner et al. (2006). Спектральный диапазон FLAMES/Giraffe в режиме LR04 и гелиоцентрическое красное смещение скопления Abell 496 позволяют вычисление следующих ликских индексов: Fe₅₀₁₅, Mgb, Fe₅₂₇₀, Fe₅₃₃₅ и Fe₅₄₀₆. Ошибки в определении Ликских индексов рассчитывались согласно работе Cardiel et al. (1998).

Существует три основных источника систематических ошибок при измерении Ликских индексов: (1) ошибки при редукции данных, вызывающие аддитивные систематические ошибки потоков, такие как проблемы с вычитанием рассеянного света или фона неба; (2) разница в спектральном разрешении между наблюдениями и системой Lick/IDS; (3) ошибки определения лучевых скоростей.

Вычитание рассеянного света для данных FLAMES/Giraffe сделано довольно точно, благодаря достаточно неплотному расположению световодов в режиме MEDUSA на плоскости CCD, поэтому данный эффект не может приводить к серьезным систематическим ошибкам. Мы наблюдали фон неба одновременно с объектами, поэтому достаточно просто оценить качество вычитания неба путем сравнения индивидуальных спектров неба, полученных в различных световодах. Мы не нашли никакой систематической разницы, поэтому можем заключить, что процедура вычитания неба достаточно надежна.

Лучевые скорости и дисперсии скоростей объектов в Abell 496 измеряются с высокой точностью, в частности, благодаря тому, что спектрограф FLAMES/Giraffe имеет фактически бесконечное спектральное разрешение в терминах квадратичных разностей по сравнению с системой Lick/IDS.

Также мы отмечаем, что в данном исследовании мы анализируем Ликские индексы для спектров FLAMES/Giraffe и SDSS с использованием моделей из работы Thomas et al. (2003), а не оригинальных моделей из работы Worthey (1994). Поэтому, перевод наших измерений Ликских индексов в систему Lick/IDS не требуется. Более того, эмпирическим способом его провести невозможно, поскольку звезды из Ликского списка не наблюдались. Измерения Ликских индексов для галактик из скопления Abell 496 приведены в Taб. 2.9.

В ряде работ (Gallazzi et al., 2006; Smith et al., 2006; Yamada et al., 2006; Carretero et al., 2007) исследовались корреляции между силами абсорбционных линий в галактиках и дисперсиями скоростей. Большинство из этих работ основано на данных, полученных с мульти-объектными спектрографами с фиксированным размером апертуры (как и наша работа). Хотя подобная методика позволяет получать спектры многих объектов одновременно, она страдает от ряда недостатков при изучении звездных населений. Галактики ранних типов (карликовые и гигантские) и балджи спиральных галактик обычно имеют довольно сильные градиенты металличности (см. например, работу Sánchez-Blázquez et al., 2006b) а также химически и эволюционно выделенные ядра (Sil'chenko, 2006; Chilingarian et al., 2007e; Peletier et al., 2007). Молодые и/или высокометалличные звездные населения в ядрах не будут оказывать серьезного влияния на апертурные измерения параметров звездного населения для галактик на расстояниях свыше 100 Мрс, поскольку их пространственные размеры малы, а вклад в общее излучение внутри 1.5-arcsec апертуры пренебрежим. В то же время, градиенты металличности могут довольно сильно влиять на измерения.

Если анализируются члены данного скопления галактик, то формы градиентов будет зависеть от их эффективных радиусов, которые, в свою очередь, довольно сильно связаны со светимостями. В то же время, поскольку светимости галактик ранних типов коррелируют с центральным дисперсиями скоростей (Faber & Jackson, 1976), для объектов с низкими σ те же апертуры в среднем будут содержать большие части галактик, что будет приводить к недооценке центральной или эффективной металличностей. Это может вызвать резкий излом в зависимости Mgb- σ , особенно для слабых объектов (делая его круче). С другой стороны, дисперсии скоростей также зависят от радиуса; однако, для галактик низкой светимости профили σ оказываются практически плоскими (Simien & Prugniel, 2002; Geha et al., 2002, 2003; van Zee et al., 2004a). Поэтому, хотя апертурные эффекты могут быть не столь важны для гигантских галактик (Gallazzi et al., 2006) из-за того, что градиенты σ и [Fe/H] будут компенсировать друг друга, они могут быть очень существены для карликовых галактик и систем средней светимости.

Когда множество скоплений галактик на различных расстояниях наблюдаются с одним инструментом (Gallazzi et al., 2006; Smith et al., 2006), апертурные эффекты будут увеличивать разброс сил абсорбционных линий на данной дисперсии скоростей.

На Рис. 2.15 предсталены измерения индексов Mgb и $\langle {\rm Fe} \rangle = 0.72 \; {\rm Fe}_{5270} + 0.28 \; {\rm Fe}_{5335}$ как функции дисперсии скоростей. Мы также приводим измерения для ~700 галактик ранних типов старше 3 Gyr с красными смещениями z < 0.033 из обзора SDSS. Мы используем измерения Ликских, представленные в данных SDSS. Сплошная линия на диаграмме $Mgb-\sigma$ соответствует наилучшей аппроксимации данных из обзора National Optical Astronomical Observatory (NOAO) Fundamental Plane Survey (NFPS, Smith et al., 2006). Измерения для выборки галактик ранних типов из работ Sánchez-Blázquez et al. (2006c,a,b), любезно предоставленные P. Sánchez-Blázquez в электронном формате, показаны оранжевыми символами. Между всеми показанными наборами данных, а также галактиками из Abell 496 наблюдается весьма хорошее согласие. Наши объекты оказываются немного богаче магнием, в отличие от SDSS. В нашем случае галактики наблюдались в основном вблизи центра Abell 496, в то время как для выборки NFPS объекты также выбирались на перифериях скопления, а в SDSS присутствуют также спектры галактик в группах и галактик поля (поскольку мы не применяли никаких критериев отбора по окружению). В работе Smith et al. (2006) (см. также Sil'chenko (2006) в применении к линзовидным галактикам) было показано, что галактики в центрах скоплениий имеют тенденцию быть более высоко-металличными, чем во внешних частях скоплений при тех же светимостях, что объясняет наблюдаемый эффект.

Мы отмечаем 4 галактики в скоплении Abell 496 с высокими σ , сильно отстоящими от зависимости из работы Smith et al. (2006). Эти объектв (ACO496J043333.17-131712.6 (G-17); ACO496J043337.35-131520.2 (G-20); ACO496J043338.22-131500.7 (G-21); ACO496J043341.69-131551.8 (G-24)) находятся в самой внутренней части скопления и повидимому испытали приливное обдирание (см. Дискуссию в данном разделе).

Зависимость $\langle Fe \rangle$ versus Mgb показана на Рис. 2.16. Размеры символов отвечают значениям дисперсий скоростей галактик. Также показаны данные для галактик из работ Sánchez-Blázquez et al. (2006с,a,b). Модели из работы Thomas et al. (2003) для значений -0.3 < [Mg/Fe] < +0.5 dex показаны крестиками, каждая последовательность включает модели одинаковой металличности для возрастов от 3 до 15 Gyr (слева-снизу вправоверх). Практически все объекты с низкими дисперсиями скоростей имеют солнечные отношения [Mg/Fe] (данные модели показаны голубым). Объекты в высокими σ имеют [Mg/Fe]>0.2 dex и в целом имеют тенденцию к высоким металличностям.

В Главе 1 мы показали, что несолнечные отношения [Mg/Fe] не приводят к систематическим ошибкам ни в определении возрастов, ни металличностей при использовании NBURSTS в диапазоне длин волн FLAMES/Giraffe-LR04. Однако, наши измерения подвержены хорошо известному эффекту вырождения возраста и металличности (см., например,



Рис. 2.15: Зависимости Mgb - σ_0 (сверху) и $\langle Fe \rangle$ - σ_0 (снизу). Показаны только измерения, где $\Delta(Mgb) < 0.5$ Å. Голубые точки показывают галактики старше 3 Gyr из обзора SDSS. Черная сплошная линия – корреляция между Mgb и σ_0 из работы Smith et al. (2006).



Рис. 2.16: Индексы $\langle Fe \rangle$ vs Mgb с размерами символов, соответствующими центральным дисперсиям скоростей галактик выборки. Показаны сетки моделей из работы Thomas et al. (2003) для разных значений [α /Fe]. Показаны только данные, где Δ (Mgb) < 0.5 Å.

Worthey, 1994), которое выражается как $\Delta t/\Delta Z \approx 3/2$ ог $\Delta(\log_{10} t)/\Delta Z \approx 2/3$. Поэтому ошибки измерения возрастов и металличностей оказываются скореллированными. При этом форма эллипсов контуров значимости в пространстве возраст–металличность четко соответствует данному вырождению параметров.

На Рис. 2.17 мы сравниваем измерения возрастов (t) и металличностей как функции дисперсии скоростей для галактик скопления Abell 496 с выборкой объектов SDSS и галактиками ранних типов из работы Sánchez-Blázquez et al. (2006с). Мы использовали значения Ликских индексов, опубликованные в работе Sánchez-Blázquez et al. (2006с) и инвертировали сетку моделей H β vs (MgFe) для определения значений параметров звездных населений. Верхняя панель представляет зависимость t от σ . Объекты из скопления Abell 496 систематически старше, чем объекты из выборок SDSS, а разброс возрастов оказывается выше. Однако, мы отмечаем: (а) отсутствие молодых галактик с большими дисперсиями скоростей; (b) факт, что мелкие галактики (с низкими дисперсиями скоростей) оказываются моложе, чем крупные; (с) разброс возрастов увеличивается для маломассивных объектов. Два возможных объяснения отличия возрастов галактик скопления Abell 496 от галактик из обзора SDSS – эффекты окружения и способ построения выборки. Мы выбирали галактики SDSS с ограничением по минимальному отношению сигнал-шум, поэтому карликовые галактики практически автоматически исключались. С другой стороны, мы подтверждаем из нашей выборки (которая включает объекты в центральной части массивного скопления), что галактики средней светимости имеют тенденцию к старым возрастам в плотном окружении, поскольку мы видим очень мало объектов младше 10 Gyr с $\sigma > 60$ km s⁻¹.

Зависимость [Fe/H] versus σ (средняя панель Рис. 2.17) демонстрирует намного более сильную корреляция, чем age vs σ . Галактики Abell 496 окаызваются практически на продолжении последовательности галактик SDSS в область низких дисперсий скоростей, хотя есть несколько сравнительно слабых галактик Abell 496 с высокими металличностями. Нижняя панель на Рис. 2.17 показывает комбинацию возраста и металличности, такую что вырождение возраст-металличность оказывается "с ребра": 0.4 log₁₀ t + 0.6Z. Корреляция становится еще сильнее, чем Z- σ , и положения объектов из Abell 496 и SDSS лежат на одной линии. Разброс измерений (стандартное отклонений) для данного значения дисперсии скоростей остается менее 0.1 dex. Несколько объектов отстоят от зависимости: две галактики с высокими значениями σ , расположенные в самом центре скопления (A496cE и A496g1 в обозначениях из Главы 3), и три карликовые галактики (ACO496J043324.61-131111.9 (G-08), ACO496J043339.07-131319.7 (G-22) и ACO496J043355.55-131024.9 (G-37)). Величина 0.4 log₁₀ t + 0.6Z, является индикатором средней силы абсорбционных линий в спектре.

Семь галактик из нашей выборки показывают относительно молодые звездные населения (t < 3 Gyr): ACO496J043321.37-130416.6 (G-07), ACO496J043325.54-130408.0 (G-12),ACO496J043334.54-131137.1 (G-19), ACO496J043350.17-125945.4 ACO496J043351.54-131135.5 (G-35), ACO496J043356.18-125913.1 (G-38) (G-34),И АСО496Ј043415.37-130823.5 (G-46). Три из них: АСО496Ј043321.37-130416.6 (G-07), АСО496J043356.18-125913.1 (G-38) и АСО496J043415.37-130823.5 (G-46), имеют узкие эмиссионные линии [OIII] в спектрах без каких-либо следов линии [NI] (λ =5199Å) по крайней мере в двух из них, что указывает на процесс текущего звездообразования, а не на возбуждение ударной волной. Первые две галактики из списка выше, а также АСО496Ј043351.54-131135.5 (G-35) показывают наличие центральных неразрешаемых



Рис. 2.17: Соотношение между центральной дисперсией скоростей и параметрами звездного населения: SSP-эквивалентным возрастом (сверху), металличностью (в середине) и их комбинацией, свободной от эффектов вырождения (внизу). Отмечено присутствие вложенных структур в галактиках. Показаны измерения для галактик из работ Sánchez-Blázquez et al. (2006с, a) и измерения для 848 галактик из обзора SDSS. Цветовые обозначения такие же, как на Рис. 2.15.

голубых областей на картах цвета. Это может расцениваться как аргумент в пользу присутствия молодых звезд и/или текущего звездообразования только в центрах этих галактик. Все 7 галактик расположены довольно далеко в проекции от центра Abell 496 (расстояния порядка 150 – 200 kpc для ACO496J043334.54-131137.1 (G-19) и ACO496J043351.54-131135.5 (G-35) и > 450 kpc для остальных 5 объектов).

Значительная доля галактик (13 of 46) имеют красные пространственно неразрешенные ядра на картах цвета. Звездные населения этих объектов, определенные методом NBURSTS оказываются достаточно старыми и высокометалличными, ни в одном из спектров мы не видим эмиссионных линий. В некоторых случаях (ACO496J043320.35-ACO496J043331.48-131654.6 (G-15);130314.9(G-06);ACO496J043333.53-131852.6 ACO496J043342.10-131653.7 (G-25); ACO496J043346.71-131756.2 (G-31) (G-18); И ACO496J043401.57-131359.7 (G-40)) красные ядра представляют собой центральные части протяженных структур, напоминающих бары, хорошо заметных на картах цвета, которые оказываются краснее, чем окружающие их части галактик. Однако, в большинстве из оставшихся случаев, только ядра имеют необычные цвета, в то время как основные диски/сфероиды имеют более менее однородное распределение цвета. В случае ACO496J043306.97-131238.8 (G-01), дисковой галактики, видимой с ребра, поглощение пылью отвечает за красный цвет центральной области.

Пытаясь связать присутствие вложенных структур (диски, спиральные ветви, бары) со звездными населениями, мы отмечаем, что большинство галактик со вложенными струткруми имеют возрасты от 4 до 10 Gyr (только ACO496J043346.71-131756.2 (G-31) и ACO496J043403.19-131310.6 (G-41) с баром и слабыми спиральными ветвями около 14 Gyr, но их абсолютные величины превосходят —18 mag; а ACO496J043321.37-130416.6 (G-07) – молодая галактика со вспышкой звездообразования) и все они имеют детали, заметные на картах цвета. Ни один объект с вложенными структурами не находится в центральной части скопления ($d_{proj} < 60$ kpc), где возраста всех 5 галактик оказываются выше 12 Gyr.

На Рис. 2.18 представлены возраста и отношения α /Fe как функция расстояния в проекции от центра скопления. В переходной области ($60 < d_{proj} < 230$ kpc), возрасты самых молодых объектов возрастают по мере приближения к центру, как видно на Рис. 2.18. Половина всех галактик с вложенными структурами расположена в этой области, но некоторые их них могут находиться реально на значительно больших расстояниях от центра скопления. На нижней панели Рис. 2.18 отношения α /Fe в этой переходной зоне не настолько велики, как в центральной части скопления и его разброс практически такой же, как для галактик на больших расстояниях в проекции.

В работе Lisker et al. (2007), посвященной исследованию карликовых галактик ранних типов в скоплении Дева, авторы не приводят параметров звездного населения для трех подклассов dE, являющихся результатом трансформации популяций галактик, падающих на скопление. Однако если мы возьмем 8 dE из Abell 496, соответствующие их классу dE(di) и пять объектов с молодыми центральными звездными населениями, эта подвыборка показывает те же свойства распределений скоростей и галактик в пространстве, что и два наименее прорелаксировавших подкласса dE из работы Lisker et al. (2007). Разброс скоростей в этой подвыборке из 13 dE галактик в Abell 496 больше, чем для оставшихся 24, включая два объекта, для которых параметры звездного населения не могли быть определены из-за слишком низких отношений сигнал-шум в спектрах. Если мы посмотрим на их пространственное распределение, то мы можем предположить, что вероятно этот



Рис. 2.18: Возраст и отношения [Mg/Fe] для галактик как функция их расстояния от центра скопления в проекции. На нижней панели показаны только галактики с качеством измерения [Mg/Fe] лучше 0.1 dex. Оставшиеся галактики на верхней панели отмечены синим цветом.

подкласс не является полностью срелаксировавшим населением в скоплении. Наблюдается четкая разница в возрастах звездных населений, поскольку из 22 dE без вложенных структур только 6 галактик имеют возрасты от 3 до 9 Gyr, оставшиеся – старше.

Яркую часть нашей выборки можно сравнить с другими исследованиями звездных населений в галактиках ранних типов. В работах Poggianti et al. (2001) представлены взвешенные по светимости возрасты и металличности для нескольких десятков галактик ранних типов в скоплении Coma. Из их Рис. 2 следует, что для $M_B > -19.0$ возрасты старых галактик антикоррелируют со светимостью. В нашей выборке полностью отсутствуют яркие галактики с молодыми звездными населениями. Возможно это связано с выборкой объектов в нашем случае: (1) мы избегали объектов с известными лучевыми скоростями из литературы; (2) молодые галактики имеют высокие поверхностные яркости и, соответственно, более высокий шанс наблюдаться в прошлом в рамках обзоров красных смещений с пределом по звездной величине в апертуре, и таким образом оказываются исключенными из нашей выборки.

В работе Sánchez et al. (2007) были получены параметры кинематики и звездных населений для галактик в ядре скопления Abell 2218 с использованием 3D-спектроскопии. Поведение возрастов галактик схоже с объектами в Abell 496 – для маломассивных галактик есть тенденция к более молодым звездным населениям и увеличению разброса возрастов.

2.3.3 Обсуждение

О происхождении dE/dS0 галактик

Здесь мы обсуждаем, что мы можем узнать о происхождении и эволюции dE/dS0 галактик в Abell 496 из их свойств звездных населений. Во-первых, как объяснить разброс возрастов и металличностей для наших галактик? Связан ли разброс с разницами во времени, требующемся галактикам, чтобы влететь в скопление и дойти до его центральной части? Галактики меньших масс более чувствительны как в внутренним, так и к внешним процессам. Поэтому сценарий формирования "in situ", способный воспроизвести различные временные шкалы для звездообразования, может работать так же хорошо, как сценарий аккреции. Какой из сценариев в состоянии объяснить звездообразование в центральных частях некоторых галактик? Звездообразование в первую очередь связано с содержанием газа, и поскольку газ быстро устраняется из галактики, звездообразование можно очень быстро остановить. С другой стороны, выпадение газа на центр галактики будет индуцировать звездообразование в ядерной области. Этот сценарий должен также объяснять наблюдаемые значения отношения [Mg/Fe] и их связь с дисперсией скоростей.

Для dE галактик обычно рассматриваются три возможных сценария по выметанию газа: (1) ветра, вызываемые сверхновыми на ранних этапах эволюции (Dekel & Silk, 1986); (2) выметание лобовым давлением межгалактического газа (Gunn & Gott, 1972; Abadi et al., 1999); (3) гравитационные взаимодействия с соседями ("harassment", Moore et al., 1998). Первый сценарий обычно называют "внутренним", а два оставшихся – "внешними" агентами формирования и эволюции dE галактик.

Идея галактических ветров основана на предположении, что гравитационное поле карликовой галактики недостаточно сильно, чтобы удержать междзвездную среду от выметания вспышками сверхновых типа SN II в процессе первого интенсивного эпизода звездообразования.

Существует несколько различных моделей галактических ветров (см. детальный обзор в De Rijcke et al., 2005). Простые модели, обсуждаемые в Yoshii & Arimoto (1987) приводят к быстрой потери газа и прекращению эпизода звездообразования в короткое время (10⁷ лет). Затем, дальнейшие вспышки SNIa на временах порядка Gyr не будут вносить вклад в обогащение звездных населений железом (Matteucci, 1994). Таким образом, короткий эпизод звездообразования приведет к переобогащению α -элементами ([α /Fe] > 0). Это явление наблюдается в шаровых скоплениях и обычно также в гигантских галактиках ранних типов (Kuntschner et al., 2006; Sil'chenko, 2006). Если бы газ устранялся из dE галактик галактическими ветрами, мы бы ожидали увидеть [Mg/Fe]>0 dex, и это отношение должно было бы антикоррелировать с динамической массой галактик (σ). Это не согласуется в тем, что мы видим в наших данных.

В другой работе (Chiosi & Carraro, 2002), в противоположность работе Yoshii & Arimoto (1987), предсказываются длинные и осциллирующие истории звездообразования в карликовых галактиках: взрывы сверхновых рассеивают газ, останавливая звездообразование, затем он остывает, падает обратно и начинается следующая вспышка звездообразования. В этом случае отношения [Mg/Fe] уменьшаются до ~0 dex, а корреляция между динамической массой и металличностью может быть объяснена более низкой эффективностью звездообразования в галактиках малых масс из-за более эффективного отклика на сверхновые. Однако, в рамках этого сценария не должны наблюдаться старые карликовые эллиптические галактики, поскольку звезды, формируемые в поздних эпизодах звездообразования, будут доминировать в излучении по сравнению с более старым населением. Поэтому, всетаки требуется механизм для выметания остатков газа из карликовых галактик на ранней стадии их жизни.

В случае Abell 496, [Mg/Fe]≈0 dex почти для всех маломассивных объектов (σ_0 <60 km/s), означая, что периоды звездообразования должны были продолжаться минимум 1−2 Gyr, что является минимальным временем, необходимым для обогащения железом (Matteucci, 1994). Поэтому мы не можем рассматривать сценарий устранения газа вспышками сверхновых как единственный, хотя он и позволяет объяснить наблюдаемую корреляцию массы и металличности.

Лобовое давление, действующее на карликовые галактики поздних типов (dIrr) или карликовые спиральные галактики кажется допустимым способом выметания газа из прародителей dE. Если мы предположим, что dIrr/dS формируются за пределами центральной части скопления и затем падают на нее, у них остается достаточное время для обогащения населения железом, поскольку типичное время падения на скопления составляет несколько Gyr. Если выметание лобовым давлением играет основную роль в устранении газа, то будет ожидаться больший разброс возрастов для более маломассивных объектов, которые могут быть ободраны во время первого же прохода через скопление, в то время как обдирание может произойти в любой момент в жизни галактики. Из-за малого объема нашей выборки мы не можем дать однозначный ответ на вопрос, является ли наблюдаемый разброс возрастов на Рис. 2.17 результатом лобового давления, действующего на галактики поздних типов, либо только связан с низким качеством данных (включая вырождение возраст–металличность).

В работе Smith et al. (2007) указано, что существует "конспирация" параметров звездного населения в том смысле, что на плоскости $Z - \log t$ для данной дисперсии скоростей



Рис. 2.19: Уровни значимости 1- σ для определения возрастов и металличностей галактик из скопления Abell 496 Объекты в трех диапазонах дисперсий скоростей показаны разными цветами: красным для $\sigma < 30$ km s⁻¹, синим для $30 < \sigma < 60$ km s⁻¹ и черным для $\sigma > 60$ km s⁻¹.

значения выстраиваются вдоль линии вырождения возраст–металличность. На Рис. 2.19 мы показываем связь возраста и металличности в различных интервалах дисперсий скоростей, выбранных в работе Smith et al. (2007) для выборки слабых красных галактик, расположенных в сверхскоплении Shapley. Мы выбираем два интервала, соответствующие их работе, а также показываем галактики, где $\sigma < 30$ km s⁻¹ (отсутствуют в обзоре Smith et al., 2007). В двух общих интервалах в этом исследовании работе Smith et al. (2007) мы подтверждаем существование антикорреляции возраста и металличности для фиксированной дисперсии скоростей. Разброс возраста на связан с вырождением возраст–металличность, поскольку ошибки измерения параметров отвечают менее, чем за четверть от наблюдаемых ошибок для объектов с $\sigma > 30$ km s⁻¹. Для меньших дисперсий скоростей разброс в металличности явно не из-за вырождения, и простая модель SSP не может применяться, если звездообразование продолжается в течение длительного времени с небольшим темпом. Отмечаем также особое расположение четырех галактик с высокими значениями σ , высокими металличностями и старыми возрастами.

Присутствие выделенных по цвету ядер в достаточном количестве dE/dS0 из нашей выборки можно соотнести с молодыми ядрами в dE галактиках, которые надавно были открыты в трех dE галактиках в скоплении Дева (Chilingarian et al., 2007e) и в S0-галактике низкой светимости в группе (Chilingarian et al., 2008b). В этих работах предполагается сценарий выметания газа лобовым давлением, как способа избавить галактику от межзвездной среды во внешних частях, а в то же время, сжать газ и вызвать звездообразование в плотной центральной области. В зависимости от времени и продолжительности этого явления, цвет ядра может быть как голубым (если звездообразоение до сих пор идет либо закончилось недавно), так и красным (если звездообразование давно закончилось, так что лишь металличность говорит о нем). Хотя количественное моделирование этого явления довольно сложно и требует массовых численных экспериментов, качественно мы можем рассматривать присутствие ядер различных цветов в нашей выборке dE галактик как аргумент в пользу сценария лобового давления.

Присутствие слабых вложенных дисках в некоторых галактиках – еще один сильный аргумент в пользу эволюционной связи между карликовыми галактиками ранних и поздних типов. Этот результат согласуется с N-body моделированием морфологической эволюции галактик поздних типов в скоплениях (Mastropietro et al., 2005), которое показывает, что диски никогда полностью не разрушаются. Эта идея поддерживается тем фактом, что вложенные структуры наблюдаются только в ярких dE галактиках, которые оказываются более устоячивыми к подобным приливным взаимодействиям.

Из корреляций между параметрами для галактик ранних типов в обзоре SDSS, работе Clemens et al. (2006) было показано, что металличность растет монотонно с увеличением σ , что было объяснено сборкой звездной массы, регулируемой массой гало. Мы подтверждаем этот тренд, что также отмечается в других работах, но мы отмечаем, что окружение играет важнейшую роль в процессах остановки звездообразования в карликовых эллиптических галактиках и морфологической трансформации, что наблюдается в близких скоплениях (см. например Michielsen et al., 2008).

Наш основной вывод – то, что dE галактики имеют прародителей поздних типов и формируются во внешних частях скопления, испытывая приливные взаимодействия с потенциалом скопления и другими его членами, а также эффекты лобового давления при пересечении центральных частей скопления.

Галактики в плотном окружении

Пять галактик в нашей выборке объектов в Abell 496 лежат над последовательностью Faber–Jackson (Рис. 2.14). Четыре из них (АСО496Ј043333.17-131712.6 (G-17); ACO496J043341.69-131551.8 (G-24); ACO496J043337.35-131520.2 (G-20); ACO496J043338.22-131500.7 (G-21)) находятся во внутренних 100 kpc от cD галактики в проекции, в то время как пятая (ACO496J043401.57-131359.7 (G-40)) расположена на расстоянии 240 kpc. Все пять объектов имеют ряд схожих характеристик: (1) старые звездные населения (>12 Gyr); (2) очень высокие индексы Mg (Mgb > 4.2 Å) и отношения [Mg/Fe] (0.18 < [Mg/Fe] < 0.45 dex); (3) высокие поверхностные яркости и структурные свойства, помещающие их на продолжение последовательностей нормальных эллиптических галактик и балджей дисковых галактик (Рис. 2.13). Эти объекты все имеют эллиптическую морфологию, красные ядра высокой поверхностной яркости и отсутствие вложенных структур. Четыре из них существенно выше последовательности $Mgb - \sigma$ из работы Smith et al. (2006), в то время как пятая (ACO496J043401.57-131359.7 (G-40)) лежит точно на ней. Последний объект – как раз тот, что находится на расстоянии 240 kpc от cD галактики и единственный, имеющий удлинненную форму, поэтому его свойства не столь экстремальны, как свояства оставшихся четырех галактик.

Как очевидно из Рис. 2.18, мы видим полное избегание центральной области скопления молодыми галактиками. Скопление Abell 496 – динамически срелаксировавшее, что объясняет этот эффект – все галактики, которые мы наблюдаем в центре скопления, были захвачены в эту область очень давно.

Мы переводим отношение [Mg/Fe] в продолжительность вспышки звезообразования, используя модели из работы Thomas et al. (2005). Согласно их формуле 4, [Mg/Fe]=0.45 dex соответствует 30 Муг, а [Mg/Fe]=0.3 dex – 250 Муг. Четыре описанных выше объекта имеют высокие обилия Mg для их дисперсий скоростей (которые уже слишком высоки для их светимостей), но сравнительно нормальные обилия железа и средние металличности. Это указывает на то, что когда магний был произведен в этих объектах, они были массивней, чем сейчас, а эффекты окружения сыграли роль до момента производства и обогащения железом, т.е. в течение первого 1 Gyr их эволюции. Поскольку они находятся очень близко к cD, подобные свойства могут быть объяснены приливным обдиранием в процессе их падения на центр скопления. Самый экстремальный случай представляет собой галактика ACO496J043337.35-131520.2 (G-20), которая могла потерять до 90% своей звездной массы (см. Главу 3). Прародители оставшихся трех галактик также испытали потерю звездной массы, хоть и не такую сильную. Если мы объединим всю информацию, полученную из возрастов и металличностей, а также кинематики, мы получим, что светимости прародителей были от $M_B \approx -19$ mag для сЕ (G-20) до $M_B \approx -21$ mag для ACO496J043341.69-131551.8 (G-24). Подобный процесс в применении к карликовым галактикам ранних типов (dE/dS0 с ядрами) может приводить к формированию ультракомпактных карликовых (Bekki et al., 2003) или переходных UCD/cE объектах, таких, как найденный в работе Chilingarian & Mamon (2008). Другая необычная галактика в центре скопления (54 kpc от cD в проекции), АСО496Ј043332.07-131518.1 (G-16), имеет экстремальное значение [Mg/Fe] (+0.28 dex) для своей дисперсии скоростей (79 \pm 1 km s⁻¹) и светимости ($M_B = -17.91 \text{ mag}$). Принимая во внимание ее старый возраст (14 Gyr), она

Таким образом, объекты близкие к центру скопления подвержены сильному влиянию плотного окружения. Мы можем сделать грубую оценку общей динамической массы в центрально части скопления Abell 496, взяв лучевую скорость ACO496J043333.53-131852.6 (G-18) и предположив, что она находится на круговой орбите, наблюдаемой перпендикулярно лучу зрения, с радиусом ≈130 kpc. Это приводит к значению массы $M \approx \Delta v^2 r_{proj}/2G = 4 \cdot 10^{13} M_{\odot}$, что согласуется с оценкой полной массы из анализа рентгеновских данных ~ $3 \cdot 10^{13} M_{\odot}$ внутри 150 kpc (T. F. Lagana в работе).

скорее всего имеет сценарий происхождения, похожий на 4 вышеупомянутые галактики.

2.3.4 Выводы

Мы провели анализ спектральных и фотометрических данных для уникальной выборки карликовых галактик ранних типов вплоть до объектов малых масс с дисперсиями скоростей $\sigma \sim 20$ km s⁻¹.

Хотя карликовые эллиптические и линзовидные галактики с экспоненциальными профилями яркости структурно отличаются от "классических" эллиптических галактик и балджей спиральных галактик, формирующих отношение Корменди, их звездные населения следуют одному и тому же тренду, продолжая известные корреляции для сил абсорбционных линий, металличности и возраста как функций σ .

Галактики малых масс ($\sigma < 70$ km s⁻¹) имеют солнечные отношения элементов [Mg/Fe], свидетельствуя в пользу длительных эпизодов звездообразования (>~1.5 Gyr).

Основываясь на свойствах наблюдавшихся галактик, мы заключаем, что между карликовыми галактиками поздних и ранних типов должна быть эволюционная связь и что внешние эволюционные агенты (лобовое давление, "harassment") должны играть ключевую роль в морфологической трансформации.

Эволюция даже более массивных галактик, находящихся в центральной части скопления, определяется эффектами окружения: приливное обдирание звездных дисков потенциалом скопления – один из возможных сценариев формирования и эволюции относительно компактных и плотных эллиптических галактик, наблюдаемых только в окрестностях cD.

2.3.5 Параметры 46 галактик в скоплении Abell 496.

В этом разделе представлены таблицы с параметрами морфологии, фотометрии, кинематики и звездных населений для 46 галактик из скопления Abell 496. Еще для двух галактик, обозначенных A1 и A2 мы не проводили аппроксимацию параметров звездного населения и дисперсий скоростей из-за слишком низкого отношения сигнал-шум в данных.

Мы рассчитываем абсолютные величины в фильтре B, приведенные в Таб. 2.7, а также поверхностные яркости в Таб. 2.8 из параметров в фильтре g', используя фотометрические трансформации из работы Fukugita et al. (1995), предполагая SED эллиптической галактики для всех объектов (B - g' = 0.55 mag, R - r' = -0.25 mag), учитывая Галактическов поглощение согласно работе Schlegel et al. (1998), космологическое ослабление поверхностной яркости (0.14 mag) и k-поправку ($K'_r = 0.05 \text{ mag}, K'_g = 0.1 \text{ mag}, Fukugita et al., 1995}$), Структурные параметры: эффективные радиусы и эффективные поверхностные яркости, рассчитывались напрямую из изображений без применения декомпозиции балдж-диск либо аппроксимации профиля яркости. Полные величины в четырех фильтрах CFHT в Таб. 2.7 были исправлены только за эффекты Галактического поглощения.

Типы вложенных структур в Таб. 2.7: В – бар, D – диск, R – кольцо, S – спиральные ветви. Интенсивность вложенных структур указана как (s) для сильных и (w) для слабых.

2.4 Профили кинематики и звездных населений выборки карликовых галактик ранних типов в скоплении Дева.

Результаты, представленные в данном разделе, опубликованы в работе Chilingarian (2009а).

2.4.1 Выборка и использованные данные

В рамках этого исследования мы использовали данные наземной спектроскопии среднего разрешения, имеющие различное происхождение. Критерии отбора данных были следующие: (1) только опубликованные данные с доступными продвинутыми калибровками, такими как опорные звездные спектры или спектры сумеречного неба, либо хорошо документированный спектрограф с известным спектральным разрешением; (2) покрытие голубого или зеленого спектрального диапазона (4800Å < λ <5400Å), содержащего сильные абсорбционные детали; (3) среднее спектральное разрешение не хуже R = 1300, чтобы иметь возможность одновременно исследовать звездные населения и кинематику и бороться с вырождением дисперсии скоростей и металличности; (4) мы отдавали предпочтение данным с достаточным отношением сигнал–шум и пространственным разрешением (т.е. длиннощелевые или IFU спектры). В этом подразделе представлены коллекции данных,

Таблица 2.7: Абсолютные величины в фильтре *B*, морфологическая классификация, наличие вложенных структур и интегральные величины в 4 цветах CFHT для 48 галактик скопления Abell 496, включая 2 объекта (A1 и A2), где анализ спектров не был возможен.

Ν	IAU Name	Mр	type	emb.str.	u^*	a'	r'	i'
		mag	-J P -		mag	mag	mag	mag
01	ACO496J043306.97-131238.8	-17.72	SB0a/dS0	(s):B+S	19.09 ± 0.03	17.67 ± 0.04	17.08+0.04	16.68 ± 0.04
02	ACO496J043308.85-130235.6	-18.54	Sbc	(s):D	18.23 ± 0.02	16.85 ± 0.03	16.23 ± 0.03	15.85 ± 0.03
03	ACO496J043312.08-130449.3	-16.55	dE	-	20.12 ± 0.12	18.84 ± 0.14	18.35 ± 0.06	17.96 ± 0.07
04	ACO496J043317.75-131536.6	-16.58	dS0/dE	(\mathbf{w}) :S	19.93 ± 0.17	18.81 ± 0.06	18.28 ± 0.06	17.96 ± 0.04
05	ACO496J043318.95-131726.9	-16.99	dE	-	19.81 ± 0.05	18.40 ± 0.03	17.96 ± 0.06	17.66 ± 0.06
06	ACO496J043320.35-130314.9	-18.78	SB0	(s):B/S/R?	18.01 ± 0.02	16.61 ± 0.03	16.00 ± 0.03	15.62 ± 0.03
07	ACO496J043321.37-130416.6	-17.01	dSB0a	(s):B/S/R?	19.38 ± 0.07	$18.38 {\pm} 0.03$	17.97 ± 0.05	17.71 ± 0.04
08	ACO496J043324.61-131111.9	-15.69	dE	-	$_{21.08\pm0.08}^{$	19.70 ± 0.09	19.13 ± 0.06	18.78 ± 0.08
09	ACO496J043324.91-131342.6	-17.20	dE	-	$19.57 {\pm} 0.05$	$18.19 {\pm} 0.04$	$17.60 {\pm} 0.04$	$17.25 {\pm} 0.05$
10	ACO496J043325.10-130906.6	-15.93	dE	-	$20.66 {\pm} 0.09$	$19.46 {\pm} 0.04$	18.87 ± 0.15	$18.63 {\pm} 0.07$
11	ACO496J043325.40-131414.6	-16.66	dE	-	$20.06 {\pm} 0.04$	$18.73 {\pm} 0.07$	18.17 ± 0.04	$17.82 {\pm} 0.04$
12	ACO496J043325.54-130408.0	-16.07	dE	-	$20.60 {\pm} 0.07$	$19.32 {\pm} 0.04$	$18.90 {\pm} 0.07$	$18.62 {\pm} 0.07$
13	ACO496J043326.49-131717.8	-17.13	dS0	-	$19.63 {\pm} 0.03$	$18.26 {\pm} 0.05$	17.72 ± 0.05	$17.35 {\pm} 0.06$
14	ACO496J043329.79-130851.7	-16.49	dE	-	$20.03 {\pm} 0.05$	$18.90 {\pm} 0.07$	$18.39 {\pm} 0.06$	$18.05 {\pm} 0.04$
15	ACO496J043331.48-131654.6	-18.13	S0a	(s):S/D	$18.67 {\pm} 0.05$	$17.26 {\pm} 0.04$	$16.66 {\pm} 0.03$	$16.32 {\pm} 0.04$
16	ACO496J043332.07-131518.1	-17.76	dE/E/S0	(w):R	$19.11 {\pm} 0.03$	$17.63 {\pm} 0.05$	$16.96 {\pm} 0.04$	$16.53 {\pm} 0.03$
17	ACO496J043333.17-131712.6	-18.27	Е́́	-	$18.68 {\pm} 0.04$	$17.12 {\pm} 0.03$	$16.46 {\pm} 0.04$	$16.05 {\pm} 0.04$
18	ACO496J043333.53-131852.6	-18.17	SB0a	(s):B	$18.62 {\pm} 0.03$	$17.22 {\pm} 0.03$	$16.60 {\pm} 0.03$	$16.22 {\pm} 0.03$
19	ACO496J043334.54-131137.1	-16.04	dE	-	$20.65 {\pm} 0.15$	$19.35 {\pm} 0.13$	$18.85 {\pm} 0.04$	$18.50 {\pm} 0.07$
20	ACO496J043337.35-131520.2	-16.99	cE	-	$19.93 {\pm} 0.03$	$18.40 {\pm} 0.06$	$17.60 {\pm} 0.06$	$17.20 {\pm} 0.08$
21	ACO496J043338.22-131500.7	-17.44	dE	-	$19.67 {\pm} 0.02$	$17.95 {\pm} 0.04$	$17.26 {\pm} 0.05$	$16.81 {\pm} 0.04$
22	ACO496J043339.07-131319.7	-15.63	dE	-	21.22 ± 0.20	$19.76 {\pm} 0.10$	$19.06 {\pm} 0.10$	$18.70 {\pm} 0.11$
23	ACO496J043339.72-131424.6	-16.17	dE	-	$20.59 {\pm} 0.04$	$19.22 {\pm} 0.03$	$18.63 {\pm} 0.05$	$18.24 {\pm} 0.10$
24	ACO496J043341.69-131551.8	-18.49	Е	-	$18.54 {\pm} 0.04$	$16.90 {\pm} 0.04$	16.17 ± 0.04	$15.71 {\pm} 0.03$
25	ACO496J043342.10-131653.7	-17.65	dS0/S0	(s):D/R	$19.28 {\pm} 0.05$	$17.74 {\pm} 0.04$	17.07 ± 0.04	$16.62 {\pm} 0.04$
26	ACO496J043342.13-131258.8	-16.92	dE	-	$19.97 {\pm} 0.06$	$18.47 {\pm} 0.04$	$17.84 {\pm} 0.02$	$17.53 {\pm} 0.02$
27	ACO496J043342.83-130846.8	-17.92	$\mathrm{S0/E}$	-	$18.81 {\pm} 0.03$	$17.47 {\pm} 0.04$	$16.84 {\pm} 0.04$	$16.42 {\pm} 0.04$
28	ACO496J043343.04-130514.1	-17.41	dS0	-	$19.33 {\pm} 0.03$	$17.98 {\pm} 0.03$	$17.36 {\pm} 0.03$	$16.95 {\pm} 0.04$
29	ACO496J043343.04-125924.4	-16.34	dS0/dE	-	$20.35 {\pm} 0.14$	$19.05 {\pm} 0.07$	$18.55 {\pm} 0.04$	$18.21 {\pm} 0.27$
30	ACO496J043345.67-130542.2	-17.32	dS0	-	$19.39 {\pm} 0.06$	$18.07 {\pm} 0.06$	$17.53 {\pm} 0.03$	$17.14 {\pm} 0.06$
31	ACO496J043346.71-131756.2	-18.44	SB0	(s):S+B	$18.42 {\pm} 0.04$	$16.95 {\pm} 0.04$	$16.34 {\pm} 0.03$	$15.96 {\pm} 0.03$
32	ACO496J043348.59-130558.3	-17.09	dE	-	$19.71 {\pm} 0.06$	$18.30 {\pm} 0.04$	$17.69 {\pm} 0.03$	$17.35 {\pm} 0.07$
33	ACO496J043349.08-130520.5	-17.96	m S0a/dS0	(w):S	$18.83 {\pm} 0.02$	$17.43 {\pm} 0.03$	$16.85 {\pm} 0.04$	$16.44 {\pm} 0.04$
34	ACO496J043350.17-125945.4	-16.08	dS0	-	$20.56 {\pm} 0.11$	$19.31 {\pm} 0.09$	18.79 ± 0.10	$18.44 {\pm} 0.09$
35	ACO496J043351.54-131135.5	-16.47	dS0/dE	-	$20.17 {\pm} 0.05$	$18.92 {\pm} 0.10$	$18.43 {\pm} 0.09$	$18.23 {\pm} 0.08$
36	ACO496J043352.77-131523.8	-17.73	S0/dS0	(w):D?	$18.94 {\pm} 0.06$	$17.66 {\pm} 0.04$	$17.08 {\pm} 0.05$	$16.69 {\pm} 0.04$
37	ACO496J043355.55-131024.9	-16.12	dS0/dE	-	$20.50 {\pm} 0.13$	$19.27 {\pm} 0.07$	$18.68 {\pm} 0.07$	$18.40 {\pm} 0.06$
38	ACO496J043356.18-125913.1	-17.96	E/dE/dS0	-	$18.52 {\pm} 0.02$	$17.43 {\pm} 0.04$	$16.95 {\pm} 0.03$	$16.60 {\pm} 0.03$
39	ACO496J043359.03-130626.7	-17.50	dS0	-	$19.17 {\pm} 0.03$	$17.89 {\pm} 0.04$	$17.34 {\pm} 0.04$	$16.98 {\pm} 0.04$
40	ACO496J043401.57-131359.7	-18.34	E/S0	-	$18.44 {\pm} 0.03$	$17.05 {\pm} 0.03$	16.41 ± 0.03	$16.04 {\pm} 0.03$
41	ACO496J043403.19-131310.6	-18.75	$\mathrm{SB0/SBa}$	(s):S+B	$18.14 {\pm} 0.02$	$16.64 {\pm} 0.03$	$16.00 {\pm} 0.04$	$15.62 {\pm} 0.04$
42	ACO496J043408.50-131152.7	-16.67	dE/dS0	(w):B?/D	$19.97 {\pm} 0.05$	$18.72 {\pm} 0.12$	$18.13 {\pm} 0.10$	$17.80 {\pm} 0.14$
43	ACO496J043410.60-130756.7	-16.79	dS0	-	$19.89 {\pm} 0.05$	$18.60 {\pm} 0.07$	18.07 ± 0.03	$17.74 {\pm} 0.06$
44	ACO496J043413.00-131003.5	-18.25	$\rm E/S0$	-	$18.61 {\pm} 0.02$	$17.14 {\pm} 0.03$	$16.54 {\pm} 0.03$	$16.12 {\pm} 0.03$
45	ACO496J043413.08-131231.6	-16.60	dE	-	$20.14 {\pm} 0.09$	$18.79 {\pm} 0.03$	$18.24 {\pm} 0.09$	$17.91 {\pm} 0.10$
46	ACO496J043415.37-130823.5	-17.46	dIm	-	$18.49 {\pm} 0.03$	$17.93 {\pm} 0.05$	$17.81 {\pm} 0.06$	17.67 ± 0.06
A1	ACO496J043411.72-131130.2	-15.07	dE	-	21.53 ± 0.09	20.32 ± 0.09	$19.78 {\pm} 0.08$	$19.47 {\pm} 0.08$
A2	ACO496J043414.54-131303.0	-15.50	dE	-	$20.87 {\pm} 0.19$	$19.89 {\pm} 0.11$	19.32 ± 0.17	$19.00 {\pm} 0.17$
Таблица 2.8: Расстояния в проекции и относительные лучевые скорости от центра скопления, а также структурные параметры: эффективные радиусы и средние поверхностные яркости в полосе *B* внутри 1 r_{eff} , лучевый скорости, дисперсии скоростей и SSP-эквивалентные возрасты и металличности для 46 галактик из скопления Abell 496. Колонки 7 – 9 содержат параметры наилучшей аппроксимации, а колонки 10 – 12 – значения, полученные путем сканирования χ^2 в пространстве возраст–металличность.

N	1	0	-	/ \	<u> </u>		<u> </u>	7
N	d_{proj}	$v_r - v_{A496}$	r_{eff}	$\langle \mu_{eff} \rangle = 2$	v _1	σ_{fit}	t_{fit}	Z_{fit}
	arcsec	km s ⁺	arcsec	mag arcsec ~	km s *	km s -	Gyr	dex
01	486	-970	2.94 ± 0.12	22.31 ± 0.04	8915 ± 1	47 ± 1	4.9 ± 0.9	-0.13 ± 0.03
02	892	977	6.20 ± 0.14	23.11 ± 0.05	10862 ± 1	45 ± 1	4.0 ± 0.6	-0.21 ± 0.04
03	752	-691	$2.52 {\pm} 0.34$	23.16 ± 0.12	9194 ± 3	33 ± 3	14.2 ± 6.7	-0.73 ± 0.14
04	293	1179	3.07 ± 0.16	$23.55 {\pm} 0.09$	11064 ± 2	18 ± 3	4.9 ± 3.1	-0.72 ± 0.09
05	295	-1260	$2.18 {\pm} 0.10$	22.39 ± 0.06	8625 ± 2	49 ± 2	14.0 ± 4.1	-0.54 ± 0.10
06	788	-1120	$3.38 {\pm} 0.12$	$21.56 {\pm} 0.05$	8765 ± 1	72 ± 1	$6.8 {\pm} 0.4$	-0.14 ± 0.01
07	725	-2149	$1.94 {\pm} 0.06$	22.13 ± 0.06	7736 ± 1	27 ± 1	$1.2 {\pm} 0.2$	-0.46 ± 0.03
08	331	-292	1.41 ± 0.10	22.75 ± 0.07	9593 ± 2	21 ± 2	9.9 ± 4.9	-0.54 ± 0.07
09	222	-686	$2.13 {\pm} 0.08$	22.13 ± 0.05	9199 ± 1	41 ± 1	12.0 ± 3.0	-0.51 ± 0.05
10	436	528	$2.03 {\pm} 0.06$	$23.31 {\pm} 0.08$	10413 ± 3	26 ± 3	6.2 ± 4.6	-0.72 ± 0.12
11	201	-1510	1.75 ± 0.14	22.26 ± 0.08	8375 ± 1	39 ± 1	9.5 ± 2.6	-0.35 ± 0.03
12	716	1208	$2.30 {\pm} 0.13$	23.43 ± 0.07	11093 ± 3	26 ± 3	5.5 ± 2.5	-0.89 ± 0.07
13	192	-944	$4.15 {\pm} 0.28$	$23.65 {\pm} 0.06$	8941 ± 2	40 ± 2	6.6 ± 2.3	-0.37 ± 0.06
14	426	-1244	$1.68 {\pm} 0.11$	22.33 ± 0.11	8641 ± 2	31 ± 2	6.6 ± 2.4	-0.72 ± 0.06
15	118	-298	$2.85 {\pm} 0.10$	21.84 ± 0.05	9587 ± 1	51 ± 1	$5.5 {\pm} 0.5$	-0.21 ± 0.01
16	87	69	$1.69 {\pm} 0.09$	21.07 ± 0.10	9954 ± 1	79 ± 1	12.9 ± 1.4	-0.43 ± 0.03
17	114	-13	1.51 ± 0.05	20.34 ± 0.06	9872 ± 1	124 ± 2	14.0 ± 1.2	-0.06 ± 0.02
18	202	1820	$2.34 {\pm} 0.11$	$21.38 {\pm} 0.06$	11705 ± 1	83 ± 1	5.7 ± 0.5	-0.07 ± 0.01
19	248	-1441	$2.25 {\pm} 0.35$	23.42 ± 0.18	8444 ± 2	19 ± 3	6.1 ± 4.3	-0.50 ± 0.11
20	22	-130	$0.75 {\pm} 0.02$	20.07 ± 0.07	9755 ± 1	103 ± 1	15.7 ± 1.2	-0.06 ± 0.02
21	41	407	$1.22 {\pm} 0.05$	$20.69 {\pm} 0.05$	10292 ± 2	147 ± 2	$15.6 {\pm} 1.9$	-0.18 ± 0.03
22	142	929	1.51 ± 0.13	$22.95 {\pm} 0.09$	10814 ± 1	26 ± 2	6.9 ± 1.9	-0.20 ± 0.06
23	81	256	$1.74 {\pm} 0.04$	22.72 ± 0.07	10141 ± 2	37 ± 3	$15.9 {\pm} 6.5$	-0.82 ± 0.14
24	58	-114	1.37 ± 0.06	19.87 ± 0.07	9771 ± 1	176 ± 1	$14.8 {\pm} 0.9$	-0.09 ± 0.01
25	96	-369	$2.51 {\pm} 0.11$	22.04 ± 0.06	9516 ± 1	77 ± 1	8.5 ± 1.2	-0.28 ± 0.02
26	174	463	$4.44 {\pm} 0.18$	$24.01 {\pm} 0.08$	10348 ± 3	36 ± 3	6.0 ± 3.5	-0.41 ± 0.10
27	420	649	$2.84 {\pm} 0.12$	22.04 ± 0.04	10534 ± 1	53 ± 1	7.7 ± 1.1	-0.58 ± 0.02
28	631	-203	$2.64 {\pm} 0.11$	22.40 ± 0.06	9682 ± 1	56 ± 1	12.9 ± 2.3	-0.49 ± 0.04
29	979	338	$3.02 {\pm} 0.19$	$23.76 {\pm} 0.09$	10223 ± 2	21 ± 2	11.2 ± 5.4	-0.75 ± 0.11
30	610	-196	$2.39 {\pm} 0.22$	22.27 ± 0.06	9689 ± 1	46 ± 1	4.7 ± 0.6	-0.21 ± 0.03
31	188	-1519	$2.84 {\pm} 0.10$	$21.53 {\pm} 0.05$	8366 ± 1	73 ± 1	11.6 ± 1.2	-0.40 ± 0.02
32	603	-108	$2.03 {\pm} 0.12$	$22.15 {\pm} 0.08$	9777 ± 1	46 ± 1	$10.9 {\pm} 1.6$	-0.38 ± 0.02
33	642	-115	$3.66 {\pm} 0.18$	$22.55 {\pm} 0.05$	9770 ± 1	55 ± 1	7.9 ± 1.4	-0.39 ± 0.02
34	972	492	$2.48 {\pm} 0.18$	23.59 ± 0.11	10377 ± 3	39 ± 4	3.0 ± 1.7	-0.67 ± 0.21
35	317	-426	1.71 ± 0.21	$22.38 {\pm} 0.13$	9459 ± 1	21 ± 2	1.5 ± 0.4	-0.43 ± 0.03
36	219	-959	$2.52 {\pm} 0.12$	21.97 ± 0.06	8926 ± 1	52 ± 1	7.8 ± 1.3	-0.34 ± 0.02
37	409	-1459	2.25 ± 0.13	$23.34 {\pm} 0.09$	8426 ± 2	30 ± 2	5.4 ± 2.1	-0.29 ± 0.05
38	1024	1318	$1.71 {\pm} 0.09$	$20.90 {\pm} 0.04$	11203 ± 1	43 ± 1	1.2 ± 0.1	-0.47 ± 0.02
39	635	667	$4.46 {\pm} 0.21$	$23.45 {\pm} 0.06$	10552 ± 1	27 ± 2	4.9 ± 1.4	-0.48 ± 0.04
40	361	398	1.34 ± 0.07	20.01 ± 0.05	10283 ± 1	151 ± 1	12.9 ± 0.9	-0.21 ± 0.01
41	400	-933	3.41 ± 0.11	21.61 ± 0.05	8952 ± 1	87 ± 1	11.9 ± 1.1	-0.25 ± 0.02
42	503	-123	$2.83 {\pm} 0.30$	23.29 ± 0.18	9762 ± 3	31 ± 4	6.7 ± 5.0	-0.70 ± 0.11
43	667	-1510	2.90 ± 0.24	$_{23.22\pm0.06}^{$	8375 ± 2	38 ± 2	4.0 ± 1.6	-0.36 ± 0.09
44	615	950	3.27 ± 0.11	22.02 ± 0.04	10835 ± 1	50 ± 1	8.9 ± 1.1	-0.23 ± 0.02
45^{-}	549	314	2.02 ± 0.06	22.62 ± 0.06	10199 ± 2	43 ± 3	14.1 ± 5.4	-0.78 ± 0.12
46	701	-2138	2.74 ± 0.15	22.42 ± 0.13	7747 ± 2	22 ± 3	0.2 ± 0.1	-0.16 ± 0.05
A1	555	606	1.22 ± 0.13	23.00 ± 0.23	10491 ± 4			
A2	559	1020	$1.56 {\pm} 0.15$	23.17 ± 0.12	$10905 {\pm} 10$			

^{*}Значения r_{eff} и $\langle \mu_{eff} \rangle$ для G-20 в этой таблице сильно отличаются от значений, представленных в следующей главе, измеренных на изображениях HST WFPC2, поскольку здесь мы не учитывали качество изображения наземных наблюдений с CFHT.

Таблица 2.9: Некоторые Ликские индексы, значения [Mg/Fe] полученные путем сравнения их с моделями из работы Thomas et al. (2003), и краткие комментарии относительно структур, видимых на картах цвета.

orp.	mjp, m	ζανισιλ πα	партал	цвета.			
Ν	Fe_{5015}	M g b	Fe_{5270}	Fe_{5335}	Fe_{5406}	[Mg/Fe]	Comments
	Å	Å	Å	Å	Å	dex	
01	$3.89 {\pm} 0.28$	$3.40 {\pm} 0.10$	$2.59 {\pm} 0.10$	$2.05 {\pm} 0.10$	$1.78 {\pm} 0.09$	$0.22 {\pm} 0.10$	red core
02	4.61 ± 0.19	$3.07 {\pm} 0.07$	$2.46 {\pm} 0.07$	$2.45 {\pm} 0.09$	$1.70 {\pm} 0.07$	$0.14 {\pm} 0.07$	red core
03	3.07 ± 0.54	$2.70 {\pm} 0.21$	2.17 ± 0.21	$1.28 {\pm} 0.21$	$0.64 {\pm} 0.20$	$0.20 {\pm} 0.20$	
04	$4.70 {\pm} 0.47$	$2.94 {\pm} 0.19$	$1.63 {\pm} 0.19$	$1.23 {\pm} 0.20$	$0.56 {\pm} 0.17$	$0.48{\pm}0.06$	
05	$3.96 {\pm} 0.35$	$2.78 {\pm} 0.14$	$3.01 {\pm} 0.14$	$2.17 {\pm} 0.14$	1.41 ± 0.11	-0.11 ± 0.15	red core
06	5.46 ± 0.12	$3.67 {\pm} 0.05$	$2.93 {\pm} 0.05$	$2.50 {\pm} 0.05$	$1.38 {\pm} 0.04$	0.11 ± 0.04	red core
07	$2.64 {\pm} 0.19$	$1.39 {\pm} 0.07$	$1.75 {\pm} 0.07$	$1.12 {\pm} 0.09$	1.21 ± 0.06	-0.02 ± 0.09	blue core
08	4.50 ± 0.47	$3.07 {\pm} 0.19$	$2.45 {\pm} 0.19$	$2.04 {\pm} 0.19$	$0.76 {\pm} 0.17$	$0.18 {\pm} 0.22$	
09	$2.85 {\pm} 0.28$	3.21 ± 0.11	2.99 ± 0.11	$1.69 {\pm} 0.11$	$1.40 {\pm} 0.09$	$0.08 {\pm} 0.12$	
10	2.12 ± 0.57	$2.31 {\pm} 0.22$	1.67 ± 0.23	$1.66 {\pm} 0.25$	$0.83 {\pm} 0.22$	$0.24 {\pm} 0.25$	
11	4.73 ± 0.32	$2.64 {\pm} 0.14$	$2.12 {\pm} 0.12$	$2.00 {\pm} 0.12$	$1.69 {\pm} 0.11$	$0.15 {\pm} 0.17$	red core
12	2.01 ± 0.56	$2.29 {\pm} 0.22$	$0.95 {\pm} 0.24$	$2.61 {\pm} 0.24$	0.57 ± 0.22	$0.41 {\pm} 0.27$	
13	4.37 ± 0.43	$2.56 {\pm} 0.17$	$3.54 {\pm} 0.17$	$1.92 {\pm} 0.17$	1.70 ± 0.14	-0.23 ± 0.09	
14	3.58 ± 0.31	$2.41 {\pm} 0.12$	2.34 ± 0.12	$0.96 {\pm} 0.13$	$0.82 {\pm} 0.10$	0.17 ± 0.16	
15	4.22 ± 0.15	$3.24 {\pm} 0.06$	$2.93 {\pm} 0.06$	$2.12 {\pm} 0.06$	$1.32 {\pm} 0.04$	$0.06 {\pm} 0.06$	red core
16	4.36 ± 0.14	$3.68 {\pm} 0.06$	$2.52 {\pm} 0.06$	$2.01 {\pm} 0.06$	1.41 ± 0.06	$0.28 {\pm} 0.04$	red core
17	4.85 ± 0.17	$4.84 {\pm} 0.07$	$3.33 {\pm} 0.07$	$2.64 {\pm} 0.07$	1.77 ± 0.06	$0.20 {\pm} 0.04$	red core
18	4.87 ± 0.16	$3.53 {\pm} 0.06$	$2.77 {\pm} 0.06$	$2.44 {\pm} 0.07$	1.75 ± 0.06	$0.14 {\pm} 0.06$	red core
19	6.17 ± 0.60	1.71 ± 0.25	2.16 ± 0.23	$1.79 {\pm} 0.23$	$1.58 {\pm} 0.19$	-0.09 ± 0.23	
20	5.57 ± 0.16	$4.79 {\pm} 0.06$	$3.25 {\pm} 0.06$	$2.96 {\pm} 0.06$	$1.95 {\pm} 0.06$	$0.18 {\pm} 0.04$	
21	4.13 ± 0.22	$4.85 {\pm} 0.08$	$2.65 {\pm} 0.08$	2.11 ± 0.10	$1.75 {\pm} 0.08$	$0.45 {\pm} 0.07$	
22	4.26 ± 0.41	$3.06 {\pm} 0.15$	3.37 ± 0.15	$1.82 {\pm} 0.17$	1.21 ± 0.14	-0.10 ± 0.17	
23	4.93 ± 0.44	$2.42 {\pm} 0.17$	1.33 ± 0.19	$0.82 {\pm} 0.19$	$0.68 {\pm} 0.16$	$0.29 {\pm} 0.06$	
24	4.55 ± 0.13	$5.01 {\pm} 0.05$	$2.94 {\pm} 0.05$	$2.53 {\pm} 0.05$	$1.72 {\pm} 0.04$	$0.34 {\pm} 0.03$	red core
25	4.56 ± 0.20	$3.53 {\pm} 0.07$	$2.80 {\pm} 0.07$	$2.19 {\pm} 0.08$	$1.42 {\pm} 0.07$	$0.14 {\pm} 0.07$	red core
26	3.95 ± 0.57	$\dots \pm \dots$	2.02 ± 0.22	$3.36 {\pm} 0.22$	$0.42 {\pm} 0.20$	$\dots \pm \dots$	
27	3.50 ± 0.16	$2.90 {\pm} 0.06$	$2.15 {\pm} 0.06$	$1.99 {\pm} 0.07$	$1.52 {\pm} 0.06$	$0.26 {\pm} 0.07$	
28	4.63 ± 0.21	$3.62 {\pm} 0.08$	$2.42 {\pm} 0.08$	$1.86 {\pm} 0.08$	1.28 ± 0.07	$0.32 {\pm} 0.06$	red core
29	2.59 ± 0.49	$2.91 {\pm} 0.18$	2.23 ± 0.19	2.35 ± 0.19	3.16 ± 0.15	0.16 ± 0.24	
30	4.86 ± 0.19	$2.90 {\pm} 0.08$	$2.92 {\pm} 0.08$	$2.28 {\pm} 0.08$	$1.68 {\pm} 0.06$	-0.05 ± 0.09	
31	3.56 ± 0.15	$3.50 {\pm} 0.05$	$2.61 {\pm} 0.05$	$2.13 {\pm} 0.05$	1.31 ± 0.05	$0.21 {\pm} 0.05$	red core
32	3.74 ± 0.19	$3.55 {\pm} 0.07$	$2.70 {\pm} 0.07$	$2.38 {\pm} 0.07$	1.71 ± 0.06	$0.15 {\pm} 0.07$	red core
33	3.81 ± 0.21	$3.03 {\pm} 0.08$	$2.50 {\pm} 0.08$	2.06 ± 0.09	$1.53 {\pm} 0.08$	0.15 ± 0.09	
34	2.60 ± 0.57	1.77 ± 0.23	1.14 ± 0.23	2.43 ± 0.23	1.84 ± 0.19	$0.14 {\pm} 0.26$	
35	1.54 ± 0.24	$1.97 {\pm} 0.09$	$2.80 {\pm} 0.09$	1.65 ± 0.10	$0.93 {\pm} 0.09$	-0.25 ± 0.10	blue core
36	3.36 ± 0.22	$3.16 {\pm} 0.09$	$2.85 {\pm} 0.09$	2.49 ± 0.09	$1.62 {\pm} 0.07$	$0.00 {\pm} 0.09$	red core
37	3.00 ± 0.54	2.49 ± 0.22	2.84 ± 0.19	2.17 ± 0.21	1.98 ± 0.16	-0.11 ± 0.22	
38	1.14 ± 0.09	$1.55 {\pm} 0.04$	1.42 ± 0.04	1.28 ± 0.04	0.77 ± 0.03	$0.12 {\pm} 0.04$	blue core
39	3.93 ± 0.28	2.10 ± 0.11	1.69 ± 0.11	2.06 ± 0.12	1.78 ± 0.09	0.13 ± 0.14	
40	$3.92 {\pm} 0.13$	4.24 ± 0.05	2.84 ± 0.05	$2.34 {\pm} 0.05$	1.60 ± 0.04	$0.25 {\pm} 0.04$	red core
41	3.35 ± 0.16	$3.90 {\pm} 0.07$	2.82 ± 0.07	$2.33 {\pm} 0.07$	1.60 ± 0.05	$0.19 {\pm} 0.05$	red core
42	3.31 ± 0.69	3.40 ± 0.25	1.51 ± 0.27	1.61 ± 0.27	1.40 ± 0.22	0.43 ± 0.06	
43	5.46 ± 0.45	2.16 ± 0.18	2.30 ± 0.18	2.26 ± 0.18	1.21 ± 0.15	-0.07 ± 0.26	
44	4.79 ± 0.18	$3.80 {\pm} 0.07$	2.67 ± 0.07	2.27 ± 0.07	1.55 ± 0.06	0.22 ± 0.06	red core
45	2.56 ± 0.43	3.07 ± 0.16	1.89 ± 0.16	1.90 ± 0.16	0.48 ± 0.15	0.34 ± 0.15	_
46	-12.09 ± 0.20	$1.50 {\pm} 0.09$	$0.87 {\pm} 0.09$	$0.93 {\pm} 0.11$	$0.54 {\pm} 0.08$	0.35 ± 0.11	strong star formation

использованные в ходе нашего исследования в порядке важности. Мы также кратко обсуждаем шаги процедуры редукции данных, которые необходимо было предпринять до проведения анализа данных.

Проект Palomar dE: длиннощелевая спектроскопия

Наблюдения 16 карликовых галактик ранних типов в скоплении Девы были проведены с использованием Двойного Спектрографа (Double Spectrograph) 5-м телескопа Паломарской обсерватории в течение двух наблюдательных периодов в марте 2001 и апреле 2002 года. Обработанные и откалиброванные по потокам спектры были любезно предоставлены L. Van Zee (PI проекта) осенью 2004 года. Спектрограф позволяет одновременно получать данные в двух спектральных диапазонах – голубом 4800–5700Å с разрешением $R \approx 2200$ и красном 8250–8900Å с более высоким разрешением ($R \approx 5400$). Времена экспозиций отличались от 1200 sec для VCC 1075 до 12000 sec для VCC 1308. Щель шириной 2 агсsес имела высоту 2 агстіп и устанавливалась по большим осям галактик (см. Таблицу 2 в работе van Zee et al., 2004b). Также были получены спектры ряда звезд – стандартов лучевых скоростей (гиганты спектральных классов F7–K2).

Все детали о проведении наблюдений и обработки данных предоставлены в работе van Zee et al. (2004b), где также проведен глубокий анализ кинематики галактик, полученной из этих данных. В нашем исследовании мы напрямую используем только голубые спектры в диапазоне, включающем триплет Mgb; кинематика, полученная в красной части и представленная в работе van Zee et al. (2004b), используется для сравнения с нашими данными.

Мы использовали спектры трех звезд – HD 136202, HD 182572 и HD 187691, полученные с тем же инструментом в марте и сентябре 2001-го года и предоставленные нам вместе со спектрами галактик, для оценки вариаций инструментального контура спектрографа (функции рассеяния линии – LSF) вдоль диапазона длин волн, а также чтобы оценить качество редукции данных. Анализ 10 спектров HD 182572 на разных положениях на щели позволил нам нам оценить пространственные вариации LSF.

Мы аппроксимировали звездные спектры спектрами тех же звезд высокого разрешения, доступные в библиотеке ELODIE.3.1 (Prugniel et al., 2007), в пяти отрезках по диапазону длин волн, покрывающих голубой спектральный диапазон Двойного Спектрографа и перекрывающиеся на 20%. Аппроксимация выполнялось методикой PPXF (Cappellari & Emsellem, 2004) и возвращала коэффициенты v, σ, h_3 и h_4 параметризации Гаусса-Эрмита (van der Marel & Franx, 1993). Гелиоцентрические лучевые скорости, доступные в библиотеке ELODIE.3.1 вычитались из полученных значений. Затем мы рассчитывали гелиоцентрические коррекции для каждого спектра с помощью процедуры NOAO.RV.RVCORRECT в среде IRAF и применяли их к результатам аппроксимации.

В случае идеальной и несмещенной калибровки по длинам волн наша процедура должна давать нулевые лучевые скорости, в то время как значения, отличные от нуля, будут являться мерой систематических ошибок дисперсионной кривой. Вариации σ , h_3 и h_4 вдоль диапазона длин волн вызваны аберрациями оптической схемы спектрографа – как коллиматора, так и камеры. Среднее значение коэффициента h_4 антикоррелирует с шириной щели: более широкая щель приводит к появлению П-образных профилей линий, соответствующих отрицательных h_4 , как, например, в спектрографе FLAMES/Giraffe (см.



Рис. 2.20: Вариации коэффициентов параметризации Гаусса-Эрмита для LSF Двойного Спектрографа как функция длины волны, полученные путем анализа 10 спектров звезды HD 182572. Принятые в работе вариации параметров показаны жирными сплошными линиями.

предыдущий раздел), где физический диаметр световодов оказывается больше, чем размер дифракционного кружка коллиматора.

На Рис. 2.20 представлены вариации коэффициентов параметризации Гаусса-Эрмита вдоль диапазона длин волн, полученные из аппроксимации 10 индивидуальных спектров звезды HD 182572. Поведение коэффициентов, которое используется для трансформации моделей звездного населения PEGASE.HR при аппроксимации спектров, показано жирными черными линиями.

Измерения, полученные из индивидуальных спектров имеют разброс от -10 до 30 km s⁻¹, что возможно вызвано гнутиями инструмента, вызывающими смещение нульпункт дисперсионной кривой. Поэтому, можно ожидать систематических ошибок измерений лучевых скоростей на уровне 20 km s⁻¹. Однако, поскольку наше исследование не имеет целью точное измерение абсолютных значений лучевых скоростей галактик, этот эффект для нас не является критичным и ни каким образом не изменит наших выводов. Более важно то, что мы не наблюдаем корреляции между наблюдаемой лучевой скоростью звезды и ее положением на щели. Хорошее согласие профилей лучевых скоростей для некоторых объектов, полученных путем анализа различных наборов данных (см. ниже) также указывает на отсутствие систематических ошибок калибровки по длинам волн вдоль щели.

Мы также видим общий тренд вдоль диапазона длин волн, который очень хорошо воспроизводится в измерениях на индивидуальных спектрах: системные скорости немного уменьшаются на \sim 7 km s⁻¹ на длинах волн от 4800 до 5400Å, затем увеличиваются на \sim 8 km s⁻¹ к красному концу спектрального диапазона. Это поведение может являться результатом недостаточного порядка полинома, использовавшегося для построения дисперсионной кривой в процессе редукции данных.

Спектральное разрешение (σ_{inst}) как функция длины волны (Рис. 2.20) быстро возрастает с ~65 до ~55 km s⁻¹ в на длинах волн от 4800 до 5050Å, затем медленно увеличиваясь до ~48 km s⁻¹ на 5650Å. Это поведение остается идентичным на всех индивидуальных спектрах, что указывает на отсутствие вариаций спектрального разрешения вдоль щели.

В пределах точности измерений (~0.03) поведение коэффициента h_3 стабильно вдоль диапазона длин волн в районе среднего значения +0.05, что указывает на общую легкую асимметрию профиля LSF в голубом диапазоне DS. Коэффициент h_4 также стабилен со средним значением около 0.00 и слабым градиентом от -0.03 до +0.03, что соответствует точности его определения.

Таким образом, вариации спектрального разрешения Двойного Спектрографа в голубом диапазоне показывают хорошо воспроизводимое поведение вдоль длины волны, не показывая ни систематических различий вдоль щели, ни изменений во времени. Вариации LSF вдоль длины волны учитываются в методе NBURSTS путем свертки моделей звездного населения с переменным ядром вдоль диапазона длин волн, как описано выше. Это позволяет получать уверенные измерения дисперсий скоростей до ~1/3 ширины LSF (т.е. ~20 km s⁻¹) на средних отношениях сигнал-шум (~20), что очень важно для надежности оценок параметров звездного населения (Chilingarian et al., 2008с).

Выборка объектов в работе van Zee et al. (2004b) включала две галактики с очень низкими отношениями сигнал-шум: VCC 1743 и VCC 1857. Для этих объектов мы приводим только интегральные измерения кинематики и звездных населений. Для оставшихся 14 объектов мы используем адаптивное разбиение данных вдоль щели для достижения минимального отношения сигнал-шум 20 или 30 (10 для VCC 1075) в каждом бине на 5200Å. Это сделано путем сложения соседних спектров вдоль щели от центра галактики до достижения заданного отношения сигнал-шум. Первый бин всегда устанавливался в фотометрическом центре галактики. Для анализа кинематики и звездных населений данные интерполировались с логарифмическим шагом по длинам волн 40 km s⁻¹ на пиксел.

HyperLeda FITS Archive: длиннощелевая спектроскопия

Проект HyperLeda⁴ (Paturel et al., 2003) известный в основном по своей крупнейшей существующей базе данных однородных структурных, фотометрических и кинематических параметров галактик, также содержит богатую коллекцию сырых и обработанных спектральных данных и прямых снимков, известную как HyperLeda FITS Archive (HFA). Ресурс содержит данные для галактик ранних типов, представленные в серии работ Simien & Prugniel, полученные на длиннощелевом спектрографе CARELEC на 1.93-м телескопе Обсерватории Верхнего Прованса (OHP). В нашем исследовании мы используем подвыборку этих данных для карликовых галактик и галактик ранних типов низкой светимости

 $^{^4 \}rm http://leda.univ-lyon1.fr/$

в скоплении Дева, представленную в деталях в работе Simien & Prugniel (2002). Данные были получены в течение 5 наблюдательных блоков в апреле и июне 1999, феврале и марте 2000 и январе 2001 г.-г. Используемый режим CARELEC #2 предоставляет среднее спектральное разрешение $R \approx 5000$ в диапазоне длин волн $4700 < \lambda < 5600$ Å для щели высотой 5 arcmin. Ширины щели указаны в FITS-шапкых для каждого из файлов, и они составляли 2.2, 2.1, 2.3, 1.8 и 1.7 агсsес для 5 наблюдательных блоков. Время накопления составляло от 60 минут в одной экспозиции для NGC 4476 до 210 минут в 4 экспозициях для IC 3461. Полный журнал наблюдений представлен в Таблице 2 в работе Simien & Prugniel (2002).

Мы использовали оригинальные необработанные ССD-изображения, доступные в архиве, и обрабатывали их с использованием программного пакета, изначально разработанного для редукции IFU-данных, адаптированного для длиннощелевых спектров. Основные шаги редукции данных включают: (1) вычитание BIAS; (2) чистку следов космических частиц методом Лапласовской фильтрации (van Dokkum, 2001); (3) предварительную коррекцию за плоское поле с использование плоских полей, полученных под куполом телескопа; (4) автоматическую идентификацию спектра сравнения (He, Ne, Ar) и построение дисперсионной поверхности, используя полиномы 3-го порядка; (5) интерполяция спектра с логарифмическим шагом 25 km s⁻¹ по длинам волн; (6) коррекцию за остаточное плоское поле, используя спектры сумеречного неба. В среднем для построения дисперсионной кривой использовались около 30 линий, что давало точность около 0.04 Å.

Для всех наблюдений, кроме апреля 1999, мы использовали спектры сумеречного неба, полученные во время соответствующих наблюдательных периодов для того, чтобы оценить вариации LSF спектрографа CARELEC вдоль длины волны и вдоль щели. Они аппроксимировались спектрами Солнца из библиотеки ELODIE.3.1 точно так же, как мы поступали для звездных спектров с данными из проекта Palomar dE. Вдоль щели вариаций LSF не обнаружено. В то же время есть небольшие изменения вдоль спектрального диапазона: лучевые скорости имеют небольшой сдвиг (значения σ_{inst} даны в скобках) от +2 (32 до 50 для различных рядов наблюдений в синей части до -2 (от 25 до 40) km s⁻¹ в красной; h_3 остается в районе нуля с точностью 0.01; h_4 уменьшается от +0.04 до 0.00.

От одного периода наблюдений к другому заметны значительные изменения инструментального разрешения σ_{inst} из-за использования различных ширин щели. В апреле 1999 спектры сумеречного неба не снимались, но наблюдались две звезды, содержащиеся в библиотеке ELODIE.3.1: HD 84937 и HD 137759. Первая имеет довольно ранний тип спектра (F5 III), поэтому деталей в нем слишком мало для оценки LSF, однако вторая звезда, гигант класса К имеет спектр, позволяющий точно анализировать параметры LSF.

Мы не использовали данные для четырех галактик, IC 3120, IC 3457, IC 3653, и NGC 4482. IC 3120 – галактика позднего типа и находится за рамками данной работы; наблюдения IC 3653 проводились с очень плохим качеством изображения (6 arcsec); два оставшихся объекта имеют слишком низкое отношение сигнал-шум (возможно из-за низ-кой прозрачности для NGC 4482). Мы отмечаем, что данные для IC 3457 также содержат спектр PGC 41516 (VCC 1399) на щели, однако эта галактика также слишком слаба даже для оценки интегральных свойств звездного населения.

В результате, мы использовали данные для 15 галактик, 3 из которых также наблюдались в рамках проекта Palomar dE. Спектры некоторых объектов (например, IC 783A) имеют очень низкие отношения сигнал-шум, поэтому мы приводим только интегральные измерения параметров звездного населения для спектров, просуммированных вдоль щели. Для оставшихся галактик мы применяли адаптивное разбиение до минимального отношения сигнал-шум 10 или 15 на 5200Å, используя метод, описанный выше.

IFU-спектроскопия четырех галактик

Четыре ярких dE/dS0 галактики – IC 783, IC 3468, IC 3509 и IC 3653 наблюдались с помощью IFU-спектрографа MPFS на 6-м телескопе БТА САО РАН в течение трех периодов в марте 2004, мае 2004 и мае 2005 г.-г. Детальное описание наблюдений, обработки и анализа данных приведены в предыдущих разделах и работах Chilingarian (2006); Chilingarian et al. (2007d,e). Все данные доступны в архиве ASPID (Chilingarian et al., 2007a).

Здесь мы приводим оригинальные измерения, приведенные в соответствующих статьях для галактик VCC 490 и VCC 1871. Данные были переобработаны для VCC 1422 и VCC 1545, что позволило улучшить процедуру вычитания неба; также мы увеличили степень полиномиального континуума до 15. Данные разбивались пространственно, используя процедуру адаптивного разбиения Вороного (Cappellari & Copin, 2003).

SDSS DR6: апертурная спектроскопия

Скопление Дева частично содержится в области покрытия обзора Sloan Digital Sky Survey Data Release 6 (Adelman-McCarthy et al., 2008). Поэтому для многих членов скопления типов dE/dS0 доступны спектры среднего разрешения ($R \approx 1800$) в диапазоне длин волн ($3800 < \lambda < 9200$ Å), имеющие сравнительно высокие отношения сигнал-шум. Мы используем спектры SDSS для объектов из выборки, представленной выше, для сравнения определяемых параметров звездного населения для центральных частей галактик. Довольно низкое спектральное разрешение SDSS не позволяет уверенно измерять дисперсии скоростей ниже 40 km s⁻¹.

Спектры были получены с помощью 2.5-м телескопа обсерватории Apache Point с мультиобъектным спектрографом, содержащим 640 круглых световодов диаметром 3 arcsec в поле зрения 3 deg (Gunn et al., 2006). Выбор объектов для спектроскопии в обзоре SDSS основано на предельной звездной величине внутри апертуры световода, поэтому выборка содержит в основном карликовые галактики с ядрами.

Поскольку в обзоре SDSS не доступны ни спектры сумеречного неба, ни яркие звезды из библиотеки ELODIE.3.1 (они слишком яркие), напрямую измерить вариации LSF спектрографа вдоль спектрального диапазона невозможно. Однако, изменения спектрального разрешения в терминах σ_{inst} рассчитаны для каждого световода системой обработки данных SDSS и предоставляются вместе с данными (в 6-м расширении FITS-файлов, содержащих спектры). Величина σ_{inst} уменьшается от 68 km s⁻¹ на 3800Å до 52 km s⁻¹ на 5800Å. Затем она резко увеличивается до 66 km s⁻¹ и плавно уменьшается до 51 km s⁻¹ на 9200Å. Это происходит из-за того, что спектры SDSS содержат две части (голубую и красную), полученные двумя различными частями инструмента. Здесь мы аппроксимируем спектры SDSS в диапазоне длин волн 3900 < λ < 6700Å (покоящаяся система отсчета). Помимо того, что мы используем большой интервал длин волн, что улучшает качество оценки параметров звездного населения, центральная длина волны оказывается 5300Å, хорошо соответствуя описанным выше длиннощелевым спектрам. Для 23 из 31 галактик, включенных в нашу окончательную выборку, доступны спектры SDSS DR6.

Наша окончательная выборка представлена в Таб. 2.10. Мы приводим общепринятые наименования галактик, их номера в каталоге скопления Дева Virgo Cluster Catalogue (Binggeli et al., 1985) и доступность данных в каждом из источников, описанных выше. Светимость галактик лежит в диапазоне $-18.27 < M_B < -15.10$ mag, центральные дисперсии скоростей $23 < \sigma < 79$ km s⁻¹. Выборка не является статистически репрезентативной для карликовых галактик ранних типов в скоплении Дева из-за хорошо известной корреляции поверхностной яркости и светимости у dE/dS0, делающей слабые галактики (в терминах светимости) очень сложными для наблюдений. Для некоторых объектов из слабой части выборки мы представляем только интегральные измерения параметров звездного населения. Самый слабый объект в выборке – VCC 1308 ($M_B = -15.41$ mag).

2.4.2 Анализ данных

Мы проводили анализ данных с использованием методики NBURSTS (Глава 1), используя модели звездных населений, рассчитанных для начальной функции масс Salpeter (1955).

Если в спектре присутствовали эмиссионные линии, мы исключали области с ними из аппроксимации. В диапазоне SDSS мы исключали Бальмеровские линии (интервалы шириной 7 Å), [OIII] ($\lambda = 4363$, 4959, 5007 Å), [NII] ($\lambda = 5199$ Å), [NI] ($\lambda = 6548$, 6583 Å), and [SII] ($\lambda = 6717$, 6731 Å). Помимо этого, всегда исключались области, подверженные влиянию сильных линий эмисии ночного неба [OI] ($\lambda = 5577$, 6300, 6364 Å), NaI ($\lambda = 5890$, 5896Å), и линии ртути, появляющейся как результат паразитной засветки неба HgI ($\lambda = 5461$ Å).

Все результаты в данном разделе относятся к аппроксимации однокомпонентной моделью звездного населения (т.е. один SSP-спектр). Мы не использовали аддитивный континуум. Для мультипликативного континуума степени полинома были 13, 13, и 15 для данных Palomar dE, HFA и SDSS соответственно.

Для измерения градиентов металличности мы аппроксимировали суммарные спектры в областях вдоль радиуса с обеих сторон от ядра галактики, в областях, выделенных индивидуально для каждого объекта. В нашими данными невозможно автоматически определять эти области, основываясь только на значениях r_e , поскольку от объекта к объекту различаются как значения поверхностных яркостей, так и времена экспозиций, что приводит к сильно различающимся значениям отношениях сигнал-шум на данном расстоянии от центра в терминах r_e. Поэтому мы основывали наши определения радиальных зон на наблюдаемом радиусе ядра r_{nuc} , который мы определяем как полуширину наблюдаемого пика на профиле металличности (если он есть), либо 1.5 arcsec, если нет, пто привело к диапазону значений от 1.5 до 4 arcsec (для VCC 478). Внутренний радиус внутренней области устанавливался в $r_{ii} = 1.5 r_{nuc}$, чтобы предотвратить эффекты ядра на извлекаемый спектр. Внешний радиус внутренней зоны и параметры внешней зоны определялись как $r_{io} = (2.5/1.5)r_{ii}; r_{oi} = (3.5/1.5)r_{ii}; r_{oo} = (5.5/1.5)r_{ii}$. В результате, внутренние и внешние области оказались от 1/4 до 1/2 и от 1/2 до 1 в единицах эффективного радиуса. Значения градиентов металличности рассчитывались как $\Delta [Fe/H]/\Delta r = 2([Fe/H]_o - [Fe/H]_i)/(r_{oi} + r_{oo} - (r_{ii} + r_{io}))$, где $[Fe/H]_i$ и $[Fe/H]_o$ - значения металличности во внутренней и внешней областях по радиусу. Затем, значения переводились

данных. Галан	ктики,	наблю	давшие	еся со сі	іектрогра
Name	VCC	Pal.	OHP	SDSS	$Ph.ref^*$
IC 3081	178	yes	no	yes	3
IC 781	389	no	yes	yes	4
UGC $7399A$	437	yes	no	no	1
IC 783	490	no	yes^1	yes	4
UGC 7436	543	yes	yes	yes	1
IC $783A$	545	no	yes^1	yes	4
NGC 4328	634	no	yes	yes	4
IC 3328	856	no	yes	yes	1
IC 3344	917	yes	no	yes	2,3
IC 3363	965	yes	no	yes	3
IC 3369	990	yes	no	yes	3
NGC 4431	1010	no	yes	no	4
NGC 4436	1036	yes	yes	yes	2,3
IC 3383	1075	yes	no	yes	1
IC 3381	1087	no	yes	yes	1
IC 3393	1122	yes	yes	yes	3
IC 3413	1183	no	yes	no	4
NGC 4476	1250	no	yes	yes	1
NGC 4482	1261	yes	no^2	yes	1
IC 3437	1308	yes	no	no	3
IC 3461	1407	no	yes^1	yes	1
IC 3468	1422	no	no	yes	1
IC 3486	1491	no	yes	yes	4
PGC 41726	1514	yes	no	no	3
$IC \; 3509$	1545	no	no	yes	1
IC 3602	1743	yes^1	no	yes	1
IC 3647	1857	yes^1	no	no	1
IC 3653	1871	no	no^3	yes	1
IC 3735	2019	yes	no	no	1
IC 3773	2048	no	yes	no	1
IC 3779	2050	\mathbf{yes}	no	yes	1

Таблица 2.10: Окончательная выборка галактик ранних типов низкой светимости в скоплении Дева. Колонки (1) и (2) дают название галактики и ее номер в каталоге VCC, колонки (3) – (5) показывают наличие данных, колонка (6) – ссылка на источник фотометрических данных. Галактики, наблюдавшиеся со спектрографом MPFS отмечены курсивом.

¹низкое отношение сигнал-шум, возможны только интегральные измерения параметров

 $^{2}\,$ очень низкое отношение сигнал-шум, данные не использовались

³ плохое качество изображения, данные не использовались

* Источник фотометрических данных: 1 – Ferrarese et al. (2006), 2 – Stiavelli et al. (2001) and/or Geha et al. (2003), 3 – van Zee et al. (2004a), 4 – SDSS DR6

в $\Delta Fe/H$ на r_e и на kpc.

Мы рассчитали радиальные вариации звездного отношения массы к светимости в фильтре *B*, используя модели PEGASE.2 (Fioc & Rocca-Volmerange, 1997) для той же начальной функции масс Солпитера. Важно отметить, что согласно моделям PEGASE.2, помимо звездной составляющей от 30 до 40% массы будут содержаться в форме межзвездной среды. Карликовые галактики в скоплениях теряют межзвездную среду в достаточно короткое время посредством различных эффектов ("harassment", лобовое давление). Поэтому для оценок отношений масса-светимость мы не учитывали массу межзвездной среды. Мы учитывали две оставшихся компоненты общей массы SSP – белые карлики и нейтронные звезды / черные дыры.

Параметры, далее представленные как "периферия" или "основное тело галактики" были получены путем сложения спектров вдоль щели по обе стороны от фотометрического ядра галактик на радиусах от r_{ii} до r_{oo} .

Для объектов, спектры которых имеют достаточные отношения сигнал-шум в голубом диапазоне, мы также измерили Ликские индексы. Мы сравниваем измерения индекса Mgb и комбинированного индекса железа $\langle Fe \rangle = 0.72Fe_{5270} + 0.28Fe_{5335}$ (Thomas et al., 2003) с SSP-моделями для разных отношений α /Fe, представленных в той же работе. Эти измерения проводились в ядрах и на перифериях галактик, а также по спектрам SDSS DR6. Для измерения Ликских индексов мы ухудшали эффективное разрешение данных (т.е. квадратичную сумму ширины инструментального контура и внутренней дисперсии скоростей) до разрешения Ликской системы так же, как для данных SDSS в Главе 1 и данных FLAMES/Giraffe в предыдущем разделе и работе Chilingarian et al. (2008d).⁵ Мы вычисляли значения отношений α /Fe путем инверсии сеток моделей из работы Thomas et al. (2003), используя значения возрастов из аппроксимации спектров методом NBURSTS.

2.4.3 Результаты

В Таб. 2.11 представлены параметры кинематики и звездных населений для галактик из нашей выборки. Мы приводим глобальные фотометрические параметры, абсолютные величины M_B , исправленные за Галактическое поглощение и эффективные радиусы r_e из литературы. Преобразование между фотометрическими системами, в которых были представлены измерения в оригинальных работах и фильтром B были произведены согласно работе Fukugita et al. (1995). Мы собрали фотометрические измерения из следующих работ (см. Таб. 2.10): ACS Virgo Cluster Survey (Ferrarese et al., 2006), проект Keck dE (Geha et al., 2002, 2003), поверхностная фотометрия с HST WFPC2 (Stiavelli et al., 2001), проект Palomar dE (van Zee et al., 2004b,a), SDSS DR6 (Adelman-McCarthy et al., 2008). Из каталога SDSS DR6 мы использовали значения 50% радиуса Петросяна в фильтре g' в качестве r_e . Мы использовали модуль расстояния до скопления Дева —31.09 mag, как в работе Ferrarese et al. (2006), остальные измерения были скорректированы соответствующим образом.

Следующие величины представлены для ядер и основных тел галактик: дисперсия скоростей, возраст и металличность, взвешенные по светимости, звездные отношения M/Lв предположении начальной функции масс Солпитера, отношения [Mg/Fe]. Мы также

⁵Поскольку у нас не было достаточного количества наблюдений звезд из Ликской системы, мы не могли рассчитывать и применять систематические сдвиги для перехода в Ликскую систему (см. Appendix A в работе Michielsen et al., 2008).

приводим градиенты металличности на kpc и на r_e , рассчитанные по методу, описанному выше.

Поскольку параметры звездного населения, полученные при помощи аппроксимации спектров, подвержены вырождению возраст-металличность, мы приводим ошибки параметров в повернутой координатной системе (см. Еq. 1.3 в Главе 1). Две пары колонок $\Delta \eta$ и $\Delta \theta$ дают возможность восстановить форму эллипса ошибок на плоскости возраст-металличность для ядер и внешних частей галактик.

Сравнение данных

Для длиннощелевых и IFU спектров мы аппроксимировали суммарные спектра в центральных областях галактик в апертурах размером 3 агсsec, чтобы напрямую сравнить парамтры звездного населения с параметрами, получаемыми из анализа данных SDSS. На Рис. 2.21 мы сравниваем эти измерения. Согласие очень хорошее без признаков систематических сдвигов между различными наборами данных, что указывает на корректную обработку данных. Поскольку в измерениях металличности не наблюдается систематических различий между данными из разных источников, мы делаем вывод, что вычитание аддитивного фона (рассеянный свет, ночное небо) было произведено достаточно точно. Еще один важный вывод – спектры SDSS могут быть успешно использованы для изучения свойств звездных населений в ядрах dE/dS0. Хотя они содержат часть света основного диска/сфероида галактики, результаты их анализа соответствуют анализу других наземных спектральных наблюдений, что дает возможности для изучения больших выборок карликовых галактик ранних типов, используя только данные SDSS.

Для трех объектов, VCC 543, VCC 1036 и VCC 1122, где присутствуют данные как в проекте Palomar dE, так и в HyperLeda FITS Archive, согласие между полученными характеристиками кинематики и звездного населения достаточно хорошее (см. детали ниже в подразделе, описывающем отдельные галактики).

Мы можем количественно сравнить наши кинематические профили с результатами, опубликованными в работе Simien & Prugniel (2002), доступными в электронной форме. Во всех случаях, полученные измерения и их ошибки хорошо согласуются, несмотря на то, что результаты были получены с использованием совершенно разных методов анализа данных. Мы отмечаем, что для определения параметров звездного населения, нам необходимы более высокие отношения сигнал-шум, чем просто для кинематики, поэтому мы применяли более сильное пространственное биннирование данных, и наше пространственное разрешение зачастую оказывается хуже, чем для кинематических профилей в работе Simien & Prugniel (2002).

Поскольку в других публикациях, представляющих кинематику dE/dS0, профили в электронном виде не предоставлены, мы можем провести только качественное сравнение опубликованных данных и результатов данной работы.

В работе van Zee et al. (2004b) представлены два кинематических профиля для каждой галактики, наблюдавшейся в проекте Palomar dE, соответствующие спектрам, полученным из анализа голубого и красного спектров Двойного Спектрографа. Данные из красного трека, имеющие более высокое спектральное разрешение и более резкие и глубокие абсорбционные линии триплета Ca II, позволяют получить более высококачественные кинематические измерения, что хорошо заметно на Рис. 3 а работе van Zee et al. (2004b). Так-

Таблица 2.11: Параметры кинематики и звездных населений карликовых галактик ранних типов: центральные области. Колонки (слева направо): VCC-имя объекта, абсолютная звездная величина (исправленная за поглощение в Галактике), эффективный радиус, принятый радиус ядерной области, центральная дисперсия скоростей, возраст, металличность, ошибки двух параметров звездных населений вдоль и поперек вырождения возраст– металличность (см. текст), центральные значения [Mg/Fe], отношение масса–светимость в фильтре *B*, две колонки для значений возраста и металличности для анализа спектров SDSS DR6.

VCC	M_B	r_e	r_n	σ_0	t	[Fe/H]	$\Delta \eta$	$\Delta \theta$	[Mg/Fe]	$(M/L)_B$	$t_{\rm SDSS}$	$[Fe/H]_{SDSS}$
	mag	arcsec	arcsec	$km s^{-1}$	Gyr	dex	dex	dex	dex	$(M/L)_{\odot}$	Gyr	dex
0178	-15.43	8.7	2.0	50 ± 2	10.6	-0.73	0.08	0.03	$0.14 {\pm} 0.05$	4.8	$8.5 {\pm} 2.0$	-0.81 ± 0.04
0389^a	-16.28	10.9	2.5	23 ± 3	3.9	-0.38	0.09	0.07	$\ldots \pm \ldots$	2.8	$3.6 {\pm} 0.4$	-0.27 ± 0.03
0389^a	-16.28	10.9	2.5	36 ± 2	4.9	-0.30	0.10	0.04	$\ldots \pm \ldots$	3.6	$3.6 {\pm} 0.4$	-0.27 ± 0.03
0437	-16.85	25.1	4.0	47 ± 1	4.5	-0.36	0.04	0.02	$0.06{\pm}0.05$	3.2		
0490^a	-16.14	17.4	17.4	33 ± 5	5.1	-0.23	0.23	0.09	$\dots \pm \dots$	3.9	$2.4 {\pm} 0.3$	-0.15 ± 0.03
0490^{b}	-16.14	17.4	1.5	34 ± 8	3.3	-0.35	0.13	0.04	$\dots \pm \dots$	2.4	2.4 ± 0.3	-0.15 ± 0.03
0543	-16.55	17.1	2.0	49 ± 1	5.4	-0.49	0.06	0.01	$0.09{\pm}0.06$	3.2	$4.9 {\pm} 0.7$	-0.30 ± 0.03
0543^{a}	-16.55	17.9	2.0	48 ± 3	5.7	-0.41	0.14	0.04	$\ldots \pm \ldots$	3.6	$4.9 {\pm} 0.7$	-0.30 ± 0.03
0545^{a}	-15.10	9.5	9.5	31 ± 7	5.1	-0.47	0.27	0.07	$\dots \pm \dots$	3.2	$9.3 {\pm} 2.9$	-0.79 ± 0.05
0634^{a}	-16.31	16.6	2.5	26 ± 2	4.0	-0.30	0.13	0.07	$\dots \pm \dots$	3.1	$2.5 {\pm} 0.3$	-0.17 ± 0.03
0856^{a}	-16.42	14.7	2.5	31 ± 1	5.0	-0.43	0.10	0.03	$0.06 {\pm} 0.12$	3.2	$4.1 {\pm} 0.6$	-0.39 ± 0.03
0917	-15.48	7.8	2.0	41 ± 1	4.4	-0.62	0.05	0.02	$0.03 {\pm} 0.04$	2.6	$4.9 {\pm} 0.8$	-0.48 ± 0.02
0965	-15.44	13.8	1.5	34 ± 4	2.2	-0.56	0.12	0.04	-0.14 ± 0.07	1.4	$3.0 {\pm} 1.2$	-0.66 ± 0.10
0990	-16.31	9.7	2.0	53 ± 1	4.0	-0.40	0.03	0.02	$0.06{\pm}0.03$	2.8	$4.1 {\pm} 0.5$	-0.32 ± 0.03
1010^{a}	-16.79	22.9	2.5	43 ± 2	7.3	-0.33	0.10	0.04	$0.03 {\pm} 0.09$	4.8		
1036	-17.03	14.6	1.5	53 ± 1	3.5	-0.15	0.02	0.01	-0.05 ± 0.03	3.0	$3.0 {\pm} 0.2$	-0.02 ± 0.02
1036^{a}	-17.03	14.6	1.5	41 ± 2	2.6	-0.02	0.09	0.04	$\dots \pm \dots$	2.4	$3.0 {\pm} 0.2$	-0.02 ± 0.02
1075	-15.71	14.6	1.5	53 ± 7	5.7	-0.74	0.22	0.06	$\dots \pm \dots$	2.8	7.9 ± 3.6	-0.77 ± 0.07
1087^{a}	-16.80	18.9	2.5	63 ± 4	5.3	-0.27	0.13	0.04	$\ldots \pm \ldots$	3.9	$5.2 {\pm} 0.8$	-0.22 ± 0.02
1122	-16.03	11.4	2.5	40 ± 1	2.4	-0.37	0.04	0.01	$0.05{\pm}0.05$	1.7	$2.6 {\pm} 0.4$	-0.28 ± 0.02
1122^{a}	-16.03	11.4	2.5	33 ± 1	2.4	-0.30	0.09	0.03	$\ldots \pm \ldots$	1.9	$2.6 {\pm} 0.4$	-0.28 ± 0.02
1183^{a}	-16.66	10.5	2.5	56 ± 2	4.7	-0.28	0.08	0.03	$\dots \pm \dots$	3.6		
1250^{a}	-18.27	16.2	2.5	79 ± 4	2.2	-0.07	0.11	0.04	-0.02 ± 0.15	2.0	$2.8 {\pm} 0.1$	-0.05 ± 0.01
1261	-17.38	21.1	2.5	54 ± 1	2.5	-0.27	0.02	0.01	-0.06 ± 0.03	2.0	$2.6 {\pm} 0.3$	-0.25 ± 0.02
1308	-15.41	9.1	2.0	47 ± 1	3.6	-0.46	0.04	0.03	-0.00 ± 0.07	2.4		
1407^{a}	-15.64	8.9	8.9	36 ± 5	5.0	-0.51	0.31	0.07	$\dots \pm \dots$	3.1	5.8 ± 1.5	-0.54 ± 0.03
1422^{b}	-17.07	19.3	1.5	44 ± 7	7.1	-0.48	0.09	0.04	$\dots \pm \dots$	4.1	$5.5 {\pm} 0.8$	-0.30 ± 0.02
1491^{a}	-15.44	10.2	2.5	47 ± 4	5.6	-0.44	0.18	0.05	$\dots \pm \dots$	3.5	5.4 ± 1.2	-0.33 ± 0.03
1514	-15.58	13.7	2.0	42 ± 3	4.5	-0.77	0.09	0.04	-0.04 ± 0.05	2.3		
1545^{b}	-15.90	11.2	1.5	59 ± 5	4.3	-0.05	0.07	0.03	$\ldots \pm \ldots$	3.9	$5.5 {\pm} 0.6$	-0.16 ± 0.02
1743	-15.20	10.4	10.4	44 ± 8	14.0	-1.01	0.13	0.12	$\dots \pm \dots$	5.0	$2.9 {\pm} 1.0$	-0.46 ± 0.08
1857	-15.85	20.8	20.8	46 ± 16	2.7	-0.66	0.42	0.15	$\ldots \pm \ldots$	1.5		
1871^{b}	-16.54	6.9	1.5	68 ± 3	4.9	+0.03	0.04	0.02	-0.02 ± 0.03	4.7	$5.7 {\pm} 0.4$	$+0.11 {\pm} 0.01$
2019	-16.25	15.4	1.5	44 ± 1	2.3	-0.28	0.05	0.01	-0.03 ± 0.07	1.8		
2048^{a}	-16.85	12.6	2.5	33 ± 2	3.9	-0.44	0.06	0.05	-0.01 ± 0.15	2.7		
2050	-15.55	10.8	2.5	32 ± 2	2.6	-0.54	0.06	0.02	-0.17 ± 0.09	1.7	$2.5 {\pm} 0.6$	-0.28 ± 0.04

^а Данные из HyperLEDA FITS archive (OHP CARELEC).

^b IFU-спектроскопия (MPFS).

Таблица 2.12: Параметры кинематики и звездных населений карликовых галактик ранних типов: внешние области. Колонки (слева направо): VCC-имя объекта, дисперсия скоростей, возраст, металличность, ошибки двух параметров звездных населений вдоль и поперек вырождения возраст-металличность (см. текст), значения [Mg/Fe], отношение масса-светимость в фильтре B, градиенты металличности на r_e и на kpc (положительные значения обозначают уведичение металличности наружу)

VCC	π 0000	+	IGI JDC [Fe/H]	Δn		[Mg/Fe]	$(M/L)_{\rm p}$	$\Delta [Fe/H] / \Delta r$	Δ [Fe/H]/ Δr
100	$km s^{-1}$	Gvr	dev dev	dev	dev	dex	$(M/L)_{\odot}$	$\frac{\Delta [1 c/n]}{\Delta t}$	$dex knc^{-1}$
0150	RHI 5	11 5	0.00	0.00	a or	0.05 0.05	(11/12)		
0178	39 ± 3	11.5	-0.83	0.09	0.05	0.07 ± 0.05	4.8	0.48 ± 0.20	0.68 ± 0.29
0389-	17±6	3.7	-0.35	0.15	0.13	$\dots \pm \dots$	2.7	· · · ± · · ·	· · · ± · · ·
0389	23 ± 4	3.2	-0.44	0.17	0.15	· · · ± · · ·	2.1	±	±
0437	44 ± 3	17.9	-1.04	0.03	0.05	0.20 ± 0.07	5.8	0.91 ± 0.11	0.45 ± 0.05
0490^{a}_{b}	· · · ± · · ·			• • •		· · · ± · · ·		· · · ± · · ·	· · · ± · · ·
0490°	29 ± 7	12.8	-0.79	0.23	0.12	$\dots \pm \dots$	5.4	· · · ± · · ·	±
0543	44 ± 2	7.3	-0.69	0.07	0.03	0.16 ± 0.06	3.6	0.37 ± 0.17	0.27 ± 0.13
0543^{a}	48 ± 4	6.4	-0.63	0.17	0.06	$\dots \pm \dots$	3.3	$\dots \pm \dots$	$\dots \pm \dots$
0545^{a}	$\dots \pm \dots$					$\dots \pm \dots$		$\dots \pm \dots$	$\dots \pm \dots$
0634^{a}	31 ± 4	2.1	-0.11	0.12	0.04	$\dots \pm \dots$	1.9	$\dots \pm \dots$	$\dots \pm \dots$
0856^{a}	31 ± 2	5.9	-0.45	0.14	0.04	$\dots \pm \dots$	3.6	$\dots \pm \dots$	$\dots \pm \dots$
0917	42 ± 3	10.9	-1.00	0.10	0.05	-0.01 ± 0.06	4.2	$0.21 {\pm} 0.19$	0.33 ± 0.31
0965	12 ± 15	6.5	-1.01	0.17	0.07	$\dots \pm \dots$	2.7	$0.55 {\pm} 0.29$	$0.50 {\pm} 0.26$
0990	51 ± 1	5.1	-0.59	0.06	0.01	$0.16 {\pm} 0.04$	2.9	$0.20 {\pm} 0.06$	$0.25 {\pm} 0.08$
1010^{a}	49 ± 2	7.7	-0.40	0.12	0.04	-0.06 ± 0.11	4.8	$\dots \pm \dots$	$\dots \pm \dots$
1036	56 ± 1	4.9	-0.33	0.03	0.01	$0.17 {\pm} 0.03$	3.5	$0.48 {\pm} 0.06$	$0.41 {\pm} 0.05$
1036^{a}	43 ± 3	2.9	-0.13	0.11	0.04	$\dots \pm \dots$	2.4	$\dots \pm \dots$	±
1075	41 ± 7	5.0	-0.52	0.22	0.05	$\dots \pm \dots$	3.1	-0.09 ± 0.23	-0.08 ± 0.19
1087^{a}	65 ± 5	13.8	-0.60	0.21	0.15	$\dots \pm \dots$	6.5	$\dots \pm \dots$	±
1122	39 ± 2	6.7	-0.82	0.07	0.03	$0.09 {\pm} 0.06$	3.1	$0.38 {\pm} 0.10$	$0.42 {\pm} 0.11$
1122^{a}	35 ± 3	3.8	-0.55	0.08	0.08	$\dots \pm \dots$	2.3	$\dots \pm \dots$	$\dots \pm \dots$
1183^{a}	65 ± 5	8.3	-0.52	0.17	0.06	$\dots \pm \dots$	4.6	$\dots \pm \dots$	$\dots \pm \dots$
1250^{a}	80 ± 3	2.3	-0.05	0.08	0.03	0.11 ± 0.11	2.1	$\dots \pm \dots$	$\dots \pm \dots$
1261	57 ± 1	4.9	-0.61	0.05	0.01	$0.24 {\pm} 0.04$	2.8	0.40 ± 0.10	$0.24 {\pm} 0.06$
1308	45 ± 3	5.9	-0.75	0.09	0.02	$0.02 {\pm} 0.06$	2.9	$0.38 {\pm} 0.10$	$0.52 {\pm} 0.13$
1407^{a}	$\ldots \pm \ldots$					$\dots \pm \dots$		$\dots \pm \dots$	$\dots \pm \dots$
1422^{b}	50 ± 3	4.8	-0.40	0.03	0.01	$\ldots \pm \ldots$	3.3	±	±
1491^{a}	37 ± 8	7.4	-0.57	0.31	0.14	$\dots \pm \dots$	4.0	$\dots \pm \dots$	±
1514	48 ± 3	3.0	-0.64	0.09	0.07	$0.11 {\pm} 0.06$	1.7	$\dots \pm \dots$	±
1545^{b}	64 ± 4	8.3	-0.40	0.06	0.03	$\ldots \pm \ldots$	5.1	±	±
1743	±					$\dots \pm \dots$		$\ldots \pm \ldots$	$\ldots \pm \ldots$
1857	$\ldots \pm \ldots$					$\ldots \pm \ldots$		$\dots \pm \dots$	±
1871^{b}	65 ± 4	5.0	-0.14	0.06	0.03	$0.01 {\pm} 0.06$	4.2	±	±
2019	42 ± 3	3.5	-0.54	0.05	0.05	-0.04 ± 0.10	2.2	-0.19 ± 0.16	-0.15 ± 0.13
2048^{a}	39 ± 3	2.9	-0.45	0.10	0.04	-0.09 ± 0.13	1.9	±	±
2050	21 ± 5	4.5	-0.76	0.11	0.04	$0.03 {\pm} 0.09$	2.3	$0.20 {\pm} 0.16$	$0.23 {\pm} 0.19$

^а Данные из HyperLEDA FITS archive (OHP CARELEC).

 b IFU-спектроскопия (MPFS).



Рис. 2.21: Сравнение возрастов (слева) и металличностей (справа) в центральных частях галактик из анализа спектров SDSS DR6 и длиннощелевой спектроскопии. Различные значки соответствуют спектрам из HFA и проекта Palomar dE.

же из того же рисунка очевидно, что значения дисперсий скоростей, полученные из анализ голубых спектров обычно систематически превышают дисперсии скоростей, полученные из красных спектров, что вероятно связано с недостатками предложенного алгоритма анализа данных в режиме низких дисперсий скоростей, в случае если измеряемые величины дисперсий скоростей сравнимы или ниже, чем инструментальное спектральное разрешение. Наш кинематический анализ голубых спектров оказывается намного более точным, чем представленный в работе van Zee et al. (2004b). В центральных областях галактик наши профили хорошо согласуются с профилями, полученными из красных спектров в работе van Zee et al. (2004b), а во внешних частях мы обычно достигаем гораздо более высокого качества измерений, очевидных из меньшего разброса значений. Два исключения – VCC 956 и VCC 2050, где дисперсии скоростей слишком малы для их успешного измерения по голубым спектрам.

Профили кинематики для нескольких галактик из нашей выборки были представлены в литературе. Профили вращения для VCC 543 и VCC 1010, изображенные на Рис. 2 в работе Pedraz et al. (2002) хорошо согласуются с нашими данными, в то время как в VCC 1122 мы видим несколько большую амплитуду вращения. Дисперсии скоростей согласуются для всех трех объектов. Данные в работе Pedraz et al. (2002) были получены с помощью спектрографа IDS на 2.5-м Isaac Newton Telescope и имели спектральное разрешение ~2.5Å FWHM в голубом диапазоне длин волн, что очень похоже на данные, которые мы обсуждаем в нашей работе.

Семь галактик из нашей выборки (VCC 543, 856, 917, 1036, 1087, 1261 и 1308) наблюдались также со спектрографом Keck ESI, и анализ их кинематики был представлен в работах Geha et al. (2002, 2003). Данные имели существенно более высокое спектральное разрешение ($R \sim 10000$), но локализовались в центральных областях галактик (до 10 arcsec от центра) из-за сравнительно короткой щели. В целом, профили как лучевых скоростей, так и дисперсий скоростей согласуются для всех 7 галактик, но мы замечаем, что некоторые специфические детали (например, провалы в профилях σ) выглядят смазанными на данных ESI по сравнению с данными из проекта Palomar DS, хотя следовало бы ожидать обратного, поскольку качество изображения на Mauna Kea обычно лучше. В настоящее время мы не можем объяснить этот эффект, но мы можем предположить, что он связан с атмосферной дисперсией, которая будет иметь порядок нескольких секунд дуги для полного диапазона длин волн ESI. Ни в описании прибора, доступного онлайн, ни в работах Geha et al. (2002, 2003) нет никакого упоминания ни о корректоре атмосферной дисперсии, ни о том, как этот эффект учитывается в процессе анализа данных. Сравнивая формы профилей дисперсий скоростей для VCC 917, 1036 и 1261 с Рис. 5 в работе Geha et al. (2002) и Рис. 2–3 в работе Geha et al. (2003), мы понимаем, почему авторы не упомянули кинематически-выделенные ядра – они оказались смазанными.

В литературе отсутствует информация о пространственном распределении характеристик звездного населения для объектов из нашей выборки. Качественное сравнение интегральных параметров с работами Geha et al. (2003) и van Zee et al. (2004a), где результаты основаны на измерении Ликских индексов, дает хорошее согласие. Статистическое сравнение параметров звездных населений из нашей работы с другими выборками dE/dS0 будет дано в одной из следующих работ этой серии.

Информация по отдельным галактикам

Здесь мы кратко описываем результаты, полученные для каждой галактики. Во всех случаях, где была получена пространственно-разрешенная информация, описание проиллюстрировано профилями кинематики и звездных населений. Двумерные карты для четырех объектов приведены в предыдущих разделах.

VCC 178 = IC 3081 (Рис. 2.22). Сплюснутая карликовая галактика с ядром показывает значительное вращение и довольно плоский профиль дисперсии скоростей внутри 1 r_e . В работе Lisker et al. (2006b) не обнаружено вложенных структур в этом объекте: VCC 178 присутствует там в Appendix E. В галактике виден существенный градиент металличности. Распределение возраста вдоль радиуса изменяется довольно слабо от 7 Gyr до 11.5 Gyr на периферии.

VCC 389 = IC 781 (Рис. 2.23). Эта dE галактика с ядром возможно имеет вложенный диск (Lisker et al., 2006b). Она наблюдалась со спектрографом CARELEC с немного разными положениями щели. Оба ряда наблюдений имеют низкие отношения сигнал-шум, однако полученные профили звездных населений вдоль радиуса согласуются хорошо. Мы не обнаружили ни статистически значимой разницы звездного населения в ядре и внешних частях, ни градиента металличности.

VCC 437 = UGC 7399A (Рис. 2.22). В галактике наблюдается очень резкий градиент металличности на радиусах > 4 агсяес. Металличность на 1 r_e почти на 1 dex ниже, чем на 4 агсяес. Интересно, что примерно на расстоянии ~3 агсяес от центра, профиль цвета галактики g' - z', представленный в работе Ferrarese et al. (2006) меняет градиент, а также резко меняется эллиптичность изофот. Это указывает на присутствие вложенной структуры во внутренних частях галактики, которая в то же время не обнаруживается на нерезких масках изображения SDSS, что может объяснять ее ориентацией почти "плашмя". Этот объект – единственный, где возраст также значительно меняется по ра-



Рис. 2.22: Кинематика и звездные населения галактик VCC 178, VCC 437, VCC 543, и VCC 917 (данные Palomar DS). На четырех панелях для каждой галактики показаны (сверху вниз): лучевая скорость, дисперсия скоростей, SSP-эквивалентные возраст и металличность. Результаты анализа SDSS спектров показаны (если есть) серым кружком. Похиционные углы щели, а также значения минимального отношения сигнал-шум для адаптивного разбиения показаны сверху. Вертикальные пунктирные линии обозначают фотометрический центр и $\pm r_e$. Для VCC 543 серым цветом показаны точки, полученные из анализа данных с OHP CARELEC.



Рис. 2.23: Кинематика и звездные населения VCC 389, VCC 634, VCC 856 и VCC 1010 (данные OHP CARELEC). См. Рис. 2.22. Для VCC 389 разными символами показаны данные двух разрезов с немного отличающимися позиционными углами.

диусу – население становится старше во внешних частях, создавая эффект "конспирации" в широкополосных цветах в оптическом диапазоне, делая профили цвета плоскими.

VCC 490 = IC 783 (Рис. 2.8). Эта карликовая галактика с ядром показывает замечательные спиральные ветви в звездном диске (Вагаzza et al., 2002; Lisker et al., 2006b). Данные из HFA для этого объекта имеют слишком низкие отношения сигнал-шум вне ядерной области, поэтому параметры звездных населений не могут быть получены. Глубокие IFUнаблюдения этого объекта были проведены на БТА САО РАН с использованием MPFS в 2004-м году и представлены выше. Возраст ядра в VCC 490 составляет 3 Gyr, в то время как основной диск галактики старше 10 Gyr. В диске есть намек на крупномасштабное практически твердотельное вращение (Simien & Prugniel, 2002). Галактика находится на периферии скопления Дева, поблизости от яркой спиральной галактики M 100. Их лучевые скорости различаются всего на 270 km s⁻¹, что может указывать на принадлежность VCC 490 к группе M 100.

VCC 543 = UGC 7436 (Рис. 2.22). Эта сплюснутая галактика, поддерживаемая вращением, была объектом нескольких кинематических исследований, упомянутых выше. Это одна из трех галактик, где доступны данные как в проекте Palomar dE, так и в архиве HFA. Параметры кинематики и звездных населений согласуются между двумя рядами наблюдений. Профиль возраста в галактике плоский со средним значением около ~5.5 Gyr, в то время как металличность имеет небольшой градиент. В работе Lisker et al. (2006b) отмечается отсутствие вложенных структур в этой галактике.

VCC 545 = IC 783A В работе Lisker et al. (2006b) не указано наличие подструктур в этой слабой dE галактике с ядром. Отношение сигнал-шум данных HFA было слишком низким, поэтому мы приводим только интегральные характеристики звездного населения и среднюю дисперсию скоростей, которые согласуются со значениями, полученными путем аппроксимации спектра SDSS DR6. Галактика находился неподалеку от VCC 490 и M 100, и ее лучевая скорость близка к скорости VCC 490.

VCC 634 = NGC 4328 (Рис. 2.23). Эта сравнительно яркая карликовая галактика с ядром, поддерживаемая вращением, не содержит вложенных структур согласно работе (Lisker et al., 2006b). Мы видим население среднего возраста (3 Gyr) с достаточно высокой металличностью (-0.2 dex) без существенных изменений свойств внутри 1 r_e . Низкое отношение сигнал-шум не позволило нам определить поведение металличности на больших расстояниях от центра.

VCC 856 = IC 3328 (Рис. 2.23). Эта галактика была первым объектом типа dE/dS0, где были обнаружены низкоконтрастные спиральные ветви (Jerjen et al., 2000). Наши данные позволили нам определить параметры звездного населения до 1 r_e . Профиль возраста достаточно плоский со средним значением около 4 Gyr, в то время как распределение металличности показывает градиент. С данными, доступными в настоящий момент, мы не можем увидеть статистически значимой разницы между звездными населениями ядра и спирального диска.

 $VCC \ 917 = IC \ 3344$ (Рис. 2.22). В работе Lisker et al. (2006b) не были обнаружены подструктуры в VCC 917. Этот сплюснутый объект с очень небольшим вращением вдоль большой оси рассматиривался как один из примеров галактик, поддерживаемых анизотропным тензором дисперсий скоростей. Мы видим кинематически-выделенный центральный компонент радиусом порядка 3 arcsec (~0.25 kpc), контр-вращающийся по отношению к основному телу галактики. Он ассоциируется с провалом в профиле диспресии скоростей с ~40 до ~20 km s⁻¹ и молодым высокометалличным звездным нселением по сравнению с внешними частями галактики. Это первый пример кинематически-выделенного ядра в галактике, поддерживаемой анизотропным тензором дисперсий скоростей.

VCC 965 = IC 3363 (Рис. 2.24). В работе Lisker et al. (2006b) сообщается об отсутствии вложенных структур в этой сплюснутой галактике с ядром. Это один из нескольких случаев, где внутренняя дисперсия скоростей оказывается слишком низкой и не может быть измерена по нашим данным. Звездные населения в центральной области сильно отличаются от периферии галактики – ядро более молодое и высокометалличное. Профиль дисперсии скоростей этой галактики, полученный из красных спектров DS и представленный в работе van Zee et al. (2004b) показывает центральный провал.

 $VCC \ 990 = IC \ 3369$ (Рис. 2.24). В работе Lisker et al. (2006b) в этой сплюснутой галактике с ядром обнаруживается наклоненный диск. Внутри 1 r_e мы видим довольно сильный градиент металличности от -0.3 dex во внутренних частях до -0.8 dex во внешних, в то время как возраст остается примерно постоянным на уровне ~ 5 Gyr. Дисперсия скоростей имеет локальный минимум в центре, что также соответствует особенности в профиле лучевых скоростей. В невязках аппроксимации обнаруживаются слабые эмиссионные линии (H β , [OIII]), указывая на присутствие ионизованного газа в этой галактике.

VCC 1010 = NGC 4431 (Рис. 2.23). В этой сплюснутой галактике, поддерживаемой вращением, в работе Lisker et al. (2006b) были найдены бар и диск. Данные, доступные для этого объекта в архиве HFA, позволили нам проследить поведение параметров звездного населения до $r_e/2$. Как возраст, так и металличность имеют плоские профили без значительных изменений вдоль радиуса.

VCC 1036 = NGC 4436 (Рис. 2.24). Наклоненный диск отмечается в этой галактике в работе Lisker et al. (2006b). Практически твердотельное вращение до 1 r_e сменяется плоской кривой вращения на больших радиусах. Дисперсия скоростей остается постоянной вне 0.3 r_e на уровне ~50 km s⁻¹. Галактика содержит кинематически-выделенное ядро. Это один из объектов, где доступны данные как из проекта Palomar dE, так и из работы Simien & Prugniel (2002). Оба набора данных согласуются в присутствии KDC в центре. Однако, из-за худшего качества изображений в данных HFA вместо контрвращения мы видим плато в центре. В профиле дисперсии скоростей наблюдается небольшая депрессия в центральной области, соответствующей KDC. Она соответствует хорошо заметному максимуму в профиле металличности со значениями, достигающими [Fe/H]=0.0 для данных SDSS. Возраст в этой части (~3Gyr) оказывается на ~2 Gyr моложе, чем в окружающих областях. Металличность остается на постоянном уровне около -0.3 dex до радиуса 8 агсsec, а затем начинает резко спадать. Это единственный объект в нашей выборке, где центральное значение отношения α /Fe (-0.05 dex) сильно отличается от периферии (+0.17 dex).

VCC 1075 = IC 3383 (Рис. 2.24). Эта слабая сплюснутая галактика с ядром не содержит вложенных структур согласно работе Lisker et al. (2006b). Отношение сигнал-шум для данных довольно низкое, что затрудняет оценки поведения вариаций параметров звездного населения по радиусу. Однако, на текущем уровне точности мы не видим статистически значимых градиентов ни в возрасте, ни в металличности.

VCC 1087 = IC 3381 (Рис. 2.25). Эта сплюснутая карликовая галактика без вложенных (Lisker et al., 2006b) имеет очень низкое вращение, если оно вообще присутствует. Низкое отношение сигнал-шум затрудняет оценки поведения вариаций параметров звездного



Рис. 2.24: Кинематика и звездные населения VCC 965, VCC 990, VCC 1036 и VCC 1075 (данные Palomar DS). Для VCC 1036 также показаны измерения по данным OHP CARELEC. См. Рис. 2.22.

населения по радиусу. Мы отмечаем существенную разницу параметров из данных OHP CARELEC и SDSS DR6, что повидимому связано с эффектами качества изображения в данных HFA, которое размыло ядро галактики.

 $VCC\ 1122 = IC\ 3393$ (Рис. 2.26). Эта сильно сплюснутая галактика с недостаточным вращением, чтобы рассматриваться как поддерживаемая вращением система, не показывает вложенных структур, согласно работе Lisker et al. (2006b). Для этого объекта доступны данные из обоих проектов – Palomar dE и HFA. Профили кинематики хорошо согласуются. В профиле лучевых скоростей видна особенность в 2 агсяес к юго-востоку от ядра, однако в настоящий момент мы не можем ее интерпретировать однозначно как кинематически выделенный компонент. Свойства звездных населений были определены до расстояния 2 r_e по данным Palomar dE. Ядерная область VCC 1122 сильно выделяется в профилях как возраста, так и металличности. Мы также видим заметный градиент металличности, которого недостаточно для объяснения высокометалличного ядра. Возраст остается постоянным вдоль радиуса вне $r_e/2$. В невязках аппроксимации в центральных частях галактики заметны слабые эмиссионные линии Н β и [OIII].

VCC 1183 = IC 3413 (Рис. 2.25). Эта сплюснутая dE галактика с ядром содержит бар (Lisker et al., 2006b). Мы видим небольшое вращение. Низкое отношение сигнал-шум для наших данных не позволяет детально исследовать звездные населения, однако мы отмечаем средний возраст (~4 Gyr) и относительно высокую металличность (-0.3 dex) без видимых изменений вдоль радиуса.

 $VCC \ 1250 = NGC \ 4476$ (Рис. 2.25). Эта галактика содержит вложенный диск со спиральными ветвями, пылевые прожилки и области НІІ, хорошо видимые на изображениях с HST ACS, представленных в работе Ferrarese et al. (2006). Наши данные получены в области, где доминирует диск. Мы видим довольно сильные эмиссионные линии, связанные с текущим звездообразованием. Возраст галактики небольшой (2 Gyr), а металличность практически солнечная без заметных изменений вдоль радиуса. Абсолютная величина VCC 1250 в фильтре B (-18.27 mag) помещает этот объект на предел неформального разделения карликовых и средних галактик. Однако, в любом случае это галактика раннего типа низкой светимости, поэтому мы и включили ее в нашу выборку.

VCC 1261 = NGC 4482 (Рис. 2.26). Согласно работе Lisker et al. (2006b), галактика не содержит подструктур. Этот объект выглядит как увеличенная версия VCC 917, предоставляя еще один пример маленького вращающегося KDC в сплюснутом сфероиде с очень малым крупномасштабным вращением. Как и в VCC 917, здесь KDC ассоциируется с провалом в профиле дисперсий скоростей, молодым высокометалличным населением. В невязках аппроксимации мы видим слабые эмиссионные линии, указывающие на присутствие ионизованного газа в этом объекте.

VCC 1308 = IC 3437 (Рис. 2.26). Галактика была классифицирована как невращающаяся в работе Geha et al. (2003), но вращающаяся в работе van Zee et al. (2004b). Подструктуры в объекте не обнаруживаются (Lisker et al., 2006b). Мы видим некоторое вращение, хотя в центре профиль лучевых скоростей довольно пекулярен. Также в галактике имеется заметный градиент металичности. Звездное население в центральной части оказывается моложе, чем на периферии.

VCC 1407 = IC 3461 Слишком низкое отношение сигнал-шум не позволяет исследовать вариаций параметров звездного населения вдоль радиума. Однако мы отмечаем очень хорошее согласие оценок возраста и металличности для этого объекта, полученные из



Рис. 2.25: Кинематика и звездные населения VCC 1087, VCC 1183, VCC 1250 и VCC 1491 (данные OHP CARELEC). См. Рис. 2.22.



Рис. 2.26: Кинематика и звездные населения VCC 1122 (данные Palomar DS и OHP CARELEC), VCC 1261, VCC 1308 и VCC 1514 (данные Palomar DS). См Рис. 2.22.

анализа спектров HFA и SDSS DR6. В объекте не содержатся вложенные структуры. VCC 1422 = IC 3468 (Рис. 2.10). Вложенная структура, наблюдающаяся в этой галактике, интерпретирована как бар в работе Вагаzza et al. (2002) и как диск, видимый с ребра в работе Lisker et al. (2006b). IFU-спектроскопия показывает довольно сложную кинематику с признаками вращения только за пределами 5 arcsec от центра. Есть намек на то, что звездное население в области этого бара/диска немного моложе, чем на периферии объекта ($\sigma = 54 \pm 4$ km s⁻¹, t = 7.2 Gyr, [Fe/H]=-0.54 dex), однако разница находится на пределе обнаружения. VCC 1422 – единственная галактика из нашей выборки, где самый центр, где доминирует ядро, имеет более старое и низкометалличное население, чем окружающие его области бара/диска. Возраст ядра оказывается очень близким к внешним частям галактики.

VCC 1491 = IC 3486 (Рис. 2.25). В этом объекте не обнаруживаются подструктуры (Lisker et al., 2006b). Эта галактика без ядра имеет довольно сильное вращение для ее умеренной сплюснутости. Звездные населения старые (~8 Gyr) и бедны металлами (-0.6 dex) без заметных изменений параметров вдоль радиуса.

VCC 1514 = PGC 41726 (Рис. 2.26). Возможный наклоненный диск отмечается в этой сильно сплюснутой галактике в работе Lisker et al. (2006b). Возраст и металличность не показывают заметных изменений вдоль радиуса, хотя отношение сигнал-шум низкое.

VCC 1545 = IC 3509 (Рис. 2.11). Эта галактика была одна из первых, где мы нашли молодое население в центральных областях (Chilingarian et al., 2007е). Она имеет очень сложную кинематику: мы видим вращение по малой оси во внутренней части галактики без особенной депрессии в распределении дисперсий скоростей, в то время как вдоль большой оси также наблюдается заметное вращение. Звездное население центра галактики моложе и металличнее, чем в основном теле галактики.

VCC 1743 = IC 3602 Эта слабая сплюснутая карликовая галактика со слабым протяженным ядром, которое видно на изображениях HST ACS, но не заметно на наземных прямых снимках. Галактика присутствует в Appendix E работы Lisker et al. (2006b) как объект, "содержащий вложенные структуры, отличные от диска". Наши данные имеют низкое отношение сигнал-шум, поэтому мы не смогли получить детальные профили звездных населений. Однако, вне ядра галактики возраст населения старый (~10 Gyr), а металличность довольно низкая (-0.6 dex).

 $VCC \ 1857 = IC \ 3647$ Самый слабый объект из выборки Palomar dE, который не содержит подструктур (Lisker et al., 2006b). Отношение сигнал-шум недостаточно даже для точных интегральных определений параметров звездных населений, однако на уровне 1- σ мы можем сказать, что возраст звезд в галактике не превосходит 7 Gyr.

VCC 1871 = IC 3653 Наклоненный звездный диск был открыт в поле скоростей этой галактики в работе Chilingarian et al. (2007d), который также виден на картах цвета. Галактика имеет довольно высокую поверхностную яркость, распределение возраста практически однородное, в то время как наблюдается заметный пик в карте металличности со значением, несколько превосходящим солнечное.

VCC 2019 = IC 3735 (Рис. 2.27). "Возможный наклоненный диск, возможно искривленный или деформированный" описан в этой галактике в работе Lisker et al. (2006b). Изофоты показывают изменение эллиптичности и позиционного угла (Ferrarese et al., 2006). Мы видим центральный пик в распределении металличности и соотвествтующий ему провал в профиле дисперсии скоростей, в то время как качество определения возрастов недоста-

точно для уверенных выводов о разницах населений я ядре и внешних частях. Мы видим заметный градиент металличности. В невязках аппроксимации видны слабые эмиссионные линии (H β and [OIII]).

 $VCC \ 2048 = IC \ 3773$ (Рис. 2.27). В работе Lisker et al. (2006b) отмечается наличие бара или диска, видимого с ребра. Галактика имеет ядро и сильно сплюснута. Ее внутренняя область, соответствующая диску, показывает твердотельное вращение и выглядит кинематически выделенной по отношению к внешним частям, вращающимся в том же направлении, что напоминает структуры, найденные в работе De Rijcke et al. (2004) в двух dE галактиках в группах. Виден отчетливый провал в профиле дисперсии скоростей. Звездные населения не показывают существенных изменений вдоль радиуса за исключением небольшой области в 4 arcsec к северу от ядра, где металличность возрастает на ~0.3 dex по сравнению с соседними областями. В настоящий момент мы не можем дать объяснение этой детали, но она может быть связана, к примеру, с шаровым скоплением, которое может попадать на щель.

VCC 2050 = IC 3779 (Рис. 2.27). Возможный наклоненный диск был найден в этой галактике в работе Lisker et al. (2006b). Наблюдаемая дисперсия скоростей слишком низка для того, чтобы быть измеренной по нашим данным. В галактике наблюдается значительный градиент металличности, в то время как отношение сигнал-шум не достаточно высоко для выявления вариаций в распределении возраста. Звездное население центральной части довольно молодое, и мы сидим слабые эмиссионные линии в невязках аппроксимации.

2.4.4 Заключение и выводы

Мы представили первую большую выборку радиальных профилей параметров звездных населений в карликовых галактиках ранних типов, полученных с помощью анализа новым методом опубликованных спектральных данных. Благодаря использованию методики NBURSTS, мы улучшили определение звездной кинематики по сравнению с работой van Zee et al. (2004b), достигнув сравнимое качество результатов с работами Geha et al. (2002, 2003), но обычно на намного больших радиусах от центра, часто далее 1 r_e . Мы провели анализ звездных населений в спектрах, для которых до этого были опубликованы только кинематические измерения (Simien & Prugniel, 2002). Наши измерения параметров звездных населений в ядрах галактик находятся в хорошем согласии с результатами анализа архивных спектров SDSS DR6.

Часто в dE/dS0 галактиках наблюдаются значительные градиенты металличности, хотя в некоторых объектах распределение металличности по радиусу остается постоянным. Имеется тенденция к дихотомии в распределении градиентов металличности – профили либо практически плоские, либо очень крутые вплоть до -0.9 dex r_e^{-1} в VCC 437. Ни в одном из случаев мы не видим статистически значимого положительного градиента. Распределение возраста вдоль радиуса обычно плоское. Если и существуют градиенты возраста, то с текущими данными мы не можем их уверенно измерить.

Уровень обогащения α -элментами, полученный из анализа Ликских индексов не показывает значительных изменений ни вдоль радиуса, ни в ядрах по сравнению с основными дисками/сфероидами ни в одном объекте, за исключением VCC 1036, где в центральной части значение практически солнечное ([Mg/Fe]=-0.05 dex), а во внешних частях оно остается на уровне +0.17 dex вдоль радиуса вплоть до 1.2 r_e .



Рис. 2.27: Кинематика и звездные населения VCC 2019 (данные Palomar DS), VCC 2048 (данные OHP CARELEC) и VCC 2050 (данные Palomar DS). См. Рис. 2.22.

Звездные населения в областях ядер обычно существенно более высоко-металличные, чем во внешних частях, и центральные значения металличности выше, чем можно ожидать из экстраполяции градиента металличности к центру. Значительная доля галактик (11 из 27) показывает более молодые возрасты населения в ядрах по сравнению с внешними частями, превышая 7 Gyr в случаях VCC 917 и VCC 490.

Эти химически и эволюционно выделенные ядерные области всегда ассоциируются с провалами в профилях дисперсий скоростей. Только в тех случаях, где дисперсии скоростей слишком малы, чтобы быть надежно измеренными с нашими данными, провалы σ не наблюдаются. Во всех этих случаях отношение масса–светимость сильно изменяется вдоль радиуса, указывая на неправомерное использование динамических моделей с постоянным M/L.

В некоторых объектах (VCC 990, 1122, 1250, 1261, 2019 и 2050) мы обнаружили слабые эмиссионные линии (Н β , [OIII]) в центральных областях, связанные с химически и эволюционно выделенными ядрами.

Мы обнаружили четыре кинематически-выделенных вращающихся ядра в ярких галактиках из нашей выборки (VCC 917, 1036, 1261 и 1545), два из которых (VCC 917 и 1261) содержатся в галактиках с очень слабым крупномасштабным вращением по большой оси. Во всех случах KDC связаны в молодым высокометалличным населением и провалом в профиле дисперсии скоростей.

В заключение отметим, что мы видим замечательное совпадение внутренней структуры dE/dS0 галактик и галактик ранних типов промежуточных и больших масс. Некоторые галактики низкой светимости после проведения детального анализа оказываются похожими на уменьшенные версии более ярких объектов (например, VCC 917/1261 и NGC 5813, VCC 1545 и NGC 4365), указывая возможные сходства между сценариями их эволюции. Некоторые физические процессы, например крупные слияния и секулярная эволюция, обычно рассматриваются в применении к гигантским галактикам. Мы должны пересмотреть их роль и применимость для объяснения эволюции dE/dS0 галактик.

Глава 3

Компактные эллиптические и ультракомпактные галактики

На диаграмме средняя поверхностная яркость – абсолютная звездная величина, а также на Фундаментальной плоскости (FP, Djorgovski & Davis, 1987), карликовые и гигантские галактики формируют две отдельные последовательности, соединяющиеся в районе $M_B = -18$ mag (см. Kormendy et al., 2009 и ссылки там). Однако, это бимодальное распределение может быть объяснено как проекция двух известных монотонных зависимостей других структурных параметров галактик ранних типов как функций их светимости: (а) индекса концентрации профиля яркости и (b) центральной поверхностной яркости (Graham & Guzmán, 2003; Hilker et al., 2003; Karick et al., 2003; Ferrarese et al., 2006). Только объекты, классифицированные как компактные эллиптические (cE) и ультракомпактные карликовые (UCD, Mieske et al., 2002; Drinkwater et al., 2003) галактики сильно отстоят от этих зависимостей.

Они представляют собой два класса галактик, предположительно формирующихся путем приливного обдирания более массивных объектов (Bekki et al., 2001b, 2003), т.е. в какой-то момент их эволюции они должны были резко уменьшить свои звездные массы. Оба класса представлены всего несколькими десятками известных членов, включая недавно открытые объекты переходного типа (Chilingarian & Mamon, 2008; Price et al., 2009). Поскольку все эти объекты очень маленькие и плотные, для поддержания их в равновесии требуются гораздо более высокие значения внутренних дисперсий скоростей по сравнению с карликовыми эллиптическими и сфероидальными галактиками схожих светимостей, таким образом cE/UCD галактики лежат над последовательностью dEs на зависимости (Faber & Jackson, 1976). Звездные населения сЕ и UCD галактик разительным образом отличаются от типичных dE/dSph – они очень старые (за редкими исключениями такими как Messier 32) и существенно более богатые металлами.

Компактные эллиптические галактики – объекты высокой поверхностной яркости и низкой светимости, имеющие малые эффективные радиусы, такие как М 32 – прототип класса сЕ. Обычно они на порядок меньше в линейных размерах, чем dE галактики сходных светимостей. Компактные эллиптические галактики представляют собой очень редкий класс объектов, до последнего времени включавший всего 5 подтвержденных членов. Все они находятся в окрестностях массивных галактик в группах (как М 32 и NGC 5846A) или сD галактик в скоплениях (как NGC 4486B), либо в центральных областях богатых скоплений галактик, как 2 сЕ в Abell 1689 (Mieske et al., 2005). Глобальные структурные свойства помещают их на продолжение зависимости Корменди (1977), построенной для гигантских эллиптических галактик и балджей, в область меньших эффективных радиусов. В то же время, их внутренние дисперсии скоростей оказываются существенно выше, чем у карликовых эллиптических галактик, помещая их над последовательностью на диаграмме Faber & Jackson (1976).

Галактики этого класса показывают достаточно необычные свойства звездных населений: их металличности намного выше чем ожидается для их светимости; за исключением М 32, их звезды обычно очень старые и отношение α /Fe существенно выше солнечных Sánchez-Blázquez et al., 2006d;C07a). Комбинация их кинематики и звездных населений поддерживают сценарий приливного обдирания более массивных галактик (Nieto & Prugniel, 1987; Choi et al., 2002). Новый класс компактных карликовых галактик, называемых ультракомпактные карликовые галактики (UCD), был открыт около 10 лет назад в скоплении Печь (Hilker et al., 1999; Drinkwater et al., 2000; Phillipps et al., 2001). Эти объекты оказались намного крупнее шаровых скоплений, но все же довольно далеки от карликовых эллиптических и компактных эллиптических галактик. Они заполняют пустую область на фундаментальной плоскости (Djorgovski & Davis, 1987). Их происхождение не до конца понятна. До сих пор рассматриваются несколько альтернатив: (1) UCD являются результатом эволюции первичных флуктуаций плотности (Phillipps et al., 2001); (2) они формируются путем слияния шаровых скоплений или просто представляют собой экстремально яркий конец функции светимости шаровых скоплений (Mieske et al., 2002); (3) UCD – ядра карликовых эллиптических галактик (dE,N), ободранных приливными силами (Bekki et al., 2003) или dE,Ns с очень низкой поверхностной яркостью; (4) UCD формируются как приливные суперскопления в процессе слияния галактик (Fellhauer & Kroupa, 2005; Kissler-Patig et al., 2006).

UCD занимают область на фундаментальной плоскости между последовательностями шаровых скоплений и dE галактик (Drinkwater et al., 2003). На настоящий момент структурные и динамические свойства, а также звездные населения ярчайших и самых массивных UCD достаточно далеки от свойств компактных эллиптических галактик. Отношения массы к светимости UCD довольно сильно отличаются от объекта к объекту (Drinkwater et al., 2003; Haşegan et al., 2005; Hilker et al., 2007), указывая на присутствие темной материи в некоторых из них Hasegan et al. (2005) предлагают использовать отношение M/L (т.е. присутствие темной материи) как критерий различия между UCD галактиками и массивными шаровыми скоплениями. Развивая эту идею, мы приходим к выводу, что присутствие темной материи в компактной звездной системе отметает 2 сценария формирования – в этом случае UCD не могут считаться шаровым скоплением и они не могут быть сформированы как приливные сверхскопления в процессе слияния галактик. С другой стороны, если звездное население не старое и не бедное металлами, то сценарий первичных флуктуаций плотности также становится маловероятным, оставляя единственным каналом формирования UCD приливное обдирание карликовых эллиптических галактик.

Анализ звездных населений также может помочь в выборе сценария. Данные, опубликованные к настоящему моменту (Mieske et al., 2006; Evstigneeva et al., 2007а), основанные на анализе интенсивностей абсорбционных линий (Ликские индексы) Worthey et al., 1994), указывают на то, что UCD – старые и достаточно бедные металлами.

3.1 Звездные населения 6 ультракомпактных карликовых галактик в скоплении Печь (анализ архивных данных)

Результаты, представленные в данном разделе, опубликованы в работе Chilingarian et al. (2008c).

В этом разделе мы представляем анализ спектров 6 UCD галактик в скоплении Печь, сравниваем их с ядрами карликовых эллиптических галактик, определяем звездные массы и проверяем их на наличие темной матрии в предположении различных начальных функций масс звезд.

3.1.1 Данные: источники данных, редукция, анализ

Мы используем данные, полученные в рамках двух независимых исследований компактных звездных систем в скоплении Печь научными группами G. Bergond et al. (program 074.A-0756) и M. Drinkwater et al. (program 074.A-0508). Данные из обоих исследований публично доступны через наблюдательный архив ESO. Наблюдения проводились с телескопом ESO VLT, используя спектрограф FLAMES/Giraffe (Pasquini et al., 2002) в мультиобъектном режиме "MEDUSA" (130 световодов в круглом поле зрения диаметром 25 arcmin), в режиме LR04 дающем спектральное разрешение $R \approx 6300$ в диапазоне длин волн 5010–5831 Å (дисперсия 0.2 Å pix⁻¹, $\sigma_{inst} \approx 18 \text{ km s}^{-1}$), и обработаны точно таким же образом как данные для скопления Abell 496 (см. Главу 2). Световоды FLAMES/Giraffe диаметром 1.2 arcsec соответствуют пространственному масштабу 110 рс на расстоянии скопления Печь (19 Mpc), оказываются существенно больше, чем типичные эффективные радиусы UCD (Evstigneeva et al., 2007а). Таким образом, наши измерения параметров звездных населений и дисперсий скоростей, описанные ниже, должны рассматриваться как глобальные значения (см. дискуссию насчет апертурных коррекций в Mieske et al., 2008).

В результате наблюдений центральной части скопления Печь были получены порядка 900 индивидуальных спектров (см. детали насчет наблюдений в работах Bergond et al., 2007 и Firth et al., 2007). Мы просмотрели их визуально и отобрали спектры с достаточно высокими отношениями сигнал-шум, не являющиеся галактиками поля; спектры одних и тех же объектов в двух исследованиях были сложены.

В результате мы получили список, включающий порядка 40 спектров звезд Млечного Пути и членов скопления Fornax: шаровых скоплений, UCD, dE и гигантских галактик. Здесь мы представляем анализ для 6 UCD и двух ядер dE галактик (FCC 182 и FCC 266). Наша выборка представлена в таблице 3.1.

Мы аппроксимировали наши спектры моделями PEGASE.HR точно так же, как спектры галактик скопления Abell 496 (см. Главу 2). Единственная разница заключается в том, что мы использовали модели звездных населений для двух разных начальных функций масс: Salpeter (1955) и Kroupa et al. (1993). Мы используем 2 сетки модельных спектров (далее Salpeter и Kroupa SSP) абсолютно независимо друг от друга и проводим сравнение полученных результатов.

Ключевой момент для точного определения низких дисперсий скоростей путем анализа абсорбционных спектров является знание инструментального контура спектрографа как функции длины волны и номера световода. Мы обнаружили, что вариации разрешения от

Таблица 3.1: Окончательная выборка UCD и dE. Колонки (2) и (3) – обозначения согласно работам Bergond et al. (2007); Evstigneeva et al. (2007а); (4) – (7) – количество индивидуальных экспозиций и общее время экспозиции (в секундах) в двух наблюдательных программах (Bergond et al. и Drinkwater et al.), (8) – примерные отношения сигнал-шум на пиксель на $\lambda = 5300$ Å для суммарных сцектров

па	пиксель на /	1 - 0000	т дли	а сумма	рпыл	UTERI	ров
n	ID_B	ID_E	$n_{\rm B}$	$t_{\rm B},{ m s}$	$n_{\rm D}$	$t_{\rm D},{ m s}$	S/N
1	ucd257.5	UCD1	3	10200	3	7200	19
2	ucdA	UCD2	3	10200	-	-	9
3		UCD3	-	-	3	6600	15
4	ucdB	UCD4	2	7200	3	6600	13
5		UCD5	-	-	3	6000	9
6	ucd329.7		3	11200	-	-	15
7	FCC182		3	10200	-	-	40
8	FCC266		3	9704	-	-	17

световода к световоду в режиме "MEDUSA" спектрографа FLAMES/Giraffe пренебрежимо малы, в то время как зависимость от длины волны необходимо учитывать.

Мы использовали моделирование Монте-Карло, чтобы исследовать точность определения параметров кинематики звездных населений нашим методом анализа для объектов, имеющих очень низкие внутренние дисперсии скоростей, близкие к значению инструментального разрешения спектрографа и даже ниже. Мы использовали две SSP модели PEGASE.HR возрастом 10 Gyr и [Fe/H] = -1.0 и -0.3 dex, и расширили их, используя информацию о спектральном разрешении FLAMES/Giraffe в режиме LR04. Затем мы сформировали наборы модельных данных (20 реализаций для каждого набора параметров). Для отношения сигнал-шум 5, 10, 20 и 30, и для внутренних дисперсий скоростей 6, 8, 10, 15 и 20 km s⁻¹, таким образом получив 800 модельных спектров, которые затем анализировались NBURSTS. Результаты приведены в Рис 3.1.

Наше моделирование показывает, что: (1) FLAMES/Giraffe-LR04 достаточен для измерения внутренних дисперсий скоростей до 8–10 km s⁻¹ на отношении сигнал-шум 20 с точностью 10–15 per cent даже для низкометалличных объектов ([Fe/H] = -1.0); (2) для богатых металлами объектов ([Fe/H] = -0.3) мы достигаем вдвое лучшего качества определения дисперсии скоростей. Мы отмечаем, что ошибки определения возраста, металличности и лучевой скорости, которые получены из процедуры нелинейной минимизации, соответствуют значениям, полученным по результатам Монте-Карло моделирования.

3.1.2 Результаты

В таблице 3.2 представлены значения гелиоцентрических скоростей, дисперсии скоростей, SSP-эквивалентные возрасты и металличности, а также звездные отношения массы к светимости в фильтре *B* для 6 UCD и двух ядер dE галактик, рассчитанные для двух звездных начальных функций масс, упомянутых выше. Для некоторых объектов мы приводим сравнение результатов с литературой. Абсолютные величины для UCD 1-5 взяты из работы Evstigneeva et al. (2007а) и переведены в фильтр *B*, значения для ucd329.7 из Bergond et al. (в работе), а для FCC 182 и FCC 266 – из работы Karick et al. (2003). Значения дисперсий скоростей ($\sigma_{\rm lit}$) для UCD 1-5 принятые "глобальные дисперсии скоростей" из



Рис. 3.1: Точность определения лучевых скоростей с помощью метода NBURSTS для данных FLAMES/Giraffe-LR04, полученная из Монте-Карло моделирования для различных отношений сигнал-шум, внутренних дисперсий скоростей и металличностей. 5 кривых соответствуют дисперсиям скоростей от 6 до 20 km s⁻¹.

таблицы 6 в работе Hilker et al. (2007); металличности $[Fe/H]_{lit}$ для UCD 2, 3 и 4 – из работы Mieske et al. (2006).

На Рис. 3.2 обсуждаемые спектры изображены вместе с их наилучшими модельными аппроксимациями. Внутренние панели показывают уровни значимости оценок возраста и металличности для начальной функции масс Kroupa et al. (1993).

Дисперсии скоростей для 5 из 6 UCD заключены между 23 и 30 km s⁻¹, что выше, чем типичные значения для шаровых скоплений (например, Evstigneeva et al., 2007a).

Можно заметить превосходное согласие наших измерений дисперсий скоростей для 5 UCD и глобальных дисперсий скоростей из работы Hilker et al. (2007), полученных с использованием совершенно других инструментов (VLT UVES, Keck ESI для UCD1) и ме-

Таблица 3.2: Кинематика, звездные населения и звездные отношения масса–светимость в фильтре B для 6 UCD и 2 dE (n = 7, 8) в скоплении Печь. Колонки (5)–(7) и (8)–(10) для SSP-моделей, рассчитанных с начальными функциями масс Солпитера и Крупы соответственно.

n	M_B	$v_{\rm hel}$	σ	$t_{\rm Salp.}$	$[Fe/H]_{S.}$	$(M/L)_{*B}$	$t_{ m Kroupa}$	$[Fe/H]_{K}$	$(M/L)_{*B}$	$\sigma_{ m lit}$	$[Fe/H]_{lit}$
	mag	${ m km}{ m s}^{-1}$	${\rm km}{\rm s}^{-1}$	Gyr	dex	Salpeter	Gyr	dex	Kroupa	$\rm km \ s^{-1}$	dex
1	-11.39	1557 ± 1	29 ± 1	9.1 ± 2.4	-0.46 ± 0.04	5.2 ± 1.3	13.1 ± 3.1	-0.51 ± 0.07	3.8 ± 0.9	27 ± 2	
2	-11.47	1230 ± 1	$_{23\pm2}$	$5.0 {\pm} 1.7$	-0.24 ± 0.07	3.8 ± 1.3	$5.0 {\pm} 1.9$	-0.23 ± 0.08	$2.3 {\pm} 0.8$	22 ± 2	-0.90
3	-12.77	1500 ± 1	26 ± 1	13.0 ± 2.5	-0.23 ± 0.05	8.6 ± 1.5	$17.6 {\pm} 2.7$	-0.22 ± 0.05	6.3 ± 1.1	23 ± 3	-0.52
4	-11.65	1889 ± 1	26 ± 1	8.1 ± 2.4	-0.67 ± 0.06	4.0 ± 1.1	9.9 ± 3.7	-0.68 ± 0.07	$2.6 {\pm} 0.9$	25 ± 3	-0.85
5	-11.19	1280 ± 2	16 ± 3	$3.9{\pm}0.9$	-0.95 ± 0.04	$1.8 {\pm} 0.4$	$3.9 {\pm} 0.9$	-0.93 ± 0.04	1.1 ± 0.3	19 ± 3	
6	-10.78	1379 ± 1	28 ± 1	11.2 ± 2.4	-0.30 ± 0.04	7.1 ± 1.4	$14.0 {\pm} 4.0$	-0.33 ± 0.08	4.8 ± 1.3		
7	-16.50	1700 ± 1	38 ± 1	$6.8 {\pm} 0.5$	-0.10 ± 0.02	$5.6 {\pm} 0.5$	$8.0 {\pm} 0.7$	-0.13 ± 0.01	$3.6 {\pm} 0.2$		
8	-15.40	1551 ± 1	19 ± 1	$1.8 {\pm} 0.3$	-0.24 ± 0.02	$1.4 {\pm} 0.3$	2.4 ± 0.4	-0.30 ± 0.02	1.2 ± 0.2	22 ± 7^{1}	-0.47^2

¹Центральное значение дисперсии скоростей, предоставленное S. De Rijcke (частное сообщение) ниже, чем глобальное значение (44 km s⁻¹) из работы De Rijcke et al. (2005).

²Оценка металличности из аппроксимации спектра, полученного на VLT FORS1 (Michielsen et al., 2007).



Рис. 3.2: Спектры FLAMES/Giraffe, их наилучшие модели (Kroupa IMF), невязки аппроксимации и уровни значимости для определений возраста и металличности (внутренние панели) для 6 UCD и 2 dE с ядрами. Все графики сглажены скользящим средним с окном 7 пикселей для улучшения восприятия.

тодов анализа данных.

Звездные населения UCD1, UCD3, UCD4 и ucd329.7 старше 8 Gyr и показывают металличности от -0.67 до -0.23 dex. UCD2 имеет средний возраст и достаточно богатое металлами звездное население, хотя ошибки определения параметров велики. Наши оценки металличностей для UCD3 и UCD4 немного выше (0.2–0.25), чем значения, приведенные в работе Mieske et al. (2006), но разница еще больше для UCD 2 (≈ 0.65 dex).

Спектр UCD5 не содержит сильных абсорбционных линий в спектральном диапазоне FLAMES/Giraffe LR04, поскольку триплет Mgb содержит след попадания космической частицы на ПЗС. Это вызывает большую неточность в определении параметров звездных населений: контур значимости на уровне 3 σ оказывается открытым в направлении возраста, т.е. возраст не может быть определен. Глобальный минимум χ^2 соответствует молодому населению (t = 1.2 Gyr, [Fe/H] = -0.49 dex). Также имеется вторичный минимум на уровне 1.7σ (t = 3.9 Gyr, [Fe/H] = -0.95 dex). Для того, чтобы выбрать одно из двух возможных решения для UCD5 мы обработали и аппроксимировали его спектр полученный в синем диапазоне LR02 спектрографа FLAMES/Giraffe с покрытием длин волн от 3970 Å до 4545 Å. Довольно низкая эффективность спектрографа в этом режиме хорошо компенсируется голубым цветом объекта и присутствием очень сильных абсорбционных линий (Ca I "H", G-полоса, $H\gamma$), чувствительных к возрасту и металличности. Аппроксимация данных в режиме LR02 дает результаты для параметров звездных населений, соответствующих вторичному минимум у в диапазоне LR04, таким образом поэтому мы используем это решение, соответствующее бедному металлами среднему возрасту.

Аппроксимация с использованием моделей для начальной функции масс Kroupa дает несколько более высокие возрасты для промежуточных и старых звездных населений, в то время, как металличности и дисперсии скоростей остаются такими же, как и для функции масс Salpeter. Отношения массы к светимости оказываются на 40–50 per cent ниже, чем для функции масс Salpeter. Этот эффект легко понять, принимая во внимание то, что звездные населения с начальной функцией масс Salpeter содержат большее количество слабых красных карликов практически не вносящих вклад в общую светимость, но увеличивающих массу. Таким образом, SSP модели для функции масс Kroupa должны быть несколько старше, чтобы аппроксимировать "красные" спектры.

3.1.3 Обсуждение

Сравнение звездных и динамических масс

Зная значения параметров звездных населений и светимости, мы рассчитали звездные массы UCD в нашей выборке. Эти оценки, полученные из моделей PEGASE.2 (Fioc & Rocca-Volmerange, 1997) для начальных функций масс Salpeter и Kroupa даны в Таблице 3.3. В четвертой колонке мы приводим исправленные динамические массы, рассчитанные путем ренормализации значений из работы Hilker et al. (2007) с использованием наших измерений дисперсии скоростей ($M_{\rm d,corr} = M_{\rm d} (\sigma/\sigma_{\rm lit})^2$). Пятая и шестая колонки содержат доли темной материи, полученные из сравнения динамических масс со звездными для двух начальных функций масс.

Для UCD1, 2, 4 и 5 звездные масс, рассчитанные для начальной функции масс Salpeter, совпадают с динамическими массами в пределах ошибок, хотя в среднем звездным массы несколько ниже. Начальная функция масс Kroupa уменьшает их еще, что приводит к

Таблица 3.3: Сравнение звездных масс 6 UCD для начальных функций масс Солпитера
(2) и Крупы (3); динамические массы 5 объектов (5) из работы Hilker et al. (2007), ис-
правленные с учетом наших измерений дисперсий скоростей, (6)–(7) содержание темной
материи (в процентах) для начальных функций масс Солпитера и Крупы.

n	$M_{* \text{Salp.}}$	$M_{*\rm Kroupa}$	$M_{\rm d,corr}$	$\mathrm{DM}_{\mathrm{S.}}$	$\mathrm{DM}_{\mathrm{K.}}$
	$10^7 M_{\odot}$	$10^7 M_{\odot}$	$10^7 M_{\odot}$	%	%
1	$2.9{\pm}0.7$	$2.1{\pm}0.5$	$3.7 {\pm} 0.5$	20	45
2	$2.3 {\pm} 0.8$	$1.4{\pm}0.5$	$2.4{\pm}0.3$	0	40
3	$17.5 {\pm} 3.0$	$12.8 {\pm} 2.2$	12.0 ± 2.4	-45	0
4	$2.9{\pm}0.8$	$1.9{\pm}0.6$	$4.0 {\pm} 1.0$	30	50
5	$0.9{\pm}0.2$	$0.5 {\pm} 0.1$	$1.4{\pm}0.5$	35	65
6	2.3 ± 0.4	$1.6{\pm}0.4$			

значениям 40–50 per cent (65 для UCD5) в верхних пределах на содержание темной материи. Однако для UCD3 звездная масса, рассчитанная с использованием модели Salpeter оказывается существенно выше динамической оценки (отрицательное значение доли темной материи), в то время как функция масс Kroupa дает практически идеальное согласие между звездной и динамической массами, указывая на отсутствие темной материи. Таким образом, если мы принимаем отсутствие вариаций функции масс от объекта к объекту, наблюдения поддерживают начальную функцию масс Kroupa.

Существует возможность, что динамическая модель UCD3, использованная в работе Hilker et al. (2007) была не совсем корректной (например, (1) внешний компонент UCD3 не является сферически симметричным или (2) в объекте присутствует существенное вращение, или (3) тензор дисперсии скоростей анизотропен), что может привести к недооценке динамической массы. В то же время мы не можем исключить, что SSP модели не являются хорошим представлением спектра (к примеру, объект содержит высокометалличное население, которое плохо моделируется). В этом случае звездные массы могут быть переоценены.

С учетом больших ошибок параметров звездных населений и, соответственно, звездных отношений масса-светимость, мы не можем дать однозначный ответ на вопрос "Есть ли темная материя в UCD галактиках?" Однако основной вывод, который мы можем сделать – это то, что UCD не являются объектами, масса которых доминируется присутствием темной материи, и на текущем этапе темная материя, содержащаяся в UCD может быть объяснена неточностями измерений и/или моделей, используемых для определения дина-мических и звездных масс.

Зависимость металличность- M_B и металличность- σ

На Рис. 3.3 показаны металличности, дисперсии скоростей и светимости 6 UCDs и 2 dE в скоплении Печь из нашей выборки. Они сравниваются с: (а) шаровыми скоплениями Млесного Пути из работы McLaughlin & van der Marel (2005), обведенные крестики указывают на шаровые скоплениями с прямыми свидетельствами сложных звездных населений, полученных из анализа диаграмм цвет-величина; (b) dE и карликовые сфероидальные галактики из работы Mateo (1998); (с) галактики низкой светимости из скопления Abell 496 (Глава 2); (d) выборка гигантских галактик ранних типов и галактик средней светимости



Рис. 3.3: Соотношения металличность-дисперсия скоростей и металличность-светимость для галактик ранних типов, UCD и шаровых скоплений. Источники данных приведены в тексте. Обведенные крестики соответствуют Галактическим шаровым скоплениям с мно-гокомпонентными звездными населениями.

из работы Sánchez-Blázquez et al. (2006с,b); двумя компактными звездными системами в скоплении Virgo со спектрами, доступными в обзоре SDSS DR6 (Adelman-McCarthy et al., 2008): переходным объектам "M59cO" (Chilingarian & Mamon, 2008) и VUCD 7, данные для которого анализировались точно так же, как для M59cO. Размер апертуры для галактик из скопления Abell 496 порядка 0.8 kpc, то есть ядра dE галактик не вносят значительного вклада, таким образом металличности и дисперсии скоростей будут ближе к глобальным, чем к центральным значениям, если предположить практически плоские профили дисперсии скоростей, обычно наблюдаемые в dE галактиках (Simien & Prugniel, 2002; Geha et al., 2003; van Zee et al., 2004b).

На соотношении металличность-светимость (Рис. 3.3, правый график) наблюдается единая последовательность $Z \sim L_B^{0.45}$, покрывающая более 6 порядков величины по светимости, сформированная галактиками ранних типов от слабейших dSph слева до ярчайших эллиптических галактик в скоплениях справа. UCD лежат существенно выше (0.7–1.0 dex) этой последовательности по сравнению с ярчайшими dSph в Локальной Объеме, имеющими похожие светимости (см. Mateo, 1998 и ссылки в ней). В этом UCD оказываются похожими на сЕ галактики, имеющие высокие металличности для их светимостей, которые вероятно представляют собой конечные продукты приливного обдирания галактик (Bekki et al., 2001a).

В то же время, на зависимости металличность-дисперсия скоростей (Рис. 3.3, левая панель) UCD располагаются практически там же, где dE галактики. Мы рассматриваем это как аргумент для сценария приливного обдирания dE,N как способа создания UCD. В этом случае дисперсия скоростей компактного ядра не изменится сильно, в то время как общая светимость упадет на несколько звездных величин.

Для сравнения с массивными шаровыми скоплениями (McLaughlin & van der Marel, 2005) мы выбрали подвыборку шаровых скоплений в Галактики с доступными измерения-
ми дисперсии скоростей. Многие шаровые скопления следуют поведению галактик ранних типов. 3 объекта с наибольшими отклонениями: NGC 104, NGC 6388, and NGC 6441, также, как UCD, лежат существенно выше последовательности галактик ранних типов на соотношении металличность–светимость (Рис. 3.3). Отметим, что два из них показывают прямые свидетельства наличия нескольких звездных населений. Среди трех других шаровых скоплений (NGC 1851, NGC 2808, ω Cen), демонстрирующих композитные звездные населения, только ω Cen следует зависимости, формируемой галактиками ранних типов. Мы отмечаем, что третий объект, сильно отклоняющийся от нее, 47 Tuc (NGC 104), будучи по крайней мере столь же массивным, как NGC 6388, не показывает очевидной двойной главной последовательности.

В рамках сценария приливного обдирания мы можем также предложить объяснение большому разбросу металличностей (-0.25 to -0.93) на диаграмме [Fe/H] vs. σ . Он может являться комбинацией двух факторов: (1) сравнительно высоким разбросом металличности dE – прародителей UCD в связи с их собственной эволюцией под воздействием окружения (см. дискуссию Chilingarian et al., 2008d); (2) различными условиями в процессе приливного обдирания, которые могут привести к некоторым изменениям в значениях дисперсии скоростей по сравнению с галактиками прародителями.

Сравнение ядер dE,N и UCD

На Рис. 3.4 мы сравниваем возрасты и металличности 6 UCD в скоплении Печь с ядрами dE,Ns галактик в том же скоплении (2 объекта) и Дева (26 объектов), переходной cE/UCD галактикой M59cO (Chilingarian & Mamon, 2008) и VUCD7, еще одним UCD в скоплении Дева. Параметры звездных населений 22 галактик в скоплении Дева (показаны красным) так же, как для VUCD7 и M59cO, были получены из анализа спектров из SDSS DR6. Для оставшихся 4 dE,Ns в Деве, показанных голубым, результаты получены из 3D спектроскопии, представленной в работах Chilingarian et al. (2007d,e) и в Главе 2: ромбики с барами ошибок соответствуют возрастам и металличностям ядер и синие вектора указывают на параметры самих галактик.

За исключением 2 объектов со средним возрастом (UCD4 и UCD5), все UCD оказываются старыми, в то же время показывая большой разброс металличностей. Большинство dE,N имеют существенно более молодые звездные населения, чем UCD. Однако ядра некоторых dE,N (включая FCC 182) имеют старые возрасты, сравнимые с UCD. Сценарий, предполагающий, что ядра dE,N являются результатами повторных или протяженных эпизодов звездообразования в центрах dE галактик, приводящие к обогащению металлами, может объяснить наблюдаемые достаточно высокие металличности dE,N.

Происхождение UCD галактик

Параметры звездного населения, полученные с помощью нашей аппроксимации спектров, а именно, металличности выше, чем -1.0 dex, позволяют нам исключить механизм первичных флуктуация плотности (Phillipps et al., 2001), поскольку в рамках этого сценария для объектов данных масс ожидаются существенно более низкие металличности.

Низкие доли темной материи оставляют возможность для всех оставшихся каналов формирования UCD: Bekki et al. (2003) указал, что в случае обдирания dE, ядро



Рис. 3.4: Сравнение возрастов и металличностей UCD с выборкой dE галактик с ядрами из обзора SDSS.

галактики-прародителя не должно иметь слишком много темной материи; а два оставшихся сценария, слияние шаровых скоплений и формирования UCD как приливных сверхскоплений вообще подразумевают отсутствие темной материи.

Однако сценарий слияния шаровых скоплений (Mieske et al., 2002) не позволяет объяснить, почему мы не наблюдаем бедных металлами UCD. Известно, что шаровые скопления показывают дихотомию в распределении металличностей (см. обзор Brodie & Strader, 2006), но наблюдаемые UCD соответствуют только высокометалличным шаровым скоплениям. Так почему же бедные металлами шаровые скопления не сливаются? Более того, в случае слияния бедного и богатого металлами шаровых скоплений одинаковых масс, результирующая металличность, взвешенная по светимости, в нашем спектральном диапазоне окажется ниже, чем среднее значение, поскольку бедные металлами звездные населения имеют более низкие отношения M/L, чем богатые металлами. Сложные звездные населения, наблюдаемые в Галактических шаровых скоплениях, содержат от 2 до 4 SSP, иногда довольно сильно различающихся по металличности, которые очевидны из глубоких диаграмм цвет-величина. Эти объекты выглядят хорошими кандидатами для сценария слияния шаровых скоплений. К тому же, мы видим низкометалличные "композитные шаровые скопления" (NGC 1851, NGC 2808, ω Cen). Однако они на порядок величины (кроме ω Cen, где по крайней мере 4 SSP очевидны) слабее, чем UCD, которые мы здесь обсуждаем.

Статистически, UCD встречаются слишком часто, чтобы быть представителями яркого хвоста функции светимости шаровых скоплений. После дискуссии в работе Mieske et al. (2002) было открыто существенное количество UCD. Экстраполяция GCLF (см. Miller & Lotz, 2007) в сторону ярких объектов приводит к статистическому перенаселению объектов с $M_V < -11$. Хотя точное значение зависит от принимаемых параметров GCLF и ее представления (гауссова либо t_5), мы считаем этот факт довольно важным, что делет данный сценарий формирования UCD маловероятным.

Старые возрасты большинства UCD в сравнении с ядрами dE,N указывают на то, что если мы рассмотрим сценарий приливного обдирания dE,N, то оно должно было случиться довольно давно. Однако, существует сложность в объяснении формирования самых высокометалличных UCD, поскольку 8–10 Gyr назад ядра dE,N должны быть быть менее металличны, чем сейчас. Возможное объяснение – приливное обдирание наиболее массивных dE, таких как IC 3653 или FCC 182.

Другая возможность – это создать их как звездные сверхскопления (Fellhauer & Kroupa 2005) в процессе взаимодействия массивных галактик. В этом случае высокометалличное население, сформированной из высокометалличного газа в галактиках прародителях, будет наблюдаться в UCD. Оба сценария соответствуют низкому содержанию темной материи. Возможная диагностика заключается в измерении обилия элементов α /Fe: населения, сформированные в коротком и интенсивном эпизоде звездообразования будут переобогащены α -элементами (Matteucci, 1994). С нашими данными, имеющими низкое отношение сигнал-шум, мы не в состоянии провести данный тест.

В результате мы остаемся с двумя альтернативами формирования UCD: UCD с низкими металличностями ([Fe/H] < -0.5 dex) более соответствуют приливному обдиранию dE,N в том время как звездные сверхскопления лучше объясняют высокометалличные UCD. В настоящее время мы не можем исключить многообразие сценариев формирования, на возможность которого указывалось в работе Mieske et al. (2006).

3.2 Звездные населения 24 ультракомпактных карликовых галактик в скоплении Печь (спектроскопия высокого разрешения)

Результаты, представленные в данном разделе, опубликованы в работе Chilingarian et al. (2010c).

В работе Mieske et al. (2008) отмечена необходимость наблюдений для исследования звездных населений UCD, в частности для определения возрастов, необходимых чтобы объяснить низкие динамические отношения M/L в UCD галактиках в скоплении Печь по сравнению с галактиками скопления Дева. Здесь мы анализируем тот же самый наблюдательный материал, улучшая некоторые этапы в редукции данных и применяя мощный способ аппроксимации спектров, который позволяет нам получить одновременно внутреннюю кинематику и свойства звездных населений в крупнейшей выборке UCD галактик, доступной на сегодняшний день.

3.2.1 Данные: источники данных, редукция, анализ

Спектральные данные

Мы используем данные, полученные в рамках исследования компактных звездных систем в скоплении Печь (программа 078.В-0496). Данные публично доступны через архив ESO¹. Наблюдения были проведены на телескопе ESO Very Large Telescope с помощью спектрографа FLAMES/Giraffe (Pasquini et al., 2002) в мультиобъектном режиме "MEDUSA", используя режим HR9, дающий спектральное разрешение $R \approx 17000$ в диапазоне длин волн 5120–5450 Å. Наблюдения были получены в сервисной моде в 14 "наблюдательных блоках" (OB) между июнем и декабрем 2007 года с общим временем накопления 14 часов. Все детали, касающиеся наблюдений, даны в работе Mieske et al. (2008).

Для того, чтобы провести анализ звездных населений, нам пришлось усовершенствовать процесс редукции данных и вычитания неба в сравнении с требованиями для кинематического анализа, представленного в работе Mieske et al. (2008). Поэтому мы добавили несколько дополнительных шагов до и после стандартной обработки с помощью ESO FLAMES pipeline.

Первый дополнительный шаг (до обработки) – применение Лапласовской фильтрации космических частиц (van Dokkum, 2001) на исходных изображениях и маскирование всех областей, затронутых космическими частицами в каждом индивидуальном OB.

Второй этап, вычитание рассеянного света, – очень важен для успеха нашего исследования. Th-Ar лампа одновременной калибровки (SimCal) внутри спектрографа была включена в процессе наблюдений. Средний уровень потока в световодах SimCal превосходит уровень потока в объектах и ночном небе по крайней мере на 2 порядка величины. Поэтому рассеянный свет из ярких калибровочных линий на уровне 1–2% сильно "заливает" соседние объекты. Также присутствует гладкая диффузная компонента рассеянного света, производящая, однако, всего лишь незначительные эффекты на процедуру учета плоского поля.

Для того, чтобы учесть эти эффекты мы создали алгоритм моделирования рассеянного света. Поскольку световоды FLAMES размещены довольно свободно на плоскости ПЗС: расстояние между световодами составляет 14.3 пикселей при их полуширине около

¹http://archive.eso.org/



Рис. 3.5: Фрагмент ССД-кадра до (сверху) и после (снизу) вычитания рассеянного света. Яркий спектр в центре - световод SimCal, заметный спектр справа от него - ярчайший объект выборки (F-19).

4 пикселей, становится возможным использование промежутков между световодами для оценки вклада рассеянного света. Мы используем траектории световодов полученные по кадру плоского поля для идентификации промежутков, которые не должны содержать никакого сигнала. Затем мы предполагаем, что весь сигнал в этих промежутках представляет собой суперпозицию рассеянного света и глобального диффузного света. Вначале мы сглаживаем этот сигнал вдоль направления дисперсии с окном 4 пикселя, затем мы аппроксимируем его поперек дисперсии на каждом положении вдоль траектории световода между каждой парой световодов SimCal, используя сглаживающий сплайн 3-го порядка. Мы используем сплайн-интерполяцию вместо сглаживающего сплайна в небольшой области ПЗС, содержащей паразитный сигнал, создаваемый усилительным каскадом считывателя ПЗС.

Таким образом мы строим двумерную модель рассеянного света, которая вычитается из

каждого OB. На Рис. 3.5 мы приводим фрагмент OB до и после вычитания рассеянного света. Затем исправленные файлы подавались на вход системе обработки данных ESO FLAMES ESOREX и подвергались всем этапам обработки до линеаризации извлеченных спектров.

После этого мы применяли третий, последний дополнительный этап обработки, включающий в себя коррекцию длин волн, чтобы учесть гелиоцентрическую коррекцию лучевых скоростей, вычитание неба и комбинацию спектров во всех OB. Весь последующий анализ данных предпринимался на индивидуальных одномерных извлеченных спектрах независимо для каждого объекта.

Мы аппроксимировали спектры моделями звездных населений PEGASE.HR с использованием модифицированного алгоритма NBURSTS (Chilingarian et al., 2007d,c). Оригинальная версия NBURSTS не может быть использована с нашими данными так, как мы это делали для данных FLAMES-LR04 (Chilingarian et al., 2008d,c) поскольку спектральное разрешение FLAMES в режиме HR9 превосходит разрешение моделей звездного населения ($R \approx 10000$). Поэтому мы ухудшали спектральное разрешение данных, чтобы оно соответствовало разрешению PEGASE.HR, что требуется для несмещенных оценок дисперсии скоростей звезд.

Мы использовали спектры сумеречного неба с высоким отношением сигнал-шум, полученные в режиме HR9 спектрографа FLAMES и доступные на веб-странице с описанием инструмента. Затем мы аппроксимировали солнечный спектр из библиотека ELODIE.3.1 (Prugniel et al., 2007) этими спектрами, используя метод PPXF (Cappellari & Emsellem, 2004). Процедура была похожа на определение вариаций спектрального разрешения, описанных в работе Chilingarian et al. (2008d), использованных нами для спектров низкого разрешения FLAMES с одной принципиальной разницей: сейчас мы использовали спектры FLAMES как "опорные", а спектр ELODIE.3.1 как "данные". Полученная разница спектрального разрешения практически постоянна вдоль диапазона длин волн и не показывает значительных вариаций от световода к световоду. Ее форма может быть описана как Гаусс-Эрмит функция с $v_0 = 0 \text{ km s}^{-1}$, $\sigma = 12 \text{ km s}^{-1}$, $h_3 = 0$, $h_4 = -0.05$. Затем данные были свернуты с этой функцией для того, чтобы соответствовать разрешению моделей PEGASE.HR точно так же, как мы обычно сворачиваем модели для того, чтобы соответствовать разрешению спектрографа.

Свет от гало NGC 1399 является важным источником ошибок оценок параметров звездного населения UCD галактик. Поскольку он является аддитивной компонентой с весьма размытыми спектральными деталями из-за высокой внутренней дисперсии скоростей NGC 1399 ($\sigma > 200 \text{ km s}^{-1}$), значения металличностей UCD могут быть недооценены, в то время как дисперсии скоростей переоценены (см. Главу 1). Эти эффекты становятся очень важными в центральной части скопления. Поскольку световоды для получения спектров ночного небы были расположены далеко от центра NGC 1399, влиянием NGC 1399 на спектр неба можно пренебречь. Таким образом, мы не ожидаем эффектов перевычитания неба в UCD, расположенных на больших расстояниях от NGC 1399.

Для учета вклада спектра гало NGC 1399 в спектры UCD, мы использовали ее спектр в положении $(\alpha, \delta)_{J2000} = (54.625042^{\circ}, -35.451722^{\circ})$. Мы приняли положение центра NGC 1399 за $(\alpha, \delta)_{J2000} = (54.621208^{\circ}, -35.450667^{\circ})$ согласно базе данных HyperLeda. Затем мы использовали параметрическое представление ее профиля яркости в фильтре R (Dirsch et al., 2003) и расстояния в проекции для всех UCD из нашей выборки, чтобы

id	$\mathrm{id}^*_\mathrm{lit}$	R.A.(J2000)	Dec.(J2000)
<i>F</i> -13		$03:\!38:\!29.16$	-35:27:19.9
F-20		$03:\!38:\!56.21$	-35:24:48.9
F-28	FCOS 2-2106	$03:\!38:\!25.05$	-35:29:25.2
F-31		$03:\!38:\!19.78$	-35:23:39.5
F-46	FCOS 0-2032	$03:\!38:\!30.22$	-35:21:31.3
F-62	gc319.1	$03:\!38:\!49.85$	-35:23:36.0

Таблица 3.4: Координаты 6 UCD галактик, исключенных из финальной выборки в работе Mieske et al. (2008).

* обозначения из работы Mieske et al. (2004) для F-28 и F-46 и из работы Bergond et al. (2007) для F-62.

отмасштабировать спектр NGC 1399 и вычесть его из спектров UCD. Для предотвращения увеличения шумов, спектр NGC 1399 был сглажен *b*-сплайном с расстоянием между узлами 4 Å. Вклад NGC 1399 в общий поток оценивался как отношение медианного потока в отмасштабированном спектре NGC 1399 к изначальному медианному потоку в наблюдаемом спектре UCD. Соответствующие значения приведены в Таб. 3.5. Наиболее сильно "загрязненные" объекты – *F*-13, *F*-17 и *F*-11.

Для получения кинематических параметров и параметров звездного населения мы аппроксимировали суммарные спектры UCD из всех OB, используя метод NBURSTS с сеткой моделей простых звездных населений (SSP), рассчитанных для начальной функции масс Kroupa et al. (1993). Вдобавок к наилучшим значениям лучевых скоростей, дисперсии скоростей, SSP-эквивалентных возрастов и металличностей, для каждого объекта мы рассчитали карту уровней значимости в пространстве возраст – металличность.

Наша заключительная выборка содержит 19 из 23 UCD, представленных в работе Mieske et al. (2008). 2 из 4 исключенных объекта, F-12 и F-59, показывают очевидные артефакты в вычитании фона неба из-за их очень близкого положения к световодам SimCal, в то время как F-60 и F-64 имели слишком низкие отношения сигнал-шум вдобавок к проблемам с вычитанием неба. Мы добавили 5 объектов к выборке Mieske et al. (2008), для которых данные были получены, но затем они были исключены из финальной выборки:F-20, F-28, F-31, F-46 и F-62. Их координаты приведены в Таб. 3.4. Четыре из них (F-20, F-28, F-31 и F-46) имеют низкие металличности. Ни для одного из них, кроме F-13, мы не нашли архивных данных HST. Для F-13 невозможно провести точную поверхностную фотометрию, поскольку объект проецируется на очень яркую часть гало NGC 1399 всего в 0.3 arcmin от ее центра.

Наш подход может приводить к систематическим ошибкам в случаях, если: (1) изофоты NGC 1399 сплюснуты либо имеют неправильную форму; (2) имеются сильные градиенты метлличности и/или дисперсии скоростей в гало NGC 1399. Согласно работе Dirsch et al. (2003), гало NGC 1399 имеет правильную форму; профиль дисперсии скоростей выходит на константу около 230 km s⁻¹ на 15 arcsec (Saglia et al., 2000), падая далее лишь на 500 arcsec (Schuberth et al., 2010), где поверхностная яркость слишком низка для влияния на спектры UCD. Профиль цвета довольно круто изменяется (Dirsch et al., 2003), что может указывать на градиент металличности. Однако, эффекты возраста и пыли также могут играть роль.

Чтобы проверить, насколько наши результаты коррекции спектров подвержены влиянию градиентов параметров в NGC 1399, мы аппроксимировали некорректированные спек-



Рис. 3.6: Двухкомпонентная аппроксимация спектра *F*-13. Показаны: наблюдаемый спектр, наилучшая модель и ее декомпозиция на две компоненты, соответствующие NGC 1399 (зеленый спектр) и UCD (красный спектр).

тры трех наиболее сильно "загрязненных" UCD моделью, содержащей два SSP с различными кинематическими параметрами, соответствующими UCD и гало NGC 1399. Вначале мы оставили все параметры кинематики и звездного населения двух компонент свободными. Результаты представлены на Puc. 3.6. Затем мы повторили процедуру, зафиксировав дисперсию скоростей NGC 1399 на уровне 230 km s⁻¹. В обоих случаях, параметры кинематики и звездного населения UCD, так же, как и восстановленные спектры, оказались в хорошем согласии. Для *F*-17 и *F*-11 они также хорошо соответствовали результатам, полученным с помощью метода коррекции влияния гало, предложенного выше, так же, как и доли по свету гало NGC 1399 в спектрах, полученные из массовых долей двух компонент, совпадали с ожидаемыми значениями из профиля яркости. Однако, для *F*-13 вклад NGC 1399 в случае двухкомпонентной аппроксимации (73%) оказался ниже, чем ожидался из профиля яркости (83%). Это привело к рассогласованию металличностей на 0.3 dex (-0.2±0.09 dex) и увеличению на 6 km s⁻¹ оценки дисперсии скоростей (38±2 km s⁻¹) из результатов двухкомпонентной аппроксимации.

Из этого эксперимента мы закгючаем, что спектры UCD, подверженные слабому или среднему (до 35%) влиянию гало NGC 1399 (по свету), могут быть корректированы предложенным нами методом, основанном на перенормировке "эталонного" спектра NGC 1399 согласно профилю яркости, и результаты оказываются в хорошем согласии с двухкомпонентной аппроксимацией спектров – подходом, который теряет стабильность в случае низких долей света гало NGC 1399 в общем спектре, поскольку низкое отношение сигналшум при высокой внутренней дисперсии скоростей галактики не компенсируется высоким спектральным разрешением, как это происходит для спектров UCD.

Прямые снимки

Используя средства Виртуальной Обсерватории, мы идентифицировали 8 UCD, присутствующих в таблице 3 из Mieske et al. (2008) как объекты без HST фотометрии. Для 2 из них, F-2 и F-8, были найдены архивные изображения HST WFPC2 в фильтре F606W в архиве Hubble Legacy Archive (HLA)². Процесс поиска данных включал в себя следующие этапы:

- Обработанные данные FLAMES загружались в программу VO-PARIS EURO3D CLIENT³, инструмент ВО для работы с данными мультиобъектной и 3D-спектроскопии (Chilingarian et al., 2008а). Текущая версия VO-PARIS EURO3D CLIENT поддерживает формат данных FLAMES FITS.
- 2. Затем координаты световодов посылались в CDS ALADIN, используя протокол обмена сообщениями PLASTIC⁴, и отображались поверх DSS2 изображения центральной части скопления Печь. 8 объектов из таблицы 3, работа Mieske et al. (2008), были выбраны из списка.
- 3. Затем мы запрашивали из архива HLA область покрытия, то есть объединение всех полей зрения всех наблюдений на HST в данной области неба и отображали ее с помощью CDS ALADIN. Два из восьми объектов обводились, поскольку попадали в область покрытия.
- 4. Выбор этих 2 объектов на дисплее CDS ALADIN вызывал подсветку соответствующих полей WFPC2 в списке доступных данных.
- 5. Затем соответствующие WFPC2 изображения сохранялись из архива HLA и анализировались с использованием программного пакета GALFIT (Peng et al., 2002).

Мы использовали программный пакет $TINYTIM^5$ для моделирования функции рассеяния точки (PSF) камеры WFPC2 в положениях, соответствующих *F*-2 и *F*-8, которые затем использовались для анализа профилей яркости этих объектов.

Оба объекта хорошо аппроксимируются однокомпонентными профилями Серсика. Для *F*-2 мы получили следующие значения параметров профиля в фильтре *F*606*W*: $m_{\rm tot} = 19.98$ mag, $R_e = 0.15 \pm 0.01$ arcsec $= 14 \pm 1$ pc, $n = 4.9 \pm 0.1$. Для *F*-8 значения составили: $m_{\rm tot} = 20.31$ mag, $R_e = 0.07 \pm 0.01$ arcsec $= 6 \pm 1$ pc, $n = 1.2 \pm 0.1$.

3.2.2 Результаты и обсуждение

Динамика и звездные населения UCD галактик

Результаты анализа спектров представлены в Таблице 3.5. Мы представляем лучевые скорости, дисперсии скоростей, SSP-эквивалентные возрасты и металличности для всех 24 UCD в нашей выборке. Мы получили отношение массы к светимости для звездных населений, используя модели PEGASE.2. Сетка моделей была ограничена сверху возрастом 15 Gyr. Для нескольких объектов возраст для наилучшей аппроксимации соответствует

²http://hla.stsci.edu/

 $^{^{3}} http://voplus.obspm.fr/{\sim}chil/Euro3D/$

 $^{^{4}} http://plastic.sourceforge.net/$

 $^{^{5}} http://www.stsci.edu/software/tinytim/$



Рис. 3.7: Спектры FLAMES/Giraffe–HR9, их наилучшие модели (Kroupa IMF), невязки аппроксимации и уровни значимости для определений возраста и металличности (внутренние панели). Все графики сглажены скользящим средним с окном 7 пикселей для улучшения восприятия. Соответственно, ошибки потоков были уменьшены в 2.65 раз.

и звездные отношения масса-светимость, оценки количества темной материи в 24 UC										
галактиках.										
name	d_p	C_{h}	M_V	v	$\sigma_{ m obs}$	t	[Fe/H]	$(M/L)_{\mathrm{d},V}$	$(M/L)_{*V}$	D.M.
	kpc	%	mag	$\rm km~s^{-1}$	$\rm km \ s^{-1}$	Gyr	dex	$(M/L)_{\odot}$	$(M/L)_{\odot}$	per cent
F1	27.5	1.7	-12.19	1238.3 ± 0.5	22.2 ± 0.6	13.8 ± 2.1	-0.64 ± 0.02	2.8 ± 0.5	3.0 ± 0.2	-10 ± 30
F2	33.2	3.8	-11.35	1408.5 ± 1.4	19.9 ± 1.8	$12.9~\pm~5.4$	-0.73 ± 0.09	$3.0~\pm~0.8$	2.7 ± 0.7	$10~\pm~50$
F3	26.3	2.7	-11.71	1614.2 ± 1.0	33.1 ± 1.1	13.9 ± 3.3	-0.61 ± 0.03	$\cdots \pm \ldots$	3.1 ± 0.1	$\cdots \pm \ldots$
F5	21.5	5.7	-11.73	1660.6 ± 0.9	25.4 ± 1.0	$>15 \pm 3.2$	-0.34 ± 0.03	2.1 ± 0.3	3.8 ± 0.6	-80 ± 30
F6	14.5	12	-11.07	829.0 ± 1.3	14.0 ± 2.1	11.1 ± 3.2	-1.31 ± 0.11	1.4 ± 0.5	1.6 ± 0.4	-10 ± 60
F7	35.2	2.6	-11.13	1493.6 ± 0.9	12.2 ± 1.6	14.8 ± 1.2	-1.20 ± 0.04	1.7 ± 0.6	2.4 ± 0.1	-40 ± 40
F8	38.9	2.2	-11.30	1395.0 ± 1.2	30.2 ± 1.3	$>15 \pm 2.8$	-0.35 ± 0.03	4.3 ± 0.8	3.8 ± 0.5	10 ± 30
F9	58.4	1.2	-11.33	1723.8 ± 1.4	28.4 ± 1.6	$>15 \pm 5.1$	-0.62 ± 0.04	5.7 ± 1.0	3.2 ± 0.8	40 ± 40
F11	7.7	21	-11.50	1686.8 ± 0.8	23.7 ± 1.0	$>15 \pm 4.8$	-0.61 ± 0.03	1.6 ± 0.3	3.2 ± 0.8	-100 ± 40
F13	1.6	83	-12.08	1740.7 ± 1.3	32.1 ± 1.5	14.0 ± 3.5	$0.14~\pm~0.09$	$\cdots \pm \ldots$	5.3 ± 0.6	$\cdots \pm \ldots$
F17	7.9	26	-11.27	1369.6 ± 1.2	28.0 ± 1.4	$>15 \pm 4.4$	-0.55 ± 0.04	2.5 ± 0.5	3.3 ± 0.9	-30 ± 50
F18	36.6	1.6	-11.69	2008.9 ± 0.8	27.2 ± 0.9	$6.9~\pm~0.8$	-0.41 ± 0.07	$\cdots \pm \ldots$	2.0 ± 0.2	$\cdots \pm \ldots$
F19	45.1	0.4	-13.39	1492.0 ± 0.3	24.8 ± 0.3	12.1 ± 0.6	-0.19 ± 0.02	4.0 ± 0.4	$3.7~\pm~0.2$	8 ± 15
F20	32.5	3.9	-11.10	671.6 ± 1.1	11.9 ± 1.8	10.2 ± 3.3	-1.02 ± 0.12	$\cdots \pm \ldots$	2.1 ± 0.5	$\cdots \pm \ldots$
F22	54.7	1.1	-11.12	1039.5 ± 1.3	29.1 ± 1.5	$>15 \pm 4.4$	-0.49 ± 0.04	2.9 ± 0.7	3.4 ± 0.7	-20 ± 50
F23	71.3	0.8	-11.66	1460.3 ± 1.0	17.5 ± 1.2	11.9 ± 2.9	-0.41 ± 0.10	$\cdots \pm \ldots$	3.3 ± 0.6	$\cdots \pm \ldots$
F24	74.7	0.4	-12.27	1888.4 ± 0.8	29.1 ± 1.0	$>15 \pm 2.0$	-0.67 ± 0.03	5.2 ± 0.7	3.1 ± 0.2	40 ± 20
F28	13.7	12	-10.88	1161.0 ± 1.6	16.9 ± 2.5	2.0 ± 0.4	-0.94 ± 0.18	$\cdots \pm \ldots$	0.7 ± 0.0	$\cdots \pm \ldots$
F31	21.2	7.9	-10.78	927.4 ± 1.4	11.0 ± 2.6	10.9 ± 3.5	-1.39 ± 0.14	$\cdots \pm \ldots$	1.8 ± 0.5	$\cdots \pm \ldots$
F34	21.0	7.2	-10.73	1621.2 ± 1.1	15.3 ± 1.5	14.9 ± 4.4	-0.77 ± 0.05	1.4 ± 0.4	2.9 ± 0.8	-110 ± 50
F46	30.2	5.8	-10.59	1424.9 ± 1.5	20.0 ± 2.0	$3.0~\pm~0.9$	-0.32 ± 0.08	$\cdots \pm \ldots$	3.3 ± 2.0	$\cdots \pm \ldots$
F51	13.7	19	-10.56	1242.9 ± 1.3	20.9 ± 1.6	$>15~\pm~5.6$	-0.23 ± 0.11	2.8 ± 0.8	4.2 ± 1.2	-50 ± 60
F53	17.3	11	-10.55	660.9 ± 1.3	14.5 ± 1.8	13.8 ± 5.3	-0.80 ± 0.06	1.5 ± 0.5	2.9 ± 1.7	-90 ± 80
F62	29.8	5.5	-10.43	966.6 ± 1.5	19.6 ± 1.8	$>15 \pm 6.0$	-0.26 ± 0.06	$\cdots \pm \ldots$	4.1 ± 1.3	$\cdots \pm \ldots$

Таблица 3.5: Внутренняя кинематика, звездные населения, исправленные динамические и звездные отношения масса-светимость, оценки количества темной материи в 24 UCD галактиках.



Рис. 3.8: Продолжение Рис. 3.7.



Рис. 3.9: Продолжение Рис. 3.8.

этому значению. Хотя 15 Gyr несколько превосходит принятый в настоящее время возраст Вселенной, мы должны помнить, что в моделях звездных населений существует хорошо известная "проблема нуль-пункта", связанная с недостаточно хорошим знанием звездной эволюции. Поэтому, например, публикуемые значения возрастов эллиптических галактик зачастую превосходят Хаббловское время.

Ошибки определения параметров звездных населений изменяются от 0.03 dex для [Fe/H] и 15% для возраста F-19 (UCD 3) до >0.3 dex в металличности и полностью неопределенного возраста для самых слабых представителей нашей выборки, таких как F-62. В общем наблюдается четкая корреляция между качеством определения возраста и средней металличностью галактики, что можно легко объяснить, поскольку в высокометалличных объектах абсорбционные линии сильнее, соответственно процедура аппроксимации более ограничена для данного среднего отношения сигнал-шум в континууме.

Благодаря высокому спектральному разрешению наших данных и, соответственно, хорошо разрешенному распределению лучевых скоростей вдоль луча зрения для большинства UCD, вырождение дисперсия скоростей – металличность (см. Глава 1) присущее методу NBURSTS имеет очень маленькие эффекты на полученные измерения дисперсии скоростей. Таким образом, даже в случае, где измерения металличностей имеют большие ошибки из-за низкого отношения сигнал-шум, дисперсии скоростей остаются хорошо определенными.

Наши значения дисперсии скоростей иногда существенно отличаются от значений в работе Mieske et al. (2008), поэтому их результаты динамического моделирования, т.е. апертурные коррекции, центральные глобальные дисперсии скоростей и, соответственно, отношения M/L должны корректировать. Мы повторили ту же самую процедуру динамического моделирования для новых значений дисперсий скоростей и структурных параметров 13 UCD из работы Mieske et al. (2008), а также для структурных параметров F-2 и F-8, полученных выше.

Темная материя в UCD и звездная функция масс

Используя динамические и звездные отношения масса – светимость, мы оцениваем долю темной материи в 13 UCD в нашей выборки $((M/L)_{dyn,V} - (M/L)_{*V})/(M/L)_{dyn,V}$. Соответствующие доли в процентах представлены в последней колонке Таблицы 3.5. Для 10 из 13 объектов получены нулевые доли темной материи (с учетом ошибок измерений), в то время как для оставшихся трех, F-5, F-11 и F-34, динамические массы оказываются ниже, чем звездные, что приводит к отрицательным формально посчитанным вкладам темной материи, т.е. –100 рег cent соответствует звездному M/L вдвое выше, чем динамическому. Какова причина появления отрицательных массовых долей темной материи? Мы либо неооцениваем динамическую массу, либо переоцениваем звездную.

Недооценка динамической массы может вызываться ошибками в поверхностной фотометрии (недооценка эффективного радиуса) либо заниженными оценками дисперсий скоростей. Хотя наши UCD имеют довольно небольшие размеры, большинство из них остаются уверенно разрешенными на данных HST, что исключает первый вариант. В то же время, недооценки дисперсий скоростей также маловероятны, поскольку спектральное разрешение наших данных позволяет уверенно измерять дисперсии скоростей вплоть до 5 km s⁻¹. Звездные массы могут быть переоценены, если принятые звездные отношения массасветимость слишком велики. В нашем режиме (т.е. старые звездные населения с промежуточными и низкими металличностями) единственный параметр, который может сильно на них повлиять – форма (наклон) звездной функции масс на малых массах, где звезды практически не влияют на светимость, зато сильно изменяют массу системы из-за сильно нелинейного поведения зависимости масса-светимость для звезд главной последовательности. Изменение степенного индекс наклона на малых массах от 2.3 до 1.3 (т.е. от Salpeter к Kroupa) уменьшает отношения масса-светимость для старого звездного населения на ~50 %. Означает ли это, что начальная функция масс изменяется от объекта к объекту в нашей выборке?

Следует помнить, что компактные звездные системы, наблюдаемые в настоящее время, могли испытывать эффекты динамической эволюции на своих звездных функциях масс, т.е. наблюдаемая звездная функция масс может отличаться от начальной. Известно (Spitzer, 1987; Baumgardt & Makino, 2003; Khalisi et al., 2007; Kruijssen & Mieske, 2009), что в шаровых скоплениях динамическая эволюция приводит к сегрегации по массам, т.е. массивные звезды концентрируются в центре, в то время как маломассивные звезды мигрируют во внешние части скоплений, где они обдираются приливными силами при проходах шарового скопления вблизи центра родительской галактики либо через ее диск. Это создает дефицит маломассивных звезд в скоплении, изменяя форму его интегральной звездной функции масс. Характерное время этого процесса соответствует времени динамической релаксации, которое для компактной звездной системы можно оценить (Mieske et al., 2008) как $t_{\rm relax} = \frac{0.234}{\log M_{\rm dyn}} \sqrt{M_{\rm dyn} r_e^3}/0.0045}$ Myr, где $M_{\rm dyn}$ выражена в массах Солнца, а r_e в пк.

На Рис. 3.10 (правая панель) представлены отношения динамических масс $(M_{\rm dyn})$ к звездным (M_*) как функция времени релаксации. Мы видим тренд: объекты, где оценки M_* превышают $M_{\rm dyn}$ имеют времена релаксации короче времени Хаббла. Этот тренд соответствует результатам, представленным на рис. 12 в работе Mieske et al. (2008), но в нашем случае динамические отношения масса-светимость нормированы на звездные. Данный результат указывает на то, что некоторые из наименее массивных UCD вероятно испытали эффекты динамической эволюции, которые вызвали потерю маломассивных звезд, что привело к "уплощению" формы функции масс так, что применение в моделях звездного населения начальной функции масс Кгоира приводит к переоценке звездных масс этих систем.

Мы отмечаем, что даже для объяснения динамических отношений M/L для самых массивных UCD из нашей выборки, требуется минимальная доля темной материи (если вообще требуется). Однако, поскольку эти системы не могли проэволюционировать динамически (времена релаксации намного превышают возраст Вселенной), они не могли потерять маломассивные звезды. Поэтому, мы можем исключить начальную функцию масс типа Солпитера, которая приведет к увеличению звездной массы на 50% и, соответственно отрицательным долям темной материи во всех исследуемых объектах.

Сравнение с литературой

Три объекта из нашей выборки, F-1 (UCD 2), F-19 (UCD 3) и F-24 (UCD 4), имеют опубликованные измерения параметров кинематики и звездных населений (Chilingarian et al.,



Рис. 3.10: Слева: сравнение дисперсий скоростей в нашей работе и работе Mieske et al. (2008). Справа: отношение динамических масс к звездным как функция времени динамической релаксакии на эффективном радиусе для 14 UCD с динамическими оценками масс. Штриховая линия указывает на равенство динамической и звездной масс для начальной функции масс Kroupa. Объекты выше этой линии либо содержат темную материю, либо имеют начальную функцию масс с избытком звезд малых (bottom-heavy) или больших (top-heavy) масс; объекты ниже линии должны были испытать изменение звездных функций масс за счет эффектов динамической эволюции.

2008с), полученные с использованием того же самого способа анализа данных, примененного к спектрам FLAMES-LR04, имеющим похожий, хоть и немного более широкий диапазон длин волн, но вдвое более низкое спектральное разрешение. Измерения дисперсии скоростей согласуются очень хорошо для всех трех объектов. Значения металличностей согласуются в пределах нескольких сотых dex для UCD 3 и UCD 4, однако различаются на ~ 0.4 dex для UCD 2. Для этого объекта оценки возраста также различаются: средний возраст в Chilingarian et al. (2008с) и старый в этом исследовании. Однако, две оценки возраста и металличности для этого объекта лежат вдоль вырождения возраст-металличность. Отсюда мы заключаем, что, учитывая довольно низкое отношение сигнал-шум в данных, представленных в работе Chilingarian et al. (2008с), и большие размеры эллипсов на карте уровней значимости, различия между измереними не являются статистически значимыми. Определение возрастов для UCD 3 и UCD 4 согласуется между двумя работами в представх 2*σ* их статистических ошибок.

Стоит отметить, что оценки металличностей для всех трех UCD, представленных в Mieske et al. (2006) оказываются систематически ниже наших на 0.20...0.25 dex.

На Рис. 3.10 (левая панель, черные точки) мы представляем сравнение опубликованных измерений дисперсий скоростей для 19 UCD (Mieske et al., 2008) с нашими значениями. Хотя общий тренд совпадает, измерения для индивидуальных объектов часто существенно различаются. Возможные причины различий включают: (1) несовпадение опорного спектра и спектра UCD из-за различий в металличности между исследуемыми UCD и звездами-гигантами из скопления ω Cen, использовавшимися для определения дисперсий скоростей; (2) немного отличающиеся диапазоны длин волн (включение области триплета Mgb в нашей работе); (3) коррекции спектров за эффекты гало NGC 1399, которые не применялись в работе Mieske et al. (2008).

Разница металличностей между анализируемыми спектрами и опорными звездами может приводить к смещенным оценкам дисперсий скоростей (см. Главу 1), по крайней мере если анализ проводится в пиксельном пространстве, таким образом влияя как на результаты работы алгоритма NBURSTS, так и на кросс-корреляцию с помощью пакета FXCOR. Тогда нам следует ожидать корреляции между металличностями UCD и разницами в оценках дисперсий скоростей в данной работе и работе Mieske et al. (2008), которую мы не обнаруживаем на статистически значимом уровне. Это может быть объяснено тем, что описанное вырождение между металличностью и дисперсией скоростей по большей части влияет на данные для объектов с низкими дисперсиями скоростей, сравнимых с инструментальным разрешением, либо еще ниже. В нашем случае, большинство объектов с низкими значениями σ имеют низкие металличности, хорошо соответствующие значениям металличностей опорных звезд из скопления ω Cen. C другой стороны, массивные высоко-металличные UCD со сравнительно высокими значениями σ оказываются яркими, поэтому их спектры имеют высокие отношения сигнал-шум и меньше подвержены описанному вырождению.

Mieske et al. (2008) исключили область триплета Mgb из результатов их анализа, поскольку им казалось, что этот регион смещает оценки дисперсий скоростей при использовании техники кросс-корелляции. Однако Mgb – это наиболее заметная спектральная деталь в нашем диапазоне длин волн, содержащая таким образом значительную долю спектральной информации. Чтобы проверить страдает ли метод NBURSTS от подобных систематических ошибок мы применили нашу процедуру для диапазона $\lambda_{\text{restframe}} > 5200$ Å и сравнили ее с результатами измерений дисперсии скоростей, полученных при аппроксимации во всем диапазоне длин волн. Значения совпадают в пределах ошибок, однако точность измерения вдвоем ниже при исключении триплета магния. Таким образом мы делаем вывод, что систематические ошибки дисперсии скоростей методом кросс-корелляции в области триплета Mgb возможно происходят из-за несоответствия использованных опорных спектров спектрам UCD, при том, что это несоответствие существенно меньше в случае аппроксимации спектров моделями звездного населения. Поскольку эти эффекты влияют только на измерение низких дисперсий скоростей в объектах таких, как шаровые скопления, полученные по спектрам высокого разрешения и не проявляются в исследованиях более массивных галактик, мы полагаем, что несоответствие между спектрами галактик и индивидуальных звезд происходит из мелких абсорбционных линий и имеет значение только на высоком спектральном разрешении.

После коррекции мы решили повторить измерения дисперсий скоростей в программном пакете FXCOR в системе NOAO IRAF. Используя те же самые опорные спектры звезд из ω Cen, нам удалось резко сократить различия с измерениями, полученными методом NBURSTS, что проиллюстрировано на Рис. 3.10 (красные точки на левой панели). Мы достигли хорошего согласия между двумя методами, хотя осталось небольшое систематическое различие между измерениями – значения, полученные с помощью FXCOR оказываются немного выше значений NBURST для объектов с нихкими дисперсиями скоростей. Исходя из этого, мы заключаем, что отсутствие коррекции спектров за влияние гало родительской галактики является основным источником систематических ошибой при измерениях кинематических параметров, и этот эффект должен учитываться во всех исследованиях внутренней динамики компактных звездных систем.

Соотношения Faber-Jackson и металличность-светимость

На Рис. 3.11 мы представляем сравнение между абсолютными звездными величинами и измеренными дисперсиями скоростей (верхняя панель, Faber & Jackson, 1976) и металличностями (нижняя панель) для галактик ранних типов и компактных звездных систем. Гигантские галактики представлены 140 галактиками ранних типов в скоплении Coma из обзора SDSS DR7 (Abazajian et al., 2009), полученных с помощью метода NBURSTS, а также измерения дисперсии скоростей из работы Bender et al. (1992). Данные для карликовых ранних типов из работ Chilingarian et al. (2008d) и Chilingarian (2009a) (глобальные значения). Карликовые сфероидальные галактики из работы Mateo (1998) показаны в левой части диаграмм. Данные для сЕ галактик взяты из работы Chilingarian et al. (2009a), переходные сЕ/UCD галактики – из Chilingarian et al. (2008c). Данные для шаровых скоплений взяты из работ McLaughlin & van der Marel (2005); Djorgovski et al. (1997); Martini & Ho (2004) для скоплений в Галактике, М 31 и NGC 5128 соответственно.

На верхней панели Рис. 3.11 мы видим, что все новые кинематические измерения UCD следуют экстраполяции в область слабых светимостей соотношения Faber-Jackson $(L \propto \sigma^4)$, изначально установленного для галактик ранних типов и показанных штриховой линией. Большинство сЕ и переходных cE/UCD галактик также находится на нем. В то же время dE, dS0 и даже dSph галактики, где доминирует темная материя, лежат ниже его, показывая более низкие дисперсии скоростей для тех же светимостей.

Шаровые скопления формируют другую последовательность на этой диаграмме, имеющую более крутой наклон $(L \propto \sigma^2)$, чем отношение Faber–Jackson. UCD из нашей выборки присутствуют вплоть до светимостей, где последовательности объединяются, и мы видим плавный переход между ними.

На соотношении металличность-светимость ситуация совершенно другая: отношение Z - L, отмеченное штриховой линии на нижней панели Рис. 3.11, формируется dSph, dE/dS0 и гигантскими галактиками ранних типов, в то время как компактные галактики обычно более богаты металлами и не показывают столь сильные корелляции между металличностями и светимостями, заполняя всю область над отношением Z - L. Отклонение металличностей в сравнении с протяженными карликовыми сфероидальными галактиками соответствует более эффективному самообогащению металлами и/или формирования этих объектов из материала, который был уже обогащен, к примеру, в процессе диссипативного слияния галактик.

Происхождение UCD галактик

В заключение данного раздела мы приведем краткое обсуждение сценариев происхождения UCD. Наши данные указывают на одну из двух концепций, из рассмотренных во введении к этой главе:

1. UCD галактики – остатки более протяженных галактик, ободранных приливными эффектыми. В этом случае они являются остатками карликовых галактик.



Рис. 3.11: Соотношения Faber–Jackson (сверху) и металличность–светимость (снизу) для галактик ранних типов и компактных звездных систем.

2. UCD галактики – массивные звездные скопления, либо результаты их слияний, и их формирование связано со сценариями фромирования большинства других шаровых скоплений, окружающих галактики.

Относительно первого варианта, Chilingarian et al. (2009а) продемонстрировали, что дисковая галактика, сравнимая по размерам с Млечным Путем, на временной шкале 0.5– 1 Gyr обдирается приливными эффектами при сближении с cD галактикой средней массы, такой как М 87 в скоплении Девы. Поскольку карликовые галактики обычно имеют меньшие поверхностные плотности дисков, приливное обдирание будет более эффективным и быстрым. Один пролет около cD галактики долежн быть достаточным, что указывает на характерное время процесса порядка 200 Муг. Этим объясняется, почему мы не видим много dEN галактик в процессе приливного обдирания – эта фаза коротка, поэтому вероятность ее наблюдения мала.

Открытие первой переходной сЕ/UCD галактики M59cO (Chilingarian & Mamon, 2008) и население галактик в скоплении Coma (Price et al., 2009), полностью заполняющих промежуток по массам между сЕ и UCD, дополнительно поддерживает идею об общем эволюционном пути этих двух классов объектов. Однако, классические сЕ галактики вряд ли могут быть сформированы как приливные сверхскопления в процессе слияния галактик, потому что: (1) они обладают очень существенными массами, превосходящими $10^9 M_{\odot}$, которые довольно проблематично собрать в приливных хвостах; (2) все близкие сЕ галактики вращаются и либо содержат подтвержденные сверхмассивные черные дыры (Davidge et al., 2008) либо центральные пики в распределениях дисперсии скоростей, вероятно вызванных ими (Chilingarian & Bergond, 2010).

Поэтому если мы предположим, что UCD и сЕ имеют одинаковый сценарий происхождения и эволюции, то они должны формироваться путем приливного обдирания более массивных галактик. Наилучшими кандидатами на такой сценарий являются два наиболее массивных UCD в скоплениях Дева и Печь (см. Evstigneeva et al., 2007b; Hilker et al., 2007), имеющие протяженные "гало" низкой поверхностной яркости. Они имеют массы $M \simeq 10^8 M_{\odot}$ и хорошо соответствуют другим UCD по размерам и светимостям, см. также положение на диаграмме Faber–Jackson (Рис. 3.11) для наиболее массивного UCD скопления Печь.

В противоположность, большинство слабых UCD сравнительно малых масс показывают плавный переход в светимостях и размерах в режим обычных шаровых скоплений, а их количество хорошо соответствует экстраполяции GCLF (см. Mieske et al., 2004). Это соответствует сценарию, когда большинство из этих объектов (в особенности, высокометалличных) сформировались тогда же и так же, как большинство красных шаровых скоплений в процессе формирования сфероидов своих родительских галактик (либо в процессе монолитного коллапса, либо при многочисленных слияниях).

3.3 SDSS J124155.33+114003.7 – объект переходного класса между ультракомпактными карликовыми и компактными эллиптическими галактиками.

Результаты, представленные в данном разделе, опубликованы в работе Chilingarian & Mamon (2008).

В этом разделе мы представляем открытие первой галактики переходного типа между ультракомпактными карликовыми и компактными эллиптическими галактиками. Мы приводим параметры ее внутренней кинематики и звездного населения. Наши результаты полностью основаны на архивных данных, доступных в Виртуальной Обсерватории.

3.3.1 Открытие SDSSJ124155.33+114003.7: данные и методы

Объект SDSSJ124155.33+114003.7 (далее M59cO) был открыт случайно в данных обзора SDSS-DR6 (Adelman-McCarthy et al., 2008) в рамках проекта по изучению функции светимости в скоплении галактик Дева (Mamon et al. в работе): M59cO – единственный объект в поле 62 deg² ($1R_{vir}$) вокруг M 87, классифицированный как галактика в обзоре SDSS, но как точечный источник визуально. Он находится на расстоянии 2.1 arcmin к северо-западу от гигантской эллиптической галактики M 59, которая, в свою очередь, расположена в ближайшей известной компактной группе галактик (Mamon, 1989), содержащей еще более яркую M 60. Для M59cO мы используем модуль расстояния 30.87 mag (Mei et al., 2007), соответствующий пространственному масштабу 72 рс arcsec⁻¹.

Мы провели поиск дополнительных данных в Виртуальной Обсерватории с использованием CDS ALADIN (Bonnarel et al., 2000) и нашли: (1) спектр галактики (R=1800) в апертуре 3 arcsec из обзора SDSS; (2) полностью калиброванные изображения с HST ACS (WFC) в двух фотометрических полосах, F475W (g') и F850LP (i') из обзора Virgo Cluster ACS Survey (Côté et al., 2004), доступные в рамках сервиса ACS Associations, предоставляемого Канадским центром астрономических данных (CADC).

Спектр галактики аппроксимировался моделями PEGASE.HR (Le Borgne et al., 2004) с помощью методики NBURSTS (Chilingarian et al., 2007d) и использования моделей простых звездных населений (SSP). Вариации спектрального разрешения по длинам волн, предоставленные в обзоре SDSS, использовались для деградации разрешения SSP моделей. Мы использовали диапазон длин волн от 4050 до 5700Å. Синий предел связан с ограничением моделей PEGASE.HR (4000Å), в то время как верхний предел был установлен для работы только с "синим" плечом спектрографа SDSS, чтобы избежать скачка спектрального разрешения, присутствующего в комбинированных спектрах SDSS.

3.3.2 Свойства SDSSJ124155.33+114003.7

Фотометрические характеристики

Полная (исправленная изофотная) АВ-величина M59cO в фильтре F475W $(m_{F475}=18.12\pm0.03)$, измеренная с использованием SEXTRACTOR (Bertin & Arnouts, 1996), находится в хорошем согласии с данными из обзора SDSS ($m_{a'}=18.08\pm0.01$). Переводя это значение в фильтр B, согласно Fukugita et al. (1995) для эллиптических галактик $(B-q'=0.55 \text{ mag})^6$ и исправляя его за Галактическое поглощение (Schlegel et al., 1998), мы получаем абсолютную звездную величину $M_B = -12.34$. Используя SEXTRACTOR, мы оцениваем эффективный радиус $R_e=0.43$ arcsec=32 pc, соответствующий средней поверхностной яркости внутри него $\langle \mu_B \rangle_e = 18.69 \text{ mag arcsec}^{-2}$, что соответствует ярчайшим из известных UCD.⁷

⁶Параметры звездного населения и цвета М59сО очень напоминают свойства галактик ранних типов средних светимостей. ⁷Два объекта из работы Evstigneeva et al. (2007а), VUCD 7 и UCD 3, имеют несколько более высокие светимости. Однако, они оба имеют протяженные "гало", содержащие существенную долю звездной светимости. Однако, восстановленные



Рис. 3.12: Сверху слева: Изображени HST ACS объекта М59сО в фильтре g'; Сверху справа: карта цвета g'-i' полученная из данных HST ACS; Снизу: Профиль яркости М59сО в фильтре F850LP и его двухкомпонентная модель, включающая внутренний ядерный профиль Серсик с n около 1 (синяя штриховая линия), внешний экспоненциальный профиль (зеленая пунктирная линия) и их сумму красная сплошная линия.

Метод нерезкого маскирования, примененный для изображений М59сО, не обнаруживает никаких вложенных структур в объекте. Мы провели поверхностную фотометрию HST/ACS изображений с использованием пакета stsdas.isophote.ellipse в среде IRAF, а также GALFIT (Peng et al., 2002), см. Рис. 3.12 (нижняя панель). Результаты, полученные обоими методами, совпадают. Модельные профили сворачивались с функцией рассеяния точки (PSF) камеры ACS, рассчитанной для обоих фильтров для положения галактики М59сЕ в плоскости ПЗС, используя программный пакет ТINY ТІМ⁸, используя звезду спектрального класса K4V в качестве опорного спектра. Ни одна из моделей из следующего списка: Серсик, Кинг, "Nuker", не давала удовлетворительного согласия с наблюдательными данными. Наилучшая аппроксимация была получена двухкомпонентной моделью, содержащей либо два профиля Серсика с параметром $n \simeq 1$ (т.е. практически экспоненциальные профили), либо с экспоненциальным внешним профилем и профилем Кинга для ядра. Галактика практически идеально круглая – эллиптичность изофот остается < 0.03 на всех радиусах. Получены следующие наилучшие значения параметров в фильтре В, исправленные за Галактическое поглощение: $R_{e,in} = 13 \pm 1 \text{ pc}, \langle \mu \rangle_{e,in} = 18.13 \pm 0.09 \text{ mag arcsec}^{-2},$ $m_{\rm tot,in} = 19.78 \text{ mag}, R_{e,\rm out} = 50 \pm 2 \text{ pc}, \langle \mu \rangle_{e,\rm out} = 20.01 \pm 0.04 \text{ mag arcsec}^{-2}, m_{\rm tot,out} = 10.01 \pm 0.04 \text{ mag arcsec}^{-2}$ 18.82 mag.

Мы построили карту цвета g'-i', предварительно ухудшив пространственное разрешение изображения в фильтре F475W, имеющего несколько лучшее разрешение (FWHM=0.090 arcsec), чем изображение в фильтре F850LP (0.092 arcsec), использовав простое математическое преобразование: $I_{475}^{\text{degraded}} = F^{-1}[F(I_{475}) \cdot F(\text{PSF}_{850})/F(\text{PSF}_{475})]$, где F и F^{-1} обозначают прямое и обратное Фурье преобразования соответственно. Для восстановления цветовой информации на периферии объекта мы применили адаптивное разбиение Вороного (Cappellari & Copin, 2003) для изображения в фильтре F850LP для отношения сигнал-шум 100.

Полученная карта g'-i' представлена на Рис. 3.12 (справа вверху). Бины, содержащие более 120 пикселей (области с низким сигналом), маскировались. Ядро галактики оказывается на ~0.15 величин голубее, чем окружающие его области. Размер голубого ядра хорошо соответствует параметрам внутренней компоненты профиля яркости, полученной с помощью пакета GALFIT и при декомпозиции 1-мерного профиля. Оно может свидетельствовать о более молодом звездном населении в ядре M59cO, что напоминает молодые ядра в некоторых dE галактиках в скоплении Дева и S0 галактике низкой светимости NGC 130 (Chilingarian et al., 2007e, 2008b).

Кинематика и звездное население

Методом аппроксимации спектра М59сО мы получили следующие значения параметров кинематики и звездного населения: $v = 708\pm3$ km s⁻¹, $\sigma_v = 48\pm5$ km s⁻¹, $t = 9.3\pm1.4$ Gyr, $Z = -0.03\pm0.04$ dex. Спектр и его наилучшая SSP-модель представлены на Рис. 3.13. Лучевая скорость М59сО отличается на ~270 km s⁻¹ от скорости М59 ($v_r = 440$ km s⁻¹). Это может расцениваться как свидетельство их гравитационного взаимодействия. Мы просканировали значения χ^2 в пространстве параметров на сетке возраст–металличность для

светимости компактных компонент этих объектов из Таб 10 в работе Evstigneeva et al. (2007а) оказываются существенно ниже, чем светимость М59сО. С другой стороны, слабейшая из известных сЕ галактик – М 32 – примерно в 15 раз ярче ($M_B = -15.34$, Graham, 2002, после трансформации в полосу B).

⁸http://www.stsci.edu/software/tinytim/



Рис. 3.13: Спектр SDSS объекта M59cO, его наилучшая модель и невязки аппроксимации; Внутренняя панель: уровни значимости 1 (черный), 2, 3 и 5 σ в пространстве возрастметалличность.

того чтобы обнаружить возможные вторичные минимумы. Уровни значимости в пространстве возраст–металличность показаны на внутренней панели Рис. 3.13.

Мы рассчитали значения Ликских индексов (Worthey et al., 1994) и получили значение обилия элементов $[Mg/Fe] = +0.21 \pm 0.10$ dex, используя модели Thomas et al. (2003). Однако, остаточные отклонения после фиттирования спектра не показывают характерной "ступеньки" в районе 5185Å, обычно хорошо заметной для объектов с высокими значениями [Mg/Fe] из-за несоответствия моделей реальным данным. Поэтому мы подозреваем, что линия Fe₅₂₇₀ испорчена слабой космической частицей, смещая оценки соответствующего Ликского индекса. Поэтому значение +0.2 должно рассматриваться как верхний предел обилия элементов [α /Fe] в M59cO.

3.3.3 Обсуждение и выводы

Сравнение с известными UCD и сЕ галактиками

На Рис. 3.14 мы представляем отношение Faber-Jackson (1976) для динамически горячих звездных систем. Здесь мы приводим расширенную версию Рис. 3 из работы C07a, которая включает полную выборку галактик из скопления Abell 496, UCD-галактики в скоплениях Дева и Печь; переходные объекты от шаровых скоплений к карликовым галактикам – dwarf-globular transition objects (DGTOs); шаровые скопления в Млечном Пути, М 31, NGC 5128; объект W3-NGC 7252 ("тяжелое шаровое скопление"). Дисперсии скоростей M59cO и W3 были исправлены за фактор 1.14, чтобы учесть коррекцию от глобальных до центральных значений (Djorgovski et al., 1997). Другие источники данных остаются теми



Рис. 3.14: Соотношение Faber–Jackson для эллиптических (гигантских и карликовых) и балжей дисковых галактик, UCD, шаровых скоплений и переходных объектов. Источники данных описаны в тексте. Красными квадратиками отмечены NGC 4467, IC 3653 и VCC 1627.

же, что на Рис. 3 в работе C07a. Три UCD из скопления Печь и один в скоплении Девы, имеющие протяженные гало, показаны стрелками, концы которых (как и для M59cO) соответствуют параметрам центральных компактных структур. Для W3 нижних конец стрелки соответствует ожидаемой светимости этого объекта в возрасте 10 Gyr (данные из работы Maraston et al., 2004).

На диаграмме Faber-Jackson открытый нами объект лежит на ярком окончании последовательности, формируемой шаровыми скоплениями, DGTOs и UCD, будучи при этом почти на две величины ярче. Несколько объектов, включая все известные компактные эллиптические галактики, расположены на продолжении этой последовательности в сторону более высоких светимостей, демонстрируя дисперсии скоростей примерно втрое выше, чем dE/dS0 галактики похожих светимостей.

Как уже отмечалось, три UCD с протяженными гало (2 в скоплении Печь и 1 в скоплении Дева) немного ярче, чем M59cO. Однако они смещаются влево на Рис. 3.14 в "обычную" область расположения UCD, если учитывать только их внутрненние компактные компоненты (концы стрелок на рисунке). В то же время, ожидаемое положение молодого массивного скопления NGC7252-W3 через 10 Gyr пассивной эволюции оказывается очень близким к M59cO.

Более детальное сравнение физических свойств M59cO с другими типами галактик и шаровыми скоплениями дается фундаментальной плоскостью. Мы используем переопределение FP в пространстве κ -параметров, предложенном Bender et al. (1992), где κ_1 связана с логарифмом массы, κ_2 , пропорциональное $(M/L)I_e^3$ – мера компактности, а κ_3 связана с логарифмом отношения (M/L).

На Рис. 3.15 мы представляем две проекции FP: κ_3 vs κ_1 ("с ребра") и κ_2 vs κ_1 ("faceon"). Две области, занимаемые различными классами объектов, упомянутых выше, четко видимы на проекции "face-on", в то время как на виде "с ребра" видны только две последовательности: (1) dEs, cEs, gEs и балджи спиралей справа и (2) шаровые скопления, DGTO и UCD слева. Проекция "face-on" (компактность – масса) показывает, что *UCD формируют последовательность, соединяющую яркие шаровые скопления со слабыми карликовыми галактиками*. Несмотря на свою двухкомпонентную структуру, внешняя компонента M59cO намного более компактна, чем гало UCD 3, UCD 5, FCC 303 и VUCD 7 из работы Evstigneeva et al. (2007а), где R_e лежат в диапазоне от 107 рс (UCD 3) до 696 рс (FCC 303), а низкие эффективные поверхностные яркости ($\langle \mu_B \rangle_e$ от 21.1 до 23.2 mag arcsec⁻²) делают их довольно регулярными структурами, напоминающими обычные dEs.

На фундаментальной плоскости M59cO лежит между областями локализации UCDs и cEs-gEs, но все же ближе к UCD. Однако, поскольку звездные населения M59cO похожи на M 32 (Rose et al., 2005), мы заключаем, что SDSSJ124155.33+114003.7 – объект переходного типа между UCD и компактными эллиптическими галактиками.

Происхождение SDSSJ124155.33+114003.7

Динамические отношеия M/L для UCD галактик существенно отличаются от объекта к объекту (Drinkwater et al., 2003; Haşegan et al., 2005; Hilker et al., 2007), указывая на наличие темной материи в некоторых из них. Наşegan et al. (2005) предлагают использовать отношения M/L как способ разделения UCD и массивных шаровых скоплений. В то же время, Evstigneeva et al. (2007а) не нашли свидетельств наличия темной материи в UCD



Рис. 3.15: Фундаментальная плоскость (*к*-пространстве) для различных классов круглых звездных систем. Те же обозначения и цвета, что на Рис. 3.14.

галактиках.

Оценить динамическую массу возможно при использовании теоремы вириала: $M_{\rm vir} \sim 10.0 R_e \sigma_v^2/G$, где σ_v – глобальная дисперсия скоростей (см. Spitzer, 1969, коррекция из 3D к 2D для эффективного радиуса согласно модели Hernquist, 1990). Согласно этой формуле, оценка полной массы M59cO $(1.5 \pm 0.3) \times 10^8 M_{\odot}$ оказывается между массами наиболее массивных UCD и наименее массивных компактных эллиптических галактик. Звездное отношение M/L в фильтре B, которое мы оценили по моделям звездного населения PEGASE.2 для начальной функции масс Солпитера – (5.9 ± 0.7) – соответствует звездной массов $M_* = (9.1 \pm 1.7) \times 10^7 M_{\odot}$, указывая на присутствие темной материи в M59cO в массовой доле около 40%, что примерно соответствует содержанию темной материи в более массивных карликовых эллиптических галактиках – спутниках M 31 (De Rijcke et al., 2006). Если бы мы использовали начальную функцию масс Кгоира (2001) или Scalo (1986), звездная масса снизилась бы еще сильнее, соответствуя большей доле темной материи.

Принимая во внимание высокую металличность звездного населения М59сО, возраст ~9 Gyr указывает на невозможность сценария пассивной эволюции первичной флуктуации плотности как способа формирования М59сО. Присутствие темной материи позволяет заключить, что это ни гигантское шаровое скопление, ни приливное сверхскопление, сформировавшееся в процессе слияния галактик, похожее на NGC 7252-W3. Таким образом, вероятно, что М59сО – это ядро более крупной галактики, сильно ободранной приливными силами М 59.

Сравнение возраста и металличности M59cO с карликовыми эллиптическими галактиками, а также более массивными эллиптическими галактиками (Sánchez-Blázquez et al., 2006d; Chilingarian et al., 2008d), ожидаемая яркость ее прародителя до его приливного обдирания должна находиться в районе $-16.0 < M_B < -18.0$ mag. Другой аргумент в пользу этого сценария – достаточно высокая поверхностная яркость внешнего структурного компонента M59cO: слабая dE галактика не могла быть ее прародителем, иначе "гало" имело бы намного более низкую поверхностную яркость, как в случае 4 UCD из работы Evstigneeva et al. (2007a).

Шесть галактика ранних типов из обзора Virgo ACS Survey содержат звездные ядра, сравнимые по светимости и эффективным радиусам с внутренней компонентой M59cO. Мы оценили параметры кинематики и звездного населения для четырех из них (NGC 4387, IC 3653, IC 3328 и VCC 1627) по спектрам SDSS-DR6 и использовали литературные данные (Sil'chenko, 2006; Trager et al., 1998) для оставшихся двух (NGC 4379 и NGC 4467). Все эти галактики (кроме более молодой и низко-металличной IC 3328) имеют центральные металличности от -0.1 до +0.15 dex и возрасты от 5 (IC 3653) до 12 (NGC 4379) Gyr, т.е. похожие на М59cO. Однако, обилие элементов [Mg/Fe] для NGC 4379 существенно выше солнечного, а дисперсии скоростей для NGC 4379 и NGC 4387 превосходят 100 km s⁻¹. Оставшиеся три галактики со светимостями $-17.0 < M_B < -16.0$ – довольно яркие и компактные и поэтому могут расцениваться как переходные объектов между dE/dS0 и E/S0. Поверхностная яркость внутренних областей соответствует значениям во внешнем компоненте M59cO.

Таким образом, наилучшее объяснение происхождения SDSSJ124155.33+114003.7 – *при*ливное обдирание переходной галактики раннего типа со светимостью между карликами и гигантами. Такие галактики имеют более высокие поверхностные яркости в сравнении как с dE/dS0s, так и с более яркими гигантскими эллиптическими галактиками. В этом случае внешний компонент M59cO может рассматриваться как динамически нагретый остаток толстого диска галактики-прародителя.

Свойства открытого объекта не позволяют однозначно его классифицировать. Он может рассматриваться как наиболее слабый представитель класса компактных эллиптических галактик, либо как наиболее яркая ультракомпактная карликовая галактика. Однако, поскольку он является продуктом катастрофического приливного обдирания, как сЕ и по крайней мере некоторые UCD, его классификация не столь важна. Открытие объекта M59cO оказывается одним из фрагментов в головоломке эволюции галактик в плотном окружении.

3.4 Открытие компактной эллиптической галактики в скоплении Abell 496

Результаты, представленные в данном разделе, опубликованы в работе Chilingarian et al. (2007b).

В этом разделе мы представляем открытие шестой компактной эллиптической галактике в скоплении галактик Abell 496. Наши результаты основаны на анализе спектральных данных среднего разрешения (R=7000 в диапазоне длин волн 5000–5800 Å), полученных с помощью спектрографа FLAMES/Giraffe (мультиобъектный режим "MEDUSA") на телескопе ESO VLT UT2 осенью 2004го года, а также прямых снимках с планетной камеры широкого поля (WFPC2) HST в трех фильтрах: F555W, F702W и F814W, доступных в архиве HST. Открытие было сделано при анализе глубоких прямых снимков в фильтрах u^{*} g' r' i', полученных с камерой Megacam Канадо-Франко-Гавайского телескопа (CFHT) осенью 2003го года, для изучения морфологии и структуры галактик в скоплении Abell 496. Детальное описание спектральных и фотометрических наблюдений приведено в Главе 2.

Для скопления Abell 496 мы принимаем модуль расстояния 35.70 и пространственный масштаб 0.627 kpc arcsec⁻¹, что соответствует $H_0 = 73$ km s⁻¹, $\Omega_M = 0.27$, и $\Omega_{\Lambda} = 0.73$. Все фотометрические измеренния, приведенные в данном разделе, исправлены за Галактическое поглощение согласно работе Schlegel et al. (1998) и эффекты красного смещения (*K*-поправки) в предположении спектра галактики раннего типа. Космологическое ослабление поверхностной яркости было рассчитано на основе лучевой скорости скопления, исправленной за скорость Местной Группы в направлении скопления Дева, составившей 9707 km s⁻¹.

3.4.1 Свойства вновь открытого объекта

Галактика присутствует в базе денных HyperLeda⁹ как PGC 3084811 (Paturel et al., 2003). Однако, другие астрономические базы данных (NED, SIMBAD) не распознают это обозначение, поэтому мы используем обозначение, рекомендованное MAC, – ACO496J043337.35-131520.2, а далее будем использовать краткое обозначение "A496cE".

Галактика A496cE расположена в 22 arcsec (14 kpc в проекции) от центра скопления галактик, таким образом она проецируется на внешние части центральной cD галактика

 $^{^{9} \}rm http://leda.univ-lyon1.fr/$



Рис. 3.16: Изображение центральной части Abell 496 в фильтре *F*702*W*, полученное с HST WFPC2. Обсуждаемые объекты подписаны.



Рис. 3.17: Наилучая двухкомпонентная (Серсик+диск) аппроксимация профиля яркости A496cE (фильтры F555 и r'). Компоненты показаны штрих-пунктирной синей и штриховой зеленой линиями.

Таблица 3.6: Глобальные параметры (светимость, лучевая скорость, центральная диспер-
сия скоростей и параметры наилучшей аппроксимации для однокомпонентной (Серсик)
и двухкомпонентной (Серсик+диск) моделей для профилей яркости A496cE, A496g1 и
А496g2 в фильтре В. Данные для М 32 из работы Graham (2002), для NGC 4486В из
работы Ferrarese et al. (2006) и HyperLeda.

		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			
	A496cE	A496g1	A496g2	M 32	N4486B
$M_{B,tot}$	-16.79	-17.32	-17.91	-15.85	-16.63
$v~{ m km/s}$	9747 ± 1	$10286{\pm}3$	$9948{\pm}1$	-197 ± 15	1557 ± 35
$\sigma_0~{ m km/s}$	104 ± 2	145 ± 3	79 ± 1	$76{\pm}10$	170 ± 4
$M_{B,b}$	-16.60	-17.32	-17.91	-15.34	-16.63
$R_{e,b}$ kpc	0.24	0.66	0.96	0.10	0.18
$\mu_{0,b}$	17.37	18.70	17.79	16.31	14.00
n_b	1.29	1.35	1.94	1.5	2.73
μ_e	19.82	21.30	21.65	19.23	19.58
$<\mu>_e$	18.00	20.44	20.63	18.34	18.39
$M_{B,d}$	-14.80	n/a	n/a	-14.78	n/a
$R_{e,d}$ kpc	0.92	n/a	n/a	0.84	\mathbf{n}/\mathbf{a}
$\mu_{0,d}$	22.55	n/a	n/a	22.28	\mathbf{n}/\mathbf{a}

(см. Рис. 3.16). Фон (т.е. вклад гало сD-галактики) моделировался и вычитался из изображений HST с использованием wavelet-анализа и реконструкции изображения, описанной в работе Adami et al. (2005). Поверхностная яркость гало cD-галактики около A496cE оказывается в районе 24 mag arcsec⁻² в фильтре *B* и имеет существенный градиент, поэтому корректная оценка фона является ключевым моментом для поверхностной фотометрии A496cE. Изображения A496cE аппроксимировались эллиптическими изофотами со свободным положением центра, эллиптичностью и позионным углом при помощи пакета ELLIPSE в среде IRAF. На изображении в фильтре r' (CFHT) позиционный угол заметно меняется, а эллиптичность возрастает от 0.05 до 0.1 в области от 1.8 до 2.6 arcsec.

Мы объединили профили яркости, полученные по данным HST во внутренней части галактики (radius <3.5 arcsec), с более глубокими данными CFHT в фильтре r' во внешних частях, где качество изображения (FWHM=0.8 arcsec) не играет столь важной роли. Профили в фильтре r' были нормированы с использованием эмпирического фактора, который был рассчитан путем сравнения профилей в области от 2 до 4 arcsec.

Мы аппроксимировали одномерный профиль яркости, используя однокомпонентную модель Серсика и двухкомпонентную модель Серсик + экспоненциальный диск (см. Graham, 2002 и Graham & Guzmán, 2003, а также Главу 1) со дополнительным свободным параметром – постоянным уровнем фона. Как и в случае М 32 (Graham, 2002), однокомпонентная модель не в состоянии точно описать наблюдаемый профиль яркости, и требуется внешний экспоненциальный диск. На Рис. 3.17 и в Таб. 3.6 мы представляем профиль яркости А496сЕ и параметры его наилучшей аппроксимации.

Применение техники нерезкой маски с эллиптическим размыванием (Lisker et al., 2006b), очень чувствительной к присутствию вложенных структур в галактиках, не показало никаких особенностей ни на одном из изображений.

Мы построили карты цветов F555W-F702W и F555W-F814W, используя адаптивное



Рис. 3.18: Соотношение Faber–Jackson для эллиптических и балжей дисковых галактик. Гигантские эллиптический галактики и галактики средней светимости показаны синим, балджи дисковых галактик – красным, карликовые галактики ранних типов – черным. Конец стрелки для М 32 соответствует измерению с помощью HST STIS, а красный кружок – HST FOS, который также согласуется с измерениями, выполненными с Земли.

разбиение Вороного (Cappellari & Copin, 2003) для достижения минимального отношения сигнал-шум 20 на бин в изображении в фильтре F814W и 40 в фильтре F702W. Данные не показывают никаких свидетельств наличия градиента цвета. Однако, это не должно рассматриваться как однозначное указание на однородное звездное население в галактике. Например, в М 32 эффекты градиентов возраста и металличности по радиусу компенсируют друг друга в цвете V - I, и профиль цвета оказывается плоским (Rose et al., 2005).

Анализ спектра A496cE проводился с использованием метода NBURSTS (см. детальное описание в Главе 1). Таким образом, мы получили оценки параметров кинематики (v, σ) и звездного населения (SSP-эквивалентные значения возраста и металличности). Хотя мы видим некоторое несовпадение модели с наблюдательными данными, связанное с высоким отношением [α/Fe] в A496cE, качество аппроксимации остается достаточно хорошим $(\chi^2/DOF = 1.6)$. Мы оценили значение отношения α /Fe для звездного населения путем измерения следующих Ликских индексов (Worthey, 1994): Mgb, Fe₅₂₇₀ и Fe₅₃₃₅, используя модели из работы Thomas et al. (2003). Параметры кинематики и звездных населений приведены в Таб. 3.6 и Таб. 3.7 соответственно.

Дисперсия скоростей в A496сЕ довольно высока для ее светимости. Она оказывается выше последовательности карликовых эллиптических галактик на диаграмме Faber-Jackson, показанной на Рис. 3.18, где представлена компиляция данных для карликовых (Geha et al., 2003; van Zee et al., 2004a; De Rijcke et al., 2005) и более ярких, в т.ч. гигантских галактик ранних типов (Bender et al., 1992). Из-за довольно большого размера апертуры

Таблица 3.7: Параметры звездного населения для A496cE, A496g1 и A496g2 в сравнении с М 32 и NGC 4486B. Для М 32 пары соответствуют значениям параметров в ядре на расстоянии 1 r_e (Rose et al., 2005).

	t, Gyr	Z, dex	[Mg/Fe]
A496cE	$16.4{\pm}1.9$	-0.04 ± 0.02	$0.19 {\pm} 0.07$
A496g1	$15.3 {\pm} 2.8$	-0.19 ± 0.03	$0.43 {\pm} 0.09$
A496g2	$13.1 {\pm} 2.0$	-0.43 ± 0.03	$0.28{\pm}0.08$
M 32	4.0, 7.0	0.00, -0.25	-0.25, -0.08
N4486B	9.5	0.4	0.3

световодов FLAMES/Giraffe наше значение дисперсии скоростей для A496cE практически соответствует глобальной дисперсии скоростей, а центральное значение должно быть еще выше. Свойства A496cE, такие как металличность и отношение [Mg/Fe] похожи на характеристики балджей спиральных и линзовидных галактик средней светимости. Возраст и металличность A496cE соответсвуют звездному отношению $(M/L)_{*,B} = 19 \pm 2 \ (M/L)_{\odot}$ (значение рассчитано для начальной функции масс Солпитера). Таким образом, звездная масса A496cE составляет $(1.7 \pm 0.4) \cdot 10^{10} M_{\odot}$.

3.4.2 Обсуждение

Сравнение А496сЕ с другими E, dE и сЕ галактиками

Очень маленький эффективный радиус (около 250 рс), высокая средняя поверхностная яркость ($\mu_{Be} = 19.60 \text{ mag arcsec}^{-2}$) и светимость, соответствующая карликовым галактикам (M_B = -16.96 mag) помещают балдж А496сЕ на продолжении последовательности гигантских эллиптических галактик и балджей в сторону низких светимостей на диаграммах Корменди (Kormendy, 1977) и $M_B - \mu_{\text{eff}}$. На Рис. 3.19 представлены обновленные версии диаграмм с Рис. 9a,g из работы Graham & Guzmán (2003): абсолютная звездная величина в фильтре В и эффективный радиус R_e как функции средней поверхностной яркости в фильтре B внутри эффективного радиуса ($\langle \mu \rangle_e$). Рисунок содержит только данные для эллиптических галактик и балджей спиральных и линзовидных галактик (где балдж-диск декомпозиция была проведена в оригинальных работах), интегральные измерения для спиральных галактик были исключены. Данные для dE и E галактик из работ Binggeli & Jerjen (1998); Caon et al. (1993); D'Onofrio et al. (1994); Faber et al. (1997); Graham & Guzmán (2003); Stiavelli et al. (2001) и алгоритмы для их приведения к единой системе (гомогенизация) были любезно предоставлены А. Graham. К этим данным мы добавили: фотометрические параметры Е и dE/dS0 из Virgo Cluster ACS Survey (Ferrarese et al., 2006), фотометрические данные для галактик ранних типов из работы Bender et al. (1992), параметры Серсик-компонента М 32 (Graham, 2002) и данные для 430 эллиптических галактик с лучевыми скоростями меньше 10000 km s⁻¹ и ярче $M_B = -18.0$ mag из базы данных HyperLeda. Все измерения исправлены за космологическое ослабление поверхностной яркости и переведены в диапазон B согласно работе Fukugita et al. (1995), предполагая спектр эллиптической галактики.

Отражая структурные свойства галактик ранних типов, гигантсие и карликовые системы лежат в разных частях этих диаграмм. Последовательность, формируемая гигант-



Рис. 3.19: Структурные свойства эллиптических галактик и балджей. Гигантские эллиптический галактики и галактики средней светимости, галактики со степенным законом яркости и плоским ядром (power-law и core) показаны синим, балджи дисковых галактик – красным, карликовые галактики ранних типов – черным. Мы сохраняем оригинальную классификацию по светимости (E/dE) для данных из Virgo Cluster ACS Survey и работ Caon et al. (1993); D'Onofrio et al. (1994), поэтому точки показаны обоими цветами.

скими эллиптическими галактиками и балджами спиральных галактик продолжается в область меньших эффективных радиусов и высоких поверхностных яркостей объектами типа M 32 и NGC 4486B. A496cE расположена рядом с NGC 4486B на обеих диаграммах. Поэтому, мы делаем вывод о том, что структурные параметры балджа A496cE похожи на свойства балджей спиральных и линзовидных галактик. Однако, балджи M 32 и A496cE находятся в области, где нет других объектов, указывая на их отличия от обычных балджей.

Мы выбрали линзовидные галактики из работы Sil'chenko (2006) с дисперсиями скоростей и параметрами звездных населений похожими на A496cE: NGC 3098 ($\sigma = 105$ km s⁻¹, [Fe/H] = -0.2, t = 10 Gyr), и NGC 4379 ($\sigma = 108$ km s⁻¹, [Fe/H] = 0.0, t = 15 Gyr). Их светимости ($M_B = -18.9, -18.6$, HyperLeda) примерно на две величины выше, чем у A496cE. Принимая отношение балдж-диск 1:1 по массе для галактик ранних типов, мы получаем, что прародитель A496cE был дисковой галактикой раннего типа, у которой диск был полностью ободран в процессе эволюции, а балдж потерял 2/3 массы.

Теперь сравним свойства A496cE с двумя галактиками из нашей спектральной выборки, попадающими в поле WFPC2: ACO496J043338.22-131500.7 и ACO496J043332.07-131518.1 (PGC 93410), далее A496g1 и A496g2 соответственно. Профиль яркости A496g1 хорошо описывается однокомпонентным законом Серсика. Для A496g2 профиль также может быть описан одной компонентой, но возможно и присутствие слабого внешнего экспоненциального диска. Оба объекта имеют эффективные радиусы в несколько раз больше, чем у A496cE, в то время как светимости не отличаются столь сильно. Металличность и дисперсия скоростей A496g2 не выше, чем ожидалось бы для объекта этой светимости, однако отношение [Mg/Fe] очень высоко, указывая на короткую интенсивную вспышку звездообразования (Matteucci, 1994). Газ из галактики мог быть выметен лобовым давлением, эффективным в центральных частях скоплений (Abadi et al., 1999), так что звездообразование было резко остановлено.

Для A496g1 общая металличность на ~0.2 dex выше, чем ожидается для ее светимости, но отношение [Mg/Fe] и дисперсия скоростей исключительно высоки (см. Рис. 3.18), так что эта галактика оказывается ближе по свойствам к эллиптической или S0 со светимостью $M_B \approx -19$ mag. Старые возрасты звездных населений A496cE, A496g1 и A496g2 доказывают, что ни одна из них не испытывала слияния с галактикой с более молодым звездным населением в течение последних 10 Gyr, что является косвенным подтверждением их обитания в центральной части скопления Abell 496 с того времени.

Возможное происхождение А496сЕ

Присутствие внешнего экспоненциального диска в A496cE не позволяет классифицировать ее как чисто эллиптическую галактику. В работе Lisker et al. (2008) предполагается, что только карликовые эллиптические галактики являются классическими сфероидами, но большое количество dE в скоплении Дева возможно являются толстыми дисками и сформировались путем потери массы более массивными галактиками во время их движения к центру скопления. Однако, A496cE не следовала по тому же эволюционному пути, что и три подкласса галактик из работы Lisker et al. (2008), поскольку ее свойства указывают на уникальность этого объекта.

В работе Block et al. (2006) представлено моделирование лобового столкновения туман-

ности Андромеды с маломассивным компаньоном, известным как М 32. Это моделирование указывает на то, что значительная часть массы М 32 оказывается потерянной на временах 10⁷ лет. При некоторых условиях, если обдираение дисковой галактики начинается с ее внешних частей, общий потенциал становится менее глубоким, и балдж галактики может уменьшиться, приводя к сокращению линейных размеров объекта.

Галактика A496cE наблюдается близко от центра скопления галактик. Если ее орбита имеет малый период и достаточно близка к cD галактике, так, что часть ее оказывается погруженной в гало cD, приливное обдирание должно происходить очень быстро и эффективно. Старое звездное население A496cE указывает на то, что основная часть диска была потеряна очень давно. Но как тогда такой объект может выжить в течение миллиардов лет столь близко к cD галактики и не будет поглощен ею?

Имеются два основных аспекта, присутствующие в процессе слияния галактик: (1) динамическое трение, уменьшающее размер орбиты и приводящее к тому, что объект проходит все ближе и ближе к центру скопления; (2) приливные силы, которые могут полностью разорвать объект, если он подойдет достаточно близко к cD галактике.

Балдж А496сЕ очень компактный и плотный, так что он должен быть достаточно устойчивым к приливному обдиранию. Ее внешний экспоненциальный профиль не показывает никакого обрывания до приливного радиуса $r_{tid} \sim 2$ kpc. Здесь мы предполагаем расстояние в перицентре орбиты $d_p = 14$ kpc, т.е. что А496сЕ проходит около перицентра сейчас, а плоскость орбиты перпендикулярна лучу зрения. Это предположение правомерно, поскольку лучевые скорости А496сЕ и сD галактики отличаются всего на 100 km s⁻¹. Принимая массу cD $\sim 10^{13} M_{\odot}$, скорость в перицентре должна быть около $v \approx 2000$ km s⁻¹. Сила динамического трения пропорциональна $\sim \frac{M^2 \rho}{v^2}$. Предполагая, что A496сЕ в 4–6 раз массивнее М 32 ($\approx 3.0 \cdot 10^9 M_{\odot}$), ее орбитальная скорость в 10 раз выше, а плотности гало сравнимы, мы получим, что динамическое трение для А496сЕ в 3–4 раза менее эффективно, чем для М 32. Поэтому, с большой вероятностью А496сЕ могла выживать в течение миллиардов лет в центральной части скопления галактик. Ее прародитель должно быть потерял большую часть массы в течение первого прохода около cD галактики, что сильно уменьшило эффекты динамического трения. Ее высокая металличность и высокое отношение [Mg/Fe] – дополнительные аргументы в пользу более массивного прародителя.

3.5 SDSS J150634.27+013331.6 – вторая компактная эллиптическая галактика в группе NGC 5846

Результаты, представленные в данном разделе, опубликованы в работе Chilingarian & Bergond (2010).

В этом разделе представлено открытие пятой¹⁰ близкой сЕ галактики, сделанное автоматической системой анализа данных, использующей Виртуальную Обсерваторию. Эта галактика стала вторым объектом этого класса в группе NGC 5846. Мы исследуем ее свойства, используя 3D-спектроскопию, а также данные в разных диапазонах длин волн, доступные в VO и архивах данных.

 $^{^{10}}$ Предварительный анализ данных (Smith Castelli et al., 2010) для двух галактик скоплении Hacoc (Smith Castelli et al., 2008), находящемся на расстоянии $d \approx 35$ Мрс подтверждает их членство в скоплении, таким образом расширяя выборку близких сЕ галактик до 7 объектов.

3.5.1 Использовавшиеся данные и методы их анализа

В работе Chilingarian et al. (2009а) описана автоматическая система анализа данных (VO workflow), разработанная для поиска сЕ галактик в близких скоплениях. Мы расширили ее для поиска галактик также в близких группах. Поскольку множество групп галактик расположены на небольших расстояниях от нас, галактики имеют большие размеры на небе по сравнению с объектами в скоплениях, что требует других установок программного пакета SEXTRACTOR (Bertin & Arnouts, 1996). Чтобы проверить обновленную версию системы, мы решили использовать HST изображения центральные части скопления Дева и группы NGC 5846, содержащих известные сЕ галактики: NGC 4486B и NGC 5846A. К нашему удивлению, система нашла новый компактный объект на HST WFPC2 изображениях группы NGC 5846, расположенный в 3.1 агстіп на юго-восток от центра группы. Для этого объекта был найден спектр, полученный в рамках обзора SDSS (SDSS DR7, Abazajian et al., 2009), доказывающий его принадлежность к группе NGC 5846. Галактика имеет обозначение SDSS J150634.27+013331.6, мы же будем ее называть NGC 5846сЕ для краткости. Недавно этот объект был упомянут в работе Eigenthaler & Zeilinger (2010), где он был неправильно классифицирован как UCD.

Группа NGC 5846, являющаяся третьей по массе структурой в локальной Вселенной после скоплений галактик Дева и Печь, интенсивно исследовалась в прошлом, поэтому для нее доступны многочисленные наблюдения в архивах и в VO. Группа расположена на расстоянии 26.1 Мрс в облаке галактик Virgo III (Tully, 1982; Eigenthaler & Zeilinger, 2010), что соответствует пространственному масштабу 126 рс arcsec⁻¹ и модулю расстояния 32.08 mag.

Фотометрические данные

Для изучения структуры NGC 5846сЕ мы использовали откалиброванные оптические данные WFPC2 HST в фильтрах F555W и F814W (суммарные времена накопления 2200 и 2300 секунд), доступные в архиве Hubble Legacy Archive¹¹, и обнаруженные автоматической системой поиска сЕ галактик. Галактика имеет маленький угловой размер на небе, поэтому все остальные фотометрические данные использовались только для интегральной фотометрии. Все фотометрические характеристики, приведенные в этом разделе, исправлены за Галактическое поглощение согласно работе Schlegel et al. (1998).

Группа NGC 5846 попадает в области обзоров: (1) GR4 Data Release обзора Medium Imaging Survey (MIS) на ультрафиолетовом телескопе Galaxy Evolution Explorer (GALEX); (2) Data Release 6plus (DR6+) проекта Large Area Survey (LAS) обзора UKIRT Infrared Deep Sky Survey (UKIDSS, Lawrence et al., 2007). Таким образом, помимо оптической 5-цветной ugriz фотометрии SDSS DR7, оказывается доступной фотометрия в двух УФ-полосах (far-UV, near-UV) и четырех фильтрах в ближнем ИК диапазоне (YJHK). Мы использовали звездные величины в апертурах Петросяна из SDSS и UKIDSS, применяя коррекцию нульпункта для перевода значений из системы Вега в AB для ИК-наблюдений согласно работе Hewett et al. (2006), и интегральные величины FUV и NUV из обзора GALEX.

Помимо этого, имеются публично доступные изображения поля NGC 5846, полученные космическим телескопом им.Спитцера с помощью камеры Infrared Array Camera (IRAC) в четырех фотометрических полосах с эффективными длинами волн 3.6, 4.5, 5.8 и 8.0 μ m.

¹¹http://hla.stsci.edu/
Мы измерили интегральные *AB*-величины в этих фильтрах для NGC 5846сE, используя SEXTRACTOR (параметры *MAG AUTO* и *MAGERR AUTO*).

Несколько центральных пикселей на изображениях галактики, полученных с помощью HST WFPC2 оказываются перекопленными, поэтому детальный анализ центральной части галактики провести нельзя. Фон из всех изображений вычитался с помощью SEXTRACTOR, поскольку галактика находится достаточно далеко от NGC 5846. Затем мы получили одномерный профиль яркости NGC 5846cE, аппроксимируя ее изображение программным пакетом STSDAS.ANALYSIS.ISOPHOTE.ELLIPSE в среде IRAF.

На Рис. 3.20 представлено поведение эллиптичности e = 1 - b/a и позиционного угла (верхняя и средняя панели) как функции радиуса, а также цветовой профиль F555W - F814W. Позиционный угол показывает одно и то же значение PA = 127 deg на всех радиусах. Внешние изофоты галактики практически идеально круглые ($e \sim 0.05$), однако их эллиптичность значительно увеличивается по мере приближения к центру, достигая e = 0.3 на r = 0.125 kpc= 1 arcsec. В самых внутренних частях галактики эллиптичность уменьшается, однако мы не в состоянии измерить ее на расстояниях r < 0.3 arcsec из-за перекопленных центральных пикселей. Радиальное поведение PA и e идентично в обеих фотометрических полосах. Изофоты галактики остаются чисто эллиптическими без малейших свидетельств искажения форм (diskyness/boxiness).

Восстановленный цветовой профиль оказывается совершенно плоским со значением F555W - F814W = 0.90 mag. Мы построили двумерную карту цвета NGC 5846cE, применяя адаптивное разбиение Вороного (Cappellari & Copin, 2003) с заданным минимальным отношением сигнал-шум 100 в фильтре F555W. Она не содержит никаких статистически значимых отклонений от постоянной величины, упомянутой выше. Применение нерезкой маски не показывает никаких вложенных структур в NGC 5846cE.

Цветовой профиль во внешних частях (r > 2.0 агсsес) идеально аппроксимируется законом Серсика (Sersic, 1968) с параметром $n \approx 1.5$, но в этом случае наблюдается некий избыток яркости в центральной части галактики. Поэтому мы провели структурную декомпозицию профиля яркости, используя двухкомпонентный профиль, содержащий внутреннюю и внешнюю компоненты Серсика, используя алгоритм, описанный в Главе 1. Полученные структурные параметры NGC 5846сЕ в фильтре F555W представлены в Таб. 3.8. Параметры внутренней компоненты определяются довольно плохо из-за отсутствия данных в центральной части галактики. Профиль яркости и его компоненты представлены на Рис. 3.21, масштаб по радиусу выбран логарифмический для того чтобы подчеркнуть внутреннюю компактную компоненту. Полная восстановленная абсолютная величина NGC 5846сЕ в фильтре F555W составляет $M_{F555W} = -17.07 \pm 0.10$ mag. Для того, чтобы перевести это значение в полосу Johnson B, необходимо применить преобразование B - F555W = 0.92 mag согласно работе (Jordi et al., 2006), полученное с использованием значение g - r = 0.78 mag из фотометрии SDSS DR7. Абсолютная величина галактики в фильтре B по данным фотометрии SDSS DR7 составляет $M_B = -15.98$ mag.

Спектральные данные

Галактика NGC 5846cE наблюдалась с помощью Потсдамского мульти-апертурного спектрографа PMAS (Roth et al., 2005) на 3.5-метровом телескопе обсерватории Калар-Альто 22-го апреля 2009 года в рамках наблюдательного проекта "3D-спектроскопия карликовых



Рис. 3.20: Радиальный профиль позиционного угла большой оси (сверху), эллиптичности изофот (в центре) галактики NGC 5846сЕ по изображениям HST WFPC2 в фильтрах *F*555*W* и *F*814*W* (показаны черным и зеленым). На нижней панели представлен восстановленный профиль цвета *F*555*W* – *F*814*W*.



Рис. 3.21: Двухкомпонентная декомпозиция профиля яркости NGC 5846cE. На верхней панели показан профиль яркости (черные ромбики) и две компоненты (штриховая синяя и пунктирная зеленая линии для внутреннего и внешнего профилей Серсика соответственно. На нижней панели показаны невязки аппроксимации.

1 000111		
	$ m S\acute{e}rsic_{in}$	$Sérsic_{out}$
$r_e \; \mathrm{kpc}$	0.038 ± 0.012	0.291 ± 0.009
r_e arcsec	0.30 ± 0.10	2.33 ± 0.07
n	1.56 ± 0.26	1.41 ± 0.02
$\mu_e \text{ mag arcsec}^{-2}$	17.48 ± 1.05	19.86 ± 0.13
$\langle \mu \rangle_e \text{ mag arcsec}^{-2}$	16.56 ± 1.05	19.00 ± 0.13
M_{F555W} mag	-14.92	-16.91

Таблица 3.8: Двухкомпонентная декомпозиция профиля яркости NGC 5846сЕ в фильтре <u>*F*555W</u>.

эллиптических галактик с кинематически выделенными ядрами" (P.I.: Gilles Bergond). Галактика NGC 5846cE была предложена как дополнительный объект для наблюдения в утренние часы. Было сделано три 30-минутных экспозиции в режиме LArr с помощью полевого линзового блока (Integral-Field Unit, IFU), содержащего 16×16 квадратных линз размером 1×1 агсsес. Качество изображения (FWHM) составляло примерно 1.8 агсsес. Мы использовали гризму V1200, дающую спектральное разрешение $R \approx 2800$ в диапазоне 4720-5420Å.

Для обработки данных мы использовали универсальный автоматизированный пакет обработки IFU данных в среде IDL. Краткое описание шагов по редукции данных может быть найдено в Главе 2. Калибровка потоков производилась с использованием наблюдений спектрофотометрического стандарта HZ 44. Спектр ночного неба собирался из линз, находящихся достаточно далеко от центра галактики (r > 6 arcsec). Для анализа мы использовали только часть поля зрения размером 8×8 arcsec. Мы применяли адаптивное разбиение Вороного к полностью обработанным данным с вычтенным фоном неба.

Мы использовали методику NBURSTS (см. Главу 1 и Chilingarian et al., 2007с) для аппроксимации спектров, и восстановили двумерные карты лучевой скорости и дисперсии скоростей звезд, а также возраста и металличности, представленные на Рис. 3.22. Значения минимального отношения сигнал-шум составили 10 и 15 на пиксель для расчета карт кинематики и звездного населения соответственно.

Несмотря на практически круглые внешние изофоты, галактика показывает правильное поле скоростей с выраженным вращением по большой оси $(v_r \sin i = 40 \text{ km s}^{-1})$. Повидимому, мы достигаем максимума вращения уже на r = 3...4 arcsec, что сравнимо с M 32 (см. например Simien & Prugniel, 2002), однако более глубокие наблюдения с более высоким пространственным разрешением необходимы для однозначного ответа на данный вопрос.

Поле дисперсии скоростей имеет выраженный максимум в центре, достигая $\sigma_0 = 118 \text{ km s}^{-1}$, при удалении от центра значения снижаются до 75–85 km s⁻¹ на r = 3 arcsec. Из-за ограниченного пространственного разрешения наших данных реальное значение центральной дисперсии скоростей скорее всего недооценено, и оно может оказывать значительно выше, как в других близких сЕ галактиках (Davidge et al., 2008).

Звездное население галактики очень старое ($t = 15 \pm 4$ Gyr) и высокометалличное ([Z/H] = -0.04 ± 0.06 dex). Металличность слегка уменьшается при удалении от центра, однако изменение составляет всего -0.1 dex. Возраст не показывает статистически значимых изменений по полю.

Мы также использовали спектр галактики из обзора SDSS DR7 (R = 1800), полученный в 3-секудной круглой апертуре. Метод NBURSTS был применен в диапазоне длин аолн 3900 – 6800 Å, чтобы сравнить полученные параметры с данными наблюдений PMAS в центральной части галактики. Значения ($v_r = 1537 \pm 2 \text{ km s}^{-1}$, $\sigma_0 = 119 \pm 2 \text{ km s}^{-1}$, $t = 15.3 \pm 0.6 \text{ Gyr}$, $[Z/H] = -0.04 \pm 0.02 \text{ dex}$) очень хорошо согласуются между двумя наборами наблюдательных данных. В галактике отсутствуют эмиссионные линии, что исключает текущее звездообразование в ней, а также присутствие ионизованного газа в любой форме.

Мы использовали измерения Ликских индексов (Worthey et al., 1994) Mgb, Fe5270 и Fe5335, доступные в обзоре SDSS и модели из работы Thomas et al. (2003) для оценки отношения элементов α /Fe. Полученное значение составляет [Mg/Fe] = 0.34 ± 0.05 dex.



Рис. 3.22: Двумерные карты параметров кинематики и звездного населения NGC 5846сЕ, полученные из анализа IFU спектров PMAS методом NBURSTS: лучевая скорость и дисперсия скоростей (верхний ряд), SSP-эквивалентные возраст и металличность (нижний ряд).



Рис. 3.23: Распределение энергии в спектра NGC 5846cE в широком диапазоне длин волн, полученное из фотометрических данных, найденных в Виртуальной Обсерватории и архиве Космического Телескопа им. Спитцера. Горизонтальные отрезки соответствуют FWHM фотометрических полос. Пунктирная черная линия – SSP-модель PEGASE.2 без внутреннего поглощения, соответствующая t = 15 Gyr и [Fe/H]=0.0 dex.

3.5.2 Обсуждение

На Рис 3.23 представлено распределение энергии в спектре (SED) галактики NGC 5846сЕ, построенное из данных интегральной фотометрии, описанных выше. Поверх нанесена спектральная модель простого звездного населения (SSP) низкого разрешения, рассчитанная с помощью PEGASE.2 (Fioc & Rocca-Volmerange, 1997) для значений возраста и металличности, полученных из анализа спектра галактики из обзора SDSS DR7. Внутреннее поглощение принято за ноль. Можно видеть идеальное согласие между SSP-моделью и наблюдаемым SED галактики на всех длинах волн от 1500Å до 8 μ m. Отсутствие избытка потока в УФ части спектра исключает протяженную историю звездообразования и какое-либо недавнее остаточное звездообразование, а согласие данных с моделью на всех длинах волн указывает на отсутствие пыли в объекте. Все это, а также высокое значение [Mg/Fe] указывает на то, что история звездообразования NGC 5846сЕ содержала один очень короткий и интенсивный эпизод в далеком прошлом.

Структурные характеристики и низкая светимость помещают NGC 5846сЕ между М 32 и A496сЕ на фундаментальной плоскости и ее проекциях. В то же время, ее свойства звездного населения, особенно очень высокое отношение [Mg/Fe] напоминают экстремальные объекты типа A496g1 и NGC 4486B. К тому же NGC 5846сЕ имеет двух-компонентный профиль яркости. Однако, важное отличие этой галактики от типичных сЕ (Graham, 2002; Chilingarian et al., 2007b) и переходных галактик сЕ/UCD (Chilingarian & Mamon, 2008; Price et al., 2009) заключается в том, что даже ее внешняя компонента очень яркая и компактная.

Методами численного моделирования в работе Chilingarian et al. (2009a) продемон-

стрировано, что приливное обдирание дисковой (возможно содержащей бар) галактики потенциалом cD галактики в центре скопления является наиболее вероятным сценарием формирования cE галактик. В случае NGC 5846cE роль cD берет на себя NGC 5846 – очень массивная невращающаяся (Emsellem et al., 2004) эллиптическая галактика. Эллиптичность изофот, возрастающая к центру, вращение вдоль большой оси, и, в то же время, очень правильная форма изофот и отсутствие вложенных структур поддерживают сценарий обдирания бара, который был предложен в работе Chilingarian et al. (2009а) и представлен там на Рис. 3. По отношению светимость-металличность, представленному на нижней панели Рис. 1 в той же работе, мы можем оценить светимость прародителя NGC 5846cE в районе $M_B = -19$ mag, что означает, что галактика уменьшила свою звездную массу примерно в 15 раз в процессе приливного обдирания.

Мы можем сравнить звездные массы NGC 5846сЕ в настоящее время, рассчитанные с использованием двух различных начальных функций масс, как мы делали для UCD (Chilingarian et al., 2008c), используя светимость галактики по данным SDSS DR7, возраст и металличность ее звездных населений, полученных методом NBURSTS и соответствующие значения отношения масса-светимость из моделей PEGASE.2. Результаты различаются почти в два раза: $(4.2 \pm 0.4) \times 10^9 M_{\odot}$ и $(2.2 \pm 0.3) \times 10^9 M_{\odot}$ для начальных функций масс Salpeter (1955) и Kroupa (2001) соответственно.¹² В то же время, простая вириальная оценка динамической массы $10R_e\sigma_v^2/G$ (Spitzer, 1969) дает значение $(5.5 \pm 0.6) \times 10^9 M_{\odot}$, в предположении о глобальной дисперсии скоростей $\sigma_v = 100 \pm 5$ km s⁻¹. Таким образом, галактика будет содержать около 60% темной материи в предположении начальной функции масс Солпитера, и практически не содержать ее, если мы применяем функцию масс Крупы, что делает NGC 5846сЕ похожей на UCD галактики, которые скорее всего возникают путем приливного обдирания более массивных звездных систем.

Таким образом, все наблюдаемые свойства NGC 5846сЕ указывают на то, что скорее всего эта галактика – результат приливного обдирания массивной дисковой (возможно содержащей бар) галактики потенциалом NGC 5846, что соответствует процессам в скоплениях галактик. В отличие от М 32, NGC 5846сЕ представляет собой замечательный пример близкой сЕ галактики, похожей не объекты, наблюдаемые в массивных скоплениях. Мы надеемся, что это позволит изучить в деталях внутреннее распределение массы в ней, используя будущие наблюдения на доступных инструментах, чтобы лучше понять эффекты приливного взаимодействия галактик.

3.6 Открытие компактных эллиптических галактик с помощью Виртуальной Обсерватории

Результаты, представленные в данном разделе, опубликованы в работе Chilingarian et al. (2009а).

Компактные эллиптические галактики характеризуются малыми размерами и высокими звездными плотностями. Предполагается, что они формируются путем приливного обдирания более массивных систем. Однако известно всего несколько представителей этого класса, не позволяя нам понять роль, которую играет этот механизм в эволюции галактик. Мы представляем выборку из 21-й компактной эллиптической галактики, обна-

¹²Параметры звездного населения оказываются примерно одинаковыми для обеих начальных функций масс. Все значения, приведенные выше, относятся к функции масс Солпитера.

руженных с помощью методов Виртуальной Обсерватории. Последующая спектроскопия и поиск по архивам с использованием изображений высокого пространственного разрешения и крупных баз данных показал, что все они имеют старые богатые металлами звездные населения, отличные от карликовых эллиптических галактик схожих масс, но соответствующих более массивным галактикам ранних типов, поддерживая сценарий их приливного обдирания. Мы воспроизвели свойства сЕ галактик методами численного моделирования приливного взаимодействия, в процессе которого формируются компактные динамически горячие системы, совпадающие по свойствам с галактиками в нашей выборке.

В настоящее время скопления галактик содержат богатые популяции карликовых эллиптических и линзовидных галактик (Ferguson & Binggeli, 1994), имеющих регулярную морфологию, где отсутствует текущее звездообразование и нет межзвездной среды. Предполагается, что эти галактики формируются за счет внутренних процессов, таких как отклик сверхновых на звездообразование (Dekel & Silk, 1986), либо внешних факторов [выметание ISM лобовым давлением межгалактического газа (Gunn & Gott, 1972) и/или повторяющиеся гравитационные взаимодействия с другими членами скопления (Moore et al., 1996)], действующих на богатые газом галактики-прародители. Приливное обдирание не рассматривалось как важных механизм эволюции галактик вплоть до недавнего открытия ультракомпактных карликовых галактик (Mieske et al., 2002; Drinkwater et al., 2003), т.е. очень компактных звездных систем намного более массивных, чем известные шаровые скопления. Однако, UCD ($L \sim 10^7 L_{\odot}$) остаются почти на два порядка слабее, чем яркие dE галактики и оказываются, таким образом, доступными для изучения только в нескольких близких скоплениях галактик.

Компактные эллиптические (cE) галактики, или галактики типа M 32, которые также предположительно формируются путем приливного обдирания (Bekki et al., 2001b), имеют светимости (~ $10^9 L_{\odot}$ (Graham, 2002; Mieske et al., 2005; Chilingarian et al., 2007b; Price et al., 2009)) близкие к dE/dS0 галактикам, но их эффективные радиусы ($R_e \sim 0.25$ kpc) оказываются в несколько раз меньше, таким образом приводя к очень высоким средним поверхностным яркостям ($\langle \mu \rangle_e$) в сравнении с dE/dS0. Эти два критерия довольно просто формализовать и применить к членам близких скоплений галактик на известных расстояниях, таким образом имеющим известный пространственный масштаб. Наземные телескопы не могут разрешать объекты размером 0.25 kpc на расстояниях, превосходящих 50 Mpc. Чтобы искать их в скоплениях на расстояниях до 200 Mpc, таким образом увеличивая область поиска в локальной Вселенной по объему в 60 раз, необходимо применять Космический Телескоп им.Хаббла (HST).

Мы разработали "workflow", т.е. автоматическую систему анализа данных для поиска сЕ галактик в больших коллекциях данных, предоставленных Виртуальной Обсерваторией (VO). Он содержит несколько этапов. (i) Идентификация скоплений галактик на красных смещениях z < 0.055, используя сервис Vizier, разработанный Страсбуржским Центром Астрономических Данных. Без этого условия потенциальные сЕ кандидаты могут оказаться слишком слабыми для спектральных наблюдений. (ii) Как только скопления выбраны, более точное определение их параметров, используя другие VO ресурсы, такие как NED. (iii) Использование протокола IVOA Simple Image Access Protocol для поиска по координатам и загрузки HST изображений выбранных скоплений галактик из архива Hubble Legacy Archive (HLA). (iv) Для анализа каждого изображения использовался пакет SEXTRACTOR (Bertin & Arnouts, 1996) для примерного определения эффективных радиусов, интегральных светимостей и примерных профилей яркости для всех галактик. (v) Затем применялись цветовые преобразования для перевода всех фотометрических измерений в одну и ту же фотометрическую полосу и применялся критерий поверхностная яркость – эффективный радиус для отбора кандидатов в сЕ галактики. (vi) В заключение проводились дополнительные запросы в базы данных NED, Vizier и SDSS DR7 с целью поиска дополнительной информации для кандидатов, например опубликованных красных смещений и интегральной фотометрии.

Применение этой системы ко всей коллекции данных с камеры WFPC2 HST в архиве HLA и анализ изображений 63 скоплений галактик завершилось обнаружением 55 кандидатов в сЕ галактики в 26 скоплениях.

Наша система анализа, использующая только прямые снимки, может путать сЕ галактики с (i) галактиками с текущим звездообразованием – членами скопления либо объектами переднего плана; (ii) гигантскими галактиками ранних типов, содержащими яркие активные ядра (AGN) – объектами фона; (iii) галактиками фона типа poststarburst или E+A. Объекты с текущим звездообразованием могут быть исключены автоматически по голубым цветам, если доступны данные в нескольких фильтрах, либо при просмотре глазом по клочковатой морфологии. Два оставшихся случая реализуются, если расстояние до объекта фона превосходит расстояние до скопления в 2–3 раза, т.е. составляет <400– 500 Мрс (z < 0.12) в нашем случае. Вероятность присутствия poststarburst галактики на таком красном смещении очень низка (Goto et al., 2003а), а сильные AGN могут быть исключены анализом каталогов точечных источников рентгеновского излучения.

Мы немедленно подтвердили природу 14 сЕ галактик (см. Рис. 3.24). Для 6, где были доступны архивные спектры SDSS DR7, мы получили их свойства методом NBURSTS: параметры кинематики и звездных населений. Для оставшихся 8 галактик мы нашли литературные данные по красным смещениям в базах данных NED и Vizier.

Чтобы расширить выборку подтвержденных сЕ галактик, мы провели наблюдения трех скоплений галактик: Abell 160, Abell 189 и Abell 397, содержащих 7 кандидатов со светимостями в диапазоне $2.3 \cdot 10^8 < L_B < 1.1 \cdot 10^9 L_{\odot}$. Данные были получены с помощью многощелевого блока спектрографа SCORPIO (Afanasiev & Moiseev, 2005) на телескопе БТА САО РАН в августе 2008 года (см. ниже). Спектры аппроксимировались моделями звездных населений с помощью метода NBURSTS, что позволило получить точные оценки их лучевых скоростей, дисперсий, возрастов и металличностей. Все 7 галактик оказались членами соответствующих скоплений с внутренними дисперсиями скоростей от 50 до 100 km s⁻¹ и старыми звездными населениями. Один из них показывает деталь, возможно являющуюся следствием приливного взаимодействия (см. Рис. 3.25).

Ни одна из галактик из нашей выборки (см. Таб. 3.9,3.10) не содержит молодого звездного населения. Металличности заключены в пределах от $Z_{\odot}/2.5$ ([Fe/H] = -0.4 dex) до солнечной, за исключением ACO 189 J012325.96+014236.2, где значение оказывается ниже – порядка $Z_{\odot}/5$. Три галактики отстоят на > +0.3 dex от соотношения светимостьметалличность для галактик ранних типов (нижняя панель Рис. 3.24); три других отстоят от этой зависимости на величины от +0.2 до +0.3 dex. Дисперсии скоростей галактик лежат близко к значениям, ожидаемым по соотношению Faber–Jackson, и оказываются существенно выше дисперсий скоростей dE галактик. Все эти свойства соответствуют сценарию, где сЕ галактики формируются путем приливного обдирания дисковых галактик ранних типов средних светимостей. Приливное обдирание дисковой галактики раннего типа должно в первую очередь коснуться ее внешнего диска. Ее плотный балдж должен выдерживать даже очень сильные приливные взаимодействия. После динамической релаксации, "ободранный" остаток может немного расшириться, а дисперсия скоростей понизиться. Для галактик без межзвездной среды, таких как галактики ранних типов в скоплениях, приливное обдирание никак не изменит свойства их звездного населения, в то же время значительно уменьшив звездную массу. А поскольку существует зависимость между средними металличностями и звездными массами галактик ранних типов (Gallazzi et al., 2005; Renzini, 2006), этот процесс создаст объекты с необычными свойствами звездных населений – системы с очень высокой металличностью для их наблюдаемых звездных масс, т.е. в точности то, что наблюдается в галактиках, населяющих центральную часть скопления Abell 496 (Chilingarian et al., 2008d) и в ультракомпактных карликовых галактиках (Chilingarian et al., 2008c).

Также звездную металличность можно повысить путем звездообразования, индуцированного внешними процессами, такими как слияния либо взаимодействия с богатыми газом галактиками, где приливная компрессия может существенно увеличить эффективность звездообразования (Emsellem & van de Ven, 2008). Однако, в этом случае средний возраст звездного населения будет уменьшаться, поскольку вновь сформировавшиеся звезды имеют более низкие отношения массы к светимости, чем старое звездное население, таким образом внося существенный вклад в общую светимость даже для низких массовых долей. Все галактики в нашей выборке имеют старые звездные населения, исключая данный сценарий.

Приливные эффекты должны быть наиболее сильны в окрестностях массивных галактик, в частности, вокруг сD галактик в скоплениях.

Чтобы исследовать эффективность приливного обдирания, мы моделировали взаимодействие дисковой галактики с потенциалом скопления галактик, используя программный пакет GADGET-2 (Springel, 2005). Мы исследовали эффекты приливного обдирания с пространственным разрешением ~ 100 рс, существенно превосходящим типичные значения разрешения для моделирования скоплений галактик, и проверили 32 различных орбитальных конфигурации. Мы перевели карты плотности, полученные в результате моделирования, в карты поверхностной яркости и обработали их точно так же, как мы поступали при поиске сЕ галактик на изображениях HST.

Наше моделирование демонстрирует эффективность приливного обдирания в уменьшении звездной массы дисковой галактики. Даже в случае квази-круговых орбит, внешний диск галактики оказывается сильно ободранным, уменьшая общую звездную массу в 2 раза (Рис. 3.26) на временной шкале 600–700 Муг. Мы сравниваем эволюцию светимости, поверхностной яркости и внутренней дисперсии скоростей обдираемой галактики с наблюдениями. Взаимодействия на радиальных орбитах вызывают потерю массы до 90 процентов, однако остаток довольно быстро поглощается за счет эффектов динамического трения сD галактикой. Предположительно, уменьшая массу галактики-прародителя, т.е. заменяя гигантскую дисковую галактику карликовой S0 галактикой, возможно будет воспроизвести формирование UCD и галактик переходного типа cE/UCD (Chilingarian & Mamon, 2008; Price et al., 2009).

В нашем исследовании мы использовали поиск и анализ данных в Виртуальной Обсерватории (data mining) для превращения класса компактных эллиптических галактик из "уникального" в "обычный при определенных условиях окружения", т.е. намного более распространенного, чем считалось ранее. Мы подтвердили природу 21 галактики, выбранной автоматической системой анализа данных (VO workflow) путем анализа наблюдений и архивных данных. Затем мы воспроизвели свойства компактных эллиптических галактик методом численного моделирования. Мы можем подтвердить, что приливное обдирание звездной компоненты играет важную роль в морфологической трансформации галактик в плотном окружении, создавая остатки, покрывающие интервал светимостей в четыре порядка величины.

3.6.1 Наблюдения, обработка и анализ данных

Наблюдения трех скоплений галактик (Abell 160, Abell 189, and Abell 397), содержащих в общей сложности 7 сЕ кандидатов ($-17.1 < M_B < -15.4$ mag) проводились с помощью универсального спектрографа SCORPIO (Spectral Camera with Optical Reducer for Photometric and Interferometric Observations) (Afanasiev & Moiseev, 2005) на БТА САО РАН в рамках одного сета наблдюдений 25, 27 и 28 августа 2008 (программа "Кинематика и звездное население вновь открытых компактных эллиптических галактик"). Мы использовали многощелевой режим наблюдений и гризму VPHG2300g с центральной длиной волны 5250 Å, что позволило получать спектры до 16 объектов одновременно в поле зрения 6×6 arcmin со спектральным разрешением R = 2200 (FWHM = 2.4 Å), используя щели шириной 1.2 arcsec и высотой 18 arcsec, расставляемые в фокальной плоскости редуктора интерактивно в процессе наблюдений при помощи мини-электромагнитов. Общие времена накопления составили 3600, 6000 и 3000 s для Abell 160, Abell 189 и Abell 397 соответственно. Атмосферное качество изображения изменялось от 1.3 до 2.5 arcsec, таким образом компактные эллиптические галактики пространственно не разрешались.

Калибровки, полученные в процессе наблюдений, включали: (i) bias, (ii) спектр сравнения – лампа с полым катодом, наполненная смесью He, Ne, Ar, (iii) плоские поля по лампе внутри спектрографа, (iv) звезды спектрофотометрические стандарты, (v) спектры сумеречного неба с высоким отношением сигнал-шум, полученные в каждой из рабочих конфигураций щелей.

Мы обрабатывали данные, используя программный пакет в среде ITT IDL. Первичная редукция, включающая вычитание bias, исправление за плоское поле, чистка следов космических частиц методом Лапласовского фильтра (van Dokkum, 2001) применялась для всех изображений. Затем мы определяли положения спектров каждой из щелей по спектрам плоского поля, оценивали геометрическую дисторсию поперек дисперсии и корректировали ее посредством полиномиальной деформации изображений. Затем независимо для каждой щели строились дисперсионные кривые путем отождествления линий спектра сравнения и аппроксимации дисперсионной поверхности полиномом 3-го порядка как вдоль, так и поперек дисперсии, после чего спектры линеаризовались. Полученные дисперсионные кривые имеют ошибки порядка 0.1 Å RMS в основном из-за статистических ошибок в определении положений линий He-Ne-Ar. Кадры ошибок рассчитывались на основе фотонной статистики и проходили те же этапы редукции.

Для точного измерения дисперсий скоростей галактик, необходимо учитывать систематические ошибки полученных дисперсионных поверхностей, а также учитывать вариации спектрального разрешения вдоль и поперек направления дисперсии. Для этого мы анализировали спектры сумеречного неба так, как описано в Главе 1.



Рис. 3.24: Структура, динамика и звездные населения галактик ранних типов. Средние поверхностные яркости внутри $r_e \langle \mu \rangle_e$ (сверху), дисперсии скоростей звезд σ (в середине) и металличности звезд [Fe/H] (внизу) показаны как функции абсолютной величины в фильтре В. Подтвержденные галактики, подвергшиеся приливному обдиранию, показаны черными, фиолетовыми и голубыми кружками для спектроскопии БТА САО РАН, SDSS и литературных красных смещений соответственно. Крестиками показаны кандидаты в сЕ без спектрального подтверждения. Красные звездочки – известные сЕ галактики, синие – недавно открытые компактные звездные системы в скоплении Coma (Price et al., 2009). Штриховые линии на центральной и нижней панелях – отношения Faber–Jackson и светимость–металичность (Chilingarian et al., 2008с). Литературные данные (dE/dS0: Binggeli & Jerjen (1998); Chilingarian et al. (2008d); Chilingarian (2009а); галактики средней светимости и гигантские галактики: Bender et al. (1992), UCD: Chilingarian et al., 2008с) дополнены данными для 140 галактик ранних типов в скоплении Сота, полученными из анализа спектров SDSS DR7 с помощью метода NBURSTS. Все оценки металличности на нижней панели, кроме объектов из работы Price et al. (2009) получены методом NBURSTS. Черные линии показывают эволюцию модельной спиральной галактики раннего типа с баром, обдираемой потенциалом скопления на квази-круговой орбите, в течение 2 Gyr.



Рис. 3.25: Фрагмент изображения WFPC2 HST центральной части скопления Abell 397 из архива HLA, содержащего две сЕ галактики-кандидата, подтвержденных по данным наблюдений на БТА САО РАН; север сверху, восток слева. Показанные изофоты соответствуют уровням от 29.0 до 27.0 mag arcsec⁻² в фильтре F814W с шагом 0.5 mag arcsec⁻². Галактика A397cE#1 показывает наличия протяженной детали низкой поверхностной яркости в северо-восточном направлении, вероятно возникшей из-за ее приливного взаимодействия с доминирующей галактикой скопления UGC 2413 в правом нижнем углу.



Рис. 3.26: Численное моделирование приливного обдирания дисковой галактики с баром средней светимости. Панели показывают 4 мгновенных снимка N-body моделирования галактики, изначально находящейся на квази-круговой орбите cD галактикой, показанной в центре каждой панели. Плоскость дисковой галактики перпендикулярна начальной плоскости орбиты. Каждая панель имеет размер 100×100 kpc, масштаб плотности логарифмический. Контуры (с шагом 2 mag arcsec⁻²) показывают звезды, принадлежавшие дисковой галактике в начале эксперимента. Моделирование показывает, что внешний диск галактики оказывается полностью ободранным, оставляя компактный остаток и потерянные звезды в виде дуг и хвостов.

Затем мы извлекали одномерные спектры кандидатов в сЕ галактики из соответствующих щелей и вычитали фон ночного неба, построенный в тех же самых щелях по "пустым" областям. Затем полученные одномерные спектры анализировались независимо друг от друга методом NBURSTS (Глава 1). Мы использовали мультипликативный континуум 10го порядка. Все спектры БТА и наилучшие модели звездных населений, описывающие их, представлены на Рис. 3.29.

Как и все остальные методики анализа звездных населений, результаты, получаемые с помощью NBURSTS зависят от используемых моделей звездных населений. Поэтому все точки, представленные на нижней панели Рис. 3.24, кроме компактных звездных систем в скоплении Coma (Price et al., 2009) были получены с помощью методики NBURSTS, используя одни и те же модели звездных населений PEGASE.HR. Поэтому их сравнение друг с другом правомерно. Для объектов из скопления Coma мы не имели возможность проанализировать оригинальные спектры, поэтому мы использовали значения металличности из работы Price et al. (2009).

Тот же метод был применен для спектров 6 сЕ галактик, найденных в SDSS DR7. Таким же образом мы аппроксимировали спектры 140 галактик ранних типов из центральной части скопления Coma (Abell 1656), чтобы построить диаграммы Faber–Jackson и светимость–металличность для галактик ранних типов средней и высокой светимостей, представленных на средней и нижних панелях Рис. 3.24.

3.6.2 Результаты

На Рис. 3.27 представлены HST WFPC2 всех новых подтвержденных сЕ галактик. Для каждой из них мы приводим: (a) полное поле зрения WFPC2, часто содержащее яркую галактику скопления либо cD и (b) увеличенный фрагмент, включающий сЕ галактику, всегда имеющий размер 5×5 kpc на расстоянии скопления.

В Таб. 3.9–3.10 представлены параметры фотометрии, кинематики и звездных населений подтвержденных сЕ галактик. Колонки в Таб 3.9 представляют (слева направо): номер, идентификатор скопления по каталогу Абеля (Abell, 1958), гелиоцентрическую лучевую скорость скопления из NED, обозначение галактики согласно рекомендациям MAC, абсолютную величину в фильтре B, эффективный радиус, среднюю поверхностную яркость внутри r_e и эллиптичности сЕ галактик. В Таб. 3.10 для каждой сЕ галактики мы приводим: расстояние в проекции до ближайшей яркой (обычно cD) галактики, гелиоцентрическую лучевую скорость, дисперсию скоростей звезд, параметры звездного населения: возраст и металличность, а также фильтр, в котором была произведена фотометрия и источник красного смещения галактики. Эффективные радиусы и эллиптичности в Таб. 3.9 всегда измерялись по изображениям HST WFPC2, используя SEXTRACTOR, в то время как для интегральной фотометрии использовались различные источники. Мы отдавали предпочтение наземным данным (SDSS, CADC MegaPipe Stacks), если фотометрическая полоса лежала ближе к B, чем полоса пропускания фильтра HST. Измерения переводились в фильтр *B* согласно работе (Fukugita et al., 1995), предполагая спектр эллиптической галактики. Соответствующие поверхностные яркости $\langle \mu \rangle_{e,B}$ рассчитывались с использованием полной В величины и эффективного радиуса по данным HST в предположении плоского профиля цвета. Все приведенные звездные величины и поверхностные яркости исправлены за Галактическое поглощение и k-поправки. Поверхностные яркости исправлены также за эффект космологического уменьшения поверхностной яркости.

Помимо галактик, представленных в Таб. 3.9–3.10, наша система обнаружила известные галактики в скоплении Abell 496: A496cE и A496g1 (Chilingarian et al., 2007b). Они были исключены из Таб. 3.9–3.10.

3.6.3 *N*-body моделирование приливного взаимодействия

Обычно пространственное разрешение космологических симуляций слишком мало, чтобы в деталях отслеживать структуру галактик средних светимостей. В ряде работ обсуждалась динамическая и морфологическая эволюция дисковых галактик с скопления по результатам моделирования (Moore et al., 1996; Abadi et al., 1999; Quilis et al., 2000; Mastropietro et al., 2005); однако ни в одном из них не анализировалось сильное приливное взаимодействие. Природа Messier 32, прототипа класса компактных эллиптических галактик, была объяснена приливным обдиранием (Bekki et al., 2001b), но в этой работе не было показано, как приливные эффекты работают для галактик больших масс в скоплениях. Поэтому мы провели 32 численных эксперимента со средним пространственным разрешением (~ 100 pc) по взаимодействию дисковой галактики с потенциалом скопления галактик, используя программный пакет GADGET-2 (Springel, 2005). Мы учитывали только гравитационное взаимодействие, пренебрегая эффектами лобового давления.

Модель дисковой галактики основана на "классической модели" (Revaz et al., 2009). Она содержит балдж ($0.42 \times 10^{11} \,\mathrm{M_{\odot}}$), газовый диск Міуатоto & Nagai (1975) ($0.3 \times 10^{11} \,\mathrm{M_{\odot}}$), экспоненциальный звездный диск ($1.04 \times 10^{11} \,\mathrm{M_{\odot}}$) и темное гало, описываемое потенциалом Plummer ($8.9 \times 10^{11} \,\mathrm{M_{\odot}}$). Относительные массы компонент выбраны таким образом, чтобы получить плоскую кривую вращения до радиуса 40 kpc. Полная масса галактики составляет $9.6 \times 10^{11} \,\mathrm{M_{\odot}}$. В качестве начальных условий мы взяли галактику, содержащую центральный бар размером около 4 kpc с соотношением осей a/b = 1.8. Его период вращения составляет 220 Муг ($\Omega_p = 28 \,\mathrm{km \ s^{-1} \ kpc^{-1}}$), помещая внутренний Линбладовский резонанс на расстояние 3.5 kpc и радиус коротации на 8.4 kpc.

Потенциал скопления галактик основан на данных для Messier 87 (Emsellem et al., 2004), центральной сD галактики скопления Дева. Она моделировалась потенциалом NFW (Navarro et al., 1997), представленным 5×10^5 частицами с параметром концентрации 7 kpc и вириальной массой $1.4 \times 10^{14} \, M_{\odot}$. Мы также учитывали вклад центральной черной дыры массой $3 \times 10^9 \, M_{\odot}$, представленной как сфера Plummer с радиусом 100 pc, примерно соответствующим разрешению нашего моделирования.

Мы провели 32 численных эксперимента, варьируя орбитальный угловой момент (начальные тангенциальные скорости 650, 180, 120 и 50 km s⁻¹, соответствующие эллиптичностям орбиты 0.04, 0.79, 0.86 и 0.94) и наклонение диска к плоскости орбиты (0, ± 45 , ± 90 , ± 135 и 180 deg). Каждый эксперимент продолжался до 2 Gyr. Изначально дисковая галактика находилась на расстоянии 50 kpc от центра потенциала cD.

Карты поверхностной плотности, представленные на Рис. 3.26, получены из звездных компонент с добавлением звездного профиля яркости для cD галактики. Он моделировался посредством аппроксимации распределения яркости Messier 87 (Kormendy et al., 2009) профилем Hernquist (Hernquist, 1990), принимая отношение масса–светимость постоянным по радиусу. Самый внешний контур соответствует поверхностной яркости $\mu_B = 28$ mag arcsec⁻². Контуры показаны с шагом 2 mag arcsec⁻². На Рис. 3.24 представлена эволюция структурных и динамических параметров обдираемой галактики. Мы взяли начальные возрасты для диска и балджа в 4 и 10 Gyr соответственно. Для каждого из шагов по времени мы рассчитывали отношения масса-светимость по моделям звездного населения PEGASE.2 (Fioc & Rocca-Volmerange, 1997) для того, чтобы перевести поверхностную плотность в поверхностную яркость в фильтре *B*. Затем полученные карты яркости были проанализированы пакетом SEXTRACTOR точно так же, как HST изображения центральных частей скоплений галактик. Черная линия показывает начальное условия и шаги возрастом 50, 250, 500, 750, 1200, 1500 и 1950 Муг.

Наше моделирование демонстрирует, что протяженные звездные диски сильно обдираются даже на квази-круговой орбите (e = 0.04) уже за первые 600–800 Муг и галактика теряет около 50% начальной звездной массы. Однако, поскольку процесс затрагивает только диск, имеющий отношение масса-светимость ниже, чем балдж, общая светимость в фильтре *B* падает более, чем в три раза.

Бар из галактики-прародителя практически не затрагивается процессом приливного взаимодействия и выглядит как вытянутая эллиптическая галактика, напоминающая ACO496 J043336.12-131442.5. В случае изначально высокого наклона диска к плоскости орбиты, в некоторые моменты времени большая ось остатка оказывается примерно параллельной лучу зрения, создавая эффект очень высокой поверхностной яркости для "круглой" галактики. На такой квази-круговой орбите ободранный остаток может находиться довольно долго без последующей потери массы. Мы отмечаем, что сценарий приливного обдирания сочетается с наблюдаемыми внешними экспоненциальными дисками низкой поверхностной яркости в M 32 и A496cE.

Взаимодействия на радиальных орбитах (e = 0.86...0.94) приводят к более эффективной потере звездной массы, достигающей 85-90% через 600-700 Муг после начала численного эксперимента. Первые 70-75% теряются уже на временах t = 250-300 Муг. Внешние изофоты галактики могут округляться из-за эффектов приливной компрессии и вращения бара. Соответственно, наблюдаемая поверхностная плотность объекта изменяется периодически, соответствуя периоду орбитального вращения. Однако, во всех рассмотренных случаях на радиальных орбитах объект не выживает около cD галактики дольше, чем t = 1.0-1.2 Gyr.

Таким образом, у нас остаются две альтернативы: (i) галактики на квази-круговых орбитах могут оставаться длительное время без существенных изменений структурных свойств после изначального обдирания протяженных дисков и потери массы; (ii) галактики на радиальных орбитах теряют массу намного более эффективно и за более короткие характерные времена. Однако, они полностью поглощаются cD галактиками за время порядка 1 Gyr, так что необходимо постоянно снабжать центр скопления галактиками для того, чтобы там наблюдались объекты класса cE. Изменяя массы галактик-прародителей, можно добиваться создание компактных галактик различных светимостей и масс. Принимая во внимание зависимость концентрации профиля яркости галактики от светимости (Ferrarese et al., 2006; Graham & Guzmán, 2003), следует ожидать меньших поверхностных яркостей галактик, образующихся путем обдирания галактик низких масс.

Большая часть ободранного материала не аккрецирует на cD галактику, а вносит вклад в диффузный межгалактический свет в скоплениях. Анализ его свойств поможет нам оценить частоту приливного обдирания в скоплениях и понять важность этого механизма в плотном окружении.

Таблица 3.9: Фотометрические свойства подтвержденных сЕ галактик и параметры скоплений, в которых они находятся

Ν	Cluster	$cz_{\rm clus}$	IAU Name	M_B	r_e	$\langle \mu \rangle_{e,B}$	ϵ
		$\mathrm{km}~\mathrm{s}^{-1}$		mag	kpc	$\mathrm{mag} \mathrm{ arcsec}^{-2}$	
1	ACO 0160	13401	J011257.62 + 152821.1	-17.08	0.56	20.24	0.02
2	ACO 0160	13401	J011258.85 + 152855.3	-16.87	0.43	19.87	0.03
3	ACO 0160	13401	J011300.24 + 152921.5	-16.26	0.33	19.89	0.01
4	ACO 0189	9833	J012325.96 + 014236.2	-15.84	0.31	20.16	0.14
5	ACO 0189	9833	J012326.58 + 014230.3	-15.78	0.44	21.01	0.10
6	ACO 0397	9803	J025629.35 + 155533.0	-17.63	0.62	19.91	0.09
$\overline{7}$	ACO 0397	9803	J025631.27 + 155531.2	-17.58	0.39	18.96	0.12
8	ACO 0400	7315	J025744.50 + 060202.2	-17.16	0.42	19.54	0.08
9	ACO 0496	9863	J043336.12 - 131442.5	-18.16	0.37	18.23	0.23
10	ACO 0496	9863	J043338.55 - 131549.5	-17.18	0.32	18.87	0.14
11	ACO 0779	6742	J091947.87 + 334604.8	-16.83	0.32	19.23	0.03
12	ACO 1177	9473	J110947.06 + 214648.6	-17.43	0.49	19.60	0.25
13	ACO 3526	3418	J124853.91 - 411905.8	-16.86	0.34	19.36	0.03
14	ACO 1656	6925	J125923.41 + 275510.4	-16.19	0.20	18.91	0.01
15	ACO 1656	6925	J125942.30 + 275529.0	-18.39	0.47	18.56	0.17
16	ACO 3558	14390	J132758.71 - 312937.5	-17.39	0.44	19.42	0.17
17	ACO 3562	14690	J133340.86 - 314008.3	-17.06	0.30	18.90	0.20
18	ACO 2040	13790	J151250.26 + 072621.9	-18.13	0.65	19.49	0.10
19	ACO 2052	10640	J151641.28 + 070006.1	-17.04	0.35	19.28	0.03
20	ACO 2634	9409	J233825.48 + 270150.1	-17.03	0.47	19.87	0.07
21	ACO 2634	9409	J233829.31 + 270225.1	-15.70	0.25	19.89	0.04

Таблица 3.10: Кинематика и звездные населения подтвержденных сЕ галактик

Ν	d_{proj}	v_r	σ	t	$[{\rm Fe}/{\rm H}]$	sources of redshifts
	kpc	$\rm km~s^{-1}$	$\rm km~s^{-1}$	Gyr	dex	and photometric data
1	66	12645 ± 4	59 ± 6	8.6 ± 2.8	-0.41 ± 0.05	z:BTA, ph:SDSS (g)
2	32	12549 ± 5	70 ± 6	16.2 ± 6.1	-0.37 ± 0.17	z:BTA, ph:SDSS (g)
3	11	12848 ± 4	48 ± 7	7.5 ± 2.2	-0.38 ± 0.05	z:BTA, ph:SDSS (g)
4	11	10019 ± 4	61 ± 7	17.5 ± 4.1	-0.70 ± 0.12	z:BTA, ph:HST ($F814W$)
5	6.6	10411 ± 3	48 ± 6	7.4 ± 2.2	-0.02 ± 0.06	z:BTA, ph:HST ($F814W$)
6	24	10278 ± 4	68 ± 5	9.0 ± 1.9	-0.06 ± 0.04	z:BTA, ph:CFHT (g)
7	33	10240 ± 4	91 ± 6	11.1 ± 2.6	-0.02 ± 0.05	z:BTA, ph:CFHT (g)
8	25	7790 ± 30				z:Vizier, ph:SDSS (g)
9	43	9415 ± 31				z:NED, ph:HST ($F555W$)
10	8.4	9814 ± 21				z:Vizier, ph:HST ($F555W$)
11	31	7142 ± 3	110 ± 4	12.0 ± 1.6	-0.40 ± 0.03	z:SDSS, ph:SDSS (g)
12	54	9250 ± 3	98 ± 4	9.6 ± 1.3	-0.15 ± 0.02	z:SDSS, ph:SDSS (g)
13	13	2317 ± 20				z:NED, ph:HST ($F555W$)
14	14	6925 ± 5	108 ± 4	11.2 ± 2.1	-0.38 ± 0.04	z:SDSS, ph:SDSS (g)
15	24	6916 ± 2	177 ± 2	12.7 ± 0.9	-0.28 ± 0.02	z:SDSS, ph:SDSS (g)
16	24	16668 ± 20				z:NED, ph:HST ($F814W$)
17	79	$14746 \pm \ldots$	182 ± 9			z:Vizier, ph:Vizier (B)
18	42	14551 ± 5	100 ± 7	13.0 ± 4.2	-0.30 ± 0.07	z:SDSS, ph:SDSS (g)
19	62	10350 ± 5	117 ± 6	10.0 ± 2.8	-0.38 ± 0.03	z:SDSS, ph:SDSS (g)
20	38	9532 ± 80				z:NED, ph:HST ($F555W$)
21	20	10183 ± 80		•••		z:NED, ph:HST ($F814W$)



Рис. 3.27: Изображения сЕ галактик с HST WFPC2. Для каждой галактики мы показываем полное поле WFPC2 и внутреннюю панель размером 5 × 5 kpc на расстоянии соответствующего скопления. Также приведены названия скоплений и идентификаторы галактик, рекомендованные MAC.



Рис. 3.28: Изображения сЕ галактик с HST WFPC2 – продолжение.



Рис. 3.29: Спектры, полученные на БТА САО РАН для 7 сЕ галактик в скоплениях Abell 160, Abell 189 и Abell 397. Наилучшие аппроксимации спектров и невязки показаны краснымми и зелеными сплошными линиями. Ошибки потоков показаны тонкими голубыми линиями.

Глава 4

Средние по светимости и гигантские галактики ранних типов

В рамках современной космологической парадигмы, слияния и взаимодействия галактик являются одними из важнейших механизмов, управляющих формированием и эволюцией галактик. Морфологические характеристики галактик связаны с их окружением: впервые о различии популяций галактик в скоплениях с галактиками поля было отмечено в работе Hubble & Humason (1931).

В работе Spitzer & Baade (1951) было высказано предположение, что столкновения дисковых галактик поздних морфологических типов должны приводить к образованию галактик ранних типов – эллиптических или линзовидных, в зависимости от отношения масс галактик и орбитальной конфигурации. В работе Gunn & Gott (1972) было показано, что лобовое давление горячего газа в скоплениях галактик также может трансформировать спиральные галактики в линзовидные. Еще один механизм морфологической трансформации спиральных галактики в галактики ранних типов заключается в многочисленных, хотя обычно не столь разрушительных, как слияния, гравитационных взаимодействях с членами скопления ("gravitational harassement", Moore et al., 1996).

В работе Larson et al. (1980) авторы указали, что интенсивное звездообразование в раннюю эпоху может привести к исчерпанию газа и появлению галактик, схожих по свойствам с S0, в этом случае чтобы сформировать современные спиральные галактики, необходима их внешняя "подпитка" газом, например, в процессе слияний с карликовыми спутниками, либо посредством аккреции остатков приливного взаимодействия (tidal debris). В работе Oemler (1974), где исследовалась выборка из 15 близких богатых скоплений галактик, было впервые отмечено, что морфологический тип галактик зависит как от структуры скопления в целом, так и от расположения галактик в них. Скопления правильной формы с сильной центральной концентрацией и свойствами, указывающими на их динамически срелаксировавшее состояние, содержат большие популяции галактик ранних типов (Е и S0), причем их количество увеличивается к центру. Иррегулярные, динамически несрелаксировавшие скопления содержат большее количество спиральных галактик и не демонстрируют градиента галактических типов по радиусу. Эти статистические выводы были объяснены влиянием динамического давления.

В работе Dressler (1980) автор пришел к выводу, что отношение морфология–плотность (локальная) универсально и подходит для любого скопления, независимо от его глобальных свойств: хотя иррегулярные скопления не демонстрировали различие морфологии

галактик вдоль радиуса, как показал Oelmer, они показывают зависимость морфология– плотность отношение так же хорошо как и для регулярных, концентрированных к центру скоплений.

Значительно позднее (Dressler et al., 1997) было показано, что отношение морфологияплотность на красных смещениях около $z \sim 0.5$ отличается от локального, показывая полное отсутствие этого отношения для иррегулярных скоплений. Авторы объяснили это тем, что морфологическая сегрегация работает иерархически, действуя вначале на плотные группы и скопления галактик, и тем, что формирование эллиптических галактик происходит еще до формирования скоплений, в то время как S0-галактики формируются в больших количествах уже после вириализации.

Рассматривая различные возможные механизмы эволюции галактики из спиральной в линзовидную, можно заметить, что в большинстве из них газ концентрируется в центральной области, вызывая околоядерную вспышку звездообразования и, тем самым, увеличивая металличность звездного населения. А также, снижая средний наблюдаемый возраст, если вспышка звездообразования происходила относительно недавно, а учитывая, что пик формирования S0 галактик должен приходиться на $z \sim 0.4 - 0.5$, в значительной их части она должна была произойти не ранее, чем 5 Gyr назад, что подтверждается наблюдениями, показывающими химически- и эволюционно-выделенные ядра во многих S0-галактиках (Sil'chenko, 2006).

В работе Тоотте & Toomre (1972) было впервые предположено, что взаимодействия "довольно неожиданно приносят глубоко в галактику свежие запасы топлива в форме межзвездной среды..." Газ в баре, формирующемся в процессе взаимодействия, теряет угловой момент (Combes et al., 1990; Barnes & Hernquist, 1996), падает на центр галактики, возможно вызывая мощные вспышки звездообразования (Mihos & Hernquist, 1994a, 1996), и создает молодые центральные компоненты (Mihos & Hernquist, 1994b), часто наблюдаемые в галактиках ранних типов в локальной Вселенной (Sil'chenko, 2006; Kuntschner et al., 2006). Интенсивные эпизоды звездообразования, сопровождаемые вспышками сверхновых, обогащают мездвездную среду тяжелыми элементами, которые затем попадают в звезды в процессе звездообразования, тем самым увеличивая наблюдаемую металличность звездного населения.

Космологическое *N*-body моделирование на больших пространственных масштабах (Springel et al., 2006; Ocvirk et al., 2008) часто имеет слишком низкое пространственное разрешение, для того чтобы отслеживать в деталях звездообразование и морфологические трансформации на масштабах отдельных галактик. Поэтому обычно в подобное моделирование добавляются полуаналитические рецепты, качественно описывающие процессы, сильно влияющие на эволюцию галактик, такие как звездообразование (Blaizot et al., 2004; Somerville et al., 2008). Однако, выбор параметров этих полуаналитических моделей должен основываться на более детальном моделировании взаимодействия галактик. Моделирование с высоким разрешением (Bournaud et al., 2008) не может производиться в достаточных количествах для статистического подхода. Таким образом, необходимо найти компромис между статистикой и пространственным разрешением. Это становится одним из основных моментов, стимулирующих к изучению взаимодействий галактик посредством численных моделей среднего разрешения.

Звездообразование, вызванное взаимодействием, так же как морфологическая трансформация, сильно зависит от отношения масс взаимодействующих галактик. В общем, интенсивность эпизодов звездообразования уменьшается с увеличением отношения масс галактик (Cox et al., 2008). Слияния дисковых галактик примерно одинаковых масс (отношение меньше 4:1) обычно приводит к формированию остатка, напоминающего эллиптическую галактику (Toomre, 1977; Naab & Burkert, 2003), в то время как малые мержеры (отношение масс выше 10:1) не в состоянии разрушить диск большой галактики, сохраняя экспоненциальное распределение массы, хотя нагревают и утолщают диски (Quinn et al., 1993; Walker et al., 1996; Velazquez & White, 1999; Bournaud et al., 2005). Последовательность малых мержеров может формировать эллиптические галактики с глобальными морфологическими и кинематическими характеристиками, похожими на наблюдаемые (Bournaud et al., 2007).

Орбитальные параметры взаимодействия и взаимная ориентация галактик также сильно влияют на процесс слияния, например, эффективность звездообразования на противонаправленных орбитах (т.е. когда угловой орбитальный момент и внутренний угловой момент галактики противонаправлены) обычно оказывается выше, чем на "прямых" орбитах (Di Matteo et al., 2007).

Таким образом, необходимо исследовать многомерное пространство параметров (различные морфологии галактик, орбитальные конфигурации, отношения масс и т.п.) путем проведения тысяч численных экспериментов, чтобы полностью понять астрофизические последствия взаимодействий галактик в современной картине эволюции галактик.

Также в жизни дисковых галактик большую роль играют механизмы так называемой вековой эволюции – медленной структурной перестройки, сопровождаемой вспышками звездообразования в строго отведенных для этого местах (подробнее о вековой эволюции – см. обзор Kormendy & Kennicutt, 2004). На больших временах следствием вековой эволюции может быть изменение морфологического типа галактики; например, (пре-)образование линзовидных галактик из спиральных, вероятно, является одним из примеров вековой эволюции. Механизмы вековой эволюции, предлагаемые сейчас теоретиками, можно грубо разделить на внешние и внутренние. Внутренние механизмы – это те, которые будут действовать, даже если галактику оставить в покое в полном одиночестве; к ним в основном относятся разнообразные динамические неустойчивости звездногазовых дисков, в частности, те, которые приводят к формированию баров. Однако формирование бара в центре диска может быть спровоцировано и внешним приливным воздействием.

Близкие галактики имеют бимодальное распределение цветов, в котором пик голубых галактик с текущим звездообразованием отделен от красной последовательности галактик ранних типов слабо-заселенным промежутком (Strateva et al., 2001; Baldry et al., 2004; Balogh et al., 2004). Количество красных галактик примерно удвоилось с момента, соответствующего $z \sim 1$ (Bell et al., 2004). Красные галактики в среднем имеют более высокие светимости, чем голубые галактики. Поэтому простое объяснение их формирования путем остановки звездообразования в голубых галактик с последующей пассивной эволюцией и старением звездного населения, приобретающего красный цвет оказывается несостоятельным, поскольку при старении звездного населения светимость галактики падает. Эпизоды звездообразования часто отмечаются как возможность увеличения звездной массы голубой галактикой, прежде чем она постареет и окажется на красной последовательности (Bell et al., 2004; Labbé et al., 2007), а слияния и взаимодействия галактик указываются, как возможные триггеры звездообразования (Bekki et al., 2005; Di Matteo et al., 2008b). Слияния и вспышки звездообразования также традиционно рассматриваются как способ

прекращения звездообразования: газ используется в процессе формирования звезд (Di Matteo et al., 2007), а остатки его рассеиваются под воздействием активного ядра либо вспышек сверхновых (Buyle et al., 2008; Kaviraj et al., 2007). таким образом, первоначально голубые галактики становятся красными, а затем, путем последующих слияний между собой без участия газа ("dry mergers") могут приводить к формированию наиболее массивных эллиптических галактик, наблюдаемых в локальной Вселенной (Bell et al., 2006; Naab et al., 2006b). Эти факты призывают к изучению критической, но очень короткой фазы после вспышки звездообразования (poststarburst), в течение которой галактика пересекает малонаселенную область цветовой диаграммы.

Галактики типа poststarburst (PSG или E+A галактики) имеют оптические спектры с сильными абсорбционными Бальмеровскими линиями, соответствующими молодым звездам, но слабыми (если вообще присутствующими) эмиссионными линиями, исключающими серьезное текущее звездообразование (Dressler & Gunn, 1983; Couch & Sharples, 1987; Dressler et al., 1999). Эти объекты открывают уникальную возможность, для того чтобы исследовать как вспышки звездообразования влияют на эволюцию галактик. Молодое звездное население уже ослабевает, но все еще достаточно заметно, так что мы можем одновременно исследовать и его, и старое или промужуточное звездное население "фона". Из-за высоких значений поверхностной яркости, мы в состоянии исследовать звездную кинематику подобных объектов вплоть до нескольких эффективных радиусов от центра. Однозначно, фаза poststarburst имеет критическую значимость для дальнейшего понимания фотометрической эволюции галактик.

4.1 База данных GalMer: моделирование взаимодейтсвующих галактик

Результаты, представленные в данном разделе, опубликованы в работах Di Matteo et al. (2008b); Chilingarian et al. (2010a). Технологические решения представлены в работах Zolotukhin & Chilingarian (2008); Chilingarian & Zolotukhin (2008).

Проект GalMer (Galaxy Mergers – слияния галактик) является частью французской национальной коллаборации HORIZON¹ и преследует амбициозную задачу предоставления всему астрономическому сообществу доступа к большому объему численного моделирования взаимодействия галактик в парах, выполненного со средним пространственным разрешением, но покрывающего как можно большую часть многомерного пространства параметров начальных условий, тамим образом позволяющим проводить статистические исследования усиления звездообразования, а также структурных и динамических свойств взаимодействующих галактик. Важным аспектом является интеграция с сервисами в рамках Международной Виртуальной Обсерватории, для того чтобы в полной мере использовать уже существующие технологии визуализации и анализа данных.

В данном разделе мы представляем: (1) результаты TreeSPH моделирования GalMer и все детали о начальных условиях для галактик различных масс, а также рецептах, использовавшихся для моделирования процессов звездообразования, включая отклик на сверхновые и эволюцию металличности; (2) базу данных GalMer – первый ресурс Виртуальной Обсерватории, предоставляющий доступ к результатам TreeSPH моделирований;

 $^{^{1}} http://www.projet-horizon.fr/$

(3) сервисы GalMer, предназначенные для упрощения сравнения результатов моделирования с результатами наблюдений, такие как моделирования спектрофотометрических свойств галактик, используя методы эволюционного синтеза.

4.1.1 Начальные условия

Модели галактик: движение вдоль последовательности Хаббла

Мы моделируем взаимодействия между галактиками различных морфологических типов - от эллиптических до спиралей позднего типа. Наша модель галактики состоит из сферического невращающегося гало темной материи, которое может содержать либо не содержать звездный и газовый диски, а также возможно центральный невращающийся балдж. Для каждого типа галактики гало и балдж (если есть) моделируются как сферы Plummer, имеющие характерные массы M_B и M_H и характерные радиусы r_B и r_H . Наш выбор распределения темной материи с "плоским ядром" (core) лучше согласуется с наблюдениями, чем профили с центральными пиками, предсказываемые космологическим моделированием с холодной темной материей (Cold Dark Matter) (см. раздел 2.4.3 в работе Di Matteo et al., 2008a). Звездные и газовые диски описываются профилем плотности Miyamoto & Nagai (1975) с массами M_* , M_q и вертикальными и радиальными шкалами h_* , a_* и h_q , *a_q* соответственно. Для начальных условий моделей дисковых галактик, мы выбрали начальные значения параметра устойчивости Toomre для звездного диска $Q_{\rm star} = 1.2$, и два различных значения для газового диска – $Q_{gas} = 0.3$ и $Q_{gas} = 1.2$, чтобы представить хотя бы частично многообразие параметров, наблюдаемых в реальных галактиках (Martin & Kennicutt, 2001; Boissier et al., 2003; Hitschfeld et al., 2009).

База данных содержит пары галактик с *различными отношениями масс* (1:1, 1:2, 1:10), включающими гигантскую галактику (обозначения gE0 для эллиптической, gS0 для линзовидной, gSa, gSb и gSd – для спиральных галактик различных типов по классификации Хаббла), взаимодействующую с:

- другой гигантской галактикой;
- галактикой промежуточной массы, составляющую половину массы гигантской галактики (iE0, iS0, iSa, iSb и iSd)
- карликовой галактикой с массой, составляющей 1/10 массы гигантской галактики dE0, dS0, dSa, dSb и dSd)

Полная последовательность хаббловских типов модельных галактик представлена на Рис. 4.1. Двигаясь вдоль последовательности от gE0 к gSd, масса центрального сфероидального балджа варьируется от $M_B = 1.6 \times 10^{11} M_{\odot}$ для gE0 до 0 в случае gSd, в то время, как масса газа M_g , отсутствующего в случаях gE0 и gS0, увеличивается от $9.2 \times 10^9 M_{\odot}$ в gSa до $1.7 \times 10^{10} M_{\odot}$ в gSd (см. Таб. 4.1, содержащую полную информацию о массах и размерах компонент моделей гигантских галактик, и Таб. 4.2–4.3 для параметров галактик промежуточной массы и карликов). Наша последовательность моделей соответствует галактикам, наблюдаемым в локальной Вселенной. В будущем мы планируем расширить ее на объекты на больших красных смещениях путем увеличения доли газа.

Начальные кривые вращения всех модельных дисковых галактик приведены на Рис. 4.2.



Рис. 4.1: Последовательность хаббловских типов модельных галактик GalMer. Слева направо и сверху вниз – проекции на плоскость х-г гигантских, промежуточных и карликовых галактик. Разные цвета соответствуют различным компонентам: темной материи (серый), балджу (красный), звездному диску (оранжевый) и газовому диску (голубой). Размер каждой панели 50×50 kpc.

Каждая галактика представлена $N_{\rm TOT}$ частицами, распределенными между газом, звездами и темной материей. Газовые частицы на самом деле являются "гибридными", характеризуемыми двумя значениями массы: одним, соответствующем гравитационной массе, остающимся неизменны в течение всего численного эксперимента, и второго, являющегося газовым содержимым частица, которое может уменьшаться или увеличиваться в процессе звездообразования и потери массы. Когда газовая доля опускается ниже определенного порога, частица трансформируется в чисто звездную, а остаток газа распределяется между соседними гибридными частицами.

При моделировании взаимодействий гигантских галактик, каждая из них представлена $N_{\rm TOT}=120\,000$ частицами. Для взаимодействий с галактиками промежуточных и малых масс количество частиц было увеличено в 4 раза. Это позволило несколько улучшить пространственное разрешение и сохранить достаточное число частиц в меньших галактиках, чтобы не возникало проблем, связанных с численными артефактами из-за низкой статистики ($N_{\rm TOT}=240\,000$ и $N_{\rm TOT}=48\,000$ для галактик промежуточных масс и карликовых галактик соответственно, см. Таб. 4.5–4.6).

Для задания начальных значений скоростей мы применяли метод, описанный в рабооте Hernquist (1993).

Чтобы отделять эффекты, вызванные взаимодействиями, от секулярной эволюции, для каждой из моделей мы представляем эволюцию галактики в изоляции в течение 3 Gyr.

Орбитальные конфигурации

Для каждой из взаимодействующих пар мы проводили несколько численных экспериментов, изменяя параметры орбиты (начальную орбитальную энергию *E* и орбитальный



Рис. 4.2: Кривые вращения дла различных моделей галактик. Показаны начальные кривые вращения (сплошные черные линии) и вклады балджа (тонкие красные линии), звездного диска (штриховые оранжевые линии), газового диска (штрих-пунктирные голубые линии) и темного гало (серые пунктирные линии). Длины в kpc, скорости в единицах 100 km/s.

	gE0	gS0	gSa	gSb	gSd
$M_B \ [2.3 \times 10^9 M_{\odot}]$	70	10	10	5	0
$M_H \left[2.3 \times 10^9 M_\odot \right]$	30	50	50	75	75
$M_{*} \ [2.3 \times 10^{9} M_{\odot}]$	0	40	40	20	25
M_g/M_*	—	—	0.1	0.2	0.3
$r_B \; [\mathrm{kpc}]$	4	2	2	1	_
$r_H \; [\mathrm{kpc}]$	7	10	10	12	15
$a_* \; [\mathrm{kpc}]$	—	4	4	5	6
$h_* \; [m kpc]$	—	0.5	0.5	0.5	0.5
$a_g \; [\mathrm{kpc}]$	—	—	5	6	7
$h_g \; [m kpc]$	—	—	0.2	0.2	0.2

Таблица 4.1: Параметры моделей гигантских галактик.

	r 1	r 1		F	1
	iE0	iS0	iSa	iSb	iSd
$M_B \left[2.3 \times 10^9 M_{\odot} \right]$	35	5	5	2.5	0
$M_{H} \ [2.3 \times 10^{9} M_{\odot}]$	15	25	25	37.5	37.5
$M_{*} \ [2.3 \times 10^{9} M_{\odot}]$	0	20	20	10	12.5
M_g/M_*	—	—	0.1	0.2	0.3
$r_B \; [m kpc]$	2.8	1.4	1.4	0.7	-
$r_H \; [\mathrm{kpc}]$	5.	7.	7.	8.5	10.6
$a_* [\mathrm{kpc}]$	—	2.8	2.8	3.5	4.2
$h_* \; [m kpc]$	—	0.35	0.35	0.35	0.35
$a_g \; [\mathrm{kpc}]$	—	_	3.5	4.2	5.
$h_g \; [m kpc]$	—	_	0.14	0.14	0.14

Таблица 4.2: Параметры моделей для галактик средних масс.

Таблица 4.3: Параметры моделей для карликовых галактик.

	dE0	dS0	dSa	dSb	dSd
$M_B \ [2.3 \times 10^9 M_{\odot}]$	7	1	1	0.5	0
$M_{H} \ [2.3 \times 10^{9} M_{\odot}]$	3	5	5	7.5	7.5
$M_{*} [2.3 \times 10^{9} M_{\odot}]$	0	4	4	2	2.5
M_g/M_*	-	-	0.1	0.2	0.3
$r_B \; [m kpc]$	1.3	0.6	0.6	0.3	_
$r_H \; [\mathrm{kpc}]$	2.2	3.2	3.2	3.8	4.7
$a_* [\mathrm{kpc}]$	-	1.3	1.3	1.6	1.9
$h_* \; [m kpc]$	-	0.16	0.16	0.16	0.16
$a_g \; [\mathrm{kpc}]$	-	_	1.6	1.9	2.2
h_q [kpc]	_	_	0.06	0.06	0.06

Таблица 4.4: Количества частиц для взаимодействий гигант-гигант (отношение масс 1:1)

	gE0	gS0	gSa	gSb	gSd
$N_{\rm gas}$	_	_	20000	40000	60000
$N_{\rm star}$	80000	80000	60000	40000	20000
$N_{\rm DM}$	40000	40000	40000	40000	40000

	gE0	gS0	gSa	gSb	gSd
$N_{\rm gas}$	—	—	80000	160000	240000
$N_{\rm star}$	320000	320000	240000	160000	80000
$N_{\rm DM}$	160000	160000	160000	160000	160000
	iE0	iS0	iSa	iSb	iSd
$N_{\rm gas}$	_	_	40000	80 000	120000
$N_{\rm star}$	160000	160000	120000	80 000	40000
$N_{\rm DM}$	80 000	80 000	80 000	80 000	80 000

Таблица 4.5: Количества частиц для взаимодействий гигант-средние массы (отношение масс 1:2)

Таблица 4.6: Количества частиц для взаимодействий гигант-карлик (отношение масс 1:10)

	gE0	gS0	gSa	gSb	gSd
$N_{\rm gas}$	—	_	80 000	160000	240000
$N_{\rm star}$	320000	320000	240000	160000	80000
$N_{\rm DM}$	160000	160000	160000	160000	160000
	dE0	dS0	dSa	dSb	dSd
$N_{\rm gas}$	—	_	8 000	16000	24000
$N_{\rm star}$	32000	32000	24000	16000	8 0 0 0
$N_{\rm DM}$	16000	16000	16000	16000	16000

угловой момент L) и моделировали взаимодействия на орбитах с прямым и обратным движением (Таб. 4.7,4.8,4.9). Для каждой из пар диск одной из галактик (если он есть) всегда был компланарен плоскости орбиты $(i_1 = 0^\circ)$, а для наклона диска второй галактики к плоскости орбиты использовались следующие значения: $i_2 = 0^\circ$, $i_2 = 45^\circ$, $i_2 = 75^\circ$ и $i_2 = 90^\circ$. Концентрация значений углов к $i_2 = 90^\circ$ логична с чисто геометрической точки зрения, поскольку необходимо работать в терминах $1 - \cos(i_2)$. Это означает, что, к примеру, ориентация i_2 в диапазоне $45^\circ - 90^\circ$ в 2.3 раза более вероятна, чем ориентация в диапазоне $0^\circ - 45^\circ$. Однако, взаимная ориентация моментов вращения может быть и абсолютно нескоррелирована (Jimenez et al., 2010), но функция распределения нам не известна. Для взаимодействий карликовых и гигантских галактик мы использовали значения углов наклона $i_1 = 33^\circ$ и $i_2 = 130^\circ$ (см. Рис. 4.3, где представлено схематическое изображение геометрии орбиты и Таб. 4.10, содержащую ориентации моментов вращения галактик).

4.1.2 Численный метод

Для моделирования эволюции галактик мы использовали алгоритм Tree-SPH, в котором гравитационные силы рассчитываются методом иерархического дерева(Barnes & Hut, 1986), а эволюция газа учитывается посредством гидродинамики сглаженных частиц (SPH, Lucy, 1977; Gingold & Monaghan, 1982). Гравитационные силы рассчитываются с использованием параметра допуска (tolerance parameter) $\theta = 0.7$ и включают компоненты до квадрупольной включительно, используя мультипольное разложение. Потенциал Plummer используется для смягчения гравитационных сил для всех типов частиц. Харак-

orb.id	$r_{\rm ini}^{\rm a}$	$v_{ m ini}^{ m b}$	L^{c}	$E^{\mathbf{d}}$	$\operatorname{spin}^{\operatorname{e}}$
	kpc	$10^2 \mathrm{km} \mathrm{s}^{-1}$	$10^2 \mathrm{km} \mathrm{s}^{-1} \mathrm{kpc}$	$10^4 \mathrm{km}^2 \mathrm{s}^{-2}$	
01dir	100.	2.	56.6	0.0	up
$01 \mathrm{ret}$	100.	2.	56.6	0.0	down
02 dir	100.	3.	59.3	2.5	up
$02\mathrm{ret}$	100.	3.	59.3	2.5	down
03 dir	100.	3.7	62.0	5.0	up
$03\mathrm{ret}$	100.	3.7	62.0	5.0	down
$04 \mathrm{dir}$	100.	5.8	71.5	15.0	up
$04 \mathrm{ret}$	100.	5.8	71.5	15.0	down
$05 \mathrm{dir}$	100.	2.	80.0	0.0	up
$05 \mathrm{ret}$	100.	2.	80.0	0.0	down
$06 \mathrm{dir}$	100.	3.	87.6	2.5	up
$06 \mathrm{ret}$	100.	3.	87.6	2.5	down
$07 \mathrm{dir}$	100.	3.7	94.6	5.0	up
$07 \mathrm{ret}$	100.	3.7	94.6	5.0	down
$08 \mathrm{dir}$	100.	5.8	118.6	15.0	up
$08\mathrm{ret}$	100.	5.8	118.6	15.0	down
09 dir	100.	2.0	97.9	0.0	up
$09 \mathrm{ret}$	100.	2.0	97.9	0.0	down
$10 \mathrm{dir}$	100.	3.0	111.7	2.5	up
$10 \mathrm{ret}$	100.	3.0	111.7	2.5	down
$11 \mathrm{dir}$	100.	3.7	123.9	5.0	up
11ret	100.	3.7	123.9	5.0	down
12 dir	100.	5.8	163.9	15.0	up
12ret	100.	5.8	163.9	15.0	down

Таблица 4.7: Орбитальные параметры взаимодействий гигант-гигант

- ^а Начальное расстояние между двумя галактиками.
- ^b Значение по модулю начальной относительной скорости.

^c
$$L = |\mathbf{r}_{ini} \times \mathbf{v}_{ini}|$$

^d $E = v_{\text{ini}}^2/2 - G(m_1 + m_2)/r_{\text{ini}}$, with $m_1 = m_2 = 2.3 \times 10^{11} M_{\odot}$.

^е Орбитальный момент если z-компонента параллельна (up) или анти-параллельна (down) оси z.

		-	-		
orb.id	$r_{ m ini}^{ m a}$	$v_{ m ini}^{ m b}$	L^{c}	$E^{\mathbf{d}}$	$\operatorname{spin}^{\operatorname{e}}$
	kpc	$10^2 \mathrm{km} \mathrm{s}^{-1}$	$10^2 \mathrm{km} \mathrm{s}^{-1} \mathrm{kpc}$	$10^4 \rm km^2 s^{-2}$	
01dir	100.	1.73	48.0	0.0	up
$01 \mathrm{ret}$	100.	1.73	48.0	0.0	down
02 dir	100.	1.79	49.0	0.1	up
$02\mathrm{ret}$	100.	1.79	49.0	0.1	down
03 dir	100.	1.73	60.0	0.0	up
$03\mathrm{ret}$	100.	1.73	60.0	0.0	down
$04 \mathrm{dir}$	100.	1.79	61.0	0.1	up
$04 \mathrm{ret}$	100.	1.79	61.0	0.1	down
05 dir	100.	1.73	69.3	0.0	up
$05 \mathrm{ret}$	100.	1.73	69.3	0.0	down
06 dir	100.	1.79	69.7	0.1	up
$06 \mathrm{ret}$	100.	1.79	69.7	0.1	down

Таблица 4.8: Орбитальные параметры взаимодействий гигант-средняя масса

^а Начальное расстояние между двумя галактиками.

^ь Значение по модулю начальной относительной скорости.

^c
$$L = |\mathbf{r}_{ini} \times \mathbf{v}_{ini}|.$$

^d $E = v_{\text{ini}}^2/2 - G(m_1 + m_2)/r_{\text{ini}}$, with $m_1 = 2.3 \times 10^{11} M_{\odot}$ and $m_2 = 1.15 \times 10^{10} M_{\odot}$.

^е Орбитальный момент если z-компонента параллельна (up) или анти-параллельна (down) оси z.



Рис. 4.3: Геометрические параметры орбиты. Мы начинаем столнкновение галактик так, что орбитальный угловой момент параллелен оси z, а центры галактик изначально находятся на оси x. Внутренние моменты вращения галактик показаны синими и красными стрелками и задаются в сферических координатах (i_1, Φ_1) и (i_2, Φ_2) . В Таб. 4.10 приведены начальные значения углов.

аол	ица 4.9:	Орои	тальные пар	аметры взаимо,	цеиствии ги	<u>ант-ка</u> рлик
	orb.id	$r_{\rm ini}^{\rm a}$	$v_{ m ini}^{ m b}$	L^{c}	E^{d}	$\operatorname{spin}^{\mathrm{e}}$
		kpc	$10^2 \rm km~s^{-1}$	$10^2 \mathrm{km} \mathrm{s}^{-1} \mathrm{kpc}$	$10^4 \rm km^2 s^{-2}$	
	01dir	100.	1.48	29.66	0.	up
	$01 \mathrm{ret}$	100.	1.48	29.66	0.	down
	02 dir	100.	1.52	29.69	0.05	up
	$02 \mathrm{ret}$	100.	1.52	29.69	0.05	down
	03 dir	100.	1.55	29.72	0.1	up
	$03\mathrm{ret}$	100.	1.55	29.72	0.1	down
	$04 \mathrm{dir}$	100.	1.48	36.33	0.0	up
	$04 \mathrm{ret}$	100.	1.48	36.33	0.0	down
	$05 \mathrm{dir}$	100.	1.52	36.38	0.05	up
	$05 \mathrm{ret}$	100.	1.52	36.38	0.05	down
	$06 \mathrm{dir}$	100.	1.55	36.43	0.1	up
	06ret	100.	1.55	36.43	0.1	down

Таблица 4.9: Орбитальные параметры взаимодействий гигант-карлик

^а Начальное расстояние между двумя галактиками.

^b Значение по модулю начальной относительной скорости.

^c
$$L = |\mathbf{r}_{ini} \times \mathbf{v}_{ini}|.$$

^d $E = v_{\text{ini}}^2/2 - G(m_1 + m_2)/r_{\text{ini}}$, with $m_1 = 2.3 \times 10^{11} M_{\odot}$ and $m_2 = 2.3 \times 10^{10} M_{\odot}$.

^е Орбитальный момент если z-компонента параллельна (up) или анти-параллельна (down) оси z.

Таблица 4.10: Ориентации угловых моментов для парных взаимодействий галактик всех отношений масс

	giant-giant	giant-dwarf
	giant-intermediate	
	$\operatorname{giant-dwarf}$	
i_1	0°	33°
Φ_1	0°	0°
i_2	$0^{\circ},\!45^{\circ},\!75^{\circ},\!90^{\circ}$	130°
Φ_2	0°	0°

терны размер смягчения составляет $\epsilon = 280$ рс для взаимодействий гигантских галактик с гигантскими и $\epsilon = 200$ рс для взаимодействий с галактиками средней массы и карликовыми галактиками.

Компьютерная реализация алгоритма Tree-SPH описана в работе Semelin & Combes (2002), где приводятся все стандартные тесты для алгоритма этого типа (коллапс статической изотермической сферы самогравитирующего газа, см. работы Evrard, 1988; Hernquist & Katz, 1989; Thacker et al., 2000; Springel et al., 2001). Здесь мы применяем изотермический газ. Другие варианты представлены в работе Di Matteo et al. (2008а).

Гидродинамика сглаженных частиц – лагранжев метод, в котором газ делится на жидкие элементы, представленные частицами, которые подчиняются тем же уравнениям движения, что и бесстолкновительные частицы, но содержащие дополнительные члены, описывающие градиенты давления, вязкость и эффекты излучения в газе. Для поглощения ударных волн используется общепринятая форма искусственной вязкости с параметрами $\alpha = 0.5$ и $\beta = 1.0$ (Hernquist & Katz, 1989). Для описания различных пространственных масштабов, SPH частицы имеют индивидуальные параметры сглаживания h_i , рассчитанные тами образом, чтобы внутри $2h_i$ содержалось постоянное число соседей. Для моделирования взаимодействия гигантских галактик количество соседей было установлено в $N_s \sim 15$; для остальных взаимодействий $N_s \sim 50$. Модель газа изотермическая с температурой $T_{\rm gas} = 10^4 K$. Из-за короткого времени охлаждения газа в диске флуктуации его температуры быстро исчезают за счет излучения, поэтому модели с изотермическим газом очень слабо отличаются от более реалистичных моделей (Mihos & Hernquist, 1996; Naab et al., 2006a). Уравнения движения интегрируются с помощью алгоритма "leapfrog" с фиксированным шагом по времени, составляющим $\Delta t = 5 \times 10^5$ yr.

Звездообразование и постоянная потеря массы

Существуют многочисленные методы для моделирования звездообразования и отклика на него в численных моделях (Katz, 1992; Steinmetz & Mueller, 1994; Springel, 2000; Springel & Hernquist, 2003; Cox et al., 2006).

Мы параметризуем эффективность звездообразования для SPH, согласно работе Mihos & Hernquist (1994b):

$$\frac{\dot{M}_{\rm gas}}{M_{\rm gas}} = C \times \rho_{\rm gas}{}^{1/2},\tag{4.1}$$

где константа $C = 0.3 \,\mathrm{pc}^{3/2} M_{\odot}^{-1/2} \mathrm{Gyr}^{-1}$ выбрана таким образом, что изолированные гигантские дисковые галактики имеют средний темп звездообразования от 1 до $2.5 M_{\odot} yr^{-1}$.

Выбор параметризации в Eq. 4.1 соответствует глобальному закону Шмидта звездообразования в дисковых галактиках, получаемуму из наблюдений:

 $\Sigma_{\rm SFR} = A \Sigma_{\rm gas}^{N}$, где $\Sigma_{\rm gas}$ и $\Sigma_{\rm SFR}$ – усредненные по диску поверхностные плотности с наилучшей аппроксимацией наклона N около 1.4 (см. Kennicutt, 1998 и Wong & Blitz, 2002; Boissier et al., 2003; Gao & Solomon, 2004). Это соотношение также работает локально с похожим коэффициентом наклона, как было показано в работе Kennicutt et al. (2005) для Messier 51. Мы проверили, что наш рецепт звездообразования хорошо воспроизводит закон Шмидта на плоскости $\Sigma_{\rm gas} - \Sigma_{\rm SFR}$ как для изолированных, так и для взаимодействующих галактик. Данный рецепт учета звездообразования применяется ко всем SPH частицам, используя гибридный метод, описанный в работе Mihos & Hernquist (1994b). В этом методе каждая изначально чисто газовая частица содержит долю газа и долю звезд. Ее гравитационная масса M_i остается постоянной, но доля газа $M_{i,gas}$ изменяется соответственно Eq. 4.1. Гравитационные силы всегда вычисляются с использованием M_i , в то время как гидродинамические характеристики используют $M_{i,gas}$, изменяющуюся во времени. Если доля газа в частице падает ниже 5% от начальной, она полностью конвертируется в звезды, а малый остаток газа распределяется между соседними гибридными частицами.

Эффекты звездообразования на окружающую междзвездную среду были реализованы согласно работе Mihos & Hernquist (1994b). В каждой гибридной частице, формирующей звезды, мы рассчитываем количество образующихся звезд с массам > $8M_{\odot}$ (принимая начальную звездную функцию масс Miller & Scalo (1979)), и предполагаем, что они мгновенно становятся сверхновыми с компактными остатками, имеющими массы $1.4M_{\odot}$, в то время как оставшаяся часть массы переходит в межзвездную среду. Это вещество также обогащает окружающий газ металлами, предполагая эффективность $y = M_{ret}/M_*=0.02$, где M_{ret} – общая масса всех полученных металлов, а M_* – общая масса звезд. Для каждой газовой частицы, возвращенная масса газа и металлы переходят к *i*-й соседней частице, используя вес w_i , рассчитанный с учетом длины сглаживания.

Передача энергии от взрывов сверхновых межзвездной среде моделируется, предполагая, что только часть ϵ_{kin} общей энергии $E_{SN} = 10^{51}$ erg переходит в кинетическую энергию, путем радиальных импульсов соседних газовых частиц. То есть, для каждого взрыва сверхновой, *i*-я соседняя частица получает радиальную скорость в направлении от "донора":

$$\Delta v_i = \left(\frac{2 \ w_i \ \epsilon_{\rm kin} \ E_{SN}}{M_i}\right)^{1/2},\tag{4.2}$$

где w_i – вес, рассчитанный с учетом длины сглаживания и массы M_i реципиента.

Значение $\epsilon_{\rm kin}$ выбрано таким образом, что общее количество кинетической энергии, получаемой газовой частицей от соседей $\leq 1 \ {\rm km \ s^{-1}}$, что предотвращает быстрый рост вертикальной толщины газового диска.

Помимо звездообразования, мы учитываем процесс постоянной потери звездной массы: на каждом шаге

$$M_{i,s}(t) = \frac{(M_i - M_{i,gas}(t))\,\Delta t \,c_0}{t - t_{\text{birth}} + T_0} \tag{4.3}$$

доля звездной массы, сформированной в гибридной частице предполагается потерянной из-за эффектов эволюции звезд, также обогащая газ $M_{i,gas}$, содержащийся в частице. В этой формуле $t_{\rm birth}$ соответствует времени рождения звездного населения, $T_0 = 4.97$ Myr и $c_0 = 5.47 \times 10^{-2}$ (см. Jungwiert et al., 2001).

Эволюция металличности

Изначально металличность гигантских галактик распределена согласно радиальному профилю:

$$z_m(R) = z_0 \times 10^{-0.07*R},\tag{4.4}$$

где R – расстояние частицы от центра галактики и $z_0 = 3 \times z_{\odot}$ (Kennicutt et al., 2003; Magrini et al., 2007; Lemasle et al., 2008). Для галактик промежуточных масс и карликовых
галактик мы обобщили этот закон, учитывая зависимость металличности как от общей массы, так и от эффективного радиуса (Tremonti et al., 2004; Lee et al., 2006):

$$z_m(R) = \sqrt{M_{\text{gal}}/M_{\text{giant}}} z_0 \times 10^{-0.07*4.85*R/r_{50}}$$
$$= \sqrt{M_{\text{gal}}/M_{\text{giant}}} z_0 \times 10^{-0.34*R/r_{50}}, \qquad (4.5)$$

где M_{gal} – общая масса галактики, r_{50} – радиус, внутри котрого заключена половина массы, M_{giant} – масса гигантской галактики с эффективным радиусом 4.85 kpc.

Металличность звездной компоненты (старых звезд) остается неизменной в процессе моделирования, так что изначальный градиент может изменяться только перемешиванием и под действием динамических эффектов. В то же время, металличность как газа, так и вновь формируемых звезд изменяются во времени, поскольку проиходит обогащение межзвездной среды металлами в процессе звездообразования. Гибридные частицы характеризуются двумя значениями металличности – z_m и z_{new} . Первое знвчение соответствует текущей металличности газа в частице, в то время как второе соответствует среднему значению металличности звезд внутри частицы. Как и для старых звезд, z_m изначально распределена в диске согласно Еq. 4.4. Металличность z_{new} вновь сформированных звезд устанавливается в то же значение, что и металличность газа на момент их формирования, в то время как переработанные металлы обогащают окружающий газ с эффективностью, приведенной выше.

4.1.3 База данных GalMer

Все результаты моделирования GalMer доступны онлайн, используя технологии Виртуальной Обсерватории. Три основных момента, необходимых для предоставления прямого доступа к данным таковы: (1) хранение данных; (2) хранение и возможность осуществления запросов к описанию данных, т.е. метаданных; (3) механизмы доступа и визуализации данных. Мы также предоставляем дополнительные сервисы для анализа данных в режиме онлайн, которые в деталях описаны ниже.

Формат данных и хранение данных

Для того чтобы добиться высокой производительности, а также совместимости с другими pecypcaми (interoperability), вы выбрали формат FITS binary table (Cotton et al., 1995; Hanisch et al., 2001) для хранения результатов моделирования. Формат FITS поддерживается различными программными пакетами, широко используемыми в астрономии. Формат FITS binary table может быть легко включен в формат VOTable (Ochsenbein et al., 2004), используемый новым поколением астрономических программных пакетов, разработанных в рамках проекта Виртуальная Обсерватория.

Каждое взаимодействие галактик (далее "эксперимент GalMer") включает от 50 до 70 мгновенных снимков (snapshot), полученных с временным интервалом 50 Муг и содержащих данные для частиц, участвовавших в моделировании. Таким образом, эволюция взаимодействующей пары галактик отслеживается в течение 2.5–3.5 Gyr. Каждый snapshot сохранен в отдельном файле. Следующие характеристики приведены для всех частиц: трехмерные декартовы координаты (X, Y, Z), трехмерный вектор скорости (v_X, v_Y, v_Z) , общая масса (M), тип частицы (hybrid, star или dark matter) и идентификация галактики, к которой принадлежала данная частица в начале моделирования. Помимо этого, мы приводим металличности и t_{birth} , т.е. время рождения звездного населения для гибридных и звездных частиц, при этом для звездных частиц (тип star) эти параметры остаются постоянными в процессе моделирования, поскольку эти частицы не эволюционируют. Для гибридных частиц приводится средние значения t_{birth} и металличностей звезд z_m , а также массы газа и металличности звез z_{new} , сформированных в течение последнего шага по времени.

Вся информация, относящаяся к начальным параметрам данного эксперимента GalMer, т.е. морфологические типы галактик, орбитальная конфигурация, единицы измерения масс, координат и скоростей, а также момент времени, когда был получен текущий snapshot, приведены в заголовке FITS-файлов, делая их самодостаточными и доступными для независимого анализа впоследствии без необходимости обращаться к базе данных GalMer.

Типичный snapshot, содержащий 240000 имеер размер около 12 Мбайт, таким образом данные каждого эксперимента GalMer имеют размер 0.6–0.9 Гбайт. Текущий релиз данных содержит около тысячи экспериментов GalMer с общим объемом около 1 Тбайта. Новые результаты моделирования будут добавляться в базу данных и станут доступными онлайн по мере их появления.

Метаданные

Метаданные рассчитываются для каждого индивидуального snapshot-файла в момент обновления базы данных. Поскольку данные архивируются и не изменяются со временем, метаданные также остаются неизменными. Поэтому обычно доступ к базе данных предоставлен в режиме "только чтение", если только не производится загрузка новых результатов моделирования.

Метаданные моделирования GalMer соответствуют текущей версии стандарта Виртуальной Обсерватории – модели данных SimDB (Lemson et al. в работе), разрабатываемого IVOA. Предполагается, что SimDB позволит предоставлять полное самодостаточное описание результатов N-body моделирования, используя объектно-ориентированный подход, для разработки которого используется язык Unified Modeling Language (UML). Для практического использования, такого как создание базы данных, содержащей метаданные для численного моделирования, модель данных UML необходимо сериализовать. Мы частично сериализуем UML в структуру реляционной базы данных, оставляя часть в виде сериализации в формат XML.

Мы используем свободно-распространяемую объектно-реляционную систему управления базами данных $POSTGRESQL^2$ для реализации продвинутых механизмов запросов метаданных, описанных в работе Zolotukhin et al. (2007).

Метаданные, хранимые в СУБД содержат прямые ссылки на snapshot FITS-файлы. Поэтому для совершения операция над частицами, например, выделение фрагментов или статистические вычисления, необходимо загружать весь snapshot файл. Однако, глобальные характеристики симуляций, такие как общие массы газа или звезд доступны внутри базы данных, что делает возможным, например, рассчитывать глобальную историю звез-

 $^{^{2} \}rm http://www.postgresql.org/$



Рис. 4.4: Интерактивный доступ к данным GalMer через web-интерфейс: (1) выбор морфологий галактик и типа орбиты; (2) выбор одного из экспериментов GalMer из тех, что удовлетворяют критериям выбора; (3) выбор snapshot-файла; (4) предварительный просмотр snapshot-файла и доступ к средствами анализа данных для него.

дообразования во взаимодействующих галактиках. Эта функция реализована на языке plpgsql, интегрирована в базу данных и доступна через web-интерфейс.

Все запросы к методанным конструируются динамически с помощью визуальных элементов, доступных в web-интерфейсе, что исключает необходимость написания SQL запросов "вручную".

Доступ к данным и визуализация

Интерактивный доступ к данным предоставлен посредством WWW-интерфейса³. Он основан на *de facto* стандартной технологии асинхронного JavaScript и XML (AJAX) и поэтому поддерживается большинством современных интрнет-браузеров, таких как MOZILLA

 $^{^{3}\}mathrm{http://galmer.obspm.fr/}$

FIREFOX ver.>1.5, MICROSOFT INTERNET EXPLORER ver.>5 и APPLE SAFARI ver.>3. Также возможен прямой доступ к snapshot-файлам в пакетном режиме.

Веб-сайт предоставляет интерфейс запроса в базу данных для доступа к моделированию взаимодействия галактик данных морфологических типов и с данными орбитальными параметрами. Являясь частью метаданных SimDB, эта информация хранится в в базе данных, доступ к ней происходит динамически, и полученные данные отображаются во всплывающем окне, как только пользователь выбрал данный тип орбиты и/или галактики в веб-форме запроса. Чтобы использовать все доступные компоненты интерфейса базы банных GalMer, необходимо наличие на компьютере пользователя следующих компонент: (1) поддержки JavaScript в веб-браузере; (2) SUN JAVA⁴, в том числе поддержка апплетов и технологии Java WebStart, что является стандартными компонентами SUN JAVA.

Интерактивный доступ к данным включает в себя несколько шагов (см. Рис. 4.4). На первом этапе выбираются морфологические типы галактик и конфигурация орбиты на вкладке "DB Query". Затем пользователь выбирает интересующий его эксперимент GalMer на вкладке "Query Results" из списка, удовлетворяющего критериям выбора из первого шага. Как только эксперимент был выбран, пользователь может скачать либо визуализировать интегральную историю звездообразования в данном взаимодействии и/или скачать или отобразить индивидуальные snapshot-файлы в программном пакете TOPCAT на вкладке "Experiment". После этого появляется возможность детально изучить содержание данного snapshot-файла и получить доступ к средствам анализа данных, используя вкладку "Shapshot".

На вкладке "Snapshot" представлен мощный механизм предварительного просмотра данных прямо в веб-браузере, основанный на технологии AJAX (см. нижнюю правую панель на Рис. 4.4). Основная цель визуализации и манипуляции с данными snapshot-файла – выбор проекции и масштаба изображения для последующей генерации карт различных физических величин в проекции, а также синтетических изображений и/или спектров, как описано в следующем подразделе.

Хотя возможности интерактивной визуализации данных внутри веб-браузера довольно ограничены, все эти ограничения возможно обойти путем использования соответствующих программных пакетов, если данные посылаются в них напрямую из интерфейса доступа к базе данных.

Мы реализовали взаимодействие между веб-интерфейсом базы данных GalMer и существующими средствами Виртуальной Обсерватории для работы с таблицами (TOPCAT⁵, Taylor, 2005), изображениями (CDS ALADIN⁶, Bonnarel et al., 2000) и спектрами (ESA VOSPEC⁷, Osuna et al., 2008). Механизм взаимодействия был предложен в работе Chilingarian & Zolotukhin (2008), а его первая реализация была в архиве наблюдательных данных ASPID-SR (Chilingarian et al., 2007а). Взаимодействие основано на промежуточном программном слое (middleware, Zolotukhin & Chilingarian, 2008), представленном двумя компонентами (Puc. 4.5), взаимодействующими посредством технологии Sun Java LiveConnect: (1) части, отвечающей за обработку действий пользователя в веббраузере, реализованной на языке JavaScript, и (2) Java-апплете для посылки данных VO-приложениям, реализующем VO протокол обмена сообщений для приложений. Те-

⁴http://www.java.com/

⁵http://www.star.bris.ac.uk/~mbt/topcat/

 $^{^{6}} http://aladin.u-strasbg.fr/$

 $^{^{7}\,\}mathrm{htt\,p://esavo.esa.int/vosp\,ec/}$

кущая версия программного решения реализует протокол PLASTIC (PLATFORM FOR ASTRONOMICAL TOOL INTERCONNECTION, Boch et al., 2006). Поддержка для более продвинутого протокола SAMP (Simple Application Messaging Protocol, Taylor et al., 2009) будет добавлена в следующую версию базы данных.

4.1.4 Сервисы онлайн анализа данных

Мы разработали библиотеку-интерфейс программного доступа (API) для манипуляций и анализа результатов моделирования GalMer. Библиотека MERGERAPI реализована на языке ANSI C и требует минимальный набор необходимого программного обеспечения для работы: библиотеку CFITSIO⁸ для доступа к данным и библиотеку GD⁹ для генерации изображений в форматах *gif* и *png*, отображаемых непосредственно в веб-браузере. Библиотека MERGERAPI установлена на сервере и используется несколькими сервисами для онлайн анализа данных, описанными ниже.

Карты распределения физических параметров

Для каждого snapshot-файла мы предоставляем ряд сервисов для создания "на лету" двумерных карт распределения различных физических величин, которые используются в процессе моделирования. Эти сервисы доступны на вкладке "Snapshot' веб-интерфейса базы данных GalMer.

Карты распределения следующих величин могут быть рассчитаны для любой комбинации из трех типов частиц: поверхностная плотность, лучевая скорость, дисперсия скоростей вдоль луча зрения (σ). Для гибридных частиц можно рассчитать поверхностную плотность газа, поверхностную плотность звезд, металличность газа, металличность вновь сформировавшихся звезд. Для звездных частиц можно также рассчитать металличность звезд, которая представляет собой металличность старого звездного населения, которая не эволюционирует во времени для данной частицы. Предварительный просмотр карт поверхностной плотности показывается прямо в веб-браузере, в то время как карты всех остальных физических параметров можно получить в формате FITS либо отобразить в CDS ALADIN.

Для генерации карт параметров на лету мы разработали эффективный численный алгоритм. Все карты рассчитываются в параллельной проекции на плоскость (т.е. наблюдатель находится бесконечно далеко), в то же время можно задавать пространственный масштаб (т.е. эффективное расстояние r от наблюдателя до барицентра). Поэтому, проекция однозначно задается двумя величинами – азимутальным (φ) и полярным (θ) углами. Для упрощения сравнения карт различных масштабов и возможности составлять мозаики (т.е. увеличивать некоторые области взаимодействующих галактик), мы используем конвенцию FITS WCS (Greisen & Calabretta, 2002) для тангенциальной проекции и устанавливаем начало координат (R.A.=0 и Dec=0) в положение проекции барицентра. В этом случае координаты частиц рассчитываются следующим образом:

 $^{^{8}}$ http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/software/fitsio/fitsio.html

⁹http://www.libgd.org/



Рис. 4.5: Промежуточный программный слой (middleware, в середине), соединяющий базу данных GalMer с программными средствами Виртуальной Обсерватории, предназначенными для продвинутых операций над данными и визуализатором карт плотности в браузере (сверху), с пакетами VOSpec и Aladin (снизу), содержащими модельный спектр и поле лучевых скоростей.

$$x_{\rm proj} = -X\sin\varphi + Y\cos\varphi$$

$$\eta = 206265 \quad x_{\rm proj}/r$$

$$y_{\rm proj} = -X\cos\varphi\sin\theta - Y\sin\varphi\sin\theta + Z\cos\theta$$

$$\xi = 206265 \quad y_{\rm proj}/r.$$
(4.6)

Здесь η и ξ определяют тангенциальные координаты на небе в arcsec и используются для генерации синтетических изображений, которые можно напрямую сравнивать с наблюдениями (см. ниже).

Лучевые скорости и положения на луче зрения даются формулами:

$$v_{\rm r} = v_X \cos\varphi \cos\theta + v_Y \sin\varphi \cos\theta + v_Z \sin\theta \tag{4.7}$$

 $z_{\rm r} = X\cos\varphi\cos\theta + Y\sin\varphi\cos\theta + Z\sin\theta.$ (4.8)

Затем предпринимаются следующие шаги:

- Создается сетка, соответствующая желаемому размеру и масштабу карты.
- В одном цикле по всем частицам мы определяем бин (пиксель), в который каждая частица будет вносить вклад, и учитываем этот вклад.
- Во втором цикле уже по пикселям мы рассчитываем (если требуется) реальные значения физического параметра.

Алгоритм оказывается достаточно быстрым для того, чтобы формировать карты в режиме реального времени, т.е. генерация изображения размером 400 × 400 пикселей занимает долю секунды. На Рис. 4.6 мы приводим пример полученных карт параметров для одного из взаимодействий галактик.

Спектрофотометрические характеристики

Мы разработали методику моделирования спектрофотометрических свойств взаимодействующих галактик по результатам численного моделирования GalMer, используя модели PEGASE.HR (Le Borgne et al., 2004) и PEGASE.2 (Fioc & Rocca-Volmerange, 1997). Учитывая кинематику, истории звездообразования и обогащения тяжелыми химическими элементами, мы моделируем спектры и цвета галактик. Детальное описание метода будет представлено в отдельной работе (Chilingarian et al. в работе), здесь же мы кратко опишем алгоритм и результаты, которые возможно получить.

В прошлом предпринималось несколько успешных попыток (Chakrabarti & Whitney, 2009; Jonsson et al., 2010) моделирования спектрофотометрических свойств галактик по результатам N-body моделирования. Однако, во всех случаях свойства звездного населения учитываются приблизительно, приписывая частицам некие средние возрасты и металличности. В то же время, поведение деталей в спектрах является сильно нелинейной функцией возраста и металличности, которая также сильно изменяется в разных диапазонах длин волн, в частности, в связи с поглощением пылью. Поэтому, SED рассчитанный с использованием возрастов и металличностей, усредненных по массе, может не отражать реальные распределения энергии в спектрах галактик. В моделях GalMer, благодаря использованию гибридных частиц мы можем: (1) отслеживать в деталях истории звездообразования



Рис. 4.6: Карты в проекции для 8 физических параметров, отслеживаемых в моделировании GalMer для слияния gSa и gSb галактик на орбите типа "prograde 5" через 650 Myr после начала моделирования. Слева-направо сверху-вниз: лучевая скорости, дисперсия скоростей (звезды и гибридные частицы), поверхностные плотности газа и старых звезд, металличность газа, металличность старых звезд, металличность сформировавшихся звезд, общая поверхностная плотность (звезды + гибридные частицы).

и обогащения металлами в течение всего численного эксперимента для каждой частицы этого типа; (2) использовать эту информацию. Поэтому, мы можем проводить моделирование спектрофотометрических свойств взаимодействующих галактик на качественно новом уровне (применимо к результатам любого другого моделирования методом TreeSPH) и сравнивать полученные результаты с наблюдениями напрямую. Истории звездообразования и обогащения металлами рассчитываются, используя весь ряд snapshot-файлов в данном эксперименте GalMer как разница масс каждой из гибридных частиц на соседних шагах в 10 бинах по металличности от [Fe/H]= -2.5 до +1.0 dex.

Наиболее затратная по времени часть для подобного моделирования – это время работы программного пакета PEGASE.HR. Из-за сложности алгоритмов эволюционного синтеза, даже на современных компьютерах генерация одного спектра занимает несколько секунд (т.е. один спектр на каждую звездную частицу), что выливается в несколько часов для одного snapshot-файла, включающего до 160000 гибридных и звездных частиц. Вычисление спектров индивидуальных частиц абсолютно необходимо для моделирования эффектов пылевого поглощения и внутреннего уширения спектральных линий за счет движения частиц вдоль луча зрения (т.е. внутренней кинематики галактик). Однако, мы смогли избежать непосредственно выполнения программного кода PEGASE.HR.

Алгоритм эволюционного синтеза, такой как PEGASE.HR включает в себя:

- 1. расчет изохрон для данного возраста и металличности, используя данный набор эволюционных треков звезд и начальную функцию масс;
- 2. выбор звездных спектров из библиотеки (теоретической или эмпирической) для параметров атмосферы, соответствующих данной точке на изохроне;
- 3. сложение спектров различных типов звезд, согласно их весам на изохроне, т.е. создание модели простого звездного населения SSP, содержащей звезды одного возраста и одной металличности, но разных масс
- 4. сложение различных SSP для реализации сложной истории звездообразования и обогащения металлами

Когда IMF фиксирована, а истории звездообразования и обогащения металлами отслеживаются на фиксированной заранее определенной сетке возрастов и металличностей, становится возможным опустить первые три этапа из этого списка и выполнять только четвертый. Это означает, что если мы однажды рассчитаем сетку моделей SSP для данной начальной функции масс (Miller & Scalo (1979) в нашем случае) и данной сетки возрастов и металличностей, мы можем использовать ее для всех частиц, увеличивая эффективность расчета на несколько порядков величины. Для каждого эксперимента GalMer мы один раз также рассчитываем истрии звездообразования и обогащения металлами и храним их как двумерные гистограммы для каждой гибридной частицы.

Для каждого пространственного пикселя (см. определение в предыдущем подразделе) мы сначала сортируем частицы вдоль луча зрения для учета эффектов поглощения. Затем мы рассчитываем либо спектр высокого разрешения, либо распределение энергии в спектре для выбранных фотометрических полос (в зависимости от режима работы) для каждой частицы, начиная с лежащей дальше всего от наблюдателя. Это производится путем сложения SSP-моделей, рассчитанных заранее с весами, соответствующими массовой доле звезд в каждой ячейке по возрасту и металличности согласно историям звездообразования и обогащения металлами.

После этого учитываются эффекты поглощения межзвездной пылью, которые применяются к спетру или SED, сформированному на предыдущем шаге (т.е. исключая текущую частицу). Для известной плотности газа на луче зрения (column density) мы применяем стандартное соотношение между газом и пылью для солнечной металличности для расчета экстинкции $A_V = N_H/1.871 \times 10^{21}$ (Bohlin et al., 1978), где N_H – количество атомов водорода на сm², а константа $R_V \equiv A_V/E(B-V) = 3.1$. Мы расчитываем N_H для данной частицы и масштабируем значение A_V линейно по металличности. Затем мы учитываем зависимость экстинкции от длины волны согласно работе Fitzpatrick (1999) и применяем полученный вектор поглощения к спектру звездного населения, рассчитанном на предыдущем шаге.

После учета поглощения, общий спектр текущей частицы сдвигается в красную или синюю стороны согласно ее лучевой скорости. Наши спектральные модели звездного населения имеют логарифмический шаг по длине волны, соответствующий постоянному масштабу в km s⁻¹ на пиксель, поэтому эта операция представляет собой простой сдвиг вектора.

Затем общий спектр (или SED) данной частицы добавляется к результату в данном пикселе. Данный алгоритм предоставляет возможность вычисления суммарного спектра среднего разрешения ($R = 3000, 3900 < \lambda < 6800$ Å), основанного на эмпирической библиотеке ELODIE.3.1 (Prugniel et al., 2007) всего за несколько секунд. При этом общее количество SSP-моделей, участвующих в вычислении в некоторых случаях достигает 10^6 . Широкополосная и среднеполосная фотометрия в 91 фильтре от FUV до NIR с использованием теоретической библиотеки звездных спектров BaSeL (Lejeune et al., 1997) вычисляется гораздо быстрее, поскольку количество точек в SED намного меньше, чем в случае расчета спектров, таким образом мы можем моделировать многоцветный куб данных размером 400×400 в пространственных координатах всего за несколько секунд.

Из-за ограниченного пространственного разрешения моделирования GalMer, мы не достигаем пространственных масштабов, достаточных для корректного учета неоднородности газа и пыли, поэтому для расчета поглощения мы используем пространственный масштаб 250 pc, что примерно соответствует разрешению наших моделей, и приводит к значениям общего поглощения в галактиках, соответствующим наблюдениям. Наше ограниченное пространственное разрешение приводит к переоценке роли поглощения в центральных частях галактик с высокой плотностью газа. В настоящее время наши модели не включают в себя излучение пыли в среднем и дальнем ИК-диапазонах. Эти эффекты будут добавлены в следующие версии базы данных GalMer и будут представлены в отдельной работе (Melchior et al. в работе).

На Рис. 4.7 мы представляем пример спектров, рассчитанных для одного из результатов взаимодействия галактик, где эффекты внутренней кинематики хорошо заметны. Синий и красный спектры рассчитаны на расстояниях 1.5 kpc от центра галактики вдоль большой оси, и заметно доплеровское смещение спектральных линий. Абсорбционные линии расширяются автоматически из-за кинематики частиц на луче зрения и отражают эффекты дисперсии скоростей звезд в галактике.

В настоящее время мы не моделируем эмиссионный линии в спектрах, поскольку наши модели не отслеживают в достаточной мере физические параметры межзвездной среды. В принципе, возможно проведение лишь качественного моделирования, предполагая



Рис. 4.7: Примеры синтетических спектров, созданных алгоритмом спектрофотометрического моделирования, примененного к результатам моделирования GalMer. Две кривые соответствуют двум различным позициям вдоль проекции большой оси галактики – результата слияния: приближающиеся (синий) и удаляющейся (красный) вдоль луча зрения. Спектры нормированы на поток на $\lambda = 5000$ Å для наглядности.

фиксированную температуру ISM и плотность, зависящую только от металличности газа, моделируемой в гибридных частицах. Это моделирование также будет описано в статье по учету поглощения и излучения пыли (Melchior et al. в работе).

4.1.5 Астрофизические приложения

Свойства галактик из численных моделей

База данных GalMer активно использовалась для изучения различных физических процессов, связанных с взаимодействиями галактик, таких как индуцированное усиление звездообразования, эволюция градиентов металличности, перераспределение углового момента и их влияние на окончательные кинематические свойства галактики, образовавшейся в результате слияния.

В работах Di Matteo et al. (2007) и Di Matteo et al. (2008а) было исследовано увеличение эффективности звездообразования в процессе взаимодействия и слияния галактик. В работе Di Matteo et al. (2007) было показано, что (i) в заключительной фазе слияния на обратных орбитах вызывают большую эффективность звездообразования, чем на орбитах с сонаправленным угловым моментом галактики и орбитальным моментом; (ii) количество газа в галактике не является основным параметром, влияющим на эффективность звездообразования в период вспышки звездообразования; (iii) наблюдается антикорреляция между амплитудой вспышки звездообразования в период слияния и приливными силами в момент прохождения перицентра. Основной результат работы Di Matteo et al. (2008а) – вывод о том, что на малых красных смещениях взаимодействия и слияния галактик вызывают относительно небольшое увеличение интенсивности звездообразования. Сильные вспышки, где темп звездообразования увеличивается более, чем в 5 раз редки и встречаются только в 15% рассмотренных взаимодействий и слияний. Также вспышки звездообразования, связанные со слияниями, оказываются короткими с типичной продолжительностью в несколько сот Муг. Эти выводы не зависят от используемых алгоритмов моделирования и моделей звездообразования. На более высоких красных смещениях, где галактики богаты газом, вспышки звездообразования за счет падения газа на центр оказыватся ни сильнее, ни длиннее, чем в локальной Вселенной. Эти результаты находятся в хорошем согласии с рядом наблюдательных работ (Bergvall et al., 2003; Li et al., 2008; Jogee et al., 2009; Knapen & James, 2009), показывающих, что взаимодействия и слияния далеко не всегда вызывают сильные вспышки звездообразования.

В работе Di Matteo et al. (2009b) исследовалась зависимость градиентов металличности в галактиках-остатках после слияния (без участия газа) от градиентов в галактиках в начале эксперимента. Целью было понять, могут ли "сухие" слияния приводить к градиентам металличности, наблюдаемым в эллиптических галактиках в локальной Вселенной, и всегда ли они вызывают уменьшение начальных градиентов. Анализ всех "сухих" слияний показал, что галактики-остатки могут иметь большой диапазон градиентов металличности, в том числе выше, чем изначальные градиенты в зависимости от параметров галактик. Для слияния двух эллиптических галактик с одинаковыми градиентами профиль металличности остатка становится более плоским, окончательный градиент составляет около 0.6 от начального. Это уменьшение градиента не зависит ни от характеристик орбит галактик, ни от их профилей плотности. Если градиент в компаньоне галактик достаточно резкий, то финальная эллиптическая галактика может сохранить начальный градиент. При сравнении с наблюдаемым разнообразием градиентов металличности в карликовых галактиках (Chilingarian, 2009а), эти результаты указывают на возможность слияний как важных процессов в эволюции карликовых галактик ранних типов. Принимая во внимание разнообразие получающихся галактик-остатков, в работе Di Matteo et al. (2009b) сделан вывод, что "сухие" слияния не нарушают наблюдаемые ограничения на градиенты металличности эллиптических галактик (Ogando et al., 2005).

Переход орбитального углового момента во внутреннее вращение и его влияние на кинематические характеристики остатков слияний были исследованы в работах Di Matteo et al. (2008c, 2009a).

В работе Di Matteo et al. (2008с) представлен новый сценарий формирования контрвращающейся центральной компоненты в галактиках ранних типов посредством диссипативных и бездиссипативных "смешанных" слияний элиптических и спиральных галактик на обратных орбитах. Показано, что контрвращение может возникнуть в обоих случая (диссипативные и бездиссипативные слияния) и связаны в основном с дисковой компонентой, которая сохраняет часть своего начального вращения. Напротив, внешние части двух взаимодействующих галактик получают часть начального орбитального момента в связи с влиянием приливных сил на каждую из галактик. В случае диссипативных слияний центральное противовращающееся ядро может состоять из двух компонент в звездном населении – старого населения, сохранившего часть изначального момента и нового молодого населения, сформировавшегося *in situ* из кинематически-выделенной газовой компоненты.

Даже при слияниях двух изначально невращающихся галактик, поддерживаемых только случайными движениями, может приводить к формированию остатков со специфическими кинематическими свойствами. В работе Di Matteo et al. (2009а) показано, что возможно формирование эллиптических галактик с $v/\sigma > 1$ во внешних частях (за пределом одного эффективного радиуса) путем перевода орбитального углового момента во внутренний. Это преобразование работает "внутрь", т.е. внешние части галактики оказываются первыми, получающими часть орбитального момента, затем вызывая вращение как барионов, так и темной материи в галактике-остатке (т.е. обе компоненты получают угловой момент, а относительные доли зависят от начальной концентрации). Если начальная барионная компонента достаточно плотная, и происходит взаимодействие на орбите с большим угловым моментом, то галактика-остаток демонстрирует гибридные свойства, т.е. эллиптическую морфологию, но внешнее звездное гало, поддерживаемое вращением ($v/\sigma >1$). Системы с подобными свойствами наблюдалются при комбинации данных для абсорбционных спектров и кинематики планетарных туманностей на больших расстояниях от центра (Соссато et al., 2009). Результаты моделирования оказываются в качественном согласии с этими наблюдениями и демонстрируют, что даже слияния невращающихся галактик могут приводить к образованию галактик ранних типов с существенным вращением на больших радиусах от центра.

Синтетические наблюдения: виртуальный телескоп

Некоторые из сервисов анализа данных, разработанных для базы данных GalMer могут использоваться как "виртуальный телескоп" для создания модельных изображений и спектров взаимодействующих галактик. Благодаря высокому качестве моделей звездного населения PEGASE.2/PEGASE.HR, мы можем сравнивать результаты моделирования с реальными наблюдательными данными.

На Рис. 4.8 представлено RGB композитное изображение в условных цветах для пары взаимодействующих галактик по результатам спектрофотометрического моделирования, описанного выше и примененного к результатам моделирования GalMer. Модельное изображение галактик наложено на изображение скопления галактик Abell 85 из обзора SDSS DR7 (Abazajian et al., 2009). Мы используем данные (наблюдения и модели) в полосах g, r, i и код для визуализации, реализующий алгоритм из работы Lupton et al. (2004) для создания цветных изображений в условных цветах. Поскольку результаты спкектрофотометрического моделирования выражены в реальных физических единицах, их можно легко перевести в поверхностные яркости (mag arcsec⁻²) и проецировать на небесную сферу, предоставляя возможность для прямого сравнения с наблюдательными данными. Путем сложения модельных потоков с наблюдаемыми (значения из изображений в соответствующих фильтрах из обзора SDSS) мы создаем реалистичные изображения, как показанное на Puc. 4.8.

Модельные изображения затем можно анализировать, используя классические наблюдательные методы, например, поверхностную фотометрию. Удачный пример такого типа анализа продемонстрирован в работе Chilingarian et al. (2009а), где мы обнаружили хорошее совпадение между наблюдаемым трехкомпонентным профилем плотности линзовидной галактики NGC 6340 и остатками слияния из моделирования GalMer, что поддерживает идею о том, что слияние явилось важным событием в эволюции данного объекта.

Также мы можем моделировать целые спектральные кубы данных, соответствующие данным, получаемым на современных полевых (IFU) спектрографах, таких как SAURON на 4.2 m телескопе им. Уильяма Гершеля, VIMOS на VLT и GMOS на телескопе Gemini. Наше спектральное разрешение и диапазон длин волн позволяет моделировать режим



Рис. 4.8: Изображения в условных RGB-цветах модели слияния галактик, показанное на фоне скопления галактик Abell 85 по данным SDSS.



Рис. 4.9: Диаграммы цвет–величина и цвет–цвет в виде контуров, представляющих результаты измерений для 80000 близких галактик (z < 0.3) из обзора SDSS, модели галактик GalMer, соответствующие изолированным галактикам различных масс и морфологических типов, и последовательность, соответствующая модели слияния GalMer от момента слияния в течение последующих 1.5 Gyr с шагом 50 Myr (красные ромбики). Цвета (см. легенду на правой панели) соответствуют морфологическим типам, а типы значков (см. легенду на левой панели) – классам светимости.

HR-Blue (R = 2500) спектрографа VIMOS и наблюдения с гризмой B600 для GMOS (R = 2200), обычно выбираемую для исследования звездной кинематики в близких галактиках.

Пространственное разрешение нашего моделирования (0.20-0.28 kpc) сравнимо с разрешением обзора SAURON (de Zeeuw et al., 2002) близких галактик на расстояниях от 10 до 40 Mpc, что соответствует пространственному разрешению от 0.05 до 0.2 kpc для типичного атмосферного качества изображения 1 arcsec. В то же время, мы можем ухудшить пространственное разрешение наших моделей, для того чтобы сравнивать результаты с наблюдениями галактик типа poststarburst со спектрографом VIMOS, представленные в работе Chilingarian et al. (2009b).

По мере улучшения моделей звездного населения, мы будем обновлять систему моделирования спектрофотометрических свойств галактик в базе данных GalMer, чтобы моделировать данные с новых инструментов, таких как спектрограф второго поколения MUSE на ESO VLT.

Соотношение цвет-величина

Механизмы спектрофотометрического моделирования позволяют нам вычислять глобальные звездные величины и цвета взаимодействующих галактик и напрямую сравнивать их с наблюдениями.

Диаграммы цвет-величина и цвет-цвет, на которых приведено сравнение результатов моделирования GalMer с большим набором наблюдательных данных представлен на Рис. 4.9. Хорошо известная бимодальность цветов (Strateva et al., 2001) четко видна на диаграмме цвет-величина, содержащей данные для 80 000 близких галактик (z < 0.3) из обзора SDSS. Фотометрические данные исправлены за Галактическое поглощение и исправлены за k-поправки аналитически. "Красная последовательность" и "голубое облако", разделенные "зеленой долиной", в которой располагаются poststarburst-галактики (Goto et al., 2003а) хорошо заметны.

Интегральные звездные величины одного из слияний галактик из базы данных GalMer в SDSS фильтрах были рассчитаны с помощью спектрофотометрического моделирования, описанного выше. Мы также показываем положения моделей изолированных галактик различных масс и морфологических типов. Эллиптические и линзовидные галактики (красные и желтые значки) сидят точно на красной последовательности, а то время как спиральные галактики голубее и отстоят в направлении синего облака. Модели галактик типов Sa и Sb (зеленые и синие символы) на этапе эволюции, приведенном на Puc.4.9, оказываются в районе "зеленой долины".

Мы отслеживаем эволюцию взаимодействующей пары с момента слияния (красные ромбики, соединенные линией) до конца эксперимента, показывая промежуточные этапы каждые 50 Муг. Сразу после слияния галактик, богатых газом, остаток находится в синем облаке, несмотря на сильное внутреннее поглощение в областях массивного звездообразования. Затем, по мере уменьшения темпа звездообразования, средний возраст звездного населения начинает увеличиваться, галактика краснеет и перемещается вправо вверх в область красной последовательности через "зеленую долину". В результате, через 400–600 Муг после момента слияния остаток садится на красную последовательность, несмотря на то, что остаточное звездообразование все еще идет.

Видно, что остаток пересекает "зеленую долину" очень быстро, давая возможное объяснение тому факту, что в этой области наблюдается дефицит галактик, принимая во внимания, что пока в базе данных GalMer не содержатся все взаимодействия для галактик всех масс.

4.1.6 Заключение

Мы представили базу данных GalMer, предоставляющую доступ к результатам TreeSPHмоделирования. Структура базы данных соответствует стандартам Международной Виртуальной Обсерватории. Мы описали интерактивный доступ к данным через вебинтерфейс, а также продвинутые механизмы визуализации и манипуляции данных, используя связь с программными пакетами, используемыми в Виртальной Обсерватории для работы с данными типа таблиц, изображений и спектров.

Все данные хранятся и формате FITS и к ним предоставлен прямой доступ (к информации о каждой частице, участвующей в моделировании). Помимо этого мы представили набор средств визуализации и анализа результатов TreeSPH-моделирования, которые включают: (1) генератор двумерных карт распределения физических параметров, эволюция которых отслеживается в процессе моделирования; (2) реализованные алгоритмы моделирования спектрофотометрических свойств взаимодействующих галактик с использованием моделей эволюционного синтеза PEGASE.2/PEGASE.HR. Эти алгоритмы могут быть использованы в качестве виртуального телескопа, с помощью которого можно получать синтетические изображения, спектры и спектральные кубы данных, напрямую сравнимые в наблюдательными данными. Мы представляем примеры научного применения базы данных GalMer.

База данных будет пополняться новыми результатами моделирования по мере их появления.

4.1.7 Модели галактик: профили плотности

В разделе 4.1.1 мы представили модели галактик, использованные в нашем моделировании. В частности, мы видели, что темное гало и балдж (если есть) моделируются сферами Plummer (см. стр. 42 Binney & Tremaine, 1987) с характеристическими массами M_B и M_H и радиусами r_B и r_H . Их плотности вычисляются аналитически, согласно формулам:

$$\rho_H(r) = \left(\frac{3M_H}{4\pi r_H^3}\right) \left(1 + \frac{r^2}{r_H^2}\right)^{-5/2}$$
(4.9)

И

$$\rho_B(r) = \left(\frac{3M_B}{4\pi r_B{}^3}\right) \left(1 + \frac{r^2}{r_B{}^2}\right)^{-5/2}.$$
(4.10)

Звездные и газовые диски следуют профилю плотности Миямото-Нагаи (см. стр. 44 Binney & Tremaine, 1987):

$$\rho_*(R,z) = \left(\frac{h_*^2 M_*}{4\pi}\right) \times \frac{a_* R^2 + (a_* + 3\sqrt{z^2 + h_*^2}) \left(a_* + \sqrt{z^2 + h_*^2}\right)^2}{\left[a_*^2 + \left(a_* + \sqrt{z^2 + h_*^2}\right)^2\right]^{5/2} \left(z^2 + h_*^2\right)^{3/2}}$$
(4.11)

$$\rho_g(R,z) = \left(\frac{h_g^2 M_g}{4\pi}\right) \times \frac{a_g R^2 + (a_g + 3\sqrt{z^2 + h_g^2}) \left(a_g + \sqrt{z^2 + h_g^2}\right)^2}{\left[a_g^2 + \left(a_g + \sqrt{z^2 + h_g^2}\right)^2\right]^{5/2} (z^2 + h_g^2)^{3/2}}, \qquad (4.12)$$

где массы звезд и газа – M_{\ast}
и $M_{g},$ а вертикальные и радиальные масштабы соответственн
о $h_{\ast},\,a_{\ast}$ и $h_{g},\,a_{g}.$

4.1.8 Модели изолированных галактик

Поскольку наша цель – исследование эффектов взаимодействия на эволюцию галактик, также важно исследовать эволюцию галактик в изоляции, чтобы отличать эффекты секулярной эволюции от процессов, связанных с взаимодействиями. На Рис.4.10–4.11 представлена эволюция газовой и звездной компонент гигантских галактик типа gSa, gSb и gSd, которую мы моделируем в течение 3 Gyr. Как видно, модели быстро эволюционируют в первые 0.5–1 Gyr: формируются звездный бар и спиральные ветви, в то же время газ сжимается в волны плотности и облака и частично оседает на центральные области, где наблюдается усиление звездообразования (см. подробнее работу Di Matteo et al., 2007).



Рис. 4.10: Карты поверхностной плотности газа для моделей изолированных галактик типов gSa, gSb и gSd для $Q_{gas} = 0.3$. Снимки от t=0 до t=3 Gyr через каждые 750 Myr. Каждое изображение имеет размер 60×60 kpc.



Рис. 4.11: Карты поверхностной плотности звезд для моделей изолированных галактик типов gSa, gSb и gSd. Снимки от t=0 до t=3 Gyr через каждые 750 Myr. Каждое изображение имеет размер 60×60 kpc.

4.2 Исследования E+A галактики SDSS J230743.41+152558.4

Результаты, представленные в данном разделе, опубликованы в работе Chilingarian et al. (2009b).

В этом разделе мы представляем первые двумерные карты кинематики и параметров звездного населения, полученные для богатой газом E+A галактики, выбранной из каталога Goto et al. (2003а) – объекта SDSS J230743.41+152558.4. Находясь на красном смещении z = 0.0695, соответствующем расстоянию по светимости $d_L = 302$ Mpc (принимая пространственно плоскую космологическую модель с параметрами $H_0 = 73$ km s⁻¹ Mpc⁻¹, $\Omega_{\rm M} = 0.27$, $\Omega_{\Lambda} = 0.73$), модулю расстояния m - M = 37.40 mag и пространственному масштабу 1.27 kpc arcsec⁻¹ эта галактика оказывается довольно близкой poststarburstгалактикой. Несколько галактик на расстоянии в проекции от SDSS J230743.41+152558.4 до 200 kpc с известными лучевыми скоростями, имеют красные смещения, распределенные в широком интервале (0.036 < z < 0.25), и таким образом, ни одна из них не связана физически SDSS J230743.41+152558.4. Поэтому мы подтверждаем классификацию SDSS J230743.41+152558.4, приведенную в работе Yagi & Goto (2006), как галактики поля.

4.2.1 Наблюдения и обработка данных

Данные были получены в мультизрачковом режиме IFU спектрографа VIMOS а телескопе ESO/VLT-Melipal штатными наблюдателями ESO в середине 2006го года. Мы использовали режим высокого спектрального разрешения "HR-blue" с масштабом 0.67" на линзу и полем зрения инструмента $27'' \times 27''$ (40×40 lenses). Этот режим дает спектральное разрешение порядка $R \sim 2500$ в диапазоне 4200–6300 Å. Мы использовали 11 из 12 полученных экспозиций, пространственно смещенных друг относительно друга для устранения эффектов обломанных световодов, продолжительность каждой из которых составила 2000 sec. Качество изображения составляло от 0.7 до 1.2". Калибровки по длинам волн и плоские поля были получены для каждого наблюдательного блока (OB) в процессе наблюдений.

Для обработки данных мы использовали универсальную систему обработки IFUданных, реализованную в среде ITT IDL. Краткое описание шагов редукции приведено в работе Chilingarian et al. (2007d). Детальное описание, включая специфические аспекты, касающиеся VIMOS, будут представлены в отдельной статье. Каждый из четырех квадрантов VIMOS, обозначающийся Q1 – Q4 для каждого OB обрабатывался независимо до этапа калибровки по потокам и вычитания фона неба. Относительная калибровка квадрантов для учета относительных различий чувствительности проводилась при помощи спектров утреннего неба и требовала специального внимания из-за того, что мы использовали пространственные сдвиги между экспозициями. Абсолютная калибровка по потокам производилась с помощью наблюдений спектрофотометрических стандартов, что является частью стандартных калибровок VIMOS.

Спектры ночного неба восстанавливались из линз, находящихся дальше 5 г_e от центра галактики, чтобы избежать влияния спектра галактики. Затем они вычитались из всех OB независимо. После этого индивидуальные экспозиции складывались, применяя итеративную процедуру σ -clipping для удаления космических частиц, а также сдвигая экспозиции в пространственных и спектральном направлениях, чтобы учесть сдвиги, гелиоцентрические коррекции и дифференциальную рефракцию. Кадры ошибок обрабатывались теми же методами вплоть до этапа вычитания ночного неба.

Мы используем спектры сумеречного неба, а также экспозиции объекта с заметным влиянием лунного света (4 из 12) чтобы оценить качество обработки данных и получить количественные оценки аппаратной формы спектральных линий VIMOS и ее вариации по полю зрения и спектральному диапазону для различных ОВ. Для этого мы аппроксимировали данные солнечным спектром из библиотеки ELODIE.3.1 (Prugniel et al., 2007) в каждой линзе VIMOS-IFU в 6 интервалах в диапазоне длин волн от 4000 до 6300Å, используя метод PPXF (Cappellari & Emsellem, 2004). Проведя этот тест, мы заключаем, что (1) качество калибровки по длинам волн в диапазоне от 4000 до 5900Å оказывается лучше 5 km s⁻¹; (2) спектральное разрешение ($\sigma_{\rm inst}$) не показывает существенных вариаций по полю зрения для каждого из квадрантов и от между различными OB, хотя (3) оно изменяется вдоль диапазона длин волн (от 60 в синей до 40 km s⁻¹ в красной области) и различается для различных квадрантов; (4) моменты более высоких порядков h_3 и h_4 (van der Marel & Franx, 1993) для инструментального контура оказываются близкими к 0 за исключением синей части квадранта Q3 $\lambda < 4350$ Å, где h_3 имеет значения несколько ниже 0 из-за неидеальной фокусировки инструмента; (5) систематические ошибки дисперсионной кривой становятся очень значительными на $\lambda > 5900 \text{A}$, сильно меняются между ОВ, так что мы не используем красный конец диапазона для анализа.

4.2.2 Анализ данных

Для извлечения параметров кинематики и звездного населения из данных VIMOS мы применяли метод NBURSTS (см. Главу 1). Данные подвергались адаптивному разбиению Bopohoro (Cappellari & Copin, 2003) с минимальным отношением сигнал-шум в каждом бине 15. Мы использовали только центральную часть поля зрения VIMOS IFU размером 18×18 элементов ($12'' \times 12''$), где вычитание фона ночного неба было надежным. Мы применяли 25-й порядок мультипликативного полиномиального континуума, аппроксимировали спектр одной моделью SSP, а для кинематики использовали первые четыре момента параметризации Гаусса-Эрмита (v, σ, h_3 и h_4).

Также мы исключали из аппроксимации узкие области размером 12Å вокруг центров линий Н β , Н γ , [ОIII] ($\lambda = 4959,5007$ Å) и [NI] ($\lambda = 5199$ Å), чтобы иметь возможность детектировать слабые эмиссионные линии. Как было показано в работах Chilingarian et al. (2007d, 2008d), оказывается возможным получать надежные оценки возраста звездного населения, даже если из рассмотрения исключены бальмеровские линии. Используя подход, описанный в работе Chilingarian (2009а) мы оцениваем количество информации, чувствительной к возрасту, в исключенных областях в ~ 7%.

4.2.3 Результаты

На Рис. 4.12 представлены карты параметров кинематики и звездных населений, полученные методом NBURSTS. Области с неуверенным определением параметров (например, ошибки > 15 km s⁻¹ для v и σ), либо области, где какие-либо параметры не аппроксимировались (h_3 и h_4) замаскированы. Изофоты восстановленного изображения в континууме (т.е. куб данных, просуммированный по диапазону длин волн) показаны черными контурами. Лучевые скорости могут быть определены с адекватной точностью до больших расстояний от центра, чем дисперсии скоростей или параметры звездного населения, поскольку они не чувствительны к проблемам вычитания фона неба.



Рис. 4.12: Двумерные карты звездной кинематики, SSP-эквивалентных возрастов и металличностей для SDSS J230743.41+152558.4 по данным VIMOS IFU. Черные контуры показывают изофоты восстановленного изображения, полученного путем суммирования спектрального куба вдоль оси длин волн.

Кинематика и динамика

Галактика SDSS J230743.41+152558.4 показывает очень регулярное, симметричное, чисто дисковое вращение с полу-амплитудой 90 km s⁻¹ без каких-либо следов поворота изовел. Однако, наблюдается значительное смещение между кинематической и фотометрической осями. На изображениях SDSS виден бар, ориентированный точно вдоль малой оси галактик (примерно с севера на юг), который также заметно на восстановленных изображениях. Кривая вращения становится плоской на расстоянии ~ 4" от центра, что соответствует ~ 6 kpc или $\sim 3.5 r_e$ (Buyle et al., 2006) (см. Рис. 4.13). Дисперсия скоростей падает от центральных максимальных значений около $\sim 110 \text{ km s}^{-1}$ до $40 - 50 \text{ km s}^{-1}$ на 6". Высокое значение v/σ во внешних областях галактики также является аргументом в пользу присутствия диска. Необходимо соблюдать осторожность при интерпретации центральных значений дисперсии скоростей, поскольку быстро-вращающийся центральный компонент, размазанный атмосферным качеством изображения, может приводить к подобным эффектам. Таким образом, принимая во внимание все наблюдательные проявления, SDSS J230743.41+152558.4 наилучшим образом морфологически классифицируется как линзовидная галактика с баром SB0. Этот факт не столь удивителен, поскольку хоть и наблюдается большое разнообразие, большинство галактик E+A имеют S0-морфологию (Yang et al., 2008).

Мы используем метод, похожий на предложенный в работе van Moorsel & Wells (1985) для определения наклона диска галактики к лучу зрения *i* и позиционного угла большой оси РА из поля лучевых скоростей звезд (с основной разницей, заключающейся в



Рис. 4.13: Лучевая скорость v и дисперсия скоростей σ вдоль двух разрезов SDSS J230743.41+152558.4 по большой и малой кинематическим осям. Профиль скорости становится плоским в районе ~ 5", в то время как дисперсия скоростей уменьшается до $\sigma \sim 50 \text{ km s}^{-1}$.



Рис. 4.14: Вид фундаментальной плоскости в *к*-пространстве. Положение SDSS J230743.41+152558.4 показано красным кружком. См. текст для описания источников данных. Конец красного вектора показывает положение SDSS J230743.41+152558.4 после 900 Муг пассивной эволюции, а зеленый вектор показывает сдвиг галактики при учете энергии вращения.



Рис. 4.15: Распределение интенсивности эмиссионной линии [ОШ] в центральной области SDSS J230743.41+152558.4 (слева) и интегральный спектр в центральных 2" (справа).

том, что мы используем непараметрическое представление кривой вращения). Аппроксимируя поле скоростей в эллиптических кольцах в диапазоне радиусов 0.7 < r < 6'' дает значения PA= 131 deg и i = 30 deg. Эти значения хорошо согласуются с формой и отношением осей внешней изофоты, изображенной на Puc. 4.12. Пик скорости в проекции $v \approx 90$ km s⁻¹ = $v_{\phi} \sin i$ после коррекции за наклон принимает значение $v_{\phi} \approx 180$ km s⁻¹ для средней тангенциальной скорости. Мы используем значени экспоненциальной шкалы профиля плотности $h_R = 0.8''$ из обзора SDSS. Используя эти значения, мы оцениваем круговую скорость $v_{\rm circ}$ на радиусе 4'', исправленную за асимметричный дрифт, используя метод, описанный в параграфе 4.8.2(a) Binney & Tremaine (1987). Для внешних частей галактики мы предполагаем плоскую форму кривой вращения ($\sigma_{\phi} \approx \sigma_R/\sqrt{2}$) и дисперсии скоростей, не зависящие от радиуса. Таким образом мы приходим к следующему выражению для круговой скорости:

$$v_{\rm circ}(4'') \approx \sqrt{v_{\phi}^2 + \sigma_{\phi}^2 \left(2\frac{4''}{h_R} - 1\right)}.$$
 (4.13)

Здесь σ_{ϕ} – тангенциальная дисперсия скоростей. К сожалению, вдоль большой оси σ является функцией одновременно σ_{ϕ} и σ_z – вертикального компонента тензора дисперсии скоростей. В предположении тонкого диска $\sigma_z \ll \sigma_{\phi}$ и $\sigma_{\phi} \approx \sigma/\sin i \sim 80 \text{ km s}^{-1}$. В случае изотропного тензора дисперсий скоростей $\sigma_{\phi} = \sigma_z \approx \sigma \sim 40 \text{ km s}^{-1}$. Для первого случая мы получаем $v_{\rm circ} \sim 300 \text{ km s}^{-1}$; для второго – $v_{\rm circ} \sim 220 \text{ km s}^{-1}$. Ширина профиля скорости (W20) по наблюдениям галактики в линии HI (21 cm) составляет 286 ± 43 km s⁻¹. Это соответствует круговой скорости $v_{\rm circ} \approx 143/\sin i \text{ km s}^{-1} \sim 286 \text{ km s}^{-1}$ (Buyle et al., в работе), что оказывается между двумя крайними значениями, привееденными выше. Поэтому мы принимаем это значение как наиболее вероятную оценку. Используя эти значения, мы можем оценить глобальную динамическую массу в пределах радиуса 5 kpc около $\sim 10^{11} \text{ M}_{\odot}$.

С абсолютной звездной величиной $M_B = -20.5 \text{ mag}$ (Buyle et al., в работе), логарифмом пика круговой скорости $\log(v_{\text{circ}}) = 2.48$ и логарифмом центральной дисперсии скоростей $\log(\sigma_0) = 2.04$, SDSS J230743.41+152558.4 лежит точно на соотношении Tully-Fisher (1977) для эллиптических и линзовидных галактик (Bedregal et al., 2006; De Rijcke et al., 2007). Она слегка отстоит от отношения Faber-Jackson (Faber & Jackson, 1976; Gerhard et al., 2001; De Rijcke et al., 2005), будучи на ~ 1 mag ярче в фильтре *B*, чем ожидается для этой дисперсии скоростей. На Рис. 4.14 представлена фундаментальная плоскость (Djorgovski & Davis, 1987) в κ -пространстве (Bender et al., 1992). На диаграмме κ_2 vs. κ_1 (вид "face-on") видны отдельные области, занимаемые карликовыми (van Zee et al., 2004b; Geha et al., 2003; De Rijcke et al., 2005; Chilingarian et al., 2008d), промежуточными и гигантскими галактиками ранних типов (Bender et al., 1992). Регион гигантских галактик имеет продолжение влево-вверх с область балджей низкой светимости и компактных эллиптических галактик, где M59cO является самым экстремальным случаем (Chilingarian & Mamon, 2008). Галактика SDSS J230743.41+152558.4, показанная красным кружком, попадает в область, занимаемую балджами низкой светимости и эллиптическими галактиками промежуточной светимости, имеющими высокие поверхностные яркости. Поскольку фундаментальная плоскость определена для галактик, которые являются вириализованными системами, мы должны учитывать энергию вращения в общем энергетическом балансе в первом приближении как $\sigma^2 + v_r^2/2$. Это перемещает SDSS J230743.41+152558.4 в положение, отмеченное концом зеленой стрелки в сторону более ярких E/S0 галактик.

Звездное население и активность ядра

На картах звездного населения мы четко видим ядро на пределе разрешения, имеющее форму и размер, соответствующие центральному максимуму σ . Центр галактики имеет металличность существенно выше солнечной до +0.25 dex. SSP-эквивалентный возраст в центральной части составляет 650 Муг, увеличиваясь примерно до 3 Gyr на расстоянии 3". Область poststarburst, где находится очень молодое звездное население, имеет размер около 2 arcsec (2.5 kpc). В работе Yagi & Goto (2006) представлены наблюдения SDSS J230743.41+152558.4 с длинной щелью, и авторы утверждают, что области с большой эквивалентной шириной Н δ продолжаются до 2.5 arcsec от центра. Данные VIMOS подтверждают существование протяженной области с молодым звездным населением, хотя градиент возраста довольно значительный. Для сравнения со спектром этой галактики из обзора SDSS DR6 (Adelman-McCarthy et al., 2008) мы интегрируем спектр VIMOS в круглой апертуре размером 3" и применяем метод NBURSTS к обоим спектрам. Мы видим идеальное согласие – все параметры звездного населения и кинематики, за исключением h_4 совпадают в пределах области в пределах вибок.

Мы аппроксимируем ярчайшую эмиссионную линию ([OIII] $\lambda = 5007$ Å) Гауссианой, чтобы определить ее амплитуду (см. Рис. 4.15а). К сожалению, провести точные измерения лучевой скорости невозможно из-за слишком низкого потока в линии. Распределение излучения в линии [OIII] очень сильно сконцентрированно к центру, что является аргументом в пользу наличия центральной пространственно неразрешенной области. Внимательное исследование невязок аппроксимации в центральной области (Рис. 4.15b) показывает на пределе обнаружения эмиссии в линии [NI] ($\lambda = 5199$ Å), типичному признаку LINER или AGN. Поэтому мы связываем центральный пик в распределении [OIII] с возможной активностью ядра. Аппроксимация спектра SDSS DR6 в полном диапазоне длин волн моделей PEGASE.HR (3900 < λ < 6800 Å) и анализ невязок обнаруживает довольно сильные эмиссионные линии Н α и [NII] ($\lambda = 6548, 6584$ Å). Высокие значения log([NII₆₅₈₄]/H α) = 0.13 и log([OIII₅₀₀₇]/H β) = 0.46 поддерживают интерпретацию LINER (Baldwin et al., 1981; Kewley et al., 2006). Таким образом, SDSS J230743.41+152558.4 становится второй хорошо изученной роststarburst галактикой, где обнаружена слабая активность в ядре (Liu et al., 2007). Как предположено в работе Kaviraj et al. (2007), отклик на AGN может играть критическую роль в остановке звездообразования в массивных poststarbust-галактиках путем выметания газа. В работе Buyle et al. (2008) показано, что основная часть газа HI в двойной poststarburst-галактике EA01A/B находится *outside* звездных компонент галактик, указывая на то, что процесс отклика должен быть достаточно сильным, чтобы физически переместить большие количества газа, и отклик на AGN подходит на эту роль (Silk & Rees, 1998; Schawinski et al., 2009). В то же время, слабые линии H β и [OIII] ($\lambda = 4959/5007$ Å) обнаруживаются везде по диску галактики до 3" от центра, что может указывать на слабое текущее звездообразование в довольно протяженной области в галактике.

4.2.4 Эволюция в прошлом и будущем

Расстояние до SDSS J230743.41+152558.4 соответствует времени путешествия фотона ~ 900 Муг. Мы оцениваем светимость галактики в фильтре B, используя модели PEGASE.2 (Fioc & Rocca-Volmerange, 1997). Если мы предположим, что SDSS J230743.41+152558.4 будет пассивно эволюционировать в течение этого периода, она ослабеет максимум на 1 mag, если все ее звезды были сформированы 700 Муг назад. В более вероятном случае композитного звездного населения эффекты на интегральную величину B будут меньше, поскольку старое население эволюционирует медленнее, чем молодое, которое имеет низкую долю по массе. После этого SDSS J230743.41+152558.4 станет похожей на современные E/S0 галактики в ее положении на соотношениях Faber-Jackson, Kormendy (Kormendy, 1977), и фундаментальной плоскости (см. красный вектор на Puc. 4.14). Внутренние 4″ или $3r_e$ содержат около 75 % света, что соответствует отношению масса-светимость $M/L_B \sim 4$ в солнечных единицах. После 700 Муг пассивной эволюции это значение увеличится до $M/L_B \sim 10$ максимум. Это будет соответствовать современным близким галактикам ранних типов (Gerhard et al., 2001).

Галактика SDSS J230743.41+152558.4 окажется быстровращающейся (fast rotator), если к ней применить новую классификацию, описанную в работе (Emsellem et al., 2007). Однако, несмотря на правильную морфологию, присутствие доминирующего крупного динамически холодного диска не позволяет классифицировать этот объект как типичную галактику раннего типа. Слияния и взаимодействия могут приводить к сильным, резко прекращающимся эпизодам звездообразования, как было показано статистически, используя численное моделирование, в работе Di Matteo et al. (2007), что будет приводить к явлению E+A. Такие процессы разогревают, а иногда полностью разрушают диски, не давая возможности объяснить наблюдаемое поле скоростей SDSS J230743.41+152558.4. С другой стороны, малое слияние крупной S0 галактики с большим диском или спиральной галактики раннего типа с богатым газом спутником средней массы может оказаться разумным объяснением: молодые звезды будут активно формироваться в диске из полученного газа, имеющего среднюю металличность, а ядерная вспышка звездообразования будет использовать высокометалличный газ, часто присутствующий в центральных областях галактик ранних типов.

Принимая во внимание присутствие нейтрального газа в SDSS J230743.41+152558.4 (Buyle et al., 2006), остановка звездообразования может быть временной фазой. Например, газовая компонента могла быть рассеяна сверхновыми или откликом на AGN и может вновь осесть на галактику через несколько сот миллионов лет, возможно вызвав новую

Морфологический тип (NED ¹)	SB(r)0/a:
V_r (HYPERLEDA ²)	885 км/с
Paccтояние (Gregory & Thompson, 1977)	13 Мпк
$D_{25} \ ({\rm RC3^3})$	2.9 минут дуги
R_{25}	5.5 кпк
B_T^0 (RC3)	12.01
$(B-V)_T^0 $ (RC3)	0.86
$(U-B)_T^0 \; (RC3)$	0.44
M_B (HYPERLEDA)	-18.74
$V_{max}({ m HI}),~{ m \kappam/c}$	$94/\sin i$
Inclination (HYPERLEDA)	56°
PA_{phot} (HYPERLEDA)	146°

Таблица 4.11: Глобальные параметры NGC 4245

¹NASA/IPAC Extragalactic Database

 2 Lyon-Meudon Extragalactic Database

³Third Reference Catalogue of Bright Galaxies

вспышку звездообразования. Если бы этот объект наблюдался нами в момент эпизода звездообразования, мы вероятно классифицировали бы его как спиральную галактику позднего типа с баром (SBcd).

Глубокие радио-наблюдения в линии НІ позволили обнаружить излучение в линии 21 cm примерно для 60 % всех наблюдавшихся poststarburst-галактик (Buyle et al., 2006). Некоторые из них оказались настолько же богаты газом, как LIRGs и результаты слияний, возможные прародители poststarburst-галактик в локальной Вселенной (Kaviraj et al., 2007). Присутствие большого количества газа указывает на то, что многие poststarburstгалактики могут в реальности наблюдаться в короткой фазе эволюции – временном периоде без заметного звездообразования. Таким образом, эволюция галактики на диаграмме цвет-величина от голубого облака до красной последовательности может включать несколько циклов в обоих направлениях, прежде чем галактика в результате осядет на красную последовательность.

4.3 История звездообразования в галактике NGC 4245

Результаты, представленные в данном разделе, опубликованы в работе Sil'Chenko et al. (2009).

Небольшая дисковая галактика раннего типа NGC 4245 (основные характеристики галактики см. в Таб. 4.11) – богатый объект для изучения последствий воздействия разнообразных механизмов вековой эволюции: у нее есть протяженный контрастный ("сильный") бар, и она находится в плотной части близкой группы галактик – Coma I Cloud. От центра группы (NGC 4278) NGC 4245 отделяет около 100 кпк, а еще ближе, в 59 кпк, находится гигантская спиральная галактика NGC 4274. Вообще, группа довольно большая, содержит около двух десятков галактик до абсолютной звездной величины -16^m ,

и большинство этих галактик – спиральные (Gregory & Thompson, 1977). Интересно, что спиральные галактики группы Coma I Cloud, располагающиеся в центральном полумегапарсеке, обеднены нейтральным водородом (Garcia-Barreto et al., 1994), и большая часть их газа находится в молекулярной форме (Gerin & Casoli, 1994). Например, в NGC 4245 отношение масс H₂ и H I – 4 (в среднем в дисковых галактиках это отношение существенно меньше 1). Такие особенности обычно присущи спиральным галактикам в скоплениях (например Sullivan & Johnson, 1978; Solanes et al., 2001; Kenney & Young, 1986), и привычно объясняются взаимодействием холодного газа галактик с горячим межгалактическим газом скоплений: выметание лобовым давлением горячей среды разреженного газа Н I с периферии галактических дисков может одновременно и сократить содержание нейтрального водорода, и увеличить долю молекулярного, который более плотен и собран в центральной части галактики. Интересно, что в группе Coma I Cloud, как оказалось, горячий рентгеновский газ отсутствует (Mulchaey et al., 2003), и дефицит нейтрального водорода в ее спиральных галактиках, как бы он ни был похож на аналогичный в спиральных галактиках скоплений, надо объяснять как-то иначе. Ничего, кроме гравитационных эффектов взаимодействия, тут на ум не приходит. Эти эффекты должны провоцировать также и нарушение осевой симметрии в дисках (генерацию баров), и некруговые движения газа, и центральные вспышки звездообразования. Рассмотрим историю звездообразования в центре NGC 4245 – возможно, это окажется типичная история для дисковой галактики в центре плотной группы.

4.3.1 Наблюдения

Центральная область NGC 4245 наблюдалась с Мультизрачковым волоконным спектрографом (MPFS), установленным в первичном фокусе 6-метрового телескопа САО РАН, в ночь с 18 на 19 февраля 2007 г. (описание прибора – см. Afanasiev et al., 2001). Качество изображений (пространственное разрешение), оцененное по картинке звезды-стандарта, составляло около 2.5". Использовался сине-зеленый диапазон спектра 4200–5600 Å и красный диапазон 5800–7200 Å, с обратной дисперсией 0.75 Å на пиксель (спектральное разрешение около 3 Å). Приемник – ПЗС-матрица 2048 × 2048 элементов. При наблюдениях на MPFS массив плотно упакованных квадратных микролинз (16×16) строит матрицу зрачков, которые с помощью волокон передаются на щель спектрографа. Такая конфигурация позволяет одновременно регистрировать в полном спектральном диапазоне 256 спектров, каждый из которых соответствует квадратному пространственному элементу изображения галактики размером $1.0'' \times 1.0''$. Отдельный пучок световодов "приводит" на щель излучение от пустого участка ночного неба примерно в $\approx 4'$ от объекта наблюдений; спектры ночного неба располагаются на ПЗС-приемнике между спектрами объекта, обрабатываются вместе с ними и потом, после должной нормировки, вычитаются. Для калибровки шкалы длин волн отдельно экспонируется спектр сравнения гелий-неонаргоновой лампы, для исправления за виньетирование и разное пропускание микролинз – лампа плоского поля и сумеречный спектр утреннего неба. Первичная обработка данных – вычитание электрического нуля, удаление следов космических частиц, выделение из формата матрицы одномерных спектров, линеаризация выделенных спектров, – выполняется с помощью комплекса программ в программной среде IDL, модифицированного для работы с абсорбционными спектрами объектов с низкими дисперсиями скоростей.

Наблюдения с MPFS в диапазоне 4200–5600 Å использовались для исследования кинематики звезд (лучевых скоростей и дисперсии скоростей) и анализа свойств звездных населений, проведенного двумя методами: (1) путем измерения эквивалентных ширин линий поглощения, выраженных как индексы в известной ликской системе (Worthey et al., 1994); (2) с помощью прямой аппроксимации спектров галактики модельными спектрами простых звездных населений методом NBURSTS (Chilingarian et al., 2007с). Обработанный куб данных подвергался процедуре адаптивного разбиения Вороного (Cappellari & Copin, 2003) для достижения минимального отношения сигнал-шум 20 в каждом бине, после чего каждый из полученных спектров: 1) аппроксимировался моделями звездных населений РЕGASE. НВ для определения лучевых скоростей, дисперсий скоростей, возрастов и металличностей; 2) вычислялись индексы линий поглощения $H\beta$, Mgb, Fe5270 и Fe5335. Затем из индивидуальных измерений собирались двумерные "карты" кинематики, параметров звездного населения и ликских индексов. Для индексов этих сильных линий поглощения существуют детальные расчеты в рамках моделей эволюционного синтеза старого звездного населения (например Worthey, 1994; Thomas et al., 2003), что позволяет оценивать средние параметры звездного населения сравнением наблюдаемых ликских индексов с модельными.

Для точных измерений кинематики, в особенности при низких значениях дисперсий скоростей, методом прямой аппроксимации необходимо учесть вариации спектрального разрешения MPFS по полю зрения и по спектральному диапазону. Для этого мы применяли процедуру прямой аппроксимации спектра сумеречного вечернего неба, наблюдавшегося в ту же ночь на той же аппаратуре, что и галактика, спектром Солнца (спектральный класс G2) из библиотеки спектров ELODIE, имеющим точно такое же спектральное разрешение, как модели PEGASE.HR (R = 10000). Поскольку при операциях с гауссовыми профилями складываются квадраты ширин линий, спектральное разрешение PEGASE.HR оказывается "бесконечно" большим по сравнению с разрешением MPFS (R = 1300..1800), так что полученные значения спектрального разрешения очень точно соответствуют характеристикам спектрографа.

Для анализа кинематики ионизованного газа использовались спектры в красной области 5800–7200 Å, содержащие эмиссионные линии ионизованного газа, самые сильные из которых – Н α и [N II] λ 6583. Лучевые скорости для ионизованного газа вычислялись по положениям барицентров эмиссионных линий.

Мы оцениваем точность индивидуальных измерений лучевых скоростей звезд как 5–7 км/с и точность определения эквивалентных ширин линий поглощения в центре галактики как 0.15 Å. Точность оценок лучевых скоростей ионизованного газа составляет около 10 км/с. Точность линеаризации спектров и нуль-пункт измеряемых скоростей контролировались по линиям ночного неба [O I] λ5577 и λ6300.

Галактика NGC 4245 также ранее, а именно 18 апреля 2002 г., наблюдалась на 4.2метровом телескопе Вильяма Гершеля (Ла-Пальма) со спектрографом интегрального поля SAURON. SAURON – это интернациональный проект, включающий трех соруководителей от Франции, Нидерландов и Великобритании и целый ряд европейских участников. Описание спектрографа, проекта и команды можно найти в статье Bacon et al. (2001). Принцип спектрографа основан на классической схеме Куртеса разворота мультилинзового блока на небольшой угол относительно направления дисперсии, что позволяет развести спектры на приемнике без световодов – так называемая "тигровая мода". В SAURON среднеполосный интерференционный фильтр вырезает спектральный диапазон примерно 4800-5400 Å, причем по полю зрения меняется как кривая пропускания фильтра (спектральный диапазон), так и обратная дисперсия, оцененная нами в пределах 1.11 - 1.21 Å на пиксель (спектральное разрешение – около 4 Å). Небо экспонируется одновременно с объектом: оно наблюдается всего в 1.7' от центра исследуемого объекта и передается на край того же мультилинзового блока. В ночь, когда наблюдалась NGC 4245, среднее качество изображений, которое мы оценили по десяти звездам, наблюдавшимся до и после наблюдений галактики, составляло 1.4''. Полностью обработанный куб спектральных данных для NGC 4245, приведенный к спектральному разрешению 108 км/с по всему полю зрения, был любезно предоставлен нам Хесусом Фальконом-Барросо; описание этих данных и выводы по кинематике и звездному населению, сделанные на основе расчета индексов линий поглощения и их сравнения с моделями звездного населения, содержатся в статьях команды SAURON (Falcón-Barroso et al., 2006; Peletier et al., 2007).

4.3.2 Кинематика и структура центральной части NGC 4245

На Рис. 4.16 представлены результаты панорамной спектроскопии центральной области NGC 4245 с Мультизрачковым спектрографом – карты лучевых скоростей звездного и газового компонентов, карта дисперсии скоростей звезд и распределение поверхностной интенсивности эмиссионной линии На. Мы видим в центре галактики (около)ядерное кольцо текущего звездообразования радиусом 4'' - 6'' – здесь интенсивность эмиссии Н α максимальна, а отношение интенсивностей эмиссионных линий $H\alpha$ и [N II] $\lambda 6583$ превышает двойку (Рис. 4.16г). Интенсивность эмиссии $H\alpha$ распределена вдоль кольца неравномерно, наблюдаются 2, или возможно 3, сгущения ('Н II-области'), где темп звездообразования особенно велик. Такое – не редкость в ядерных кольцах звездообразования (см., например, Böker et al., 2008). Дисперсия скоростей звезд в центре NGC 4245 везде невелика, но в самом центре она демонстрирует минимум – около 60 км/с, что можно интерпретировать как присутствие компактного динамически холодного звездного диска в самом центре (ядре) галактики. На краю поля зрения, в 8" – 10" от ядра, дисперсия скоростей звезд возрастает примерно до 85 км/с – вероятно, в этом интервале радиусов мы видим более горячий динамически звездный балдж галактики. Поля лучевых скоростей и газа, и звезд выглядят как регулярное вращение, однако при малой дисперсии скоростей звезд и неизбежно малом значении асимметричного дрейфа звезды почему-то вращаются примерно втрое медленнее, чем газ, при том, что оба компонента вращаются в одном и том же гравитационном потенциале.

NGC 4245 – галактика с крупномасштабным баром. Мы проанализировали ПЗСизображения галактики, полученные в рамках обзора SDSS. Самые внешние изофоты, на R > 50'', позволяют зафиксировать следующие параметры ориентации плоскости галактики в предположении круглой формы и малой толщины внешнего диска: угол наклона к лучу зрения $i = 40^{\circ}$ и ориентация линии узлов в картинной плоскости $PA_0 = 154^{\circ}$. На расстоянии R = 35'' от центра эллиптичность изофот достигает максимума, а их ориентация изменяется на $PA = 135^{\circ}$ – это область максимального фотометрического вклада бара. В неосесимметричном потенциале кинематическая большая ось (направление максимального градиента лучевой скорости) должна разворачиваться относительно линии узлов в сторону, противоположную развороту изофот бара (см., например, Moisseev & Mustsevoi,

2000). На Рис. 4.17 мы сравниваем ориентации кинематических больших осей полей скоростей газа и звезд с ориентацией изофот по данным SDSS и ИСЗ НST и с линией узлов глобальной плоскости галактики. В интервале расстояний от центра 1'' - 3'' (Рис. 4.17а) и на радиусах R > 10'' (Рис. 4.17б) кинематическая и фотометрическая большие оси действительно отклоняются в противоположные стороны от линии узлов - это нарушение кругового характера вращения, вызванное баром. Однако на R = 4'' - 6'', где расположено кольцо звездообразования, ориентации кинематической и фотометрической больших осей совпадают. Если бы мы анализировали только фотометрические данные, подобное поведение PA(R) в области кольца было бы однозначно интерпретировано нами как то, что кольцо звездообразования – эллиптическое в плоскости галактики: и наблюдения (Buta & Crocker, 1993), и теория (Heller & Shlosman, 1996) говорят о том, что ядерные кольца звездообразования могут быть некруглыми. Однако совпадение кинематических и фотометрической больших осей подсказывает, что может быть и другая возможная интерпретация: может быть, газовое кольцо, в котором идет звездообразование, просто наклонено к плоскости галактики и вместе с молодыми звездами вращается вполне независимо в осесимметричном потенциале балджа. В принципе, газ может выходить из плоскости диска вблизи внутренних линдбладовских резонансов бара, некоторые теоретические модели это предсказывают (например, Friedli & Benz, 1993). В рамках этой гипотезы, если газ на расстоянии 1'' - 3'' от ядра – это продолжение "вовнутрь" газового кольца, может быть, разницей ориентации плоскостей вращения можно частично объяснить видимую разницу скоростей вращения звезд балджа и газа, отмеченную выше. Правда, если плоскость вращения балджа в центре сориентирована так же, как и плоскость внешнего диска, у которого $i = 40^{\circ}$, максимальное возможное различие в проекции скоростей вращения на луч зрения из-за различия ориентации осей вращения – всего $1/\sin i = 1.56$, тогда как наблюдается фактор тройка. Тогда можно сделать предположение, что истинная форма внешнего звездного диска – существенно эллиптическая (что неудивительно, учитывая плотное окружение галактики и наличие протяженного "сильного" бара), и на самом деле галактика развернута к нам существенно более плашмя, чем при $i = 40^{\circ}$.

4.3.3 Характеристики звездного населения центральной части NGC 4245

Рис. 4.18, представляющий карты ликских индексов водорода, магния и железа, построенные по данным Мультизрачкового спектрографа для центральной области NGC 4245, с очевидностью демонстрирует присутствие химически выделенного ядра в этой галактике: и карта индекса Mgb, и карта индекса $\langle Fe \rangle \equiv (Fe5270 + Fe5335)/2$ имеют значимый, компактный пик в центре. На карте индекса Н β глубокие минимумы в 4" – 5" на северовосток и на юг от ядра зеркально отражают максимумы эмиссии Н α (Рис. 4.16г). Это означает, что абсорбционная линия Н β в значительной мере заливается эмиссией, и чтобы использовать ликский индекс Н β для оценки характеристик звездного населения, надо предварительно исправить его за эмиссию. Мы сделаем это, используя два независимых метода.

Первый метод опирается на спектральные данные для эмиссионной линии $H\alpha$. Данный метод обычно дает корректные результаты, потому что существуют физические модели для связи интенсивностей эмиссий $H\alpha$ и $H\beta$ и потому что интенсивность эмиссии $H\alpha$ всегда в несколько раз превосходит интенсивность эмиссии $H\beta$, тогда как эквивалентная ширина

линии поглощения Н β всегда порядка или даже больше эквивалентной ширины линии поглощения Н α . Самое маленькое отношение эмиссий Н α /Н β , 2.5–2.7 (Burgess, 1958), получается в случае возбуждения (ионизации) водорода ультрафиолетовым излучением молодых массивных звезд (возбуждение 'типа Н П-области'). В активных ядрах и ударных фронтах это отношение еще больше; увеличивается оно также и в случае заметного присутствия пыли в излучающей области. Наблюдательная статистика, включающая спектры спиральных галактик с самым разным типом возбуждения, дает среднее соотношение $EW(H\beta_{\rm emis}) = 0.25 EW(H\alpha_{\rm emis})$ (Stasińska & Sodré, 2001). Поэтому, исправляя индекс Н β за эмиссию в центральной области NGC 4245, мы примем $EW(H\beta_{\rm emis}) = 0.25 EW(H\alpha_{\rm emis})$ в кольце звездообразования (R = 4'' - 6''). На расстоянии 7'' от ядра эмиссионные линии в спектре NGC 4245 практически пропадают, поэтому в балдже, R = 7'' - 9'', ликский индекс Н β за эмиссию мы не поправляем.

Второй метод заключается в использовании результатов аппроксимации звездного населения модельными спектрами. Поскольку спектр галактики повсюду содержит неразрешенные бленды абсорбционных линий, информация как о возрасте, так и о металличности звездного населения содержится в каждом пикселе спектра, хотя в окрестностях сильных линий концентрация этой информации в несколько раз больше, чем в среднем по спектру (в районах сильных линий металлов – для металличности, в областях бальмеровских линий – для возраста). Использование прямой аппроксимации спектров, когда для оценки параметров используется каждый пиксель, позволяет "вырезать" узкие области, залитые эмиссионными линиями, без значительного ущерба для качества определения параметров. Мы показали (Chilingarian et al., 2008d), что исключение линии $H\beta$ из процедуры аппроксимации не вызывает смещения оценок возрастов. Таким образом, для расчета ликского индекса $H\beta$ мы можем восстановить значения потоков в центральной части абсорбции, используя значения из модельных спектров звездных населений. При этом, разумеется, значение индекса может смещаться в сторону модельных значений, но, поскольку (а) подменяется не весь диапазон, используемый в определении индекса; (б) области псевдоконтинуума остаются без изменений, методу можно доверять.

Оба метода коррекции дают отличное согласие в области R = 1'' - 3''. В ядре галактики и в кольце звездообразования второй метод дает оценки индекса ниже, чем первый, что мы можем интерпретировать как наличие повышенного поглощения пылью внутри галактики, так что отношение $H\alpha/H\beta$ оказывается выше. В балдже, напротив, коррекция с использованием модельных спектров звездного населения дает значения выше, чем метод с использованием $H\alpha$, что может быть следствием остаточных эмиссий в $H\beta$, которые невозможно обнаружить без вычитания модельного спектра звездного населения.

На Рис. 4.19 приведены диагностические диаграммы, позволяющие путем сопоставления одного ликского индекса с другим (или комбинацией других) определить средние металличность, возраст и отношение содержания магния к содержанию железа для звездного населения. Индекс Нβ здесь уже исправлен за эмиссию и характеризует интегральный спектр чисто звездного компонента. Мы сравниваем наши измерения для NGC 4245 с синтетическими эволюционными моделями "простых звездных населений" Thomas et al. (2003). "Простые" – это значит, что каждая модель представляет собой совокупность звезд одного возраста и химического состава; сравнивая интегральные спектры реальных, возможно, неоднородных звездных систем с этими моделями, мы определяем средние (взвешенные со светимостью звезд) параметры звездного населения. Thomas et al. (2003) полеза; на Рис. 4.19 изображены модельные последовательности равного возраста для двух значений [Mg/Fe], 0.0 и +0.3. Мы видим, в частности, что сопоставляя индекс H β с комбинированным индексом металлов $[MgFe] \equiv (Mgb(Fe))^{1/2}$, мы избавляемся от зависимости оценок возраста от принятого отношения содержания магния к содержанию железа. Сравнение для NGC 4245 данных по ликским индексам, осредненных в кольцах со скользящим радиусом, с моделями Thomas et al. (2003) на Рис. 4.19а показывает, что в ядре металличность звезд очень высокая, в 3–5 раз выше солнечной, а возраст звезд – средний, 2–4 млрд. лет. Кольцо радиусом R = 4'' - 5'', где и сейчас идет звездообразование, характеризуется средним возрастом звезд около 1-2 млрд. лет; это должно свидетельствовать о том, что звездообразование идет уже давно, как минимум несколько сотен миллионов лет, или же вспыхивало в этом месте балджа неоднократно. При выходе за внешнюю границу кольца звездообразования мы, очевидно, попадаем в область балджа: средняя металличность звезд там ниже солнечной, а средний возраст – больше 8–12 млрд. лет. По графику Рис. 4.196, зная средний возраст звездного населения, мы можем оценить отношение содержаний магния и железа, являющееся индикатором длительности основного звездообразования. И в ядре, и в кольце, и в балдже это отношение не превышает $|Mg/Fe| \approx +0.1$. Такое отношение, близкое к солнечному, опять же говорит о том, что звездообразование в центре NGC 4245 продолжалось в течение по крайней мере двух миллиардов лет; в кольце оно идет и сейчас.

Важный момент, касающийся методики расчета ликских индексов, связан с приведением измеренных (инструментальных) значений в ликскую систему, использовавшуюся для построения моделей звездного населения. Ряд авторов, например Kuntschner (2004); Peletier et al. (2007) считают, что перед расчетом индексов необходимо искусственно ухудшить спектральное разрешение данных до ликских значений, учитывая также внутреннюю дисперсию скоростей звезд в галактике как физическое явление, естественным образом ухудшающее спектральное разрешение (увеличивающее ширину линий поглощения). Другой подход (например, Sil'chenko, 2006) заключается в чисто эмпирическом преобразовании инструментальных индексов в ликскую систему, основанном на наблюдениях звезд из ликской библиотеки спектров с тем же инструментом и в том же режиме, в каком наблюдались и галактики. В то время, как значение индекса $H\beta$ не сильно подвержено эффектам спектрального разрешения, значения индексов Mgb и $\langle Fe \rangle$, рассчитанные при применении этих двух подходов, различаются почти на 0.4 Å, так что металличность, получаемая путем инверсии диагностических диаграмм, отличается почти на 0.3 dex (бо́льшая металличность соответствует второму методу преобразования индексов).

Сравнение металличностей, соответствующих ликским индексам, рассчитанных двумя методами, со значениями, полученными независимо методом прямой аппроксимации, выявляет хорошее согласие результатов прямой аппроксимации с эмпирическим (вторым) методом, применяемым нами (разница значений металличности составляет всего около 0.05 dex).

Данные спектроскопии интегрального поля, полученные для NGC 4245 командой SAURON на 4.2-метровом телескопе Вильяма Гершеля, тоже были проанализированы нами на предмет оценки параметров звездного населения. К сожалению, использование ликских индексов, рассчитанных по данным SAURON, должно быть ограничено в основном качественным рассмотрением: из-за слишком узкого спектрального диапазона, 4800– 5350 Å, стандартные ликские полосы для измерения континуума, с голубой стороны для $H\beta$ и с красной стороны для Fe5270, попадают на завал пропускания аппаратуры, и изза этого и из-за того, что галактика имеет заметное красное смещение по отношению к ликским звездам-стандартам, оценки $H\beta$ и Fe5270 в галактике получаются систематически смещенными. На Рис. 4.20 мы сравниваем радиальные изменения ликских индексов, осредненных в кольцах, по данным MPFS и по данным SAURON. Если измерения индекса Mgb, находящегося в середине диапазона наблюдений SAURON, совпадают неплохо, то оценки Н β по данным SAURON завышены на 0.3–0.5 Å, а оценки Fe5270 – наоборот, занижены, тоже примерно на 0.5 Å. Аналогичные систематические сдвиги измерений Н β и Fe5270 по данным SAURON были обнаружены нами ранее при исследовании галактики NGC 3384 (Sil'chenko et al., 2003), наблюдавшейся с SAURON в марте 2000 г. Очевидно, это устойчивая особенность данных, полученных с этой аппаратурой, и количественные данные для ликских индексов, рассчитываемых по спектрам SAURON, неизбежно систематически сдвинуты. Однако качественно форма радиальных профилей $H\beta$ и Fe5270 по данным MPFS и по данным SAURON хорошо согласуется, и анализ морфологии поверхностного распределения ликских индексов логично проводить и по данным SAURON.

Чтобы получить из данных SAURON количественные оценки параметров звездного населения, мы применили к обработанному командой SAURON кубу данных, как и к данным MPFS, поканальную прямую подгонку спектров с одновременным варьированием возраста, металличности и кинематических параметров звездного компонента методом NBURSTS. Поскольку этот метод опирается на библиотеку наблюдаемых спектров ярких (в основном, близких к Солнцу) звезд ELODIE, подразумевается солнечное отношение магния к железу, что в случае NGC 4245 соответствует реальной ситуации. На Рис. 4.21 представлены карты металличности, возраста и дисперсии скоростей звезд, полученные нами по кубу данных SAURON этим методом. Качественно результаты полностью согласуются с теми, что были получены по данным MPFS с применением ликских индексов: мы видим компактное, химически выделенное ядро, молодое кольцо с радиусом 4'' - 5'' и минимум дисперсии скоростей звезд в ядре. Количественно же оценки получились немного другие, чем по данным MPFS: в ядре металличность [m/H] = +0.2 и средний возраст звезд 6.5 млрд. лет, в кольце средний возраст звезд 4 млрд. лет (в отдельных конденсациях 2 млрд. лет), а в балдже (R = 7'' - 9'') металличность [m/H] = -0.2 и средний возраст звезд 8 млрд. лет. Интересно, что в отличие от ликских индексов, метод поканальной подгонки спектров не показал увеличения средней металличности звезд в кольце звездообразования. Это может быть только в том случае, если звездообразование в кольце началось совсем недавно. Таким образом, продолжительность звездообразования в кольце пока однозначно оценить не удается.

Стоит отметить, что модели Thomas et al. (2003) опираются на ликскую библиотеку звездных спектров. В то же время библиотека ELODIE.3, на которой основаны модели PEGASE.HR, имеет намного более полное покрытие пространства физических параметров (эффективная температура, сила тяжести на поверхности), особенно для звезд с низкими и высокими металличностями. В связи с этим абсолютным оценкам возраста для молодых и средневозрастных (до 3 млрд. лет) звездных населений по моделям PEGASE.HR следует больше доверять, чем оценкам из моделей Thomas et al. (2003). Этот вывод применим в основном к внутреннему кольцу молодых звезд, поскольку средняя металличность звездного населения там довольно высока.

4.3.4 Обсуждение результатов

(Около)ядерные кольца звездообразования традиционно связывают с внутренними линдбладовскими резонансами бара, вращающегося в диске галактике. Обширная статистика метрических размеров колец, собранная в статье Бута и Крокер (1993), позволила им установить эту связь эмпирически. Позже динамическое моделирование отклика газа диска галактики на вращающийся бар позволило подтвердить физическую обоснованность такой связи и обрисовать некоторые морфологические и эволюционные детали колец звездообразования (см., например, Heller & Shlosman, 1996). В объекте нашего исследования, NGC 4245, околоядерное кольцо звездообразования демонстрирует все классические признаки. На Рис. 4.22 мы определяем положение внутренних линдбладовских резонансов, связанных с крупномасштабным баром NGC 4245. При этом мы используем кривую вращения звездного компонента, построенную разрезом вдоль большой оси по полю скоростей SAURON и аппроксимированную полиномом 4-й степени, а также значение скорости вращения "узора", то есть бара, определенное кинематически (Treuthardt et al., 2007) по видимому распределению лучевых скоростей звезд методом Tremaine & Weinberg (1984), 75.5 ± 31.1 км/с/кпк. Мы видим, что при заданной скорости узора, с учетом его неопределенности, бар может иметь два внутренних линдбладовских резонанса – их положения примерно $R_{\rm iilr} = 4.8''$ и $R_{\rm oilr} = 5.8''$, причем точность заданной скорости узора такова, что эти положения можно сдвинуть: внутренний внутренний до $R_{\rm iilr} = 2''$, а внешний внутренний до $R_{\rm oilr} = 9''$. Кольцо звездообразования, таким образом, попадает как раз между двумя внутренними линдбладовскими резонансами, как и предсказывает теория (см., например, Heller & Shlosman (1996)).

На Рис. 4.23 мы приводим полную карту распределения цвета галактики NGC 4245 g' - i', которую мы рассчитали по данным SDSS; цвета приведены в абсолютную шкалу со стандартной техникой вынесения за атмосферу, коррекция за поглощение внутри Галактики не проводилась (в любом случае, она составляет не более 0.03 зв. вел). Для исключения возникновения артефактов, перед построением карты цвета изображения были приведены к пространственному разрешению 1.8". Для точного определения цвета во внешних частях галактики мы провели адаптивное разбиение Вороного (Cappellari & Copin, 2003) для минимального отношения сигнал/шум 80 в фильтре g'.

И здесь крупномасштабный бар галактики демонстрирует классические признаки, предсказываемые динамическими моделями: по кромкам бара вдоль всей его длины тянутся прямые тонкие красные (пылевые) полосы, которые очерчивают положение ударных фронтов, где газ (связанный с пылью) "скучивается" из-за поворота орбит в триаксиальном потенциале (см., например, Athanassoula, 1992). Пылевые фронты кончаются на околоядерном кольце звездообразования, которое на карте цвета выделяется своей голубизной. В кольце видны три конденсации особо синего цвета, положение которых совпадает с положением конденсаций эмиссии Н α (Рис. 4.16г), – очевидно, это места самого интенсивного современного звездообразования. Две из этих трех конденсаций находятся как раз в местах встречи пылевых фронтов с кольцом. Такая картина, уже отмечавшаяся в галактиках с барами (см., например, Böker et al., 2008), интерпретируется теоретиками как свидетельство стекания газа из внешних областей диска галактики строго вдоль кромок бара в кольцо; в местах встречи радиальных газовых потоков с кольцом ударная волна особенно сильна, и именно здесь стимулируется локальная вспышка звездообразования, которая дифференциальным вращением затем "размазывается" в кольцо. По теории, глубже внутреннего внутреннего линдбладовского резонанса газ стекать не должен, и это – давно сформулированная проблема для питания активных ядер галактик: как "стряхнуть" газ с радиуса порядка килопарсека на радиус порядка парсека. Для решения этой проблемы теоретики предлагали три варианта динамических механизмов (Combes, 2001): возмущения газового диска с модой m = 2 (бар, либо двухрукавная спираль), возмущения газового диска с модой m = 1 (асимметричные смещения центра вращения, либо однорукавная спираль), возмущения газового диска внешним приливным воздействием. Последний механизм уже не первое десятилетие тщетно пытаются подтвердить наблюдательной статистикой совпадения присутствия активного ядра и наличия возмущающего "соседа". Теоретики осваивают в основном первый класс механизмов: известны модели питания активного ядра (Shlosman et al., 1989) для компактных вложенных "вторичных" баров и модели ядерных спиралей в газовом диске (Maciejewski, 2004a,b).

Результаты нашего исследования центральной области NGC 4245 показывают, что по крайней мере когда-то газ в своем натекании вдоль бара преодолевал внутренний линдбладовский резонанс: ядро в пределах радиуса 1'' - 2'' является химически выделенным, и средний возраст звезд в ядре меньше, чем в среднем в балдже. Это означает, что несколько миллиардов лет назад в ядре была вторичная вспышка звездообразования, а для этого туда нужно было доставить газ. Его остатки сейчас наблюдаются нами и командой SAURON в центре галактики в эмиссионных линиях $H\alpha$, [N II] $\lambda 6583$ и [O III] $\lambda 5007$. Однако любопытно, но и эта вспышка звездообразования похоже была не "ядерной", а "кольцевой". Наблюдения на ИСЗ HST показали, что в пределах радиуса 0.25" от центра (недостижимое для MPFS и SAURON пространственное разрешение!) эмиссии полностью отсутствуют, а звездное население старше 10 млрд. лет, с возможным присутствием не более 1% более молодого звездного населения (Sarzi et al., 2005; Shields et al., 2007). То есть та вспышка звездообразования, которая породила найденное нами химически выделенное звездное "ядро", происходила на самом деле за пределами радиуса 0.25" (12-15 пк); до самого центра газ не доходил очевидно никогда за время жизни галактики. Это позволяет предположить, что когда-то в центре NGC 4245 мог существовать компактный "ядерный" (вторичный) бар с внутренним линдбладовским резонансом в районе R = 0.5'' - 1''. "Реликтовым" признаком существования такого бара в прошлом является сильный поворот фотометрической большой оси в интервале радиусов R = 1'' - 3'' до $PA \approx 300^\circ - 310^\circ$, хотя низкая эллиптичность изофот и мешает нам признать в этом месте присутствие современного ядерного минибара. Он был когда-то, но позднее "рассосался", оставив после себя только "линзу", и околоядерное кольцо звездообразования "переехало" с R = 0.5'' - 1''на современное положение R = 4'' - 5''. Динамические модели пока воссоздают вторичные бары только в транзиентном режиме, что не противоречит этой нашей гипотезе. Наблюдающийся сейчас остаток от прежнего кольца звездообразования, химически выделенное "ядро", можно отнести, наверно, к классу так называемых ультракомпактных ядерных колец звездообразования, с радиусом меньше 150 пк, которые только недавно стали открывать в галактиках с барами и овальными линзами и которых известно на сегодняшний день всего несколько штук (Comerón et al., 2008).


Рис. 4.16: Три кинематические карты для NGC 4245 и распределение ионизованного газа: cneea – верхняя и нижняя карты представляет изовелы поля лучевых скоростей звезд и ионизованного газа, обе на фоне интенсивности континуума, данного разными оттенками серого, изовелы помечены значениями лучевой скорости в км/с; cnpaea – вверху (в) дисперсия скоростей звезд, км/с, внизу (г) интенсивность эмиссионной линии H α , и то, и другое представлено разными оттенками серого; наложенные на карты изолинии характеризуют распределение яркости в континууме.



Рис. 4.17: Вверху – сравнение ориентаций фотометрических и кинематических больших осей для центральной области исследуемой галактики; горизонтальный пунктир – ориентация линии узлов плоскости симметрии, оцененная по внешним изофотам, принадлежащим глобальному звездному диску галактики; внизу – эллиптичность изофот по изображениям с HST и обзора SDSS



Рис. 4.18: Карты ликских индексов, в Å, полученные для центральной области NGC 4245 со спектрографом MPFS 6-метрового телескопа САО РАН: первый ряд – индекс Н β , неисправленный (слева) и исправленный (справа) за вклад эмиссии вторым методом, обсуждаемым в статье; второй ряд – индексы Mgb и $\langle Fe \rangle$; изофотами наложено распределение яркости в континууме.



Рис. 4.19: Диагностические диаграммы "индекс-индекс" для азимутально-осредненных измерений ликских индексов в центральной области NGC 4245 по данным MPFS: а – комбинированный индекс линий металлов (см. текст статьи) и индекс Н β , для диагностики возраста звездного населения. b – комбинированный индекс железа (см. текст статьи) и индекс магния, для диагностики отношения обилий магния и железа звездного населения.



Рис. 4.20: Сравнение азимутально осредненных профилей ликских индексов в центральной области NGC 4245 по данным MPFS и SAURON. На данном графике приводятся первично измеренные значения индекса $H\beta$, не исправленные за эмиссию.



Рис. 4.21: Карты параметров звездного населения, полученные для центральной области NGC 4245 по данным спектрографа SAURON методом прямой подгонки спектров: слева направо – средний возраст, в млрд. лет, средняя металличность, в логарифмической шкале по отношению к Солнцу, и дисперсия скоростей звезд, в км/с (шкалки градаций серого – с правой стороны каждого рисунка).

4.4 Истории звездообразования в 7 дисковых галактиках ранних типов по данным панорамной спектроскопии

Результаты, представленные в данном разделе, опубликованы в работе Sil'chenko & Chilingarian (2010).

Практически еще на заре исследования галактик было замечено, что радиальное распределение поверхностной яркости в дисках галактик имеет универсальную форму – поверхностная яркость падает вдоль радиуса по экспоненциальному закону de Vaucouleurs (1959); Freeman (1970). Однако происхождение и природа такой универсальности до сих пор остается неясной. Общественное мнение склоняется к тому, что это свойство – первичное, то есть оно завязано на начальные условия в момент формирования галактики: газ, остывая в темном гало на временной шкале порядка одного миллиарда лет, оседает в диск с уже экспоненциальным профилем поверхностной плотности (например, Churches et al., 2001), и дальше формирующиеся звезды продолжают "отслеживать" этот закон. Однако были и теоретические работы с обоснованием альтернативной точки зрения – что экспоненциальный профиль поверхностной плотности устанавливается в звездном диске при любом начальном распределении газа, в процессе секулярной эволюции, если характерное время звездообразования порядка характерного времени вязкой радиальной перестройки газового диска (Lin & Pringle, 1987; Clarke, 1989; Slyz et al., 2002); правда, сторонников такого подхода пока было меньшинство.

Однако с повышением точности и глубины поверхностной фотометрии галактик выяснилось, что типичная форма профиля поверхностной яркости диска – вовсе не экспоненциальная, а кусочно-экспоненциальная (напр., Pohlen & Trujillo, 2006). Большинство галактических дисков демонстрирует двойную экспоненту: на каком-то радиусе профиль ломается и либо уходит в ноль с укороченным масштабом ("обрезанные" диски), либо продолжается вовне с удлиненным масштабом ("анти-обрезанные", или двухярусные дис-



Рис. 4.22: Кривая угловой скорости вращения звезд в центральной области NGC 4245 по данным SAURON и положения внутренних линдбладовских резонансов; угловая скорость вращения бара взята согласно результатам работы Трейхардта и др. (2007), штриховыми горизонтальными линиями обозначен интервал неопределенности их оценки.



Рис. 4.23: Карта цвета (g' - i') NGC 4245, посчитанная по данным SDSS. Изофотами наложено распределение поверхностной яркости в континууме в фильтре g'

ки). Чисто экспоненциальных дисков, которые сохраняют единый характерный масштаб спадания яркости на всем своем протяжении, не так много – например, среди галактик поздних типов по статистике обзора SDSS их всего 10% (Pohlen & Trujillo, 2006). Недавно Erwin et al. (2008) опубликовали статистику форм радиальных профилей поверхностной якости для дисковых галактик ранних типов с барами. Там оказалось всего около четверти всех галактик с чисто экспоненциальными профилями яркости внешних звездных дисков (18 из 66).

Именно выборку Erwin et al. (2008) мы взяли за основу, когда начали исследования с целью связать свойства звездного населения в ядрах галактик с формой профиля яркости внешнего диска. Такая постановка задачи имеет прямой выход на установление происхождения формы профиля поверхностной плотности дисков. Дело в том, что практически любая перестройка диска галактики, вызвана ли она внутренними причинами (неустойчивостями, приводящими к формированию бара) или внешними взаимодействиями (приливным воздействием соседа, поглощением спутника, обжимом холодного газового диска давлением внешнего горячего газового гало), приводит к активному стеканию газа в центр галактики, что может привести к вспышке звездообразования – в самом ядре или в околоядерной области. Когда вспышка закончится, она оставит после себя дополнительные звезды с повышенным содержанием тяжелых элементов, и в интеграле мы будем видеть в этом месте звездное население с повышенной металличностью и пониженным возрастом. Такие химически выделенные ядра мы находим в центрах галактик ранних типов уже много лет, начиная с пионерской статьи Sil'chenko et al. (1992). Если диски галактик изначально были чисто экспоненциальными, а двухярусные профили появились после радиального перераспределения вещества в результате, например, поглощения спутника ("малого мержинга"), то в центре галактики должен остаться отпечаток этого события в виде химически выделенного, относительно молодого звездного ядра. И наоборот, если диск сохранил изначально экспоненциальный профиль с момента своего рождения, то значит, он не испытал бурных перестроек, и в центре не должно быть вторичного звездного населения. Такова была логика планируемого исследования.

В данной статье представлено исследование звездного населения в центральных областях ряда галактик с чисто экспоненциальными (одномасштабными) внешними звездными дисками. В выборке Erwin et al. (2008) содержится 18 галактик с одномасштабными дисками; из них 13 имеют морфологический тип SB0–SB0/а. Линзовидные галактики уже ранее активно привлекали внимание исследователей, определяющих методом панорамной спектроскопии параметры звездного населения в ядре и балдже. В частности, в работе Sil'chenko (2006) приводятся металличности и средние возраста звезд для ядер и балджей NGC 2681, NGC 2787 и NGC 7743. Отдельно была также подробно исследована галактика NGC 4245 (Sil'Chenko et al., 2009). Теперь появилась возможность добавить к этим галактикам еще 8 объектов, панорамную спектроскопию для которых мы обнаружили в открытом архиве наблюдательных данных обсерватории Ла Пальма (Isaac Newton Group). Галактики наблюдались со спектрографом интегрального поля SAURON на 4-метровом телескопе Вильяма Гершеля – сначала в рамках проекта SAURON (de Zeeuw et al., 2002), а последние два года – в рамках проекта ATLAS^{3D}. В Таб. 4.12 собраны каталожные характеристики галактик, исследуемых в данной работе.

Имя	NGC 4267	NGC 4340	NGC 4477	NGC 4596	NGC 4643	NGC 4754	NGC 7743	IC 676
Тип (NED ¹)	SB(s)0-	SB(r)0+	SB(s)0:	SB(r)0+	SB(rs)0/a	SB(r)0-	(R)SB(s)0+	(R)SB(r)0+
$D(0), ' (RC3^2)$	3.2	3.4	3.7	3.8	3.1	4.2	3.0	2.4
B_T^0 (RC3)	11.77	12.01	11.30	11.50	11.54	11.33	12.16	12.70
M_B (LEDA ³)	-19.3	-18.9	-20.5	-20.9	-19.9	-20.2	-19.9	-18.2
$(B-V)_{T}^{0}$ (RC3)	0.91	0.91	0.94	0.92	0.93	0.90	0.84	-
V_r , κ_M/c (NED)	1009	950	1355	1870	1335	1347	1710	1453
Расстояние ⁴ , Мпк	16.8	16.8	16.8	16.8	25.7	16.8	24.4	-
Эмиссия в ядре? ⁵	нет	нет	Sy 2	Liner2::	HII/AGN2::	Sy2	HII	
Окружение (NOG ⁶)	Virgo cl.	Virgo cl.	Virgo cl.	Virgo cl.	field	Virgo cl.	field	group
Радиус бара ⁷ , ′′	26	48	37	57	62	27	37	18
Ранее?	MPFS	_	_	_	_	long-slit ⁸	$MPFS^9$	_

Таблица 4.12: Глобальные параметры исследуемых галактик

 $^1\mathrm{NASA}/\mathrm{IPAC}$ Extragalactic Database

²Third Reference Catalogue of Bright Galaxies (de Vaucouleurs et al., 1991)

³Lyon-Meudon Extragalactic Database

 $^4\mathrm{Tully}$ & Fisher (1988)

 $^5\mathrm{Ho}$ et al. (1997)

⁶Nearby Optical Galaxy sample (Giuricin et al., 2000)

⁷Erwin (2005)

⁸Fisher et al. (1996)

⁹Sil'chenko (2006)

4.4.1 SAURON: наблюдения и обработка данных

Спектрограф интегрального поля SAURON является "частным" прибором и используется для наблюдений на 4.2-метровом телескопе Вильяма Гершеля на Ла Пальме (Канарские острова) интернациональной командой исследователей, включающей в основном представителей Франции, Нидерландов и Великобритании. Подробное (хотя и без ключевых деталей) описание спектрографа можно найти в статье (Bacon et al., 2001). На приборе были осуществлены два крупных наблюдательных проекта по исследованию кинематики и звездного населения центральных областей близких галактик ранних типов: собственно проект SAURON (наблюдения 1999–2002 гг., в выборке 72 галактики) и последующий проект ATLAS-3D (наблюдения 2007–2008 гг., более 260 галактик). Результаты первого из проектов были опубликованы, и продолжают публиковаться, в серии из почти двух десятков статей. По поводу второго из проектов было заявлено, что все наблюдения прошли, но ни предварительные результаты, ни даже сама выборка галактик опубликованы до сих пор не были. Однако все сырые наблюдательные данные, согласно правилам обсерватории, через год после наблюдений появляются в открытом архиве Кембриджского астрономического центра. В Таб. 4.13 приведена сводка деталей наблюдений; некоторые галактики наблюдались в двух "позициях" – это значит, что в первой позиции ядро устанавливалось на один край поля зрения, а во второй – на противоположный. После комбинации результатов обработки наблюдений "двух позиций" получаются карты удвоенного поля зрения SAURON с ядром галактики в центре карты.

Принцип устройства спектрографа SAURON основан на схеме разворота входного линзового блока на небольшой угол относительно направления дисперсии, получившей в литературе название "тигровой моды" (Bacon et al., 1995); на том же принципе был построен и второй вариант спектрографа интегрального поля 6-метрового телескопа MPFS (1994– 1998), что облегчило нам работу с данными SAURON. Ради уплотнения расположения спектров на приемнике (ПЗС формата $4k \times 2k$), в SAURON интерференционный фильтр вырезает узкий спектральный диапазон, примерно 4800–5350 Å, причем по полю зрения меняется (с наклоном пучка) как кривая пропускания фильтра, так и обратная дисперсия: в 1999–2002 гг. она была заключена в диапазоне 1.11 - -1.21 на пиксель, в 2007 г., после смены оптики, вариации дисперсии по полю заметно уменьшились, сейчас это 1.16-1.17 Å. Рабочее поле зрения спектрографа – 44 × 38 элементов, при масштабе 0.94" на элемент (на линзу). Небо экспонируется одновременно с объектом на одном ПЗС-приемнике, на его крайних элементах, и берется оно всего в 1.7' от центра исследуемого объекта, что для больших галактик означает, что вместо неба экспонируются внешние области галактик. Данные для восьми интересующих нас галактик, наблюдавшихся в ходе обоих проектов с 2001 по 2008 год (список параметров экспозиций приведен в Таб. 4.13), мы взяли из открытого архива ING (Isaac Newton Group) Кембриджского центра астрономических данных вместе с калибровочными экспозициями (bias, спектрами сравнения, сумеречного неба и лампы накаливания). Для первичной обработки данных SAURON мы использовали комплекс программ (Vlasyuk, 1993), созданный в свое время для обработки данных MPFS и лишь немного модифицированный автором пакета с учетом особенностей конструкции SAURON; соответственно, и идеология обработки была такой же, как при работе с данными версии MPFS 1994-1998 гг., – она уже была описана ранее (Sil'Chenko, 2005). Для одной из галактик нашей выборки, NGC 4596, наблюдавшейся еще в 2002 году в рамках проекта SAURON, полностью обработанный куб данных был любезно предоставлен нам для анализа доктором Фальконом-Барросо.

Для оценки параметров звездного населения в исследуемых галактиках мы применили два независимых метода – Ликские индексы (Worthey, 1994) и прямую подгонку спектров моделями звездного населения PEGASE.HR методом NBURSTS. Измерения Ликских индексов позволили нам провести сравнение того, что дают данные SAURON, с литературными данными. При расчете карт Ликских индексов (Worthey et al., 1994) линий поглощения $H\beta$, Mgb и Fe5270 использовался оригинальный комплекс программ на FORTRAN, в качестве базового элемента которого была встроена программа Александра Ваздекиса (A. Vazdekis), рассчитывающая Ликские индексы вместе с их статистическими ошибками по индивидуальным спектрам пространственных элементов. Спектральное разрешение SAURON, 4 Å, выше стандартного Ликского, ~ 8Å, поэтому теоретически эквивалентные ширины линий поглощения должны в точности равняться вычисляемым индексам. Однако мы все же подправляли "стандартность" наших Ликских индексов по спектрам стандартных звезд из списка Worthey et al. (1994), наблюдавшихся в те же периоды времени, что и галактики. Систематические отклонения наших инструментальных индексов от стандартных Ликских значений не превышают 0.2 Å, и эти малые систематические поправки были внесены в измерения, сделанные для галактик. По спектрам стандартных звезд мы также исследовали, какие поправки должны быть внесены в измеряемые индексы, чтобы учесть уширение линий в спектрах галактик из-за дисперсии скоростей звезд. Спектр одной, выбранной в каждом сете, звезды-гиганта сворачивался с гауссианой переменной ширины, после чего по уширенным спектрам вновь измерялись индексы, которые затем сравнивались с индексами, измеренными по "неиспорченному" спектру звезды. Таким образом устанавливалась зависимость поправки к индексам от σ_* ; эти зависимости для каждого индекса аппроксимировались полиномами 3й-4й степени. Для характерной дисперсии скоростей звезд гигантских линзовидных галактик, ~ 200 км/с, поправки к

NGC	Дата	Т _{ехр} , мин	$FWHM_*''$	$PA(Bepx), ^{\circ}$
NGC 4267, 1-е положение	28.02.2008	2×30	1.5	200
NGC 4267, 2-е положение	28/29.02.2008	3×30	1.5	200
NGC 4340, 1-е положение	14.01.2008	2×30	1.6	190
NGC 4340, 2-е положение	14.01.2008	2×30	1.6	190
NGC 4477	25.03.2001	4×30	1.7	209
NGC 4596	19.04.2002	4×30	1.8	264
NGC 4643	14.04.2007	2×30	2.5	60
NGC 4754, 1-е положение	21.04.2007	2×30	2.3	290
NGC 4754, 2-е положение	21.04.2007	2×30	2.3	290
NGC 7743, 1-е положение	14.08.2007	3×30	2	-5
NGC 7743, 2-е положение	14.08.2007	2×30	2	- 5
IC 676	06.03.2008	2×30	1.1	188

Таблица 4.13: Спектральные наблюдения восьми SB0 галактик с SAURON

индексам за уширение линий составляют 0.15 Å для $H\beta$, ~ 0.3 Å для Mgb и ~ 0.6 Å для Fe5270; для дисперсии скоростей ~ 100 км/с эти поправки пренебрежимо малы.

Дополнительным этапом в редукции данных САУРОН по сравнению с процедурой, описанной в работе Sil'Chenko (2005), стало преобразование полученных кубов данных в формат Euro3D.

4.4.2 Химически выделенные ядра в SB0-галактиках с экспоненциальными дисками

Чтобы проследить изменения характеристик звездного населения с расстоянием от центра галактик с максимальной точностью, мы по построенным картам Ликских индексов рассчитали средние значения индексов в кольцах; ошибки этих средних, оцененные по разбросу точек внутри колец, везде меньше 0.1 Å. Однако это внутренняя точность измерений; что касается внешней точности, то несомненно, в данных SAURON могут присутствовать систематические ошибки. В частности, в спектрографе наверняка есть рассеянный свет, уровень которого нам неизвестен, потому что сами владельцы спектрографа отрицают его наличие. Также в больших галактиках может быть перевычитание фона, из-за того, что фон неба измеряется менее, чем в 2 минутах дуги от центра галактики. Первый эффект должен занижать значения эквивалентных ширин линий поглощения, второй – завышать.

Как мы указали в Таб. 4.12, три галактики из списка уже наблюдались ранее спектрально на предмет измерения Ликских индексов вдоль радиуса. Это может помочь нам получить представления о возможном уровне систематических ошибок. В частности, галактика NGC 4754 исследовалась в работе Fisher et al. (1996) с помощью спектрографа с длинной щелью – щель выставлялась вдоль большой и вдоль малой оси галактики. Мы промоделировали наблюдения с длинной щелью, наложив цифровую маску на двумерные карты индексов, посчитанные нами по данным SAURON. Сравнение наших измерений с данными Fisher et al. (1996) вдоль большой ($PA = 23^{\circ}$) и малой ($PA = 113^{\circ}$) оси показано на Рис. 4.24. Согласие неплохое, особенно в индексе магния, линия которого находится в середине спектрального диапазона SAURON. В индексе Н β данные SAURON вероятно систематически ниже измерений Fisher et al. (1996) на 0.2–0.4 Å. На Рис. 4.25 мы сравниваем уже азимутально усредненные профили индексов по данным SAURON и по данным MPFS для галактик NGC 4267 и NGC 7743. В целом, данные MPFS характеризуются меньшим отношением сигнал/шум по отношению к данным SAURON, и точность азимутально осредненных индексов здесь порядка 0.2 Å. Однако мы видим в центрах галактик прекрасное совпадение измерений (кроме индекса железа в NGC 4267), и лишь на промежуточных радиусах 2–5 секунд возможно заниженное значение на этот раз индекса магния в измерениях SAURON. В целом, сопоставляя все сравнения Рис. 4.24–4.25, мы можем заключить, что значимой систематики на уровне больше 0.2–0.4 Å в Ликских индексах, измеренных по данным SAURON, мы не видим.

На Рис. 4.26 представлены радиальные профили возраста и металличности для семи галактик из нашей выборки. Процесс получения профилей включал в себя несколько этапов. Сначала обработанные кубы данных в формате Euro3D были подвергнуты процедуре адаптивного разбиения Вороного (Cappellari & Copin, 2003), в ходе которой за счет суммирования сигнала в соседних пространственных элементах и, таким образом, ухудшения пространственного разрешения, мы добивались минимального заданного отношения сигнала к шуму спектре в каждом бине, от 60 до 100 на пиксель на длине волны 5000Å в зависимости от объекта. Затем все спектры независимо друг от друга аппроксимировались простыми моделями звездного населения PEGASE.HR с использованием методики NBURSTS. При подгонке спектров мы вырезали короткие области вокруг эмиссионных линий $H\beta$, [OIII] и [NI] в галактиках NGC 4477, NGC 4643 и NGC 7743. В результате для каждого бина мы получили значения параметров кинематики и звездного населения. После этого были восстановлены двумерные карты распределения этих параметров в галактиках, по которым были построены радиальные профили, представленные на Рис. 4.26. Полные двумерные карты кинематики и звездного населения будут представлены в отдельной работе.

Как видно на представленных профилях возраста и металличности, для всех галактик в нашей выборке на радиусах r > 4...7 arcsec, то есть в балджах, параметры звездного населения меняются слабо (для NGC 4267 и NGC 4477), либо не меняются вовсе. Металличности балджей заключены в узких пределах -0.3 < [Z/H] < 0.1 dex, возраста оказываются старыми (10 Gyr и более) для 5 галактик, 6.5 Gyr для NGC 4340 и 2.3 Gyr для NGC 7743. Параметры звездных населений ядер BO BCEX случаях значительно отличаются от балджей. Средняя металличность [Z/H] в ядрах на 0.3–0.5 dex превышает значения металличности балджей. В трех случаях: NGC 4340, NGC 4643 и NGC 7743, средний возраст звездного населения в ядрах также значительно отличается от балджей (в сторону меньших значений). Самое молодое звездное население (1.3 Gyr) наблюдается в ядре сейфертовской галактики NGC 7743. Оно же, наряду с ядром NGC 4340, показывает и наибольшую металличность (+0.2 dex) среди всех галактик нашей выборки.

Наибольшая разница металличности между ядром и балджем (+0.4 – +0.5 dex) наблюдается в галактиках, где звездное население ядра в среднем значимо моложе звездного населения балджа (NGC 4340, NGC 4643, NGC 7743). Этот факт согласуется со сценарием, в котором вторичная вспышка звездообразования в ядре может быть разной длительности и/или разной эффективности. Однако во всех исследованных галактиках с экспоненциальными внешними звездными дисками присутствуют химически выделенные звездные

NGC	t_n , млрд лет	$[m/H]_n$, dex	t_b , млрд лет	$[\mathrm{m/H}]_b,\mathrm{dex}$
4267	15 ± 4	-0.05 ± 0.03	12 ± 3	-0.43 ± 0.05
4340	4.3 ± 0.5	$+0.19\pm0.04$	6.7 ± 0.6	-0.29 ± 0.05
4477	14 ± 3	$+0.05\pm0.08$	11 ± 3	-0.18 ± 0.10
4596	11 ± 1	$+0.09\pm0.03$	11 ± 4	-0.23 ± 0.10
4643	6.7 ± 0.5	$+0.09\pm0.03$	10 ± 1	-0.25 ± 0.04
4754	> 15	$+0.05\pm0.03$	11 ± 1	-0.34 ± 0.04
7743	1.2 ± 0.1	$+0.19\pm0.05$	2.2 ± 0.1	-0.33 ± 0.05

Таблица 4.14: Характеристики звездного населения ядер (колонки 2–3) и балджей (колонки 4–5) семи SB0 галактик

ядра, и следовательно, вторичная вспышка звездообразования, той или иной длительности и/или интенсивности, имела место.

4.4.3 Обсуждение результатов

Во всех семи галактиках с экспоненциальными внешними звездными дисками, для которых были проанализированы свойства звездного населения в центре по данным SAURON, мы обнаружили химически выделенные ядра. Металличность балджей за пределами радиуса 5" нигде не превосходит солнечную, тогда как металличность звездных ядер, наоборот, всегда больше солнечной; разница металличности ядра и балджа во всех галактиках превышает фактор 2. Мы собрали характеристики звездных населений химически выделенных ядер в Таб. 4.14. Обращает на себя внимание тот факт, что возраст химически выделенных ядер очень разный – от 1 до 11 млрд лет. Карты возраста и металличности NGC 4596, полученные по тем же данным SAURON, но с применением других моделей эволюционного синтеза, были опубликованы (Peletier et al., 2007); там тоже отмечался однородно старый возраст звездного населения по всему полю зрения SAURON. Старый возраст звездных ядер NGC 4477 и NGC 4596 получался и у Sarzi et al. (2005) по данным апертурной спектроскопии HST. И наконец, если мы добавим к выборке галактики с экспоненциальными внешними звездными дисками, ранее исследованные с MPFS (Sil'chenko, 2006), то мы убедимся, что у NGC 2681 ядро очень молодое, моложе 2 млрд лет, а у NGC 2787 – очень старое, порядка 15 млрд лет. При этом металличность химически выделенных ядер антикоррелирует с их возрастом. Все выглядит так, как если бы процесс формирования химически выделенного ядра начался во всех галактиках примерно в одно время и очень давно, а заканчивался по-разному – у кого 10 млрд лет назад, у кого практически "на днях". В IC 676 этот процесс продолжается до сих пор. Поскольку у всех галактик есть крупномасштабные контрастные бары, "сгоняющие" внешний газ к центру, длительность центральной вспышки звездообразования может определяться начальным запасом газа. Необходимо учитывать и влияние окружения: самые молодые химически выделенные ядра (и самая заметная эмиссия) – в галактиках, не принадлежащих скоплению (Virgo). У членов Virgo NGC 4267, NGC 4596, NGC 4754 газа мало, и ядра относительно старые. С другой стороны, у члена Virgo NGC 4340 газа тоже нет, а ядро молодое – то есть газа она лишилась совсем недавно, менее 2 млрд лет назад. А в NGC 4477 газ есть (аккрецированный?), но ядро – старое. Не исключено, что основная эволюция в линзовидных галактиках скопления прошла и завершилась раньше, чем они присоединились к Virgo.

Итак, химически выделенные ядра в галактиках с внешними чисто экспоненциальными звездными дисками формировались в процессе длительной эволюции – сейчас на Западе для такой медленной эволюции прижился термин "секулярная эволюция" (см. обзор Kormendy & Kennicutt (2004)). При этом газ стекал по радиусу к центру. Но это тот самый процесс, который и приводит к постепенному установлению экспоненциального профиля поверхностной плотности звезд, если звезды формируются на характерных временах радиального перераспределения газа (Lin & Pringle, 1987)! Характерные времена звездообразования в дисках спиральных галактик – от немногих миллиардов лет (двухтрех) для ранних типов, Sa-Sb, до 10 млрд лет для поздних типов, Sc-Sd (см., например, Charlot & Bruzual, 1991). Этот интервал согласуется с интервалом возрастов наших химически выделенных ядер. То есть если предшественниками линзовидных галактик были спиральные галактики разных типов, мы и получим такой интервал возрастов ядер.

Теперь подумаем, чем может отличаться секулярная эволюция галактик с экспоненциальными дисками от секулярной эволюции галактик с двухярусными дисками. Среди галактик с двухярусными дисками, у которых мы исследовали кинематику центральных областей, высок процент случаев обнаружения "несвязанной" (decoupled) кинематики газового компонента по отношению к звездному: встречаются как сильно наклоненные внутренние кольца или диски – NGC 6340 (Sil'chenko, 2000; Chilingarian et al., 2009c), NGC 524 (Sil'chenko, 2000), NGC 7217 (Sil'chenko & Afanasiev, 2000), NGC 615 (Sil'chenko et al., 2001), NGC 3599, IC 1548 (Silchenko & Afanasiev, 2008), так и противовращающиеся фракции как газа, так и звезд прямо в большом галактическом диске – NGC 3626 (Ciri et al., 1995), NGC 7742 (Sil'chenko & Moiseev, 2006), NGC 7217 (Merrifield & Kuijken, 1994; Sil'chenko & Afanasiev, 2000), NGC 5631 (Sil'chenko et al., 2009). Присутствие малой фракции газа или звезд с собственных угловым моментом, не связанным с общим угловым моментом галактики, обычно объясняют поглощением малого спутника с наклонной орбиты – так называемым малым мержингом. Также на идее малого мержинга основана и единственная пока успешная модель построения двухярусного диска – в статье Younger et al. (2007). Возможно, именно различия в природе "спускового крючка" секулярной эволюции и порождают разные формы профиля поверхностной плотности галактических дисков: одномоментный малый мержинг, перестраивая газовый диск на короткой временной шкале, порождает двухярусный звездный диск, в то время как долгоживущий бар, обеспечивающий стабильную аккрецию газа внешних областей на центр в течение нескольких миллиардов лет, строит регулярный экспоненциальный профиль. Оба механизма провоцируют вспышки звездообразования в ядре, но на разных временных масштабах. Химически выделенные звездные ядра также будут появляться как в том, так и в другом случае.

4.5 Цвета близких галактик в оптическом и ИК диапазонах

Результаты, представленные в данном разделе, опубликованы в работах Chilingarian et al. (2010b); Chilingarian (2009b).



Рис. 4.24: Сравнение профилей Ликских индексов вдоль большой (*a*) и вдоль малой оси (*b*) NGC 4754 по данным SAURON и по данным спектроскопии с длинной щелью Фишера и др. (1996)



Рис. 4.25: Сравнение азимутально осредненных профилей Ликских индексов по данным SAURON и MPFS для NGC 4267 (*a*) и NGC 7743 (*b*)



Рис. 4.26: Профили среднего возраста и металличности звездного населения в центрах исследованных галактик, получены осреднением двумерных распределений в кольцах.

4.5.1 Создание каталога галактик

Изначально предполагалось, что выборка включит в себя нормальные галактики со спектроскопическими данными из SDSS DR7 (Abazajian et al., 2009) и качественной 4-полосной ИК-фотометрией из каталога Large Area Survey (LAS) обзора UKIDSS DR5 (Lawrence et al., 2007). Учитывая тот факт, что области охвата обзоров UKIDSS и SDSS до некоторой степени выравнены друг с другом, в качестве наиболее селективного критерия при создании выборки мы решили применить позиционное ограничение на основе полос SDSS, памятуя о его зональной природе. В каталог были включены только объекты из зон с 9 по 16 включительно по нумерации SDSS, что заведомо лежит в области охвата UKIDSS. Указанный критерий также был введен для улучшения производительности запросов к SDSS, в соответствии с оценками планировщика запросов, доступного в рамках сервиса CasJobs¹⁰. Практически сразу мы столкнулись с невозможностью осуществлять кросс-идентификацию объектов между обзорами в локальной базе данных (по причине существенного объема анализируемых данных) и с помощью стандартных механизмов, доступных в Виртуальной Обсерватории (вследствие разнородной природы архивов данных, которые предоставляют полнофункциональные, но далеко не всегда стандартные интерфейсы доступа, что исключает возможность интеркоммуникаций между ними). Традиционным решением в данном случае стала ручная последовательная кросс-корреляция выборок данных в следующем порядке:

- 1. Определение интересующей нас выборки в SDSS
- 2. Доставка промежуточных результатов в архив WFCAM¹¹ и кросс-корреляция с UKIDSS

Выборка объектов из SDSS целиком была осуществлена в интерфейсе CasJobs, с одновременным применением следующих критериев:

- 1. Объект должен иметь качественные (в терминологии производителей данных SDSS) спектральные и фотометрические наблюдения в седьмом релизе данных (Data Release 7)
- 2. Объект должен иметь красное смещение в диапазоне 0.03 < Z < 0.6
- 3. Объект должен находиться внутри SDSS полос 9-16

В итоге применения указанных научных критериев к данным, был составлен и выполнен в CasJobs запрос на языке SQL (Structured Query Language, язык запросов к структурированным данным), вернувший 190 275 объектов:

SELECT

```
p.objID, p.ra,p.dec, p.modelMag_u,
p.modelMagErr_u, p.modelMag_g, p.modelMagErr_g,
p.modelMag_r, p.modelMagErr_r, p.modelMag_i,
p.modelMagErr_i, p.modelMag_z, p.modelMagErr_z,
p.petroR50_u, p.petroR50Err_u, p.petroR50_g,
p.petroR50Err_g, p.petroR50_r, p.petroR50Err_r,
```

 $^{^{10} \}rm http://cas.sdss.org/CasJobs$

 $^{^{11} \}rm http://surveys.roe.ac.uk/wsa/$

```
p.petroR50_i, p.petroR50Err_i, p.petroR50_z,
    p.petroR50Err_z, p.extinction_u, p.extinction_g,
    p.extinction_r, p.extinction_i, p.extinction_z,
    s.specObjID, s.mjd, s.plate,
    s.fiberID, s.z, s.zerr, s.zconf
INTO
    mydb.MyTable_0
FROM
    PhotoObj AS p,
    SpecObj as s
WHERE
    s.bestObjid = p.objID
    AND s.z > 0.03
    AND s.z < 0.6
    AND (SELECT
             stripe
         FROM
             dbo.fCoordsFromEq(p.ra, p.dec))
         BETWEEN 9 AND 16;
```

Далее, полученная выборка была архивирована, перенесена в архив WFCAM, предоставляющий доступ к UKIDSS, и кросс-отождествлена в радиусе 3 агсяес с каталогом Large Area Survey. Эта операция вернула 170 533 объектов, из которых 87 161 имели качественные в терминологии UKIDSS фотометрические измерения во всех 4 ИК-полосах LAS (Y, J, H и K).

Все необходимые задачи преобразования форматов, извлечения и подготовки данных были осуществлены с использованием TOPCAT¹², графического программного средства манипуляции с произвольными таблицами, и STILTS, его аналога, предназначенного для использования из командной строки.

Для того, чтобы иметь возможность вычислять k-поправки, фотометрические измерения из двух разных источников данных необходимо привести к однородному виду. Для этой цели мы использовали величины SDSS, измеренные в круговых апертурах размером $d = 3 \operatorname{arcsec} (fiberMags)$, и вычисляли звездные величины объектов UKIDSS в апертурах соответствующего размера путем интерполяции величин в трех доступных апертурах (2.0, 2.7 и 5.7 arcsec). Кроме того применялась коррекция нуль-пункта (Hewett et al., 2006) для перевода фотометрических данных UKIDSS из системы Веги в систему AB-величин.

Нижняя граница диапазона красных смещений, Z = 0.03, была выбрана для минимизации апертурных эффектов: на соответствующем этому красному смещению расстоянии 120 Мпк 3 arcsec апертура в линейном выражении имеет масштаб порядка 1.75 кпк, т.е. охватывает значительную часть балджа даже гигантских галактик; звездные населения ядер таким образом уже не доминируют в потоке. За выбранным верхним пределом красного смещения, Z = 0.6, доля нормальных галактик в SDSS существенно уменьшается, в основном из-за ограниченной по величине селекции галактик для спектроскопических измерений в программе обзора; за указанным красным смещением качество абсорбционных спектров заметно ухудшается.

¹²http://www.star.bris.ac.uk/ mbt/topcat/

Мы использовали потоки в 3 arcsec апертурах, а не петросяновские величины, для того чтобы сохранить возможность для сравнения с величинами, вычисленными по спектрам SDSS DR7, которые, как известно, также были измерены в апертурах этого размера. Медианные значения неопределенностей величин в 3 arcsec апертурах составляют менее 0.01 mag для фильтров g, r, i, Y, J, H и K, 0.017 mag для фильтра z и 0.07 mag для полосы u соответственно. Все обсуждаемые в данной главе величины были поправлены за галактическое поглощение в соответствии с Schlegel et al. (1998).

Мы обнаружили важные систематические различия неизвестного происхождения между величинами SDSS DR7 и фотометрией из UKIDSS DR5 в 3 arcsec апертурах. Мы оценили величину систематического сдвига используя тот факт, что SED нормальной галактики не имеет сколько-нибудь заметных особенностей в фильтрах r и краснее, а стало быть цвета r-i, i-z, z-Y, Y-J, J-H и H-K должны достаточно гладко зависеть от эффективной длины волны фильтров. Мы аппроксимировали полиномом третьего порядка все цвета за исключением z - Y и вычислили сдвиг между ожидаемым значением цвета *z* – *Y*, полученным из наилучшего приближения, и наблюдаемой величиной. Среднее значение сдвига составило 0.22 mag при стандартном отклонении 0.13 mag вне зависимости от других параметров (т.е. от наблюдаемых цветов и красного смещения). Мы вычли найденную поправку из всех UKIDSS величин. Этот эффект продемонстрирован на Рис. 4.27. На верхней панели изображено комбинированное распределение энергии SDSS-UKIDSS для некоторой галактики и его наилучшее приближение моделями PEGASE.2. Средняя и нижняя панели показывают невязки между наблюдаемым SED и моделью, а также цвета в последовательных спектральных диапазонах и полином третьего порядка, используемый для их аппроксимации. Рисунок на средней панели однозначно указывает на систематическое отличие NIR цветов от ожидаемых значений, что очевидно по отличию измеренного значения цвета *z* – *Y* от ожидаемого.

4.5.2 Восстановленные звездные величины на Z = 0 и яркие красные галактики

Хорошо известно, что цвета галактик на Z = 0 коррелируют с их морфологией и наблюдается четкая бимодальность в распределении галактик по цветам (м., например, Strateva et al., 2001; Baldry et al., 2004; Balogh et al., 2004). Так называемая "красная последовательность", включающая в себя эллиптические и линзовидные галактики с небольшой примесью спиральных галактик ранних типов, характеризуется отсутствием звездообразования, тогда как представители "голубого облака", содержащего спиральные галактики поздних типов и неправильные галактики, демонстрируют наличие областей активного звездообразования. Часть галактик ранних типов на самом деле расположена ниже красной последовательности в "зеленой долине" или даже в "голубом облаке". Некоторые из этих объектов, которые относят к E+A галактикам (Dressler & Gunn, 1983; Couch & Sharples, 1987; Dressler et al., 1999), зачастую не имеют эмиссионных линий в спектрах (либо они слабы), тогда как сильные абсорбционные линии бальмеровской серии наглядно свидетельствуют о наличии молодых звезд. Таким образом, цвета галактик на Z = 0связаны не столько с их морфологией, сколько со внутренними свойствами, такими, как наличие звездообразования и специфика звездного населения. На Рис. 4.28 мы приводим диаграмму цвет-величина для 74 254 галактик из обзоров SDSS DR7 и UKIDSS DR5;



Рис. 4.27: На верхней панели представлено распределение энергии в спектре (оптический и ближний ИК диапазоны) галактики SDSS J155023.03-000023.8 в апертуре 3-агсsес по оригинальным данным из каталогов (черные ромбики), эмпирически исправленная ИК-часть (голубые ромбики), ее наилучшая модель PEGASE.2, использованная для подсчета k-поправок (сплошная красная линия). Невязки аппроксимации показаны на средней панели (те же значки). На нижней панели показаны цвета как функция длины волны (черные крестики), наилучшая аппроксимация 5 цветов (r - i, i - z, Y - J, J - H, and H - K) полиномом 3-й степени (сплошная зеленая линия) и исправленное значение цвета z - Y (голубой крестик).



Рис. 4.28: Диаграмма цвет-величина для 74 254 галактик из обзоров SDSS DR7 и UKIDSS DR5, построенная по петросяновским величинам в фильтрах g, r и H, с учтенной k-поправкой на основе аналитического приближения, предложенного в данном исследовании. Черные и синие контуры соответствуют методам PEGASE.2 и KCORRECT. Изолинии двумерной карты плотности проведены по степеням двойки от 2 (внешние области) до 1024 (внутренняя часть) галактик в ячейке 0.25 mag×0.025 mag.

их полные петросяновские величины были исправлены за красное смещение при помощи нашего аналитического приближения для *k*-поправок.

Слабая зависимость цвета галактик красной последовательности от светимости, в частности, соответствует зависимости масса-металличность для галактик раннего типа. Массивные (и яркие) галактики красной последовательности содержат звездные населения с большей металличностью (и, стало быть, с более красными цветами) по сравнению с маломассивными системами.

Цвета LRG на Z = 0 представляют собой естественный тест качества вычисления kпоправок. Предполагается, что подавляющее большинство звезд в этих системах сформировалось за короткий промежуток времени в ранней Вселенной и затем пассивно эволюционировало. Красное смещение Z = 0.5 соответствует времени около 5 Gyr назад. Следовательно, если предположить, что LRG имеют возраст 12 Gyr в локальной Вселенной и не содержат молодых звезд, тогда на Z = 0.5 их оптические цвета в покоящейся системе отсчета должны быть несколько голубее, $\Delta(u-r) \approx 0.25$ mag, $\Delta(g-r) \approx 0.08$ mag, а красные цвета практически неизменны (отличие меньше 0.03 mag), как показывают оценки эволюции цвета галактики с звездным населением солнечной металличности в PEGASE.2.



Рис. 4.29: Зависимость восстановленного на Z = 0 цвета LRG от красного смещения. Сплошные и пунктирные линии обозначают методы PEGASE.2 и КСОRRECT вычислений k-поправок соответственно.

На Рис. 4.29 приводится поведение восстановленных на Z = 0 цветов LRG как функций красного смещения. Все изображенные цвета содержат SDSS r величину, поскольку оба алгоритма вычисления k-поправок согласуются друг с другом в этом фильтре.

Самый голубой цвет u - r демонстрирует существенные изменения с красным смещением, отличающиеся на фактор 3 от ожидаемых исходя из пассивной эволюции SSP. Это, впрочем, возможно объяснить "хвостом" истории звездообразования, поскольку даже небольшие массовые доли звезд средней массы существенным образом влияют на значения фотометрии в полосе u. Отметим, что с другой стороны неудачный подбор опорного спектра отчасти объясняет наблюдаемый эффект.

Вызывает удивление тот факт, что цвет g - r совсем не эволюционирует, если мы используем значения КСОRRECT для k-поправок в фильтре g, и эволюционирует немного сильнее ожидаемого из эволюции SSP, когда k-поправки вычислены по PEGASE.2, что отчасти согласуется с поведением соседнего цвета u - r.

Цвета r - i и r - z ведут себя аналогичным образом в обоих подходах, проявляя отсутствие эволюции, тогда как в ближнем ИК-диапазоне ситуация обстоит другим образом. В полосе J оба метода согласуются между собой, хотя и демонстрируют немного неожиданные изменения на 0.08 mag, а в фильтрах H и K они существенным образом расходятся (этот эффект также можно наблюдаться на Рис. 1.12). k-поправки по методу PEGASE.2 в



Рис. 4.30: Диаграммы цвет-величина для близких галактик: оптические и ИК цвета. Все звездные величины исправлены за поглощение, также учтена k-поправка. Левая и правая панели представляют диаграммы M_H от g - r и M_H от g - H, соответственно. Возраста, полученные аппроксимацией спектров при помощи SSP, обозначены цветом, диапазон от фиолетового до красного соответствует значениям от 1 до 15 Gyr.

полосе K на Z > 0.3 выглядят немного недооцененными, в противоположность переоцененным k-поправкам, вычисленным по КСОRRECT. В полосе H оба метода недооценивают k-поправки, однако подход на основе SSP делает это сильнее.

Окончательный ответ на вопрос о вычислении k-поправок в фотометрических полосах ближнего ИК-диапазона будет дан только тогда, когда в этой области длин волн появятся модели звездных населений следующего поколения, основанные на эмпирических звездных библиотеках. Решения, предложенные в этой работе для фильтров H и K, следует использовать с осторожностью, памятуя о том, что они могут вносить систематические ошибки в окончательные результаты.

На Рис. 4.30 представлены диаграммы цвет-величина для галактик из нашей выборки. Мы используем восстановленную на Z = 0 величину в фильтре H, поскольку он менее чувствителен к эффектам возраста звездного населения по сравнению с оптическими полосами. Возраста, полученные аппроксимацией спектров при помощи NBURSTS, обозначены цветовым кодированием. Из диаграммы немедленно следует, что красная последовательность (Strateva et al., 2001) состоит из старых галактик, тогда как в голубом облаке заметен существенный градиент возраста.

На графиках отчетливо виден длинный (порядка 3 mag) хвост галактик высокой светимости из красной последовательности, который однозначно свидетельствует о том, что эти галактики не могли сформироваться путем слияния объектов похожей массы из голубого облака. По другому сценарию образование LRG происходило как последовательное слияние массивных галактик из красной последовательности. При этом поскольку галактики красной последовательности практически не имеют межзвездного материала, результат их слияния также будет лишен межзвездного газа (т.н. *dry merger*), и в нем таким образом не будет происходить сколько-нибудь заметного звездообразования. Это должно создавать эффект насыщения на диаграмме светимость-металличность в области высоких светимостей, который отсутствует в наших данных. Следовательно, единственным правдоподобным объяснением формирования хвоста ярких красных галактик является сценарий повторяющегося слияния богатых газом массивных голубых галактик. Важно отметить, что такие галактики чрезвычайно редко встречаются (если существуют вообще) в локальной Вселенной, но повсеместно присутствуют на высоких красных смещениях, т.е. были широко распространены в ранней Вселенной, когда формировались наиболее массивные галактики красной последовательности.

Другая важная деталь на диаграмме M_H от g - H – наложение молодых галактик и галактик среднего возраста на красную последовательность, вплоть до 0.7 mag перекрытия в красную сторону по цвету g - H. По всей видимости, это запыленные галактики с активным звездообразованием, суперпозиция молодых и старых населений в которых, плюс эффекты, связанные с пылью, приводят к такой комбинации M_H и g - H.

Большое количество пыли, наблюдаемое в галактиках, где возраст звездного населения составляет 2–3 млрд лет, скорее всего связано с фазой асимптотической ветви гигантов (AGB), которую массово проходят звезды в них. AGB фаза таким образом оказывает важное влияние на интегральные цвета (т.е. цвета на масштабах всей галактики).

Заключение

Диссертация посвящена исследованиям механизмов происхождения и эволюции галактик ранних типов различных светимостей – от ультракомпактных карликовых галактик до гигантских галактик крупнее и ярче Млечного Пути. В ходе исследований используются результаты наблюдений и численного моделирования, а также беспрецедентные возможности, предоставляемые Виртуальной Обсерваторией.

В Главе 1 представлен ряд новых методов анализа спектральных и фотометрических данных: (1) метод аппроксимации наблюдаемых спектров галактик моделями, полученными в результате эволюционного моделирования; (2) метод декомпозиции профилей яркости галактик; (3) аналитические аппроксимации *k*-поправок для галактик на небольших красных смещениях в широко используемых фототметрических полосах.

В Главе 2 представлен анализ наблюдений карликовых эллиптических галактик в скоплениях, полученный на панорамном спектрографе MPFS (6-м телескоп БТА САО РАН), мультиобъектном спектрографе Giraffe-FLAMES (8-м телескоп VLT, ESO), камере широкого поля Megacam (3.6-м телескоп CFHT) и архивных данных для 30 галактик. Данная работа является первым примером исследования выборки карликовых эллиптических галактик методами панорамной спектроскопии и первой опубликованной выборкой профилей звездного населения в карликовых галактиках ранних типов. Проведенный в работе анализ позволяет утверждать, что окружение играет ключевую роль в эволюции карликовых галактик.

В Главе 3 представлены исследования ультракомпактных карликовых галактик в скоплении Печь, а также открытие с помощью методов Виртуальной Обсерватории и последующие наблюдательные и теоретические исследования компактных эллиптических галактик в скоплениях и группе NGC 5846. Полученные результаты однозначно свидетельствуют в пользу сценария приливного "обдирания" обычных галактик как способа формирования компактных звездных систем.

В Главе 4 представлена база данных GalMer, содержащая результаты TreeSPHмоделирования эволюции изолированных и взаимодействующих галактик, алгоритм для моделирования спектрофотометрических свойств галактик и варианты научного применения базы данных GalMer. Затем приводятся результаты анализа наблюдений E+A галактики как объекта, находящегося в стадии трансформации из позднего в ранний тип, а также исследования звездных населений в галактике раннего типа промежуточной массы NGC 4245 и семи линзовидных галактиках с барами и чисто экспоненциальными внешними дисками. В заключительной части описывается процедура построения каталога спектральных распределений энергии для сотен тысяч галактик по данным фотометрических обзоров и приводятся примеры использования этих данных для изучения эволюции галактик ранних типов.

На защиту выносятся

- 1. NBURSTS новая методика одновременного определения кинематических параметров звездных подсистем галактик и параметров их звездных населений по спектрам, интегрированным вдоль луча зрения, основанная на аппроксимации наблюдений синтетическими спектрами звездного населения;
- 2. Методика автоматизированного поиска компактных эллиптических галактик средствами Виртуальной Обсерватории (workflow) и новая концепция астрономического исследования в эпоху e-Science: Виртуальная Обсерватория – наблюдения – численное моделирование;
- 3. Методика расчета k-поправок для галактик на красных смещениях z < 0.5 при минимальном доступном наборе наблюдательных данных и аналитическое приближения для зависимости k-поправок от красного смещения для галактик ранних типов;
- 4. Результаты анализа данных длиннощелевой и 3D-спектроскопии для карликовых галактик в скоплении Девы и мультиобъектной спектроскопии объектов в скоплении Abell 496 методом NBURSTS: двумерные поля лучевых скоростей, дисперсий скоростей, SSP-эквивалентных оценок возраста и металличности для 5 галактик; радиальные профили кинематики, возраста и металличности для 31 галактики; каталог параметров, содержащий лучевые скорости, центральные дисперсии скоростей, измерения Ликских индексов, SSP-эквивалентные значения возрастов, металличностей и обилия α-элементов в 46 галактиках в скоплении Abell 496
- 5. Открытие эволюционно выделенных ядер в 14 карликовых эллиптических галактиках в скоплении Дева и кинематически выделенных ядер в 4 из них, что позволяет сделать вывод о внешних механизмах эволюции карликовых эллиптических галактик: выметании газа лобовым давлением, приливным эффектам, а также слияниях, обычно не рассматривающихся для галактик столь малых линейных размеров.
- 6. Каталог параметров звездного населения, дисперсий скоростей звезд, динамических и фотометрических отношений масса-светимость для выборки ультракомпактных карликовых галактик в скоплении Печь; вывод о противоречии начальной звездной функции масс Солпитера результатам наблюдений и о малом содержании темной материи в них. Открытие в скоплении Дева карликовой галактики переходного типа от ультракомпактных карликовых к компактным эллиптическим (М59сО) и выводы о ее формировании путем приливного обдирания существенно более массивной дисковой галактики
- 7. Открытие второй компактной эллиптической галактики в группе NGC5846, двумерные поля скоростей, дисперсий скоростей и параметров звездного населения для этой галактики. Открытие 22 компактных эллиптических галактик в близких скоплениях галактик методами Виртуальной Обсерватории, каталог их кинематических параметров и параметров звездных населений. Вывод о важности механизма приливного обдирания галактик потенциалом скопления или группы в общей картине эволюции галактик.

- 8. База данных GalMer, доступная в Виртуальной Обсерватории, содержащая результаты численного TreeSPH моделирования процесса слияния галактик для тысяч конфигураций (орбиты, отношения масс, морфологические типы); эффективные алгоритмы визуализации результатов моделирования; метод моделирования спектрофотометрических свойств галактик путем применения моделей звездного населения PEGASE.2/HR к результатам TreeSPH моделирования
- 9. Результаты анализа двумерных распределений кинематических параметров и параметров звездных населений, полученные по данным панорамной спектроскопии, для дисковых галактик ранних типов: SDSS J230743.41 + 152558.4, NGC 4245, NGC 4267, NGC 4340, NGC 4477, NGC 4596, NGC 4643, NGC 4754, NGC 7743. Вывод о сложной истории звездообразования в их центральных областях и о ключевой роли секулярной эволюции в формировании морфологии дисковых галактик ранних типов.
- 10. Каталог, содержащий параметры звездных населений, апертурную и интегральную фотометрию в оптическом и ближнем ИК диапазонах для 100000 близких галактик; выводы о трудностях современных сценариев формирования галактик из "красной последовательности".

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность своему постоянному соавтору и научному консультанту О. К. Сильченко. Автор признателен поддержке всех своих соавторов и коллабораторов, в частности: Victor Afanasiev (SAO RAS, Russia), Francois Bonnarel (CDS, Strasbourg, France), Veronique Cayatte (Observatoire de Paris-Meudon, France), Francoise Combes (Observatoire de Paris-Meudon, France), Sven De Rijcke (University of Ghent, Belgium), Paola Di Matteo (Observatoire de Paris-Meudon, France), Serguei Dodonov (SAO RAS), Florence Durret (IAP, France), Alister Graham (Swinburne University of Technology, Australia), Thorsten Lisker (University of Heidelberg, Germany), Mireille Louys (CDS, Strasbourg, France), Pierre Le Sidaner (Observatoire de Paris-Meudon, France), Gary Mamon (IAP, France), Anne-Laure Melchior (Observatoire de Paris-Meudon, France), Steffen Mieske (ESO, Chile), Reynier Peletier (Kapteyn Astronomical Institute, the Netherlands), Yves Revaz (EPFL-LASTRO, Switzerland), Anatoly Zasov (SAI MSU). Особая благодарность Алексею Моисееву за поддержку наблюдений карликовых галактик на 6-м телескопе САО РАН, профессору Michael Drinkwater (University of Queensland, Australia), который рецензировал несколько вошедших в диссертацию статей в MNRAS и Science и Ивану Золотухину (ГАИШ МГУ) за помощь в переводе англоязычных статей, вошедших в диссертацию.

Особые благодарности Комитету по Тематике Больших Телескопов РАН за предоставление наблюдательного времени на 6-м телескопе САО РАН. Мы также благодарны сотрудникам центра астрономических данных Terapix (Парижский Институт Астрофизики) за компетентность и эффективность в обработке изображений Megacam.

Отдельная благодарность родителям: Владимиру и Людмиле Чилингарян за моральную поддержку во время выполнения диссертации.

Литература

- Abadi, M. G., Moore, B., & Bower, R. G. 1999, MNRAS, 308, 947
- Abazajian, K. N., et al. 2009, ApJS, 182, 543
- Abell, G. O. 1958, ApJS, 3, 211
- Adami, C., et al. 2006, A&A, 451, 1159
- Adami, C., et al. 2005, A&A, 429, 39
- Adelman-McCarthy, J. K., et al. 2008, ApJS, 175, 297
- Afanasiev, V. L., Dodonov, S. N., & Moiseev, A. V. 2001, in Stellar Dynamics: from Classic to Modern, ed. L. P. Ossipkov & I. I. Nikiforov, 103
- Afanasiev, V. L. & Moiseev, A. V. 2005, Astronomy Letters, 31, 194
- Aguerri, J. A. L., Debattista, V. P., & Corsini, E. M. 2003, MNRAS, 338, 465
- Aparicio, A. 1994, ApJ, 437, L27
- Athanassoula, E. 1992, MNRAS, 259, 345
- Bacon, R., et al. 1995, A&AS, 113, 347
- Bacon, R., et al. 2001, MNRAS, 326, 23
- Baldry, I. K., Glazebrook, K., Brinkmann, J., Ivezić, Ž., Lupton, R. H., Nichol, R. C., & Szalay, A. S. 2004, ApJ, 600, 681
- Baldwin, J. A., Phillips, M. M., & Terlevich, R. 1981, PASP, 93, 5
- Balogh, M. L., Baldry, I. K., Nichol, R., Miller, C., Bower, R., & Glazebrook, K. 2004, ApJ, 615, L101
- Barazza, F. D., Binggeli, B., & Jerjen, H. 2002, A&A, 391, 823
- Barnes, J. & Hut, P. 1986, Nature, 324, 446
- Barnes, J. E. & Hernquist, L. 1996, ApJ, 471, 115
- Baumgardt, H. & Makino, J. 2003, MNRAS, 340, 227
- Bedregal, A. G., Aragón-Salamanca, A., & Merrifield, M. R. 2006, MNRAS, 373, 1125
- Bekki, K., Couch, W. J., & Drinkwater, M. J. 2001a, ApJ, 552, L105
- Bekki, K., Couch, W. J., Drinkwater, M. J., & Gregg, M. D. 2001b, ApJ, 557, L39
- Bekki, K., Couch, W. J., Drinkwater, M. J., & Shioya, Y. 2003, MNRAS, 344, 399
- Bekki, K., Couch, W. J., Shioya, Y., & Vazdekis, A. 2005, MNRAS, 359, 949
- Bell, E. F., et al. 2006, ApJ, 640, 241
- Bell, E. F., et al. 2004, ApJ, 608, 752

- Bender, R. 1990, A&A, 229, 441
- Bender, R., Burstein, D., & Faber, S. M. 1992, ApJ, 399, 462
- Bender, R. & Nieto, J.-L. 1990, A&A, 239, 97
- Bergond, G., et al. 2007, A&A, 464, L21
- Bergvall, N., Laurikainen, E., & Aalto, S. 2003, A&A, 405, 31
- Bertin, E. & Arnouts, S. 1996, A&AS, 117, 393
- Bertola, F. & Capaccioli, M. 1975, ApJ, 200, 439
- Binggeli, B. & Jerjen, H. 1998, A&A, 333, 17
- Binggeli, B., Sandage, A., & Tammann, G. A. 1985, AJ, 90, 1681
- Binggeli, B., Tammann, G. A., & Sandage, A. 1987, AJ, 94, 251
- Binney, J. & Tremaine, S. 1987, Galactic dynamics, ed. J. Binney & S. Tremaine
- Blaizot, J., Guiderdoni, B., Devriendt, J. E. G., Bouchet, F. R., Hatton, S. J., & Stoehr, F. 2004, MNRAS, 352, 571
- Blanton, M. R. & Roweis, S. 2007, AJ, 133, 734
- Block, D. L., et al. 2006, Nature, 443, 832
- Boch, T., Comparato, M., Taylor, J., Taylor, M., & Winstanley, N. 2006, IVOA Note, version 1.00, 01 June 2006
- Bohlin, R. C., Savage, B. D., & Drake, J. F. 1978, ApJ, 224, 132
- Boissier, S., Prantzos, N., Boselli, A., & Gavazzi, G. 2003, MNRAS, 346, 1215
- Böker, T., Falcón-Barroso, J., Schinnerer, E., Knapen, J. H., & Ryder, S. 2008, AJ, 135, 479
- Bonnarel, F., et al. 2000, A&AS, 143, 33
- Boselli, A., Boissier, S., Cortese, L., & Gavazzi, G. 2008a, ApJ, 674, 742
- Boselli, A., Boissier, S., Cortese, L., & Gavazzi, G. 2008b, A&A, 489, 1015
- Bottema, R. 1988, A&A, 197, 105
- Boué, G., Adami, C., Durret, F., Mamon, G. A., & Cayatte, V. 2008, A&A, 479, 335
- Bournaud, F., Duc, P.-A., & Emsellem, E. 2008, MNRAS, 389, L8
- Bournaud, F., Jog, C. J., & Combes, F. 2005, A&A, 437, 69
- Bournaud, F., Jog, C. J., & Combes, F. 2007, A&A, 476, 1179
- Brodie, J. P. & Strader, J. 2006, ARA&A, 44, 193
- Bruzual, G. & Charlot, S. 2003, MNRAS, 344, 1000
- Bundy, K., et al. 2006, ApJ, 651, 120
- Burgess, A. 1958, MNRAS, 118, 477
- Burstein, D., Faber, S. M., Gaskell, C. M., & Krumm, N. 1984, ApJ, 287, 586
- Buta, R. & Crocker, D. A. 1993, AJ, 105, 1344
- Buyle, P., De Rijcke, S., & Dejonghe, H. 2008, ApJ, 684, L17
- Buyle, P., Ferrarese, L., Gentile, G., Dejonghe, H., Baes, M., & Klein, U. 2006, MNRAS, 373, 700
- Calzetti, D., Kinney, A. L., & Storchi-Bergmann, T. 1994, ApJ, 429, 582

Caon, N., Capaccioli, M., & D'Onofrio, M. 1993, MNRAS, 265, 1013

Capak, P., Abraham, R. G., Ellis, R. S., Mobasher, B., Scoville, N., Sheth, K., & Koekemoer, A. 2007, ApJS, 172, 284

- Cappellari, M. & Copin, Y. 2003, MNRAS, 342, 345
- Cappellari, M. & Emsellem, E. 2004, PASP, 116, 138
- Cardiel, N., Gorgas, J., Cenarro, J., & Gonzalez, J. J. 1998, A&AS, 127, 597
- Carraro, G., Chiosi, C., Girardi, L., & Lia, C. 2001, MNRAS, 327, 69
- Carretero, C., Vazdekis, A., & Beckman, J. E. 2007, MNRAS, 375, 1025
- Cayatte, V., Kotanyi, C., Balkowski, C., & van Gorkom, J. H. 1994, AJ, 107, 1003
- Chakrabarti, S. & Whitney, B. A. 2009, ApJ, 690, 1432
- Charlot, S. & Bruzual, A. G. 1991, ApJ, 367, 126
- Chilingarian, I., Afanasiev, V., Bonnarel, F., Dodonov, S., Louys, M., & Zolotukhin, I. 2007a, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 376, Astronomical Data Analysis Software and Systems XVI, ed. R. A. Shaw, F. Hill, & D. J. Bell, 217
- Chilingarian, I. & Bergond, G. 2010, MNRAS letters in press, arXiv:1003.1663
- Chilingarian, I., Bonnarel, F., Louys, M., & McDowell, J. 2006, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 351, Astronomical Data Analysis Software and Systems XV, ed. C. Gabriel, C. Arviset, D. Ponz, & S. Enrique, 371-+
- Chilingarian, I., et al. 2008a, in Astronomical Spectroscopy and Virtual Observatory, ed. M. Guainazzi & P. Osuna, 125-+
- Chilingarian, I., Cayatte, V., Chemin, L., Durret, F., Laganá, T. F., Adami, C., & Slezak, E. 2007b, A&A, 466, L21
- Chilingarian, I., Cayatte, V., Revaz, Y., Dodonov, S., Durand, D., Durret, F., Micol, A., & Slezak, E. 2009a, Science, 326, 1379
- Chilingarian, I., Di Matteo, P., Combes, F., Melchior, A., & Semelin, B. 2010a, A&A in press, arXiv:1003.3243
- Chilingarian, I., Melchior, A.-L., & Zolotukhin, I. 2010b, MNRAS in press, arXiv:1002.2360
- Chilingarian, I., Mieske, S., Hilker, M., & Infante, L. 2010c, MNRAS in press, arXiv:100x.xxxx
- Chilingarian, I., Prugniel, P., Sil'chenko, O., & Koleva, M. 2007c, in IAU Symposium, Vol. 241, Stellar Populations as Building Blocks of Galaxies, ed. A. Vazdekis & R. R. Peletier (Cambridge, UK: Cambridge University Press), 175–176, arXiv:0709.3047
- Chilingarian, I., Sil'Chenko, O., Afanasiev, V., & Prugniel, P. 2008b, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 390, Pathways Through an Eclectic Universe, ed. J. H. Knapen, T. J. Mahoney, & A. Vazdekis, 296
- Chilingarian, I. & Zolotukhin, I. 2008, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 394, Astronomical Data Analysis Software and Systems XVII, ed. R. W. Argyle, P. S. Bunclark, & J. R. Lewis, 351-+
- Chilingarian, I. 2006, PhD thesis, Moscow State University & Université Claude Bernard, Lyon
- Chilingarian, I. V. 2009a, MNRAS, 394, 1229
- Chilingarian, I. V. 2009b, in Multi-wavelength Astronomy and Virtual Observatory, ed. D. Baines & P. Osuna, 165-+
- Chilingarian, I. V., Cayatte, V., & Bergond, G. 2008c, MNRAS, 390, 906
- Chilingarian, I. V., Cayatte, V., Durret, F., Adami, C., Balkowski, C., Chemin, L., Laganá, T. F., & Prugniel, P. 2008d, A&A, 486, 85
- Chilingarian, I. V., De Rijcke, S., & Buyle, P. 2009b, ApJ, 697, L111

- Chilingarian, I. V. & Mamon, G. A. 2008, MNRAS, 385, L83
- Chilingarian, I. V., Novikova, A. P., Cayatte, V., Combes, F., Di Matteo, P., & Zasov, A. V. 2009c, A&A, 504, 389
- Chilingarian, I. V., Prugniel, P., Sil'chenko, O. K., & Afanasiev, V. L. 2007d, MNRAS, 376, 1033
- Chilingarian, I. V., Sil'chenko, O. K., Afanasiev, V. L., & Prugniel, P. 2007e, Astronomy Letters, 33, 292
- Chiosi, C. & Carraro, G. 2002, MNRAS, 335, 335
- Choi, P. I., Guhathakurta, P., & Johnston, K. V. 2002, AJ, 124, 310
- Christlein, D. & Zabludoff, A. I. 2004, ApJ, 616, 192
- Churches, D. K., Nelson, A. H., & Edmunds, M. G. 2001, MNRAS, 327, 610
- Cid Fernandes, R., Mateus, A., Sodré, L., Stasińska, G., & Gomes, J. M. 2005, MNRAS, 358, 363
- Cimatti, A., Daddi, E., & Renzini, A. 2006, A&A, 453, L29
- Ciri, R., Bettoni, D., & Galletta, G. 1995, Nature, 375, 661
- Clarke, C. J. 1989, MNRAS, 238, 283
- Clemens, M. S., Bressan, A., Nikolic, B., Alexander, P., Annibali, F., & Rampazzo, R. 2006, MNRAS, 370, 702
- Coccato, L., et al. 2009, MNRAS, 394, 1249
- Combes, F. 2001, in Advanced Lectures on the Starburst-AGN, ed. I. Aretxaga, D. Kunth, & R. Mújica, 223-+
- Combes, F., Dupraz, C., & Gerin, M. 1990, Gas dynamics in a tidal interaction: formation of rings., ed. R. Wielen, 205-209
- Comerón, S., Knapen, J. H., Beckman, J. E., & Shlosman, I. 2008, A&A, 478, 403
- Côté, P., et al. 2004, ApJS, 153, 223 $\,$
- Cotton, W. D., Tody, D., & Pence, W. D. 1995, A&AS, 113, 159
- Couch, W. J. & Sharples, R. M. 1987, MNRAS, 229, 423
- Cowie, L. L., Songaila, A., Hu, E. M., & Cohen, J. G. 1996, AJ, 112, 839
- Cox, T. J., Jonsson, P., Primack, J. R., & Somerville, R. S. 2006, MNRAS, 373, 1013
- Cox, T. J., Jonsson, P., Somerville, R. S., Primack, J. R., & Dekel, A. 2008, MNRAS, 384, 386
- Da Costa, G. S. & Armandroff, T. E. 1990, AJ, 100, 162
- Davidge, T. J., Beck, T. L., & McGregor, P. J. 2008, ApJ, 677, 238
- De Bruyne, V., De Rijcke, S., Dejonghe, H., & Zeilinger, W. W. 2004, MNRAS, 349, 461
- De Rijcke, S., Dejonghe, H., Zeilinger, W. W., & Hau, G. K. T. 2001, ApJ, 559, L21
- De Rijcke, S., Dejonghe, H., Zeilinger, W. W., & Hau, G. K. T. 2003, A&A, 400, 119
- De Rijcke, S., Dejonghe, H., Zeilinger, W. W., & Hau, G. K. T. 2004, A&A, 426, 53
- De Rijcke, S., Michielsen, D., Dejonghe, H., Zeilinger, W. W., & Hau, G. K. T. 2005, A&A, 438, 491
- De Rijcke, S., Prugniel, P., Simien, F., & Dejonghe, H. 2006, MNRAS, 369, 1321
- De Rijcke, S., Zeilinger, W. W., Hau, G. K. T., Prugniel, P., & Dejonghe, H. 2007, ApJ, 659, 1172
- de Vaucouleurs, G. 1959, Handbuch der Physik, 53, 311

- de Vaucouleurs, G., de Vaucouleurs, A., Corwin, Jr., H. G., Buta, R. J., Paturel, G., & Fouqué, P. 1991, Third Reference Catalogue of Bright Galaxies. Volume I: Explanations and references. Volume II: Data for galaxies between 0h and 12h. Volume III: Data for galaxies between 12h and 24h., ed. de Vaucouleurs, G., de Vaucouleurs, A., Corwin, H. G., Jr., Buta, R. J., Paturel, G., & Fouqué, P.
- de Zeeuw, P. T., et al. 2002, MNRAS, 329, 513
- Dekel, A. & Silk, J. 1986, ApJ, 303, 39
- Di Matteo, P., Bournaud, F., Martig, M., Combes, F., Melchior, A.-L., & Semelin, B. 2008a, A&A, 492, 31
- Di Matteo, P., Combes, F., Chilingarian, I., Melchior, A.-L., & Semelin, B. 2008b, Astronomische Nachrichten, 329, 952
- Di Matteo, P., Combes, F., Melchior, A.-L., & Semelin, B. 2007, A&A, 468, 61
- Di Matteo, P., Combes, F., Melchior, A.-L., & Semelin, B. 2008c, A&A, 477, 437
- Di Matteo, P., Jog, C. J., Lehnert, M. D., Combes, F., & Semelin, B. 2009a, A&A, in press, arXiv:0906.0010
- Di Matteo, P., Pipino, A., Lehnert, M. D., Combes, F., & Semelin, B. 2009b, A&A, 499, 427
- Dirsch, B., Richtler, T., Geisler, D., Forte, J. C., Bassino, L. P., & Gieren, W. P. 2003, AJ, 125, 1908
- Djorgovski, S. & Davis, M. 1987, ApJ, 313, 59
- Djorgovski, S. G., Gal, R. R., McCarthy, J. K., Cohen, J. G., de Carvalho, R. R., Meylan, G., Bendinelli, O., & Parmeggiani, G. 1997, ApJ, 474, L19
- D'Onofrio, M., Capaccioli, M., & Caon, N. 1994, MNRAS, 271, 523
- Dressler, A. 1980, ApJ, 236, 351
- Dressler, A. & Gunn, J. E. 1983, ApJ, 270, 7
- Dressler, A., et al. 1997, ApJ, 490, 577
- Dressler, A., Smail, I., Poggianti, B. M., Butcher, H., Couch, W. J., Ellis, R. S., & Oemler, A. J. 1999, ApJS, 122, 51
- Drinkwater, M. J., Gregg, M. D., Hilker, M., Bekki, K., Couch, W. J., Ferguson, H. C., Jones, J. B., & Phillipps, S. 2003, Nature, 423, 519
- Drinkwater, M. J., et al. 2000, A&A, 355, 900
- Durret, F., Adami, C., Gerbal, D., & Pislar, V. 2000, A&A, 356, 815
- Durret, F., Felenbok, P., Lobo, C., & Slezak, E. 1999, A&AS, 139, 525
- Durret, F., et al. 2005, in SF2A-2005: Semaine de l'Astrophysique Francaise, ed. F. Casoli, T. Contini, J. M. Hameury, & L. Pagani, 709-+
- Eigenthaler, P. & Zeilinger, W. W. 2010, A&A, 511, A12, arXiv:0911.5119
- Eisenstein, D. J., et al. 2003, ApJ, 585, 694
- Emsellem, E., et al. 2007, MNRAS, 379, 401
- Emsellem, E., et al. 2004, MNRAS, 352, 721
- Emsellem, E. & van de Ven, G. 2008, ApJ, 674, 653
- Erwin, P. 2005, MNRAS, 364, 283
- Erwin, P., Pohlen, M., & Beckman, J. E. 2008, AJ, 135, 20
- Evrard, A. E. 1988, MNRAS, 235, 911
- Evstigneeva, E. A., Gregg, M. D., Drinkwater, M. J., & Hilker, M. 2007a, AJ, 133, 1722

- Evstigneeva, E. A., Drinkwater, M. J., Jurek, R., Firth, P., Jones, J. B., Gregg, M. D., & Phillipps, S. 2007b, MNRAS, 378, 1036
- Faber, S. M. 1972, A&A, 20, 361
- Faber, S. M. & Jackson, R. E. 1976, ApJ, 204, 668
- Faber, S. M., et al. 1997, AJ, 114, 1771
- Falcón-Barroso, J., et al. 2006, MNRAS, 369, 529
- Fellhauer, M. & Kroupa, P. 2005, MNRAS, 359, 223
- Ferguson, H. C. & Binggeli, B. 1994, A&A Rev., 6, 67
- Ferrarese, L., et al. 2006, ApJS, 164, 334
- Fioc, M. & Rocca-Volmerange, B. 1997, A&A, 326, 950
- Firth, P., Drinkwater, M. J., Evstigneeva, E. A., Gregg, M. D., Karick, A. M., Jones, J. B., & Phillipps, S. 2007, MNRAS, 382, 1342
- Fisher, D., Franx, M., & Illingworth, G. 1996, ApJ, 459, 110
- Fitzpatrick, E. L. 1999, PASP, 111, 63
- Freeman, K. C. 1970, ApJ, 160, 811
- Friedli, D. & Benz, W. 1993, A&A, 268, 65
- Fukugita, M., Shimasaku, K., & Ichikawa, T. 1995, PASP, 107, 945
- Gallazzi, A., Charlot, S., Brinchmann, J., & White, S. D. M. 2006, MNRAS, 370, 1106
- Gallazzi, A., Charlot, S., Brinchmann, J., White, S. D. M., & Tremonti, C. A. 2005, MNRAS, 362, 41
- Gao, Y. & Solomon, P. M. 2004, ApJ, 606, 271
- Garcia-Barreto, J. A., Downes, D., & Huchtmeier, W. K. 1994, A&A, 288, 705
- Gavazzi, G., Boselli, A., Donati, A., Franzetti, P., & Scodeggio, M. 2003, A&A, 400, 451
- Geha, M., Guhathakurta, P., & van der Marel, R. P. 2002, AJ, 124, 3073
- Geha, M., Guhathakurta, P., & van der Marel, R. P. 2003, AJ, 126, 1794
- Geha, M., Guhathakurta, P., & van der Marel, R. P. 2005, AJ, 129, 2617
- Gerhard, O., Kronawitter, A., Saglia, R. P., & Bender, R. 2001, AJ, 121, 1936
- Gerin, M. & Casoli, F. 1994, A&A, 290, 49
- Gingold, R. A. & Monaghan, J. J. 1982, Journal of Computational Physics, 46, 429
- Giuricin, G., Marinoni, C., Ceriani, L., & Pisani, A. 2000, ApJ, 543, 178
- Goto, T., et al. 2003a, PASJ, 55, 771
- Goto, T., Yamauchi, C., Fujita, Y., Okamura, S., Sekiguchi, M., Smail, I., Bernardi, M., & Gomez, P. L. 2003b, MNRAS, 346, 601
- Graham, A. W. 2002, ApJ, 568, L13
- Graham, A. W. & Guzmán, R. 2003, AJ, 125, 2936
- Gregory, S. A. & Thompson, L. A. 1977, ApJ, 213, 345
- Greisen, E. W. & Calabretta, M. R. 2002, A&A, 395, 1061

- Gunn, J. E. & Gott, J. R. I. 1972, ApJ, 176, 1
- Gunn, J. E., et al. 2006, AJ, 131, 2332
- Guzman, R., Lucey, J. R., & Bower, R. G. 1993, MNRAS, 265, 731
- Haşegan, M., et al. 2005, ApJ, 627, 203
- Hanisch, R. J., Farris, A., Greisen, E. W., Pence, W. D., Schlesinger, B. M., Teuben, P. J., Thompson, R. W., & Warnock, III, A. 2001, A&A, 376, 359
- Heller, C. H. & Shlosman, I. 1996, ApJ, 471, 143
- Hernquist, L. 1990, ApJ, 356, 359
- Hernquist, L. 1993, ApJS, 86, 389
- Hernquist, L. & Katz, N. 1989, ApJS, 70, 419
- Hewett, P. C., Warren, S. J., Leggett, S. K., & Hodgkin, S. T. 2006, MNRAS, 367, 454
- Hilker, M., Baumgardt, H., Infante, L., Drinkwater, M., Evstigneeva, E., & Gregg, M. 2007, A&A, 463, 119
- Hilker, M., Infante, L., Vieira, G., Kissler-Patig, M., & Richtler, T. 1999, A&AS, 134, 75
- Hilker, M., Mieske, S., & Infante, L. 2003, A&A, 397, L9
- Hitschfeld, M., Kramer, C., Schuster, K. F., Garcia-Burillo, S., & Stutzki, J. 2009, A&A, 495, 795
- Ho, L. C., Filippenko, A. V., & Sargent, W. L. W. 1997, ApJS, 112, 315
- Hogg, D. W., Baldry, I. K., Blanton, M. R., & Eisenstein, D. J. 2002, ArXiv Astrophysics e-prints
- Hubble, E. & Humason, M. L. 1931, ApJ, 74, 43
- Janz, J. & Lisker, T. 2008, ApJ, 689, L25
- Jerjen, H., Kalnajs, A., & Binggeli, B. 2000, A&A, 358, 845
- Jimenez, R., et al. 2010, MNRASin press, arXiv:0906.0994
- Jogee, S., et al. 2009, ApJ, 697, 1971
- Jonsson, P., Groves, B. A., & Cox, T. J. 2010, MNRAS, 403, 17
- Jordi, K., Grebel, E. K., & Ammon, K. 2006, A&A, 460, 339
- Jungwiert, B., Combes, F., & Palouš, J. 2001, A&A, 376, 85
- Karick, A. M., Drinkwater, M. J., & Gregg, M. D. 2003, MNRAS, 344, 188
- Katz, N. 1992, ApJ, 391, 502
- Kaviraj, S., Kirkby, L. A., Silk, J., & Sarzi, M. 2007, MNRAS, 382, 960
- Kenney, J. D. & Young, J. S. 1986, ApJ, 301, L13
- Kenney, J. D. P. & Koopmann, R. A. 1999, AJ, 117, 181
- Kennicutt, R. C., Calzetti, D., Walter, F., Prescott, M. K., & SINGS Team. 2005, in Bulletin of the American Astronomical Society, Vol. 37, Bulletin of the American Astronomical Society, 1248-+
- Kennicutt, Jr., R. C. 1998, ARA&A, 36, 189
- Kennicutt, Jr., R. C., Bresolin, F., & Garnett, D. R. 2003, ApJ, 591, 801
- Kewley, L. J., Groves, B., Kauffmann, G., & Heckman, T. 2006, MNRAS, 372, 961
- Khalisi, E., Amaro-Seoane, P., & Spurzem, R. 2007, MNRAS, 374, 703

Kissler-Patig, M., Jordán, A., & Bastian, N. 2006, A&A, 448, 1031

- Knapen, J. H. & James, P. A. 2009, ApJ, 698, 1437
- Koleva, M., Bavouzet, N., Chilingarian, I., & Prugniel, P. 2007a, in Science Perspectives for 3D Spectroscopy, ed. M. Kissler-Patig, J. R. Walsh, & M. M. Roth, 153
- Koleva, M., Prugniel, P., Ocvirk, P., Le Borgne, D., Chilingarian, I., & Soubiran, C. 2007b, in IAU Symposium, Vol. 241, IAU Symposium, ed. A. Vazdekis & R. F. Peletier, 183–184
- Koleva, M., Prugniel, P., Ocvirk, P., Le Borgne, D., & Soubiran, C. 2008, MNRAS, 385, 1998
- Kormendy, J. 1977, ApJ, 218, 333
- Kormendy, J., Fisher, D. B., Cornell, M. E., & Bender, R. 2009, ApJS, 182, 216
- Kormendy, J. & Kennicutt, Jr., R. C. 2004, ARA&A, 42, 603
- Kroupa, P. 2001, MNRAS, 322, 231
- Kroupa, P., Tout, C. A., & Gilmore, G. 1993, MNRAS, 262, 545
- Kruijssen, J. M. D. & Mieske, S. 2009, A&A, 500, 785
- Kuijken, K. & Merrifield, M. R. 1993, MNRAS, 264, 712
- Kuntschner, H. 2004, A&A, 426, 737
- Kuntschner, H., et al. 2006, MNRAS, 369, 497
- Labbé, I., et al. 2007, ApJ, 665, 944
- Larson, R. B., Tinsley, B. M., & Caldwell, C. N. 1980, ApJ, 237, 692
- Lawrence, A., et al. 2007, MNRAS, 379, 1599
- Le Borgne, D., Rocca-Volmerange, B., Prugniel, P., Lançon, A., Fioc, M., & Soubiran, C. 2004, A&A, 425, 881
- Lee, H., Skillman, E. D., Cannon, J. M., Jackson, D. C., Gehrz, R. D., Polomski, E. F., & Woodward, C. E. 2006, ApJ, 647, 970
- Leitherer, C., et al. 1999, ApJS, 123, 3
- Lejeune, T., Cuisinier, F., & Buser, R. 1997, A&AS, 125, 229
- Lemasle, B., François, P., Piersimoni, A., Pedicelli, S., Bono, G., Laney, C. D., Primas, F., & Romaniello, M. 2008, A&A, 490, 613
- Li, C., Kauffmann, G., Heckman, T. M., Jing, Y. P., & White, S. D. M. 2008, MNRAS, 385, 1903
- Lin, D. N. C. & Pringle, J. E. 1987, ApJ, 320, L87
- Lisker, T., Glatt, K., Westera, P., & Grebel, E. K. 2006a, AJ, 132, 2432
- Lisker, T., Grebel, E. K., & Binggeli, B. 2006b, AJ, 132, 497
- Lisker, T., Grebel, E. K., & Binggeli, B. 2008, AJ, 135, 380
- Lisker, T., Grebel, E. K., Binggeli, B., & Glatt, K. 2007, ApJ, 660, 1186
- Liu, C. T., Hooper, E. J., O'Neil, K., Thompson, D., Wolf, M., & Lisker, T. 2007, ApJ, 658, 249
- Lucy, L. B. 1977, AJ, 82, 1013
- Lupton, R., Blanton, M. R., Fekete, G., Hogg, D. W., O'Mullane, W., Szalay, A., & Wherry, N. 2004, PASP, 116, 133
- Maciejewski, W. 2004a, MNRAS, 354, 883
- Maciejewski, W. 2004b, MNRAS, 354, 892
- Magrini, L., Vílchez, J. M., Mampaso, A., Corradi, R. L. M., & Leisy, P. 2007, A&A, 470, 865
- Makarov, D. I. & Makarova, L. N. 2004, Astrophysics, 47, 229
- Mamon, G. A. 1989, A&A, 219, 98
- Mannucci, F., Basile, F., Poggianti, B. M., Cimatti, A., Daddi, E., Pozzetti, L., & Vanzi, L. 2001, MNRAS, 326, 745
- Maraston, C., Bastian, N., Saglia, R. P., Kissler-Patig, M., Schweizer, F., & Goudfrooij, P. 2004, A&A, 416, 467
- Maraston, C., Strömbäck, G., Thomas, D., Wake, D. A., & Nichol, R. C. 2009, MNRAS, 394, L107
- Martin, C. L. & Kennicutt, Jr., R. C. 2001, ApJ, 555, 301
- Martini, P. & Ho, L. C. 2004, ApJ, 610, 233
- Mastropietro, C., Moore, B., Mayer, L., Debattista, V. P., Piffaretti, R., & Stadel, J. 2005, MNRAS, 364, 607
- Mateo, M. L. 1998, ARA&A, 36, 435
- Mathis, H., Charlot, S., & Brinchmann, J. 2006, MNRAS, 365, 385
- Matković, A. & Guzmán, R. 2005, MNRAS, 362, 289
- Matteucci, F. 1994, A&A, 288, 57
- McLaughlin, D. E. & van der Marel, R. P. 2005, ApJS, 161, 304
- Mei, S., et al. 2007, ApJ, 655, 144
- Merrifield, M. R. & Kuijken, K. 1994, ApJ, 432, 575
- Michielsen, D., et al. 2008, MNRAS, 385, 1374
- Michielsen, D., et al. 2007, ApJ, 670, L101
- Mieske, S., Hilker, M., & Infante, L. 2002, A&A, 383, 823
- Mieske, S., Hilker, M., & Infante, L. 2004, A&A, 418, 445
- Mieske, S., Hilker, M., Infante, L., & Jordán, A. 2006, AJ, 131, 2442
- Mieske, S., et al. 2008, A&A, 487, 921
- Mieske, S., Infante, L., Hilker, M., Hertling, G., Blakeslee, J. P., Benítez, N., Ford, H., & Zekser, K. 2005, A&A, 430, L25
- Mihos, J. C. & Hernquist, L. 1994a, ApJ, 437, L47
- Mihos, J. C. & Hernquist, L. 1994b, ApJ, 437, 611
- Mihos, J. C. & Hernquist, L. 1996, ApJ, 464, 641
- Miller, B. W. & Lotz, J. M. 2007, ApJ, 670, 1074
- Miller, G. E. & Scalo, J. M. 1979, ApJS, 41, 513
- Miyamoto, M. & Nagai, R. 1975, PASJ, 27, 533
- Moiseev, A. V. 2001, Bull. Special Astrophys. Obs., 51, 140
- Moisseev, A. V. & Mustsevoi, V. V. 2000, Astronomy Letters, 26, 565
- Moore, B., Katz, N., Lake, G., Dressler, A., & Oemler, A. 1996, Nature, 379, 613
- Moore, B., Lake, G., & Katz, N. 1998, ApJ, 495, 139
- Moultaka, J., Boisson, C., Joly, M., & Pelat, D. 2004, A&A, 420, 459
- Mulchaey, J. S., Davis, D. S., Mushotzky, R. F., & Burstein, D. 2003, ApJS, 145, 39

- Naab, T. & Burkert, A. 2003, ApJ, 597, 893
- Naab, T., Jesseit, R., & Burkert, A. 2006a, MNRAS, 372, 839
- Naab, T., Khochfar, S., & Burkert, A. 2006b, ApJ, 636, L81
- Navarro, J. F., Frenk, C. S., & White, S. D. M. 1997, ApJ, 490, 493
- Nieto, J.-L. & Prugniel, P. 1987, A&A, 186, 30
- Ochsenbein, F., et al. 2004, in Toward an International Virtual Observatory, ed. P. J. Quinn & K. M. Górski, 118-+
- Ocvirk, P., Pichon, C., Lançon, A., & Thiébaut, E. 2006, MNRAS, 365, 74
- Ocvirk, P., Pichon, C., & Teyssier, R. 2008, MNRAS, 390, 1326
- Oemler, A. J. 1974, ApJ, 194, 1
- Ogando, R. L. C., Maia, M. A. G., Chiappini, C., Pellegrini, P. S., Schiavon, R. P., & da Costa, L. N. 2005, ApJ, 632, L61
- Oke, J. B. & Sandage, A. 1968, ApJ, 154, 21
- Osuna, P., Barbarisi, I., Salgado, J., & Laruelo, A. 2008, in Astronomical Spectroscopy and Virtual Observatory, Proceedings of the EURO-VO Workshop, held at the European Space Astronomy Centre of ESA, Villafranca del Castillo, Spain, 21-23 March, 2007, Eds.: M. Guainazzi and P. Osuna, Published by the European Space Agency., p.83, ed. M. Guainazzi & P. Osuna, 83-+
- Padovani, P., Allen, M. G., Rosati, P., & Walton, N. A. 2004, A&A, 424, 545
- Pasquini, L., et al. 2002, The Messenger, 110, 1
- Paturel, G., Petit, C., Prugniel, P., Theureau, G., Rousseau, J., Brouty, M., Dubois, P., & Cambrésy, L. 2003, A&A, 412, 45
- Pedraz, S., Gorgas, J., Cardiel, N., Sánchez-Blázquez, P., & Guzmán, R. 2002, MNRAS, 332, L59
- Peletier, R. F., et al. 2007, MNRAS, 379, 445
- Peng, C. Y., Ho, L. C., Impey, C. D., & Rix, H.-W. 2002, AJ, 124, 266
- Phillipps, S., Drinkwater, M. J., Gregg, M. D., & Jones, J. B. 2001, ApJ, 560, 201
- Poggianti, B. M., et al. 2001, ApJ, 563, 118
- Pohlen, M. & Trujillo, I. 2006, A&A, 454, 759
- Pozzetti, L., et al. 2007, A&A, 474, 443
- Price, J., et al. 2009, MNRAS, 397, 1816
- Prugniel, P., Chilingarian, I., Sil'Chenko, O., & Afanasiev, V. 2005, in IAU Colloq. 198: Near-fields cosmology with dwarf elliptical galaxies, ed. H. Jerjen & B. Binggeli, 73-76
- Prugniel, P. & Soubiran, C. 2001, A&A, 369, 1048
- Prugniel, P., Soubiran, C., Koleva, M., & Le Borgne, D. 2007, ArXiv Astrophysics e-prints, astro
- Quilis, V., Moore, B., & Bower, R. 2000, Science, 288, 1617
- Quinn, P. J., Hernquist, L., & Fullagar, D. P. 1993, ApJ, 403, 74
- Rakos, K., Schombert, J., Maitzen, H. M., Prugovecki, S., & Odell, A. 2001, AJ, 121, 1974
- Renzini, A. 2006, ARA&A, 44, 141
- Revaz, Y., Pfenniger, D., Combes, F., & Bournaud, F. 2009, Accepted to A&A, ArXiv:0904.4638

- Richards, A. M. S., et al. 2007, A&A, 472, 805
- Richstone, D. O. & Tremaine, S. 1986, AJ, 92, 72
- Rix, H.-W. & White, S. D. M. 1992, MNRAS, 254, 389
- Roche, N., Bernardi, M., & Hyde, J. 2009, ArXiv e-prints
- Rose, J. A., Arimoto, N., Caldwell, N., Schiavon, R. P., Vazdekis, A., & Yamada, Y. 2005, AJ, 129, 712
- Roth, M. M., et al. 2005, PASP, 117, 620
- Saha, P. & Williams, T. B. 1994, AJ, 107, 1295
- Saglia, R. P., Kronawitter, A., Gerhard, O., & Bender, R. 2000, AJ, 119, 153
- Salpeter, E. E. 1955, ApJ, 121, 161
- Sánchez, S. F., Cardiel, N., Verheijen, M. A. W., Pedraz, S., & Covone, G. 2007, MNRAS, 376, 125
- Sánchez-Blázquez, P., Gorgas, J., & Cardiel, N. a nd González, J. J. 2006a, A&A, 457, 809
- Sánchez-Blázquez, P., Gorgas, J., & Cardiel, N. 2006b, A&A, 457, 823
- Sánchez-Blázquez, P., Gorgas, J., Cardiel, N., & González, J. J. 2006c, A&A, 457, 787
- Sánchez-Blázquez, P., Gorgas, J., Cardiel, N., & González, J. J. 2006d, A&A, 457, 809
- Sargent, W. L. W., Schechter, P. L., Boksenberg, A., & Shortridge, K. 1977, ApJ, 212, 326
- Sarzi, M., Rix, H., Shields, J. C., Ho, L. C., Barth, A. J., Rudnick, G., Filippenko, A. V., & Sargent, W. L. W. 2005, ApJ, 628, 169
- Scalo, J. M. 1986, Fundamentals of Cosmic Physics, 11, 1
- Scarlata, C., et al. 2007, ApJS, 172, 406
- Schawinski, K., et al. 2009, ApJ, 690, 1672
- Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., & Davis, M. 1998, ApJ, 500, 525
- Schuberth, Y., Richtler, T., Hilker, M., Dirsch, B., Bassino, L. P., Romanowsky, A. J., & Infante, L. 2010, A&A, 513, A52+
- Semelin, B. & Combes, F. 2002, A&A, 388, 826
- Sersic, J. L. 1968, Atlas de galaxias australes (Cordoba, Argentina: Observatorio Astronomico, 1968)
- Shields, J. C., et al. 2007, ApJ, 654, 125
- Shlosman, I., Frank, J., & Begelman, M. C. 1989, Nature, 338, 45
- Sil'chenko, O. 2006, ApJ, 641, 229
- Sil'chenko, O. & Chilingarian, I. 2010, Astronomy Letters in press, arXiv:100x.xxxx
- Sil'chenko, O. K. 1992, Докторская диссертация, ed. Sil'chenko, O. K.
- Sil'chenko, O. K. 1997, Astronomy Reports, 41, 567
- Sil'chenko, O. K. 2000, AJ, 120, 741
- Sil'Chenko, O. K. 2005, Astronomy Letters, 31, 227
- Sil'chenko, O. K., Afanas'ev, V. L., & Vlasyuk, V. V. 1992, AZh, 69, 1121
- Sil'chenko, O. K. & Afanasiev, V. L. 2000, A&A, 364, 479
- Silchenko, O. K. & Afanasiev, V. L. 2008, Astronomy Reports, 52, 875

- Sil'Chenko, O. K., Chilingarian, I. V., & Afanasiev, V. L. 2009, Astronomy Letters, 35, 75
- Sil'chenko, O. K. & Moiseev, A. V. 2006, AJ, 131, 1336
- Sil'chenko, O. K., Moiseev, A. V., & Afanasiev, V. L. 2009, ApJ, 694, 1550
- Sil'chenko, O. K., Moiseev, A. V., Afanasiev, V. L., Chavushyan, V. H., & Valdes, J. R. 2003, ApJ, 591, 185
- Silchenko, O. K. & Shapovalova, A. I. 1989, Soobshcheniya Spetsial'noj Astrofizicheskoj Observatorii, 60, 44
- Sil'chenko, O. K., Vlasyuk, V. V., & Alvarado, F. 2001, AJ, 121, 2499
- Silk, J. & Rees, M. J. 1998, A&A, 331, L1
- Simien, F. & Prugniel, P. 2002, A&A, 384, 371
- Slyz, A. D., Devriendt, J. E. G., Silk, J., & Burkert, A. 2002, MNRAS, 333, 894
- Smith, R. J., Hudson, M. J., Lucey, J. R., Nelan, J. E., & Wegner, G. A. 2006, MNRAS, 369, 1419
- Smith, R. J., Lucey, J. R., & Hudson, M. J. 2007, MNRAS, 381, 1035
- Smith Castelli, A. V., Faifer, F. R., Bassino, L. P., Romero, G. A., Cellone, S. A., & Richtler, T. 2010, submitted to BAAA, arXiv:1002.3830
- Smith Castelli, A. V., Faifer, F. R., Richtler, T., & Bassino, L. P. 2008, MNRAS, 391, 685
- Solanes, J. M., Manrique, A., García-Gómez, C., González-Casado, G., Giovanelli, R., & Haynes, M. P. 2001, ApJ, 548, 97
- Somerville, R. S., Hopkins, P. F., Cox, T. J., Robertson, B. E., & Hernquist, L. 2008, MNRAS, 391, 481
- Spitzer, L. 1969, ApJ, 158, L139
- Spitzer, L. 1987, Dynamical evolution of globular clusters, ed. Spitzer, L.
- Spitzer, L. J. & Baade, W. 1951, ApJ, 113, 413
- Springel, V. 2000, MNRAS, 312, 859
- Springel, V. 2005, MNRAS, 364, 1105
- Springel, V., Frenk, C. S., & White, S. D. M. 2006, Nature, 440, 1137
- Springel, V. & Hernquist, L. 2003, MNRAS, 339, 289
- Springel, V., Yoshida, N., & White, S. D. M. 2001, New Astronomy, 6, 79
- Stasińska, G. & Sodré, Jr., L. 2001, A&A, 374, 919
- Statler, T. S. 1991, ApJ, 382, L11
- Steinmetz, M. & Mueller, E. 1994, A&A, 281, L97
- Stiavelli, M., Miller, B. W., Ferguson, H. C., Mack, J., Whitmore, B. C., & Lotz, J. M. 2001, AJ, 121, 1385
- Strateva, I., et al. 2001, AJ, 122, 1861
- Struble, M. F. & Rood, H. J. 1987, ApJS, 63, 543
- Sullivan, III, W. T. & Johnson, P. E. 1978, ApJ, 225, 751
- Tanaka, T., Kunieda, H., Hudaverdi, M., Furuzawa, A., & Tawara, Y. 2006, PASJ, 58, 703
- Taylor, M., Boch, T., Fitzpartick, M., Allan, A., Paioro, L., Taylor, J., & Tody, D. 2009, IVOA Recommendation, version 1.11, 21 April 2009
- Taylor, M. B. 2005, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 347, Astronomical Data Analysis Software and Systems XIV, ed. P. Shopbell, M. Britton, & R. Ebert, 29-+

- Thacker, R. J., Tittley, E. R., Pearce, F. R., Couchman, H. M. P., & Thomas, P. A. 2000, MNRAS, 319, 619
- Thomas, D., Brimioulle, F., Bender, R., Hopp, U., Greggio, L., Maraston, C., & Saglia, R. P. 2006, A&A, 445, L19
- Thomas, D., Maraston, C., & Bender, R. 2003, MNRAS, 339, 897
- Thomas, D., Maraston, C., Bender, R., & Mendes de Oliveira, C. 2005, ApJ, 621, 673
- Tinsley, B. M. 1968, ApJ, 151, 547
- Tinsley, B. M. 1972a, PASP, 84, 645
- Tinsley, B. M. 1972b, ApJ, 178, 319
- Tonry, J. & Davis, M. 1979, AJ, 84, 1511
- Toomre, A. 1977, ARA&A, 15, 437
- Toomre, A. & Toomre, J. 1972, ApJ, 178, 623
- Trager, S. C., Worthey, G., Faber, S. M., Burstein, D., & González, J. J. 1998, ApJS, 116, 1
- Tremaine, S. & Weinberg, M. D. 1984, ApJ, 282, L5
- Tremonti, C. A., et al. 2004, ApJ, 613, 898
- Treuthardt, P., Buta, R., Salo, H., & Laurikainen, E. 2007, AJ, 134, 1195
- Tully, R. B. 1982, ApJ, 257, 389
- Tully, R. B. & Fisher, J. R. 1977, A&A, 54, 661
- Tully, R. B. & Fisher, J. R. 1988, Catalog of Nearby Galaxies, ed. Tully, R. B. & Fisher, J. R.
- van der Marel, R. P. 1994, Velocity profiles and dynamical modeling of galaxies, ed. van der Marel, R. P.
- van der Marel, R. P. & Franx, M. 1993, ApJ, 407, 525
- van Dokkum, P. G. 2001, PASP, 113, 1420
- van Moorsel, G. A. & Wells, D. C. 1985, AJ, 90, 1038
- van Zee, L., Barton, E. J., & Skillman, E. D. 2004a, AJ, 128, 2797
- van Zee, L., Skillman, E. D., & Haynes, M. P. 2004b, AJ, 128, 121
- Vazdekis, A. 1999, ApJ, 513, 224
- Vazdekis, A. & Arimoto, N. 1999, ApJ, 525, 144
- Velazquez, H. & White, S. D. M. 1999, MNRAS, 304, 254
- Vlasyuk, V. V. 1993, Bull. Special Astrophys. Obs., 36, 107
- Vlasyuk, V. V. & Sil'chenko, O. K. 2000, A&A, 354, 28
- Walker, I. R., Mihos, J. C., & Hernquist, L. 1996, ApJ, 460, 121
- Wheeler, J. C., Sneden, C., & Truran, Jr., J. W. 1989, ARA&A, 27, 279
- White, S. D. M. & Frenk, C. S. 1991, ApJ, 379, 52
- Wolf, M. J., Drory, N., Gebhardt, K., & Hill, G. J. 2007, ApJ, 655, 179
- Wong, T. & Blitz, L. 2002, ApJ, 569, 157
- Wood, D. B. 1966, ApJ, 145, 36
- Worthey, G. 1994, ApJS, 95, 107

- Worthey, G., Faber, S. M., & Gonzalez, J. J. 1992, ApJ, 398, 69
- Worthey, G., Faber, S. M., Gonzalez, J. J., & Burstein, D. 1994, ApJS, 94, 687
- Worthey, G. & Ottaviani, D. L. 1997, ApJS, 111, 377
- Yagi, M. & Goto, T. 2006, AJ, 131, 2050
- Yamada, Y., Arimoto, N., Vazdekis, A., & Peletier, R. F. 2006, ApJ, 637, 200
- Yang, Y., Zabludoff, A. I., Zaritsky, D., & Mihos, J. C. 2008, ApJ, 688, 945
- Yoshii, Y. & Arimoto, N. 1987, A&A, 188, 13
- Younger, J. D., Cox, T. J., Seth, A. C., & Hernquist, L. 2007, ApJ, 670, 269
- Ziegler, B. L. 2000, in Reviews in Modern Astronomy, Vol. 13, Reviews in Modern Astronomy, ed. R. E. Schielicke, 211-+
- Zolotukhin, I. & Chilingarian, I. 2008, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 394, Astronomical Data Analysis Software and Systems XVII, ed. R. W. Argyle, P. S. Bunclark, & J. R. Lewis, 393-+
- Zolotukhin, I., Samokhvalov, N., Bonnarel, F., & Chilingarian, I. 2007, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 376, Astronomical Data Analysis Software and Systems XVI, ed. R. A. Shaw, F. Hill, & D. J. Bell, 355-+

Zolotukhin, I. Y. 2009, PhD thesis, Кандидатская диссертация, МГУ им. М. В. Ломоносова