

UNIVERSITE LYON I – CLAUDE BERNARD
LOMONOSOV MOSCOW STATE UNIVERSITY
le type de doctorat : Arrêté du 06 janvier 2005

Igor CHILINGARIAN

date de soutenance: 23/Nov/2006

FORMATION ET EVOLUTION DES GALAXIES ELLIPTIQUES NAINES

directeurs de la thèse:
Philippe PRUGNIEL / Olga SIL'CHENKO

membres du jury:

Philippe PRUGNIEL (CRAL Observatoire de Lyon, FRANCE)
Georges PATUREL (CRAL Observatoire de Lyon, FRANCE)
prof. Jacques BERGEAT (CRAL Observatoire de Lyon, FRANCE)
Olga SIL'CHENKO (Sternberg Astronomical Institute, RUSSIA)
prof. Yuri EFREMOV (Sternberg Astronomical Institute, RUSSIA)– rapporteur
Dmitry MAKAROV (Special Astrophysical Observatory, RUSSIA)– rapporteur
prof. Boris SHUSTOV (Institute of Astronomy RAS, RUSSIA)– président
prof. Ariane LANCON (Observatoire de Strasbourg, FRANCE)– rapporteur

ABSTRACT

Cette thèse présente des études d'observation de l'évolution des galaxies elliptiques naines. Les dE sont population dominante dans les amas des galaxies, mais leur origine et évolution est une question de discussion. Plusieurs scénarios d'enlèvement de gaz des dE existent : vents galactiques, pression dynamique dépouillant, harassment gravitationnel. Nous présentons la nouvelle méthode d'évaluation des paramètres de population stellaires et de la cinématique interne, basés sur des spectres observés par ajustage de précision par les populations synthétiques de PEGASE.HR. Nous nous appliquons cette technique aux observations 3D-spectroscopique des galaxies dE dans l'ama Virgo et les groupes proches et la spectroscopie multiobjet de plusieurs douzaines de dEs dans l'ama Abell 496. Nous présentons la découverte de jeunes noyaux dans les dE galaxies lumineuses dans l'ama Virgo. Basé sur l'analyse des données de nos observations nous concluons cela : (1) il y a une connection évolutionnaire entre les dEs et les dIrrs (2) le scénario le plus probable de l'enlèvement de gaz est pression dynamique dépouillant par le matière intergalactique.

Mots-clés: galaxies: dwarf – galaxies: evolution – galaxies: elliptical and lenticular, dE – galaxies: stellar content

FORMATION AND EVOLUTION OF DWARF ELLIPTICAL GALAXIES

This thesis presents observational studies of evolution of dwarf elliptical galaxies. dE's are numerically dominant population in clusters of galaxies, but their origin and evolution is a matter of debate. Several scenarios of gas removal from dE's exist: galactic winds, ram pressure stripping, gravitaional harassment. We present new method to estimate stellar population parameters and internal kinematics, based on fitting observed spectra in the pixel space by PEGASE.HR synthetic populations. We apply this technique to 3D-spectroscopic observations of dE galaxies in the Virgo cluster and nearby groups and multiobject spectroscopy of several dozens of dE's in the Abell 496 cluster. We present discovery of young nuclei in bright dE galaxies in the Virgo cluster. Based on the analysis of observational data we conclude that: (1) there is an evolutionary connection between dE's and dIrr's, (2) the most probable scenario of gas removal is ram pressure stripping by the intergalactic medium.

Keywords: galaxies: dwarf – galaxies: evolution – galaxies: elliptical and lenticular, dE – galaxies: stellar content

Centre de Recherche Astronomique de Lyon, Observatoire de Lyon, 9 avenue Charles André, F-69230 Saint-Genis Laval, France ; CNRS, UMR 5574

Sternberg Astronomical Institute of the Moscow State University, 13 Universitetski prospect, Moscow, 119992, Russia

Оглавление

Résumé	4
Введение	7
1 Метод аппроксимации спектров	23
1.1 Описание метода	28
1.2 Аппаратная функция спектрографа	30
1.3 Проверка метода и анализ ошибок	31
1.3.1 Анализ ошибок	32
1.3.2 Стабильность решения	38
1.3.3 Возможные систематические ошибки	40
2 Карликовые галактики в скоплении Дева	47
2.1 IC 3653	47
2.1.1 Спектральные наблюдения и обработка данных	48
2.1.2 Возраст и металличность, полученные с помощью анализа Ликских индексов	53
2.1.3 Звездные населения и внутренняя кинематика, полученные из аппроксимации спектров	59
2.1.4 Фотометрия и морфология на основе изображений HST .	60
2.1.5 Обсуждение	64
2.2 Молодые ядра dE галактик скопления Дева	71
2.2.1 Наблюдения и обработка данных	72
2.2.2 Звездные населения и внутренняя кинематика	72
2.2.3 Обсуждение	78

3	Карликовые галактики в группах	82
3.1	NGC 770 (группа NGC 772)	82
3.2	NGC 127 (группа NGC 128)	85
4	Исследование галактик в скоплении Abell 496	90
4.1	Наблюдения и обработка данных	90
4.1.1	Фотометрические наблюдения и обработка данных	90
4.1.2	Спектральные наблюдения и обработка данных	91
4.2	Аппроксимация спектров и результаты	93
4.3	Фундаментальные Соотношения	100
4.4	Обсуждение и Выводы	103
4.5	Приложение: сЕ галактика в скоплении Abell 496	105
	Заключение	108
A	3D-спектры в Виртуальной Обсерватории	113
A.1	3D-спектроскопия, краткое введение	113
A.2	IVOA Characterisation Data Model	114
A.3	Характеризация 3D данных	116
A.4	Заключение	116

Résumé

Cette thèse est consacrée à l’observation de l’évolution des galaxies naines elliptiques (dE). Bien que les objets de ce type soient les plus répandus dans l’Univers, leur origine et leur évolution sont toujours sujets à débat. En se basant sur les études morphologiques, la plupart des études ont conclu qu’il existait un lien évolutif entre les galaxies naines elliptiques et les galaxies naines irrégulières (dIrr) riches en gaz : l’évolution séculaire transforme les dIrr en dE. Les observations démontrent que les dE n’ont pas de formation stellaire continue et ne contiennent pas de gaz ionisé. Donc, le problème fondamental dans la construction d’une théorie d’évolution des dE est de bien choisir le scénario de perte de gaz entraînant l’interruption de la formation stellaire.

Bien que de nombreuses observations spectroscopiques aient été publiées, aucun essai sérieux n’a été fait pour établir un lien entre la cinématique et les populations stellaires de ces objets. Pour combler cette lacune, nous présentons dans ce travail les résultats d’observations de haute qualité obtenues avec de grands télescopes.

Le chapitre 1 présente une nouvelle technique d’ajustement des spectres intégré le long d’une ligne de visée par le modèle d’évolution PEGASE.HR. Grâce à sa grande sensibilité, notre méthode ouvre de nouveaux horizons dans les études de cinématique et de population stellaire utilisant des spectres en absorption.

L’analyse des observations des galaxies dE dans des amas et des groupes est donnée dans les chapitres 2, 3 et 4. Les données ont été obtenues en utilisant le spectromètre MPFS-IFU (télescope russe de 6m), le spectromètre multi-objets FLAMES-Giraffe (ESO-VLT) et l’imageur à grand champ Megacam (CFHT). Notre travail est le premier exemple d’une étude d’un échantillon de galaxies dE observées avec la spectroscopie 3D.

L’analyse permet de conclure que l’évolution des naines est causée par des

effets environnementaux. Seule, la pression dynamique dans les amas, les parties centrales des groupes qui contiennent des gaz chauds ou dans les halos des galaxies géantes ne permet pas d'expliquer l'apparence des dE. Un autre scénario qui ne peut pas être complètement exclu est un "harcèlement" gravitationnel dû aux nombreuses rencontres avec les autres membres de l'amas. Bien que cette possibilité soit prédite par les simulations cosmologiques, elle ne peut être réalisée que si un maximum de 1 halos de matière noire sans trace de matière visible.

La possibilité de former des disques (incluant ceux en contre rotation) dans les galaxies dE évoluant dans un environnement "tranquille" de groupes de galaxies est démontrée dans un exemple réel.

Bien que la spectroscopie 3D soit devenue une technique d'observation très utilisée, il n'existe pas de format standard pour l'accès ou le stockage des données. Cette question est devenue plus importante avec l'évolution rapide des concepts d'Observatoire Virtuel. Dans les annexes, nous démontrons la possibilité de construire une description complète et auto suffisante des données 3D (modèle de données), essentielle pour fournir l'accès aux échantillons et par conséquent la création d'archives prêtes pour la science.

Résultats principaux de la thèse

1. Nouvelle technique pour l'ajustement simultané des spectres de populations stellaires et de la cinématique interne en utilisant des modèles spectraux synthétiques.
2. Des champs de vitesses radiales à deux dimensions, des dispersions de vitesses et des paramètres équivalant aux SSP des populations stellaires (âge et métallicité) des galaxies naines elliptiques et lenticulaires dans l'amas de Virgo : IC783, IC3468, IC3509, IC3653 ; et les galaxies de type précoce de faible luminosité dans des groupes : NGC127 (groupe de NGC128), NGC770 (groupe de NGC772) ; et des champs de vitesses à deux dimensions du gaz ionisé dans NGC127. Tous les résultats ont été obtenus par l'analyse des données spectroscopiques 3D provenant du spectromètre MPFS IFU du télescope russe de 6 m.

3. Catalogue de paramètres, incluant les vitesses radiales, les dispersions de vitesses centrales, les mesures des indices Lick, les âges "SSP-équivalent", la métallicité et le ratio de composition [Mg/Fe] dans 46 galaxies de type précoce (28 sont dE ou dS0) de l'amas Abell 496. Les résultats ont été obtenus par l'analyse de la spectroscopie multi-objets à haute résolution ($R=7000$) utilisant le spectromètre FLAMES-Giraffe au VLT de l'ESO.
4. Découverte de noyaux dont l'évolution est indépendante dans les galaxies dE de l'amas Virgo. En tenant compte de ce résultat et de la cinématique complexe de ces galaxies, preuves de la présence de disque stellaire, une conclusion est tirée à propos de la pression dynamique, scénario le plus probable de perte de gaz dans les dE.
5. Techniques de description universelle, de sauvegarde et de mécanismes d'accès aux données spectroscopiques 3D dans le cadre de l'Observatoire Virtuel.

Введение

История исследований диффузных (или карликовых) эллиптических (dE) галактик насчитывает более 60 лет. Впервые на значительное различие между спутниками Туманности Андромеды – компактной М 32 и диффузной NGC 205 – обратил внимание Бааде в 1944 году (Baade, 1944). Основная отличительная особенность диффузных эллиптических галактик – очень слабая концентрация яркости к центру, практически экспоненциальный профиль яркости, в отличие от сильно сконцентрированных профилей компактных карликовых и нормальных эллиптических галактик, а также балджей дисковых галактик, описываемых законом $\exp -(r/r_0)^{1/4}$.

Впоследствии стали ясно, что именно диффузные эллиптические галактики представляют численно доминирующее население в регионах Вселенной с высокой плотностью: скоплениях галактик. Более 70% известных членов ближайшего скопления Девы – dE галактики (каталог VCC: Binggeli et al. 1985). Несмотря на то, что dE галактики вездесущи, их происхождение и эволюция до сих пор остаются открытыми вопросами современной астрофизики. Не в последнюю очередь это объясняется трудностями наблюдения диффузных галактик. Их поверхностная яркость значительно ниже, чем у нормальных эллиптических галактик. Обычно dE галактики бедны металлами, что делает абсорбционные линии в спектрах слабыми и еще более затрудняет их детальные исследования. К тому же, для измерения дисперсий скоростей звезд (порядка 50 km/s) и скоростей максимального вращения (порядка 30 km/s) требуется высокое спектральное разрешение, идеальное качество и стабильность калибровок. В результате, первая работа, посвященная кинематике dE галактик появилась только при широком внедрении CCD-детекторов в 1990 году (Bender & Nieto, 1990) – через 15 лет после первых исследований кинема-

тики гигантских эллиптических галактик (Bertola & Capaccioli 1975, Binney 1976). Данные, полученные Bender & Nieto (1990) указывали на то, что dE галактики либо совсем не вращаются, либо вращаются недостаточно для поддержания сплюснутой формы. Эти выводы были оспорены лишь более десяти лет спустя.

Структура dE галактик значительно отличается от гигантских эллиптических и линзовидных галактик. На диаграмме центральная поверхностная яркость – абсолютная звездная величина (Kormendy, 1985) они формируют две различные последовательности (см. Рис.3 в Ferguson & Binggeli 1994), которые соединяются в районе $M_B = -18.0$. В целом, центральная поверхностная яркость гигантских и компактных (таких как M 32) эллиптических галактик увеличивается с уменьшением светимости, однако для dE галактик она быстро падает.

Слабые карликовые сфероидальные галактики низкой поверхностной яркости (dSph), наблюдающиеся в огромном количестве в Локальном Объемe многие авторы относят к тому же классу, что и более яркие карликовые эллиптические галактики в скоплениях, однако в данной работе под термином "карликовые" (или "диффузные") эллиптические галактики мы будем понимать исключительно "яркие" объекты с абсолютной величиной $M_B < -14.0$, наблюдаемые в близких скоплениях и группах галактик. Обсуждения того, являются ли dSph галактики продолжением функции светимости dE галактик в сторону слабых светимостей, мы оставим за рамками данной диссертации.

Фундаментальный обзор Ferguson & Binggeli (1994) охватывает практически все наблюдательные и теоретические работы, посвященные карликовым эллиптическим галактикам до середины 90х годов, поэтому мы сразу перейдем к описанию более современных исследований.

Серия работ Prugniel & Simien (1994, 1996, 1997) посвящена фундаментальным параметрам галактик ранних типов. Карликовые эллиптические галактики присутствуют в них как один из классов рассматриваемых объектов. Проведен анализ отклонений положений галактик от фундаментальной

плоскости (FP, Djorgovski & Davis, 1987) и рассмотрен ряд возможных причин этих отклонений. Наклон FP объясняется комбинацией ряда факторов: а) разнообразие звездных населений (вклад около 50 процентов); б) вращение (около 25 процентов и более для слабых галактик); в) негомологичность пространственных структур (около 25 процентов). Эффекты возраста, т.е. наличие звездного населения среднего возраста в примерно 10 процентах галактик (в основном, галактиках поля, в группах и бедных скоплениях) приводит к асимметрии (skewness) остаточных отклонений, которые коррелируют с плотностью окружения (Prugniel et al. 1999). Обращено внимание на то, что хотя dE галактики располагаются на фундаментальной плоскости, они населяют ее область, отличную от той, где располагаются гигантские галактики.

В течение последних 5 лет были опубликованы несколько сравнительно больших выборок длиннотелевых спектров карликовых эллиптических галактик. De Rijcke et al. (2001) представили первые свидетельства вращения по крайней мере некоторых карликовых эллиптических галактик (данные FORS1, VLT). Pedraz et al. (2002) приводят кинематические разрезы вдоль больших осей для 6 dE галактик скопления Дева, пять из которых показывают значительное вращение (данные получены на 2.2-м телескопе INT, La Palma). В работе Simien & Prugniel (2002) представлены кинематические профили (лучевые скорости и дисперсии скоростей вдоль большой оси) для 15 dE и dS0 галактик скопления Дева. Данные были получены на 2-м телескопе Обсерватории Верхнего Прованса (спектрограф CARELEC). Большая часть галактик обнаружила вращение, хотя встречались и не вращающиеся объекты (например, IC 3381, IC 3468).

В двух работах Geha et al. (2002, 2003) представлены результаты спектроскопии высокого разрешения ($R = 7000$ и $R = 27000$) выборки dE галактик скопления Дева, полученные на спектрографе ESI (Echelle Spectrograph and Imager), установленном на 10-м телескопе им. Кека. Авторы разделили объекты на два класса – вращающиеся и не вращающиеся. Были построены динамические модели, указавшие на довольно низкие отношения масса/светимость – от 3 до 6 в солнечных единицах. Впервые были проведены

оценки параметров звездного населения путем измерения Ликских индексов. Галактики оказались весьма разнообразными – возрасты менялись в широких пределах, от 2 до 12 Gyr (среднее значение 5 Gyr), металличности – от $[\text{Fe}/\text{H}]=-0.8$ до $[\text{Fe}/\text{H}]=0.0$ (среднее значение $[\text{Fe}/\text{H}]=-0.3$). Эти результаты радикальным образом отличались от предсказаний иерархической модели формирования галактик, которая отдавала карликовым галактикам роль ”строительного материала” при формировании более крупных систем, и, таким образом, предполагала старый возраст и низкую металличность звездного населения.

Относительно высокие металличности и не очень старые возрасты оказались типичными и для объектов в еще одной выборке карликовых галактик скопления Дева (Van Zee et al. 2004a,b) – где оценки также были сделаны посредством измерения Ликских индексов на длиннощелевых спектрах, полученных с 2-диапазонным спектрографом 5-м телескопа обсерватории Mount Palomar. Авторы также обращают внимание на сходство кинематики dE галактик с карликовыми иррегулярными галактиками (dIrr), и даже утверждают, что вращающиеся dE галактики соответствуют соотношению Талли-Фишера.

Детальные исследования отдельно взятых dE галактик выявили наличие вложенных под-структур различных типов в некоторых из них. Jerjen et al. (2000) обнаружили четкую туго-закрученную спираль в звездном диске галактики IC 3328 (скопление Дева). Последующие фотометрические исследования обнаружили диски, бароподобные структуры и спирали в ряде других dE галактик в том же скоплении (Barazza et al. 2002). Наконец, массовое исследование этого феномена на полной выборке галактик из Слоановского обзора (Lisker et al. 2006) указали на наличие подобных под-структур в значительной части ярких dE галактик ($M_B < -15.5$).

Глубокий обзор в линии нейтрального водорода 21 см (Conselice et al. 2003) установил наличие межзвездной среды в 15 процентах dE галактик из представленной выборки (скопление Дева), при этом все объекты располагались на периферии скопления. Michielsen et al. (2003, 2004) указали на наличие теплой межзвездной среды в трех карликовых галактиках скопления Печь,

в двух из них было исследовано распределение нейтрального водорода HI (Buyle et al. 2005)

Наконец, некоторые из представителей класса dE галактик, внутренняя кинематика которых была исследована детально, показали присутствие кинематически-выделенных ядер — структур, показывающих независимое вращение от основного галактического сфероида или диска. В настоящее время кинематически-выделенные ядра обнаружены в двух галактиках в группах (De Rijcke et al. 2004), одной галактике в скоплении Девы - VCC 510 (Thomas et al. 2006), и галактике NGC 770 (Geha et al., 2005; эта работа), которую формально нужно причислить к галактикам низкой светимости, а не к карликам.

Подобное многообразие проявлений карликовых эллиптических галактик очень напоминает ситуацию с гигантскими эллиптическими галактиками около 25 лет назад.

Основные свойства карликовых галактик, которые необходимо учитывать при построении теории их эволюции, обозначены в таблице 2 работы Ferguson & Binggeli (1994). Здесь мы упомянем лишь важнейшие из них, а также новые, которые обнаружились после опубликования вышеупомянутого обзора: зависимость поверхностной яркости от светимости; зависимость количества dE галактик от плотности окружения (morphology-density relation, Phillipps et al. 1998); корреляция доли галактик с ядрами (dE,N) со светимостью и плотностью окружения (Ferguson & Binggeli, 1994; Cote et al. 2006); довольно низкие отношения масса-светимость для ярких галактик ($M_B < -14$); наличие зависимости металличность-светимость, хотя и со значительным разбросом; солнечные или суб-солнечные отношения $[\alpha/\text{Fe}]$; относительно высокие спектроскопические металличности (выше, чем измерения по цветам); высокий разброс возрастов — от 2 до 12 Gyr.

Большинство численных космологических моделей предсказывают гораздо большее число гало темной материи, соответствующих массам карликовых галактик, чем количество реально наблюдаемых объектов в скоплениях и группах. Внешние причины, которые могут предотвратить звездообразование и формирование карликовых галактик, доступных наблюдениям (согласно

Ferguson & Binggeli, 1994):

1. **Фотоионизация.** Быстрое охлаждение карликовых прото-галактик можно предотвратить, если газ остается фотоионизованным метагалактическим полем излучения. Babul & Rees (1992) и Efstathiou (1992) указывают на то, что ионизирующее излучение при $z > 1$ достаточно высоко, чтобы сохранить газ в гало карликовых галактик достаточно стабильным, так что он не сможет ни уйти, ни сколлапсировать и сформировать звезды. Нехватка количества наблюдаемых линий поглощения в Ly α -forest далеких квазаров указывает на то, что межгалактическая среда (IGM) сильно ионизована. Поле ионизирующего излучения, по оценке Lu et al. (1991) может оказаться достаточным чтобы предотвратить охлаждение газа в гало с дисперсиями скоростей ниже 35 km s^{-1} до $z \sim 1$. Если предположить, что активные галактические ядра (AGN) – доминирующий источник ионизирующего излучения, то следует ожидать связи пространственных распределений карликовых галактик и активных ядер.
2. **Повторный нагрев.** Если излучения AGN не достаточно для ионизации IGM, альтернативное объяснение недостатка линий Ly α -forest может быть объяснено повторным нагревом газа в эпоху формирования галактик. Механизмы включают в себя (а) нагрев ветрами сверхновых звезд от протогалактик, (б) Комптоновский нагрев энергетичными объектами на очень высоких красных смещениях, (в) ряд других причин (Blanchard et al. 1992). В любом случае, при температуре межгалактического T_{IGM} только галактики с вириальными температурами выше T_{IGM} могут пройти стадию коллапса газа и сформировать звезды.
3. **Слияния и ударные волны.** Эпоха формирования карликовых галактик также может быть эпохой многочисленных слияний. Прогрев ударными волнами, возникающими в результате этих слияний могут частично предотвратить охлаждение газа, однако одной этой причины недостаточно, чтобы избежать формирование избыточного числа карликовых галактик.

4. Нестабильности. Термическая нестабильность горячего газа на момент фазы охлаждения может косвенным образом повлиять на функцию светимости карликовых галактик путем влияния на начальную функцию масс звезд и, соответственно, количество ОВ-звезд и, следовательно, сверхновых.

5. Выметание газа лобовым давлением Хотя этот механизм является одним из общепринятых объяснений остановки звездообразования в недалеком прошлом, он наименее вероятен на этапе формирования галактик, поскольку в ту эпоху хотя плотность среды была много выше, чем в настоящее время, случайные скорости галактик относительно среды были намного меньше, чем сейчас, что приводит к характерным временам процесса выметания газа больше, чем Хаббловское время.

Трудно не обратить внимание на морфологическое сходство карликовых эллиптических (dE) и богатых газом карликовых иррегулярных галактик (dIrr). Фактически, если убрать газ и остановить звездообразование в карликовой иррегулярной галактике, через несколько Гуг пассивной эволюции она станет неотличима от объектов, классифицируемых в настоящее время как dE галактики.

Таким образом, наиболее важный вопрос в построении теории происхождения и эволюции карликовых эллиптических галактик – механизм устранения ионизованного газа и, как следствие, остановки звездообразования. Остановка звездообразования возможна по нескольким причинам.

Зависимость светимость-металличность может означать то, что более массивные галактики сохраняют межзвездную среду дольше, чем мало-массивные, либо начальная функция масс звезд зависит от массы галактики. Наиболее простой механизм для объяснения зависимости светимость-металличность – реакция на звездообразование. Эта реакция может иметь несколько форм, и в настоящее время не до конца ясно, какая из них преобладает: (1) ветры от взрывов сверхновых звезд (Dekel & Silk, 1986); (2) ветры ОВ-звезд на ранних этапах вспышки звездообразования (первые 5 миллионов лет, до того как сверхновые начинают играть основную роль, Leitherer et al.

1992); (3) фотоионизация ОВ-звездами – как и в случае ветров ОВ-звезд, этот процесс эффективен только первые 10 миллионов лет – до эпохи массовых взрывов сверхновых, однако он может несколько затормозить темп звездообразования причем различным образом на различных расстояниях от центра галактики (Lin & Murray, 1992).

Механизмы, которые могут постепенно превратить карликовую иррегулярную галактику в карликовую эллиптическую, включают: (1) выметание газа лобовым давлением (Gunn & Gott, 1972; Marcolini et al. 2003); (2) приливное взаимодействие с другими членами скопления/группы.

Выметание газа лобовым давлением из дисковой галактики в рамках классической теории (Gunn & Gott, 1972) требует довольно высокого значения плотности межгалактической среды, достижимой лишь во внутренних 100 крс скопления скопления Девы. Помимо лобового давления, будут иметь место испарение, турбулентное вязкое выметание, и ламинарное выметание газа. Учитывая все эти факторы, Nulsen (1982) дает оценку характерного времени выметания газа 2 Гуг для галактики с массой газа $10^8 M_\odot$ в условиях внутренних 300 крс от центра скопления Дева (временная шкала существенно сократится для случая скопления Волосы Вероники).

Сжатие газа лобовым давлением в центральных областях ярких карликовых галактик может дать ответ на вопрос формирования ядер в dE'N. Как показали последние исследования (Lisker et al. 2006, эта работа) ядра зачастую имеют существенно более молодое звездное население по сравнению со всей галактикой, что является дополнительным аргументом в пользу действия лобового давления.

Поскольку эффективность звездообразования зависит от плотности, в принципе, любой механизм, который может изменить плотность ISM в спокойной карликовой иррегулярной галактике, может увеличить темп звездообразования. Если после этого газ будет удален галактическими ветрами или лобовым давлением, галактика превратится из иррегулярной в эллиптическую. Подобным механизмом могут стать приливные взаимодействия с другими членами скопления. Даже достаточно далекие прохождения могут ока-

заться достаточными (Icke, 1985).

В работе Mastropietro et al. (2005) обсуждается механизм прямой морфологической трансформации dIrr в dE при приливных взаимодействиях с членами скопления, похожего на скопление Дева, исключительно за счет динамических эффектов, без учета возможных индуцированных вспышек звездообразования. Результат N-body моделирования указывает на то, что диски dIrr не будут полностью разрушены, и довольно хорошо воспроизводят наблюдения вложенных структур в dE галактиках (Jerjen et al. 2000, Barazza et al. 2002). Однако, для осуществления подобных трансформаций требуется число динамических членов скопления, предсказываемое Λ CDM моделированием, которое превосходит количество реально наблюдаемых галактик в несколько сотен раз. В то же время, нельзя полностью исключать, что более 99 процентов членов скопления Дева представляют собой темные гало без видимого вещества, так как современные наблюдательные методы не в состоянии установить или исключить их присутствие.

Общая характеристика работы

Данная работа посвящена исследованию происхождения и эволюции карликовых эллиптических галактик (диффузных эллиптических галактик, dE) – самого распространенного типа галактик во Вселенной. Несмотря на то, что карликовые эллиптические галактики 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, (2) выметание газа галактическими ветрами, возникающими вследствие вспышек сверхновых звезд, (3) потеря газа вследствие приливного воздействия.

Недавние исследования показали огромное разнообразие наблюдательных проявлений диффузных эллиптических галактик: встречаются вращающиеся и невращающиеся галактики (по-видимому поддерживаемые анизотроп-

ными 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 и мультиобъектную спектроскопию большой выборки более далеких объектов.

В результате исследований, выполненных автором за период с 2003 г. по 2006 г., разработана оригинальная методика восстановления кинематических параметров (лучевые скорости, дисперсии скоростей) и определения параметров звездного населения (возраст, металличность) по спектрам, интегрированным вдоль луча зрения. Методика применена к наблюдениям карликовых эллиптических галактик, выполненным на 6-м телескопе БТА САО РАН и 8-м телескопе ESO VLT. Разработаны способы хранения и механизмы доступа к данным панорамной спектроскопии в Виртуальной Обсерватории.

Актуальность темы

В настоящее время исследование эволюции галактик является одной из основных и наиболее популярных задач современной астрофизики. В то время как механизмы эволюции гигантских галактик (как эллиптических, так и спиральных), исследованы в достаточной мере, этого нельзя сказать о существенно более сложных для изучения, хотя и гораздо более многочисленных, диффузных эллиптических галактик. Принимая во внимание последние данные о параметрах звездного населения в dE галактиках: 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 dE галактик является краеугольным камнем для понимания эволюции звездных систем в целом.

Классическая методика определения параметров звездного населения путем измерения Ликских индексов была предложена как эмпирическая более 20 лет назад, а ее первое астрофизическое обоснование было дано в 1994 году. С того времени методы эволюционного моделирования шагнули далеко вперед, и появилась возможность для 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 информацию, содержащуюся в спектрах, более оптимально, является актуальной проблемой для анализа современных спектральных данных.

Цель работы

Создание методики анализа абсорбционных спектров, в т.ч. с низкими отношениями сигнал-шум, и ее применение к данным панорамной спектроскопии карликовых эллиптических галактик.

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

Научная новизна работы

1. Разработана оригинальная методика оценки параметров звездного населения и кинематики с помощью анализа спектров, интегрированных вдоль луча зрения
2. Впервые в мире получены данные панорамной спектроскопии для карликовых эллиптических и линзовидных галактик в скоплениях и группах;

получены поля скоростей и пространственные распределения параметров звездного населения

3. Получены параметры звездного населения, оценки химического состава и центральные дисперсии скоростей для статистически значимой выборки карликовых эллиптических галактик в скоплении Abell 496
4. Открыты молодые ядра в карликовых эллиптических галактиках
5. На основе полученных результатов сделан вывод о наиболее вероятном сценарии формирования dE галактик – выметании газа лобовым давлением

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
2. Разработанная методика позволила успешно анализировать наблюдения карликовых эллиптических галактик, имеющих низкие поверхностные яркости, и в будущем позволит провести обработку существующих абсорбционных спектров на качественно новом уровне
3. Предложенная методика хранения и механизмы доступа к данным 3D-спектроскопии для Виртуальной Обсерватории открывает возможности для создания архивов обработанных 3D-данных

Апробация результатов работы

Результаты работы докладывались автором на научных семинарах ИНАСАН, ГАИШ МГУ, CRAL Observatoire de Lyon, GEPI Observatoire de Paris-Meudon и следующих Российских и международных конференциях:

1. Ломоносов-2003, секция физика-астрономия (г. Москва, Россия, 14 марта 2003)
2. ADASS-XIII (г. Страсбург, 12-15 октября 2003)
3. Всероссийская Астрономическая Конференция ВАК-2004 (Москва, 24-28 мая 2004)
4. JENAM-2004 (г. Гранада, Испания, 14-17 сентября 2004)
5. ADASS-XIV (г. Пасадина, США, 24-27 октября 2004)
6. International Astronomical Union Colloquium 198 (г. Ле Диаблере, Швейцария, 14-18 марта 2005)
7. IVOA Interoperability Meeting (г. Киото, Япония, 14-18 мая 2005)
8. ADASS-XV (г. Сан-Лоренцо де Эль Эскориаль, Испания, 2-5 октября 2005)
9. IVOA Interoperability Meeting (г. Виллафранка дель Кастильо, Испания, 6-7 октября 2005)
10. ESO Workshop: Science Perspectives for 3D Spectroscopy (г. Гаршинг, Германия 10-14 октября 2005)
11. IVOA Interoperability Meeting (г. Виктория, Канада, 15-18 мая 2006)
12. Mapping the Galaxy and Nearby Galaxies (о. Ишигаки, Япония, 26-30 июня 2006)
13. IVOA Interoperability Meeting (г. Москва, Россия, 18-22 сентября 2006)
14. ADASS-XVI (г. Тусон, США, 15-18 октября 2006)

Публикации и личный вклад автора

Основные результаты диссертации изложены в 9 работах, опубликованных в отечественных и зарубежных изданиях, а также в стандарте, предложенном Международным Альянсом Виртуальных Обсерватории к использованию в архивах астрономических данных.

В перечисленных работах автору принадлежит:

- В работах [1-5, 8, 9, 11] – создание методики анализа спектров и ее реализация в виде программного пакета, анализ спектральных данных и научная интерпретация полученных результатов
- В работе [6] – применение модели данных Characterisation DM к данным панорамной спектроскопии, создание примеров метаданных для наблюдений со спектрографом MPFS
- В работе [7] – предоставление методики в виде программного пакета для анализа спектров
- В работе [10] – применение модели данных Characterisation DM к данным длиннощелевой и панорамной спектроскопии, сканирующего интерферометра Фабри-Перо, а также редакция текста документа

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Она содержит 122 страницы, 28 рисунков, 12 таблиц. Список литературы насчитывает 134 наименования.

В **первой главе** содержится краткий обзор существующих методов оценки параметров звездного населения и приводится описание разработанной методики, использующей аппроксимацию наблюдений модельными спектрами. Исследованы точность, устойчивость, возможные систематические ошибки метода.

Во **второй главе** приводятся результаты анализа панорамной спектроскопии четырех карликовых эллиптических галактик в скопления Дева: IC 783, IC 3468, IC 3509, IC 3653. Найдены молодые ядра в галактиках IC 783, IC 3509 и IC 3468.

В **третьей главе** приводятся результаты анализа панорамной спектроскопии двух галактик ранних типов низкой светимости в группах: NGC 770, NGC 127. Дана интерпретация контр-вращающегося ядра в NGC 770, приведены аргументы в пользу наличия аккреции газа на NGC 127.

В **четвертой главе** приведены результаты исследования большой выборки галактик ранних типов в скоплении Abell 496 (мультиобъектная спектроскопия и глубокая многоцветная фотометрия). Построена фундаментальная плоскость для этих объектов, сделаны выводы относительно их эволюции.

В **заключении** приводятся выводы, выносимые на защиту, и обсуждаются основные результаты работы.

В **приложении** описывается применение модели данных Characterisation к данным панорамной спектроскопии для создания их универсального описания и предоставления доступа к ним в рамках Виртуальной Обсерватории.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Чилингарян И. В. Классификация объектов по распределению энергии в спектре. Труды Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов-2003", с. 16-17.
2. Chilingarian I., Prugniel P., Sil'chenko O., Afanasiev V. Diffuse elliptical galaxies, the first 3D spectroscopic observations. Proceedings of JENAM-2004 (in press). Preprint: astro-ph/0412293
3. Prugniel P., Chilingarian I., Sil'chenko O., Afanasiev V. Internal kinematics and stellar populations of dE galaxies: clues to their formation/evolution. Proceedings of IAU Colloquium 198, edited by B. Binggeli, H. Jerjen, 2005, p. 73; preprint: astro-ph/0510398
4. Chilingarian I., Prugniel P., Sil'chenko O., Afanasiev V. 3D Spectroscopic studies of dE galaxies. Proceedings of IAU Colloquium 198, edited by B. Binggeli, H. Jerjen, 2005, p. 105
5. Prugniel P., Chilingarian I., Popovic L. The history and dynamics of the stellar population in the central kpc of active galaxies. Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplement, 2005, v.7, p.42
6. Chilingarian I., Bonnarel F., Louys M., McDowell J. Handling 3D data in the

- Virtual Observatory. Proceedings of ADASS XIV, ASP Conference Series, 2006, v. 351, p. 371
7. Koleva M., Bavouzet N., Chilingarian I., Prugniel, P. Validation of stellar population and kinematical analysis of galaxies. Proceedings of ESO Workshop "Scientific Perspectives of 3D Spectroscopy", in press, preprint: astro-ph/0602362
 8. Chilingarian I., Ferraz Lagana T., Cayatte V., Durret F., Adami C., Balkowski C., Chemin L., Prugniel P. Evolution of dE galaxies in Abell 496. Kinematics and stellar populations of 46 galaxies. Proceedings of "Mapping the Galaxy and Nearby Galaxies" (in press).
 9. Chilingarian I., Prugniel P., Sil'chenko O., Afanasiev V. Kinematics and stellar populations of the dwarf elliptical galaxy IC 3653. 2006, MNRAS, in press.
 10. Data Model for Astronomical DataSet Characterisation, version 0.9, edited by J. McDowell, F. Bonnarel, I. Chilingarian, M. Louys, A. Micol, and A. Richards; IVOA Note from May 5, 2006 by IVOA Data Model Working Group.
 11. Чилингарян И., Сильченко О., Афанасьев В., Прюньэль Ф., Молодые ядра в карликовых эллиптических галактиках. 2006, принято к печати в ПАЖ.

Глава 1

Метод аппроксимации спектров

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 цвет-величина (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 (средней 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 населением 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 несколь-

ких "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:

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

где $L(\lambda)$ - светимость галактики на длине волны λ , $L(\lambda, M, \tau)$ - светимость звезды массы M и 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 О.К.Сильченко (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 следующей главе). 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 $[\alpha/\text{Fe}]$. Этот факт стимулировал создание новых моделей для несолнечных отношений элементов. Наиболее цитируемая работа этого класса – Thomas, Maraston & Bender (2003). В 4-й главе мы применяем их модели к большой выборке галактик ранних типов для изучения механизмов обогащения α -элементами в карликовых галактиках.

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

Van der Marel & Franx (1993) 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 Описание метода

Существуют различные метода для восстановления истории звездообразования (SFH) из наблюдаемых спектров (Ocvirk et al. 2003, Moulaka et al. 2004, de Bruyne et al. 2004, Ocvirk et al. 2006a, 2006b). 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 (e. g. De Bruyne et al. 2004, Ocvirk et al. 2006a,b), 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 наблю-

дательных данных, используемых нами, не достаточен для таких детальных исследований.

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

$$\chi^2 = \sum_{N_\lambda} \frac{(F_i - P_{1p}(T_i(t, Z) \otimes \mathcal{L}(v, \sigma, h_3, h_4) + P_{2q}))^2}{\Delta F_i^2}, \quad (1.2)$$

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 всех случаев, кроме NGC 770, см. Главу 3). 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 Myr до 20 Gyr, шаг увеличивается от 5 Myr до 2 Gyr) и 10 по металличности ($[\text{Fe}/\text{H}]$ 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, NASA ¹), реализующий ограниченный вариант алгоритма Levenberg-Marquardt. Таким образом, мы можем фиксировать и ограничивать любые параметры LOSVD/SFH.

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 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 этого мы провели детальный анализ LSF для наших наблюдений.

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

В случае MPFS похожая работа была проведена некоторое время назад (Moiseev, 2001), и ее результаты качественно совпадают с нашими.

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, 2004). 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 , σ , $h3$ and $h4$.

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.

1.3 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 населеннями (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.

1.3.1 Анализ ошибок

Оценка ошибок параметров звездного населения для нелинейной процедуры, которую мы используем, является довольно нетривиальной задачей. Полное и детальное описание одного из возможных подходов к поиску альтернативных решений при использовании родственного нашему подходу, даны в работе Moulata & Pelat (2000).

Мы провели Монте-Карло моделирование (около 10000 на каждый из спектров 3-point 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: $2 \text{ Gyr} < t < 14 \text{ Gyr}$ с шагом 200 Myr , $-0.45 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.40$ с шагом 0.01 dex , $30 \text{ km s}^{-1} < \sigma < 100 \text{ km s}^{-1}$ 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 ” t - Z ” и ” t - Z - σ ”. Результат содержит два

Parameter	v	σ	t	Z	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).

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

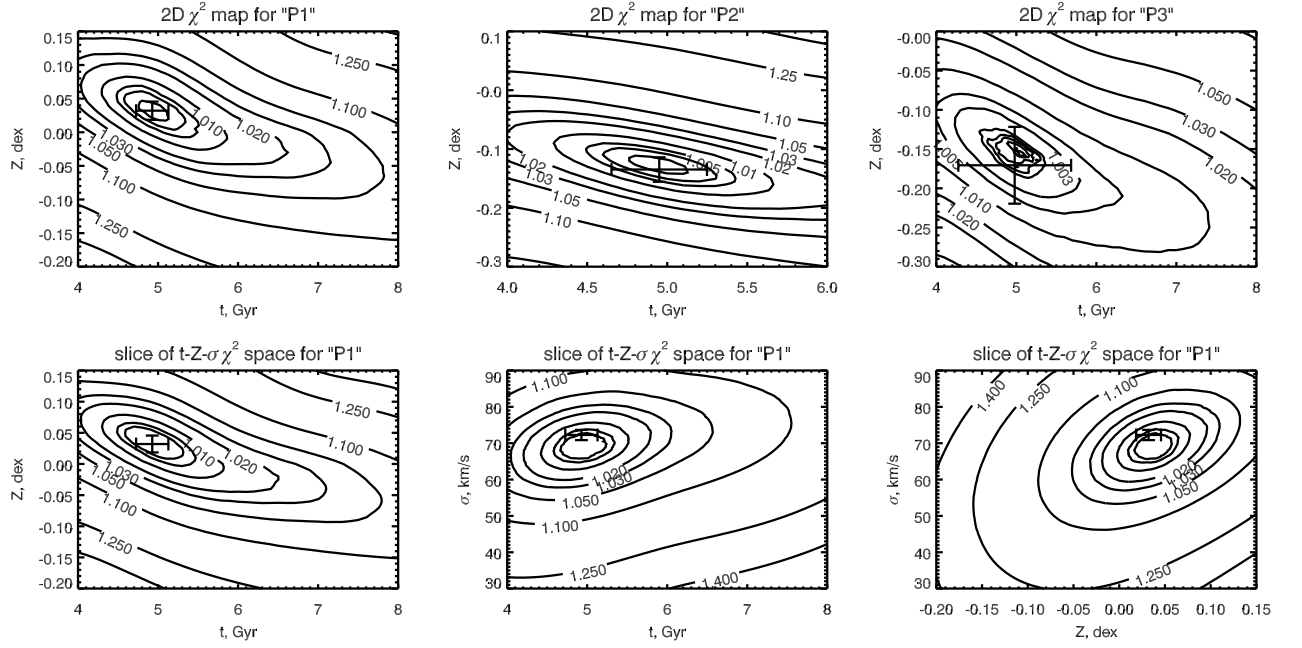


Рис. 1.1: 2-мерные карты распределения χ^2 для 3-points разбиения (верхний ряд), и срезы 3-мерного распределения χ^2 (t - Z - σ) для бина "P1".

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, $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.05$ dex) и определяются только кинематические параметры (v, σ, h_3, h_4); (б) 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 $[\text{Fe}/\text{H}] = +0.2$) и солнечным отношением $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ (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 (Aguerre 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), наблюдается резкий градиент металличности, от -0.05 до +0.21.

На Рис. 1.2 показаны 2-мерное поле скоростей (Рис. 1.2a), 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 населения далеко от идеального из-за отсутствия высоко-металлических 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.

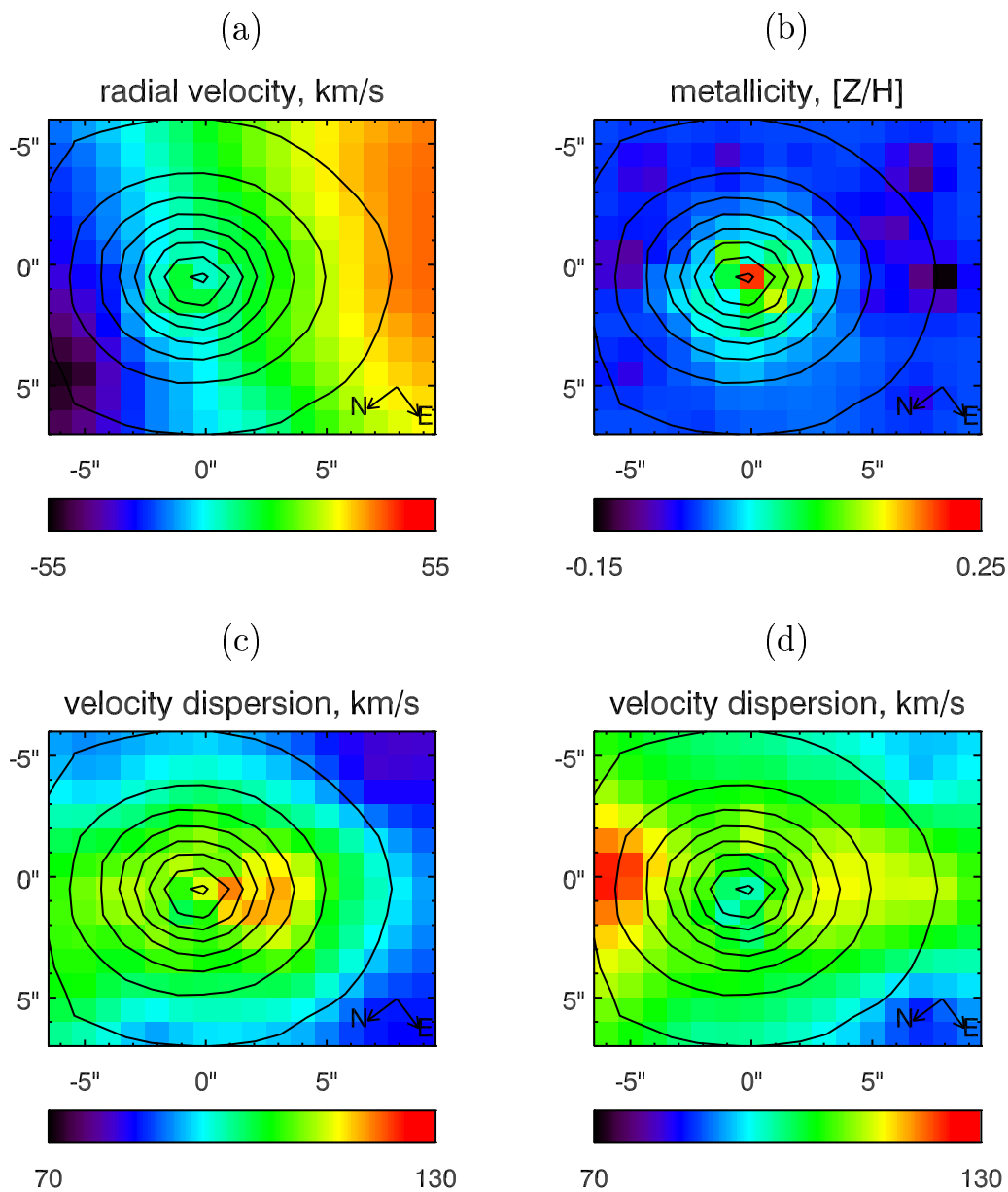


Рис. 1.2: Кинематика и металличность NGC 3412. Поле лучевых скоростей и карты SSP-эквивалентной показаны на панелях (a) и (b) соответственно; (c) и (d) представляют карты дисперсий скоростей звезд для случая изменяющегося (включенного в аппроксимацию) и фиксированного звездного населения. Проявление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

1.3.2 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 $100\text{--}150 \text{ km s}^{-1}$) 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 $\lambda > 4700\text{\AA}$, и вторая для полного диапазона длин волн MPFS (от 4200 до 5600\AA) но с исключенными регионами вблизи бальмеровских линий водорода ($H\gamma$ и $H\beta$). Причина для проведения первого эксперимента следующая: область $4150\text{\AA} < \lambda < 4700\text{\AA}$ содержит большое количество спектральных деталей, относящихся к металлам, соответственно возможно возникновение систематических ошибок в определении металличности в случае каких-либо неизвест-

	P1	P2	P3
v , km s ⁻¹	601.8± 1.0	603.4± 1.4	603.8± 3.0
	600.9± 1.0	603.1± 1.7	603.7± 3.4
σ , km s ⁻¹	70.9± 1.6	67.3± 2.2	52.1± 5.0
	71.8± 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 $\lambda > 4700\text{\AA}$, вторые – к полному диапазону с исключенными бальмеровскими линиями. См. также Таб. 2.4

ных 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 (1σ). Этот результат весьма важен, поскольку он показывает возможность определения возраста звездного населения при отсутствии бальмеровских линий, поскольку при аппроксимации спектра целиком использование информации содер-

жащейся в нем существенно оптимальнее, чем при традиционном подходе, использующем Ликсие индексы.

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 $n = 9$ – оптимальное значение порядка мультипликативного континуума для данных со спектрографа Giraffe, анализируемых в четвертой главе.

1.3.3 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 $\lambda < 6000\text{\AA}$). Недо- или перевычитание фона ночного неба приводит к аддитивной ошибке, вызывающую изменение глубин абсорбционных линий объекта (изменение эквивалентной ширины). Это будет влиять на результаты метода аппроксимации,

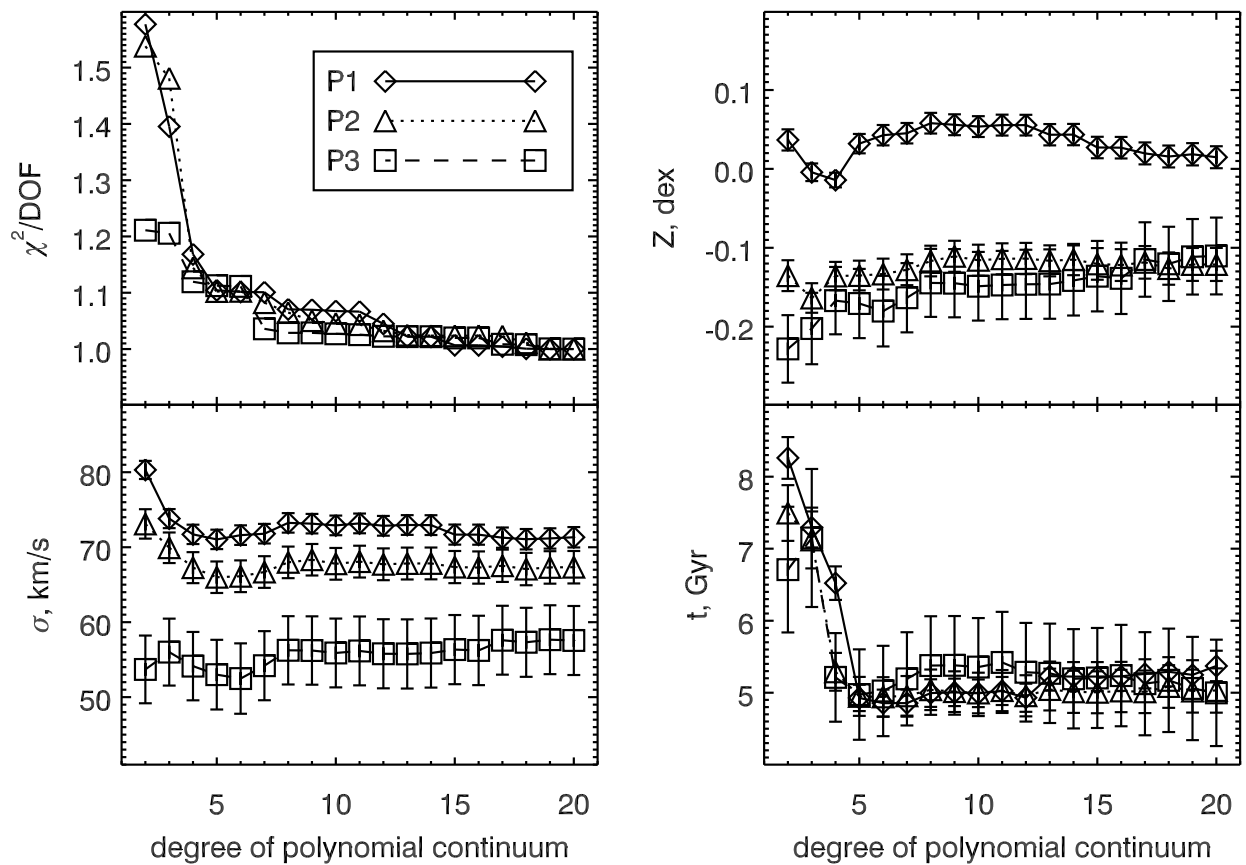


Рис. 1.3: Стабильность параметров по отношению к порядку мультипликативного полиномиального континуума. Различные значки соответствуют трем бинам 3-point разбиения куба данных IC 3653.

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 $5000\text{\AA}$, результаты показаны на Рис. 1.4. 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 $\lambda = 4358\text{\AA}$, $5461\text{\AA}$, $[NI]$ $\lambda = 5199\text{\AA}$ и $[OI]$ $\lambda = 5577\text{\AA}$. Эксперименты были проделаны для интегральных спектров

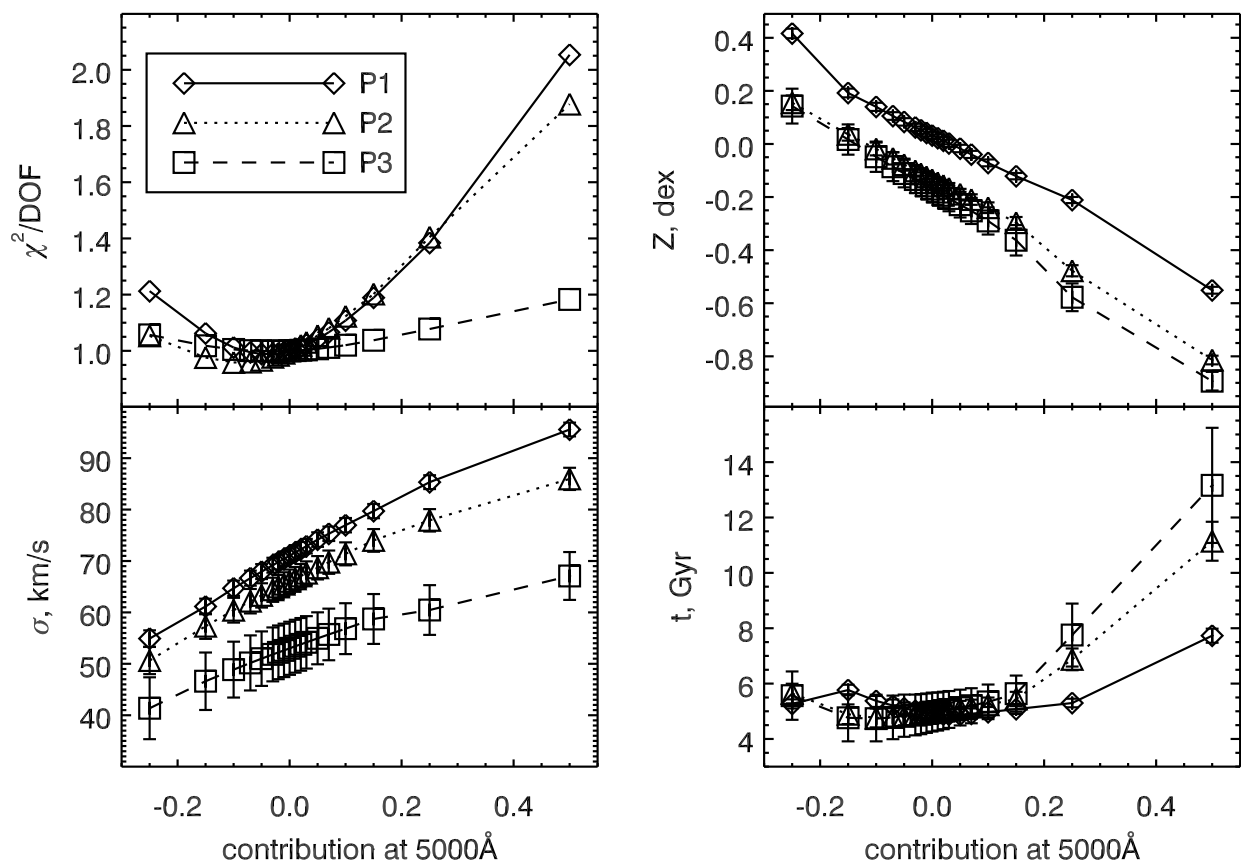


Рис. 1.4: Влияние аддитивных компонент на результат. По оси абсцисс – вклад в уровень континуума на длине волны $\lambda=5000\text{\AA}$. Различные значки соответствуют трем бином 3-point разбиения куба данных IC 3653.

	P1	P2	P3
v , km s ⁻¹	604.3± 1.0	606.0± 1.5	609.4± 3.2
	604.4± 1.0	605.9± 1.6	610.3± 3.7
σ , km s ⁻¹	71.5± 1.5	64.9± 2.4	54.4± 5.2
	80.5± 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).

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 порядка (см. Таб. 1.3). В бине "P3" 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 "P2" и еще более сильный эффект для "P3". 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 $\mu_B = 20 \text{ mag arcsec}^{-2}$ 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 $[\alpha/\text{Fe}]$

Для оценки надежности и точности определения параметров звездного населения, найденных методом аппроксимации спектров для различных условий, мы провели ряд тестов, используя как Монте-Карло моделирование, так и реальные опубликованные данные. Принимая во внимание достаточно большую долю массивных объектов с высокими значениями $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ в выборке галактик ранних типов скопления Abell 496, наиболее принципиальные вопросы для проверки результатов: получаем ли мы несмещенные оценки SSP-эквивалентных возрастов и металличности в случае несолнечных отношений $[\text{Mg}/\text{Fe}]$? Зависят ли оценки от присутствия $\text{H}\beta$? Если присутствуют систематические ошибки, возможно ли применить какие-либо эмпирические коррекции?

На сегодняшний день еще не существует синтетических моделей звездных населений для несолнечных отношений α -элементов, представляющих распределения энергии в спектре целиком в каком-либо диапазоне длин волн. Поэтому мы решили использовать опубликованные спектральные данные, где возрасты и металличности могут быть оценены обоими способами: по измерениям Ликских индексов и аппроксимацией спектров. Поскольку существует тесная связь между соотношением $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ и центральной дисперсией скоростей (а также светимостей) галактик: существенно положительные отношения $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ наблюдаются в галактиках с $\sigma > 120 \text{ km s}^{-1}$, нам не требуется высокого спектрального разрешения данных. Мы решили использовать спектры из Обзора Близких Галактик Поля (Jansen et al. 2001), полученные со спектрографом FAST на 1.5-м телескопе F. L. Whipple Observatory. Диапазон длин волн этих данных составляет от $3600\text{\AA}$ до $7500\text{\AA}$, спектральное разрешение около $6\text{\AA}$ в центре диапазона ($\sigma_{inst} = 155 \text{ km s}^{-1}$ на $5200\text{\AA}$). Мы также использовали спектры утреннего неба, доступные через архив NOAO FAST, полученные в том же режиме спектрографа в те же периоды времени, что и данные обзора. Наша задача была определить LSF спектрографа FAST и ее вариации вдоль диапазона длин волн. Практически все 200 галактик, включенные в обзор NFGS представлены двумя спектрами: ядерным,

представляющим внутреннюю часть галактики и общим спектром, интегрированным вдоль щели.

Мы выбрали только спектры галактик ранних типов (E, S0, Sa) без заметных эмиссионных линий.

Для измерения Ликских индексов мы ухудшили спектральное разрешение NFGS путем свертки оригинальных спектров с гауссовым контуром, имеющим ширину $\sigma_{degr} = \sqrt{\sigma_{Lick}^2 - \sigma_{FAST}^2 - \sigma_g^2}$, где σ_g – дисперсия скоростей галактики (для данного спектра), σ_{FAST} – ширина LSF на длине волны, соответствующей данному Ликскому индексу, и σ_{Lick} – разрешение, необходимое для измерения данного Ликского индекса. Если значение под квадратным корнем оказывалось отрицательным, ухудшения разрешения не производилось. Вместо этого применялась сигма-коррекция согласно Kuntschner (2004) в измерении Ликских индексов, используя $\sigma_{corr} = \sqrt{\sigma_{FAST}^2 + \sigma_g^2 - \sigma_{Lick}^2}$.

После измерения Ликских индексов, выборка была ограничена объектами со значениями индекса $H\beta$ между 1.4 и 2.6Å и индекса $\langle \text{MgFe} \rangle$ между 2.0 и 4.2Å: в этом диапазоне модели Thomas et al. (2003) для $Z = -0.5 \dots +0.5$ dex и $t = 2 \dots 15$ Gyr формируют однозначно обратимую сетку для любого $[\text{Mg}/\text{Fe}]$. Окончательная выборка содержит 49 спектров: 25 ядерных и 24 интегрированных.

Каждый спектр аппроксимировался 3 раза для разных диапазонов длин волн: (1) между 4300 and 5600Å (полный диапазон MPFS), (2) между 4800 и 5600Å (спектральный диапазон Giraffe для галактик Abell 496 включая $H\beta$), (3) между 4880 и 5600Å (то же, но исключая $H\beta$). Эти три серии тестов были проведены для оценки стабильности определения возрастов для объектов с несолнечными отношениями $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ по отношению к диапазону длин волн.

Мы сравнили значения возрастов и металличностей, полученные путем аппроксимации спектров, с результатами, полученными инверсией Ликских индексов: $H\beta$ и $\langle \text{MgFe} \rangle$. Для 38 из 49 спектров (77 процентов) оценки возрастов совпали в пределах ошибок (1σ). Мы не обнаружили корреляции между $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ и $t_{fit} - t_{Lick}$. Это – важный аргумент для использования метода аппроксимации спектров моделями PEGASE.HR для оценки возрастов звездного населения даже для несолнечных отношений $[\text{Mg}/\text{Fe}]$.

Глава 2

Карликовые галактики в скоплении Дева

В этой главе мы представляем 3D спектроскопию dE галактик в скоплении Дева для того, чтобы наложить дополнительные наблюдательные ограничения на эволюционные сценарии dE галактик. Поля скоростей и пространственные карты параметров звездных населений необходимы, чтобы проверить, возможно ли обнаружить отклик кинематических подструктур в распределении звездного населения.

2.1 IC 3653

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 Мpc в проекции. Ее лучевая скорость $588 \pm 4 \text{ km s}^{-1}$ (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} ,

¹<http://leda.univ-lyon1.fr/>

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.

Мультизрчковый спектрограф (MPFS), установленный на 6-м телескопе БТА Специальной Астрофизической Обсерватории Российской Академии Наук – волоконно-линзовый спектрограф с микролинзовым растром, содержащим 16×16 квадратных пространственных элементов и 17 дополнительных световодов для измерения фона ночного неба, который наблюдается в 4 arcmin от объекта. Размер каждого элемента – $1'' \times 1''$. Мы использовали дифракционную решетку 1200 gr mm^{-1} , предоставляющую дисперсию $0.75 \text{ Å pixel}^{-1}$ 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 ($4100\text{Å} - 5650\text{Å}$). 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):

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

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:

1. 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 ($5\text{-}\sigma$) 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 $\text{FWHM}=5$ 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 раstra.

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.
10. Калибровка куба данных по потокам. Кривая спектральной чувствительности, рассчитанная на предыдущем шаге, используется для абсолютной калибровки потоков. В результате значения в кубе данных соответствуют $F_\lambda[\text{erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{\AA}^{-1}]$.

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 $18.5 \text{ mag arcsec}^{-2}$ в центре до $21.2 \text{ mag arcsec}^{-2}$ 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.

Bin	N_{spax}	$m(\text{AB})$	$\mu(\text{AB})$	S/N
P1	9	16.3	18.7	69
P2	77	15.2	19.9	49
P3	122	15.7	20.9	21

Таблица 2.2: Параметры ”3-points” разбиения: количество пространственных элементов, средняя AB величина, средняя AB поверхностная яркость (mag arcsec^{-2}), и среднее отношение сигнал-шум на $\lambda = 5000\text{\AA}$.

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.

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, $H\beta$ 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 основа-

ны на эмпирической библиотеке звездных спектров ELODIE.3 (Prugniel & Soubiran 2001, 2004) и поэтому привязаны к распределениям $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ в солнечном окружении (см. Chen et al., 2003 и ссылки в ней). Чтобы показать, что эти ограничения не являются критическими для IC 3653, на Рис. 2.1 представлены Mgb vs $\langle \text{Fe} \rangle$ и модели Thomas et al. (2003) для различных отношений $[\text{Mg}/\text{Fe}]$. Эти данные позволяют заключить, что IC 3653 имеет солнечное отношение $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ 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 $\langle \text{Fe} \rangle' = 0.72\text{Fe}_{5270} + 0.28\text{Fe}_{5335}$ и “нечувствительный к отношениям” $[\text{MgFe}] = \sqrt{\text{Mg} \langle \text{Fe} \rangle'}$ (Thomas et al. 2003). Статистические ошибки измерения Ликских индексов рассчитывались согласно работе Cardiel et al. (1998).

На Рис. 2.1с представлена популярная пара индексов: $\text{H}\beta$ - 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 Worthey et al. 1994). Из-за дефекта CCD-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 $\text{H}\beta$ на значительной части поля зрения.

Для решения этой проблемы мы заменили все пропущенные значения в кубе данных соответствующими значениями модели наилучшей аппроксима-

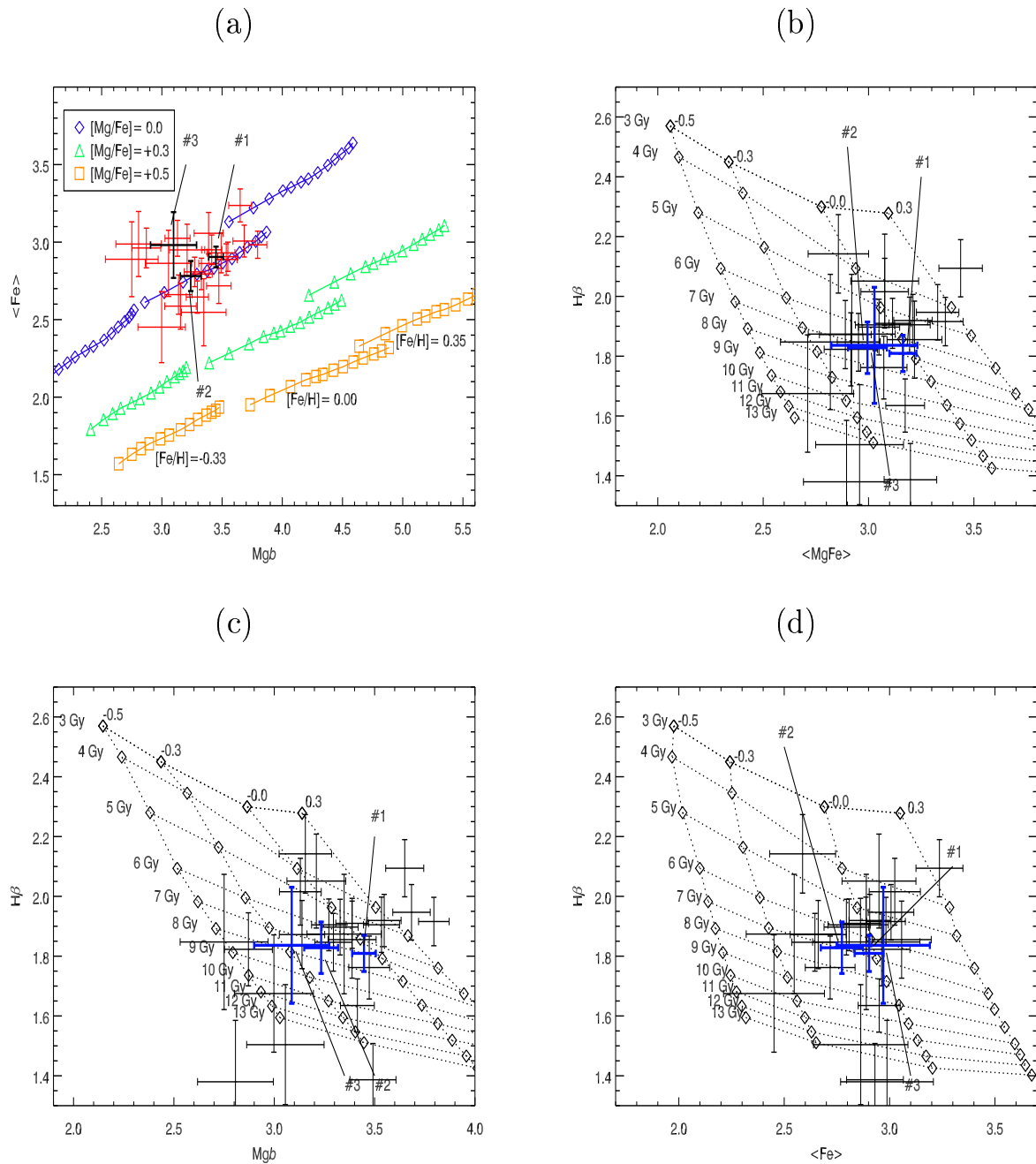


Рис. 2.1: Диаграммы $Mgb - \langle Fe \rangle'$ (a), $H\beta - [MgFe]$ (b), $H\beta - Mgb$ (c) и $H\beta - \langle Fe \rangle'$ (d). На панели (a) отмечены модели Thomas et al. (2003). Сетки моделей на панелях (b), (c) и (d) составлены из измерений Ликских индексов на синтетических спектрах простого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

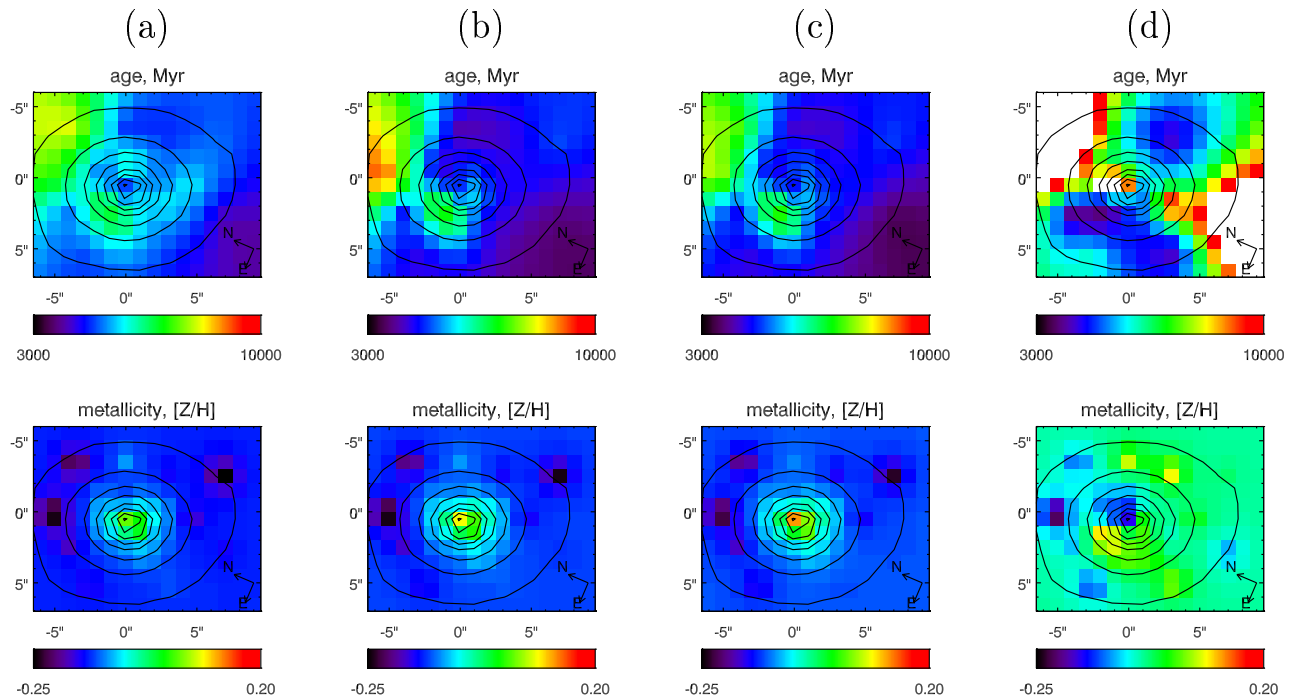


Рис. 2.2: Карты возраста и металличности, полученные путем инверсии двух-индексных диаграмм для измерений на модельных спектрах (наилучшая аппроксимация): (a) $Mgb - H\beta$, (b) $[MgFe] - H\beta$, (c) $\langle Fe \rangle - H\beta$; и на реальных данных: (d) $\langle Fe \rangle - H\beta$.

ции, 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 $H\beta$ и $H\gamma$ спектральный диапазон MPFS не содержит индикаторов возраста. Хороший индикатор для спектров среднего разрешения, $H\gamma + Mg + Fe_{125}$ (Vazdekis & Arimoto 1999), не может быть использован в нашем случае поскольку необходимое отношение сигнал-шум порядка 100 в районе $\lambda = 4340\text{\AA}$ не может быть достигнуто даже после сложения всех спектров в кубе данных из-за снижения эффективности спектрографа в синей части спектрального диапазона.

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
H β	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
<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-points разбиения. Все значения в Å. Две строки для каждого индекса соответствуют измерениям сделанным на реальных спектрах и на наилучшей модели (см. текст). Символ "Ti" указывает на то, что индекс Fe5015 сильно подвержен влиянию абсорбции титана (см., к примеру, Sil'chenko & Sharovalova, 1989).

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 $Mgb - H\beta$, 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 $H\beta$ может быть подвержен влиянию эмиссии $H\beta$, Mgb – линией $[NI]$ ($\lambda = 5199\text{\AA}$), расположенной на области красного континуума. Хотя мы не видим значимых эмиссионных линий в остаточных отклонения (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. 2.1a), поэтому мы не ожидаем систематических ошибок.

Мы провели инверсию двухиндексных диаграмм для трех комбинаций индексов: $Mgb - H\beta$, $[MgFe] - H\beta$, $\langle Fe \rangle' - H\beta$. Результаты представлены на Рис. 2.2. Для адаптивного разбиения использовалось отношения сигнал-шум на $\lambda = 5300\text{\AA}$. Показанные 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 $[MgFe] - H\beta - 0.15$ dex).

Карта возраста не содержит существенных деталей, среднее значение для возраста при использовании $[MgFe] - H\beta$ пары – 6 ± 2.5 Gyr. Индексы $[MgFe]$ и $\langle Fe \rangle'$ не очень чувствительны к возрасту, таким образом оценки возраста зависят в основном от значения $H\beta$ 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 сигнал-шум 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 $588 \pm 5 \text{ km s}^{-1}$. 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 сканированием 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 $45\text{-}50 \text{ km s}^{-1}$ 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).

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 (Рис. 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 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 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 $ST_{475} \sim 16.25 \text{ mag arcsec}^2$, немного асимметричные по отношению к центру профиля Sérsic: $n=1.88$, $R_e=6.9 \text{ arcsec}$, $\epsilon=0.11$ (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 удлинённую структуру ($a/b \sim 3.5$), имеющую размер около 7 arcsec 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,

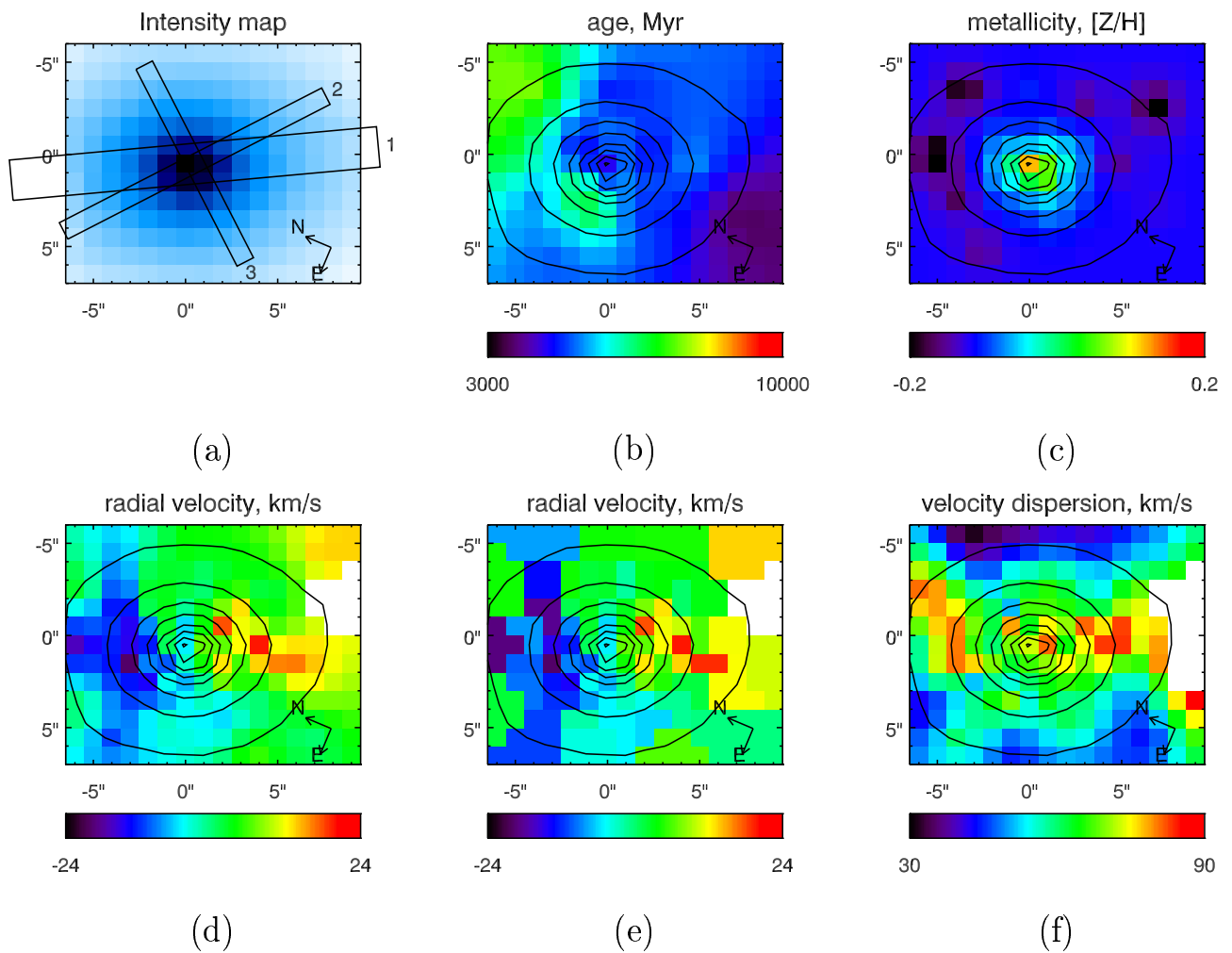


Рис. 2.3: Обобщенный вид кинематики и звездного населения IC 3653. (a) карта интенсивности с положением разрезов, для которых приведены кинематические профили: (1) позиция щели в работе Simien & Prugniel (2002), (2) и (3) положения большой и малой осей вложенного звездного диска; (b) карта среднего возраста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

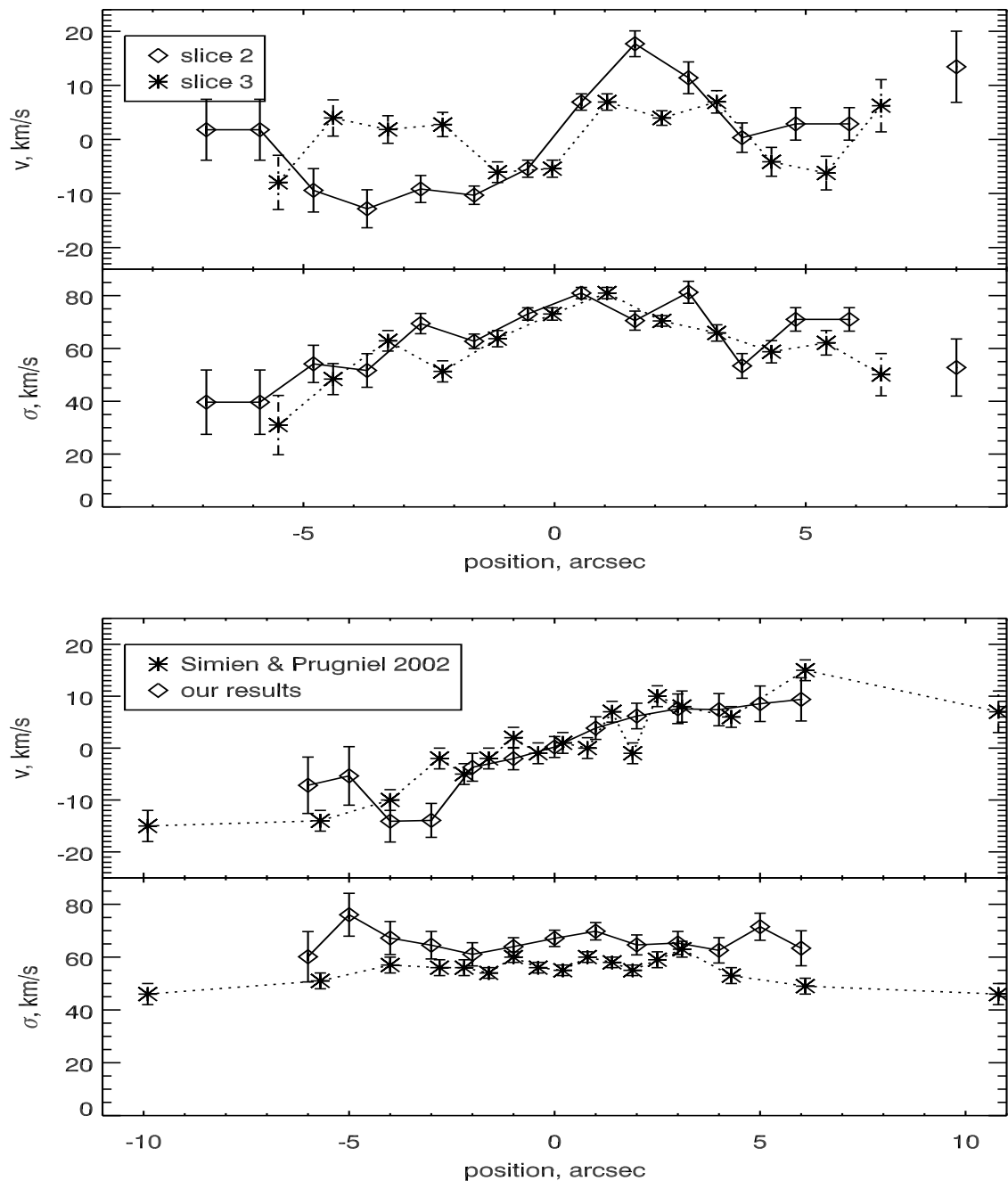


Рис. 2.4: Верхняя пара рисунков: профиль лучевых скоростей для разреза "2" (большая ось вложенного диска) и профили дисперсий скоростей для разрезов "2" и "3" (большая и малая оси вложенного диска). Нижняя пара рисунков: сравнение кинематических профилей (разрез "1", большая ось основного сфероида галактики)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

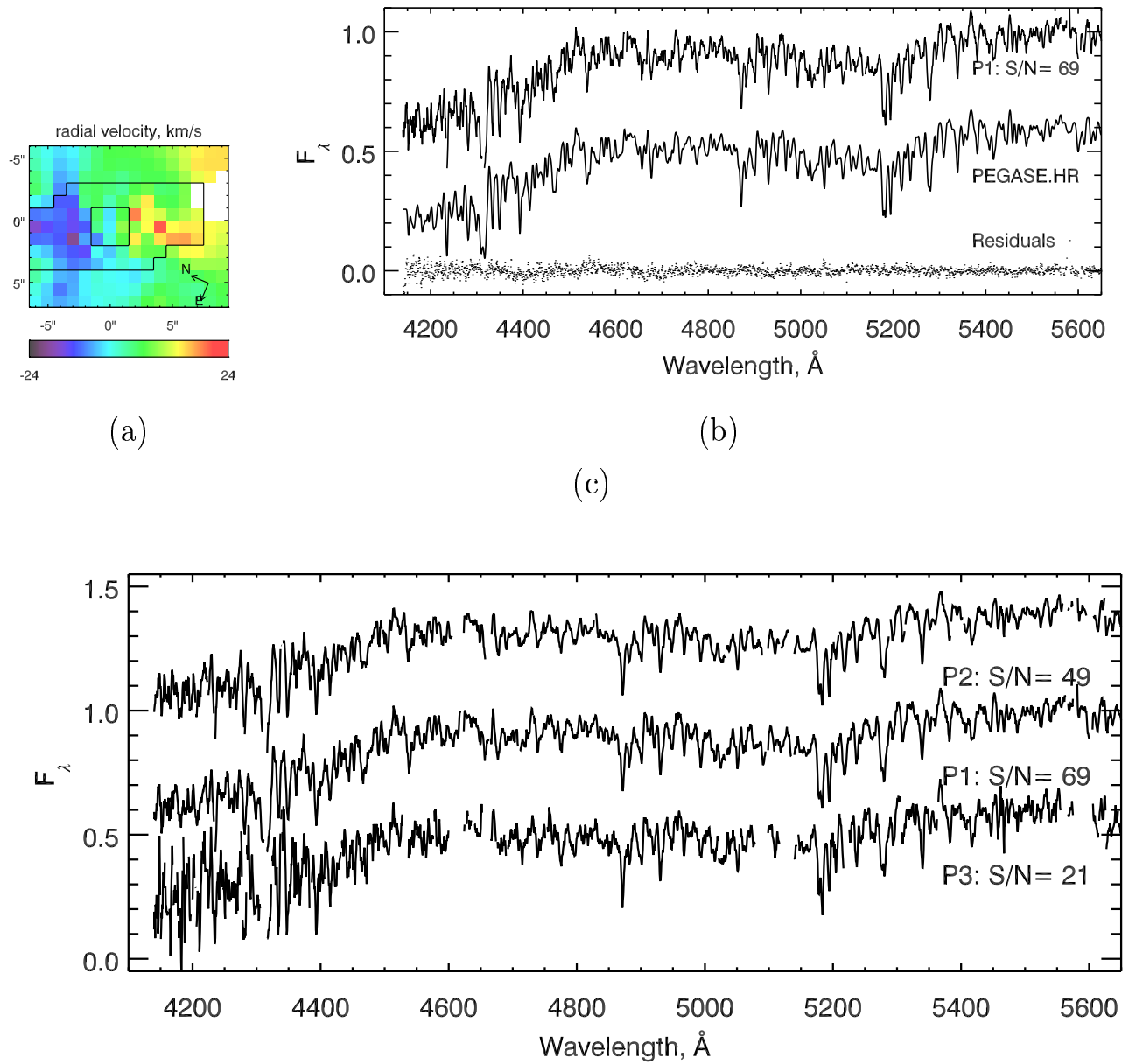


Рис. 2.5: (a) Поле лучевых скоростей с изображенными бинами 3-point разбиения (см. текст); (b) аппроксимация интегрального спектра для бина "P1": показаны спектр, наилучшая модель "PEGASE.HR" (сдвинута на -0.3 по потоку от своего первоначального положения), и остаточные отклонения, показывающие разницу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

содержащегося в ней. В то же время мы не видим удлинённой 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 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 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.

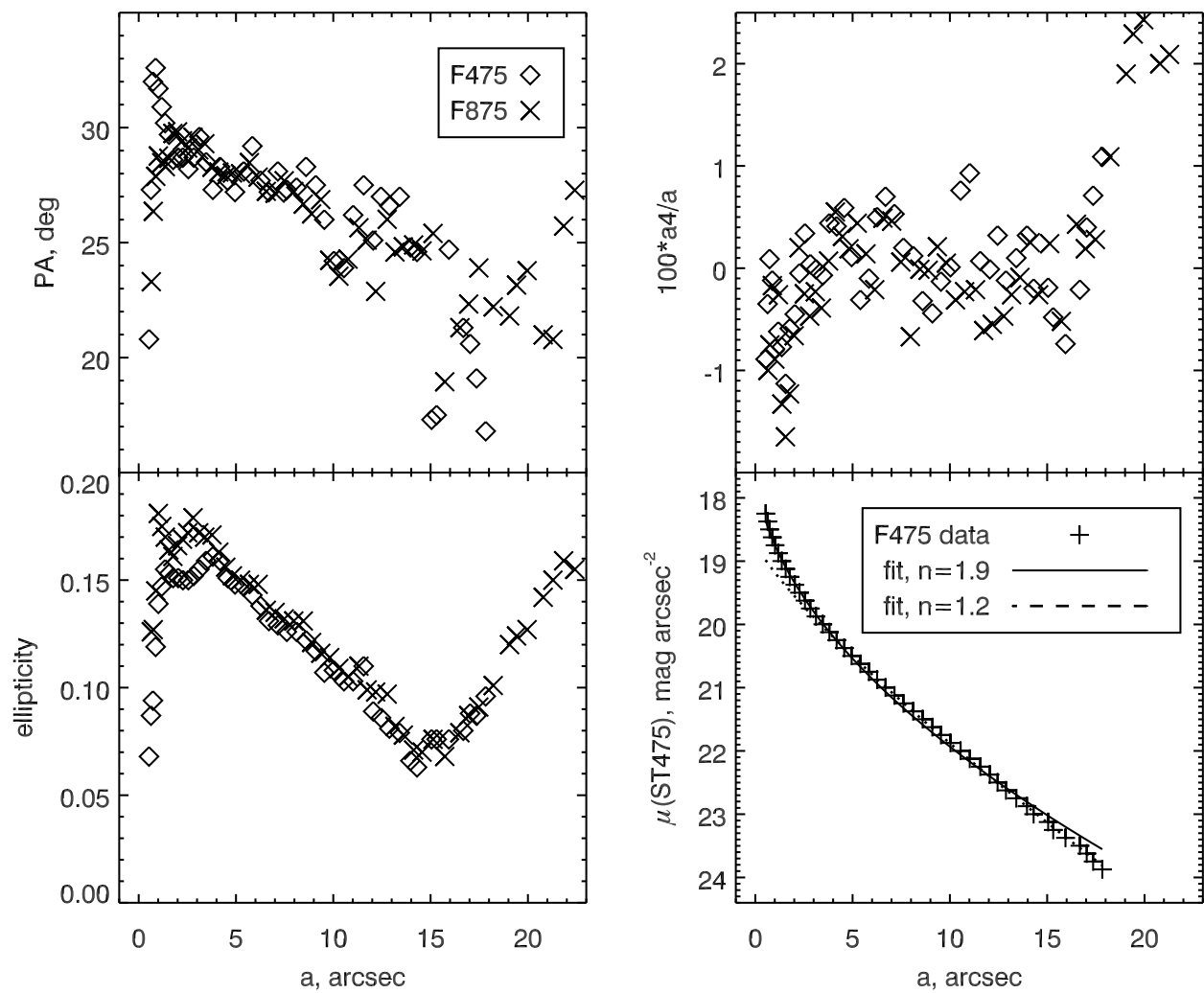


Рис. 2.6: Фотометрические характеристики IC 3653: позиционный угол (слева сверху), эллиптичность изофот (слева внизу), параметр a_4 : disk/boxy (справа сверху) в двух цветах, и профиль яркости в фильтре F475.

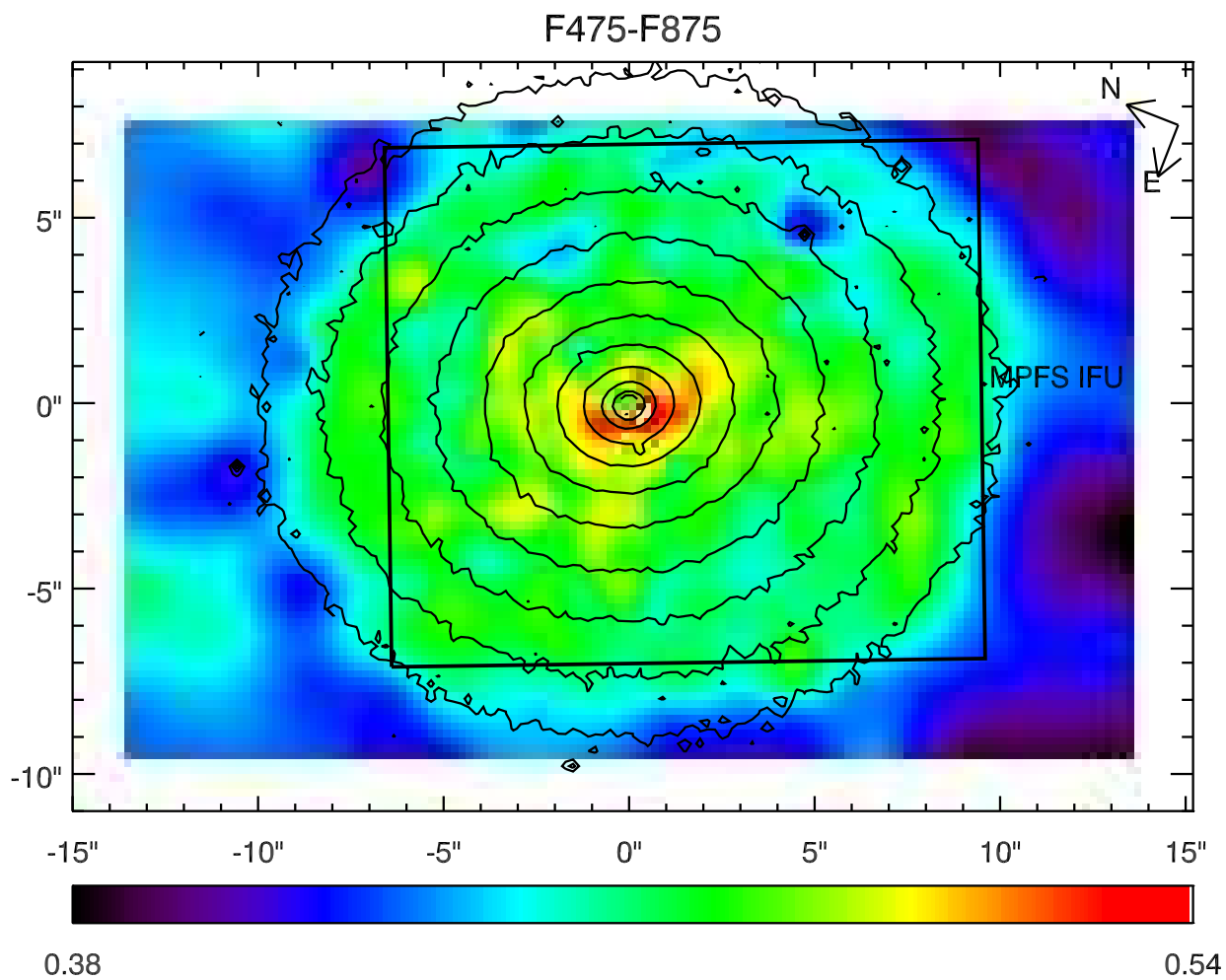


Рис. 2.7: Карта цвета F475-F875 (данные HST ACS). Наложены изофоты изображения в фильтре F875. Показано положение поля зрения MPFS.

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 значения SSP-эквивалентных возрастов и металличностей, полученных с помощью методов аппроксимации спектров и инверсией диаграмм для: $H\beta$ -Mgb, $H\beta$ - $\langle Fe \rangle'$, $H\beta$ -[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 (FP, 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 Рис. 2 (левый) в работе De Rijcke et al. 2005 и точно совпадает Chiosi & Carraro (2002) и Yoshii & Arimoto (1987), представленных на том же рисунке.

Средний возраст звездного населения IC 3653, $t = 5$ Gyr, совпадает со

	"P1"	"P2"	"P3"
t_{fit} , Gyr	4.93 ± 0.20	4.95 ± 0.30	4.97 ± 0.70
$t_{H\beta-Mgb}$	7.04 ± 1.56	6.97 ± 1.47	11.25 ± 6.02
$t_{H\beta-<Fe>'}$	7.02 ± 1.33	7.28 ± 2.20	6.08 ± 3.94
$t_{H\beta-[MgFe]}$	7.11 ± 1.65	6.88 ± 1.89	6.70 ± 5.11
$t_{H\beta-Mgbmod}$	5.27 ± 1.56	5.13 ± 1.47	4.85 ± 6.02
$t_{H\beta-<Fe>'mod}$	5.15 ± 1.33	4.30 ± 2.20	4.23 ± 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
$Z_{H\beta-<Fe>'}$	-0.02 ± 0.04	-0.10 ± 0.05	0.03 ± 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
$Z_{H\beta-<Fe>'mod}$	0.02 ± 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.

средним возрастом dE галактик в скоплении Дева ($t_{mean} = 5$ Gyr, Geha et al. (2003); $t_{mean} = 5...7$ Gyr, Van Zee et al. 2004b). 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. 2004b), 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. (2004b).

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

Мы рассчитали отношение масса-светимость (фильтр B), 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 $[\text{Mg}/\text{Fe}]$). 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 ($M_B = -18.2$ mag) и расположена рядом с массивным спиральным компаньоном NGC 772 ($M_B = -21.6$ mag) в группе. В NGC 127 ($M_B = -18.0$ 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

Молодые ядра – достаточно частое явление в гигантских галактиках ранних типов (Sil'chenko 1997, Vlasjuk & Sil'chenko 2000), наблюдаемых как в скоплениях, так и в группах (Sil'chenko 2006). Однако молодые окооядерные 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).

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

Object	Dates	Total exp.time	Seeing
IC 783	21,23 May 2004	3.5h	2''
IC 3468	20 March 2004	2.5h	1.5''
IC 3509	10,12 May 2005	3.5h	1.7''

Таблица 2.5: Параметры наблюдений

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.

Мы открыли молодое ядро в этой галактике, имеющее следующие средние параметры звездного населения: $t = 3.3 \pm 0.4 \text{ Gyr}$, $Z = -0.35 \pm 0.04 \text{ dex}$,

Object	t Gyr	Z 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 $[\text{Fe}/\text{H}]$ и отношение масса-светимость для звездных населений согласно Worthey (1994)

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 B 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 длинно-щелевая 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 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 галакти-

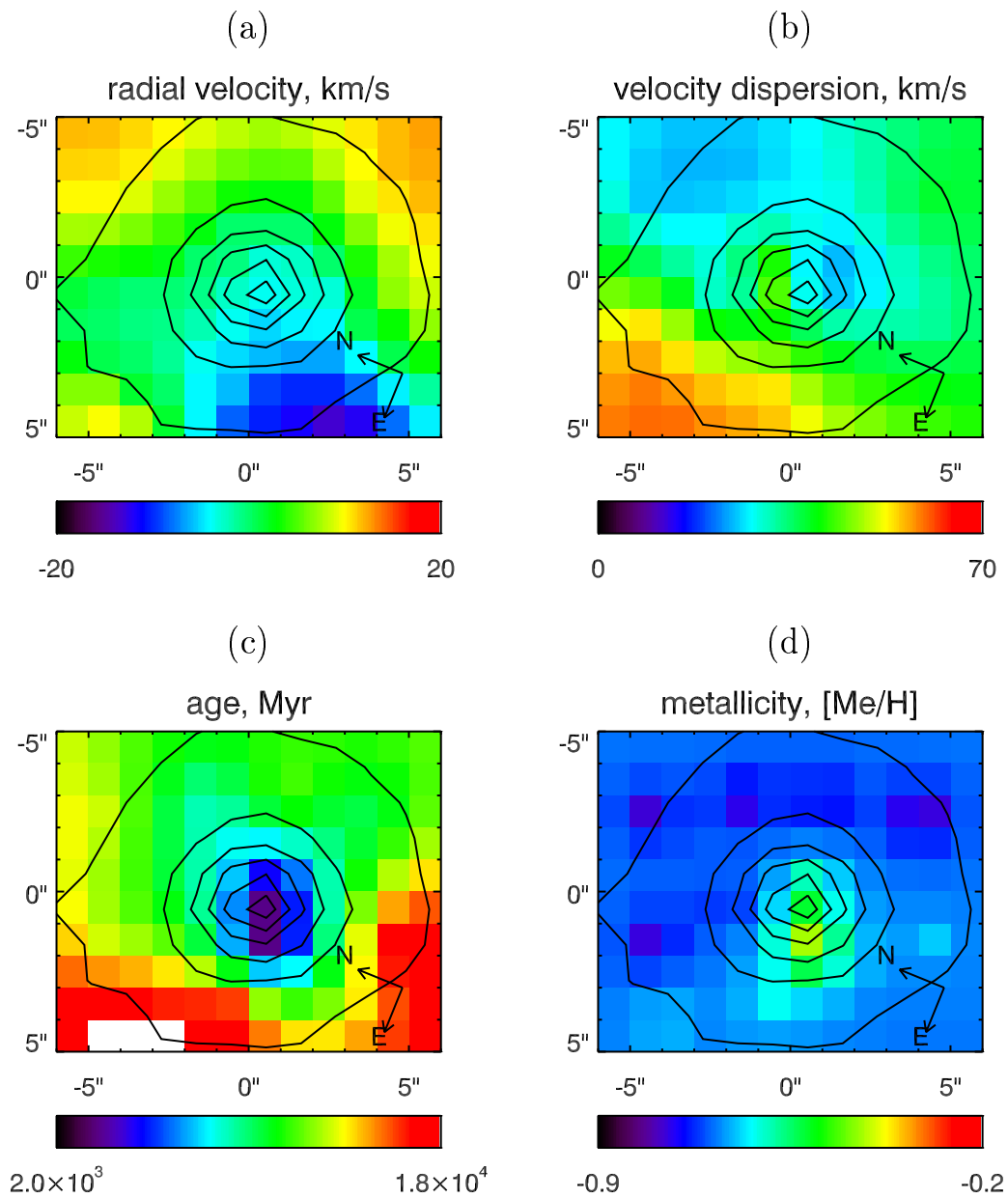


Рис. 2.8: Кинематика и звездное население IC 783. Карты звездной кинематики и параметров звездного населения построены для адаптивного разбиения для отношения сигнал/шум 15. (a) лучевые скорости; (b) дисперсия скоростей звезд; (c) средний возраст; (d) средняя металличность.

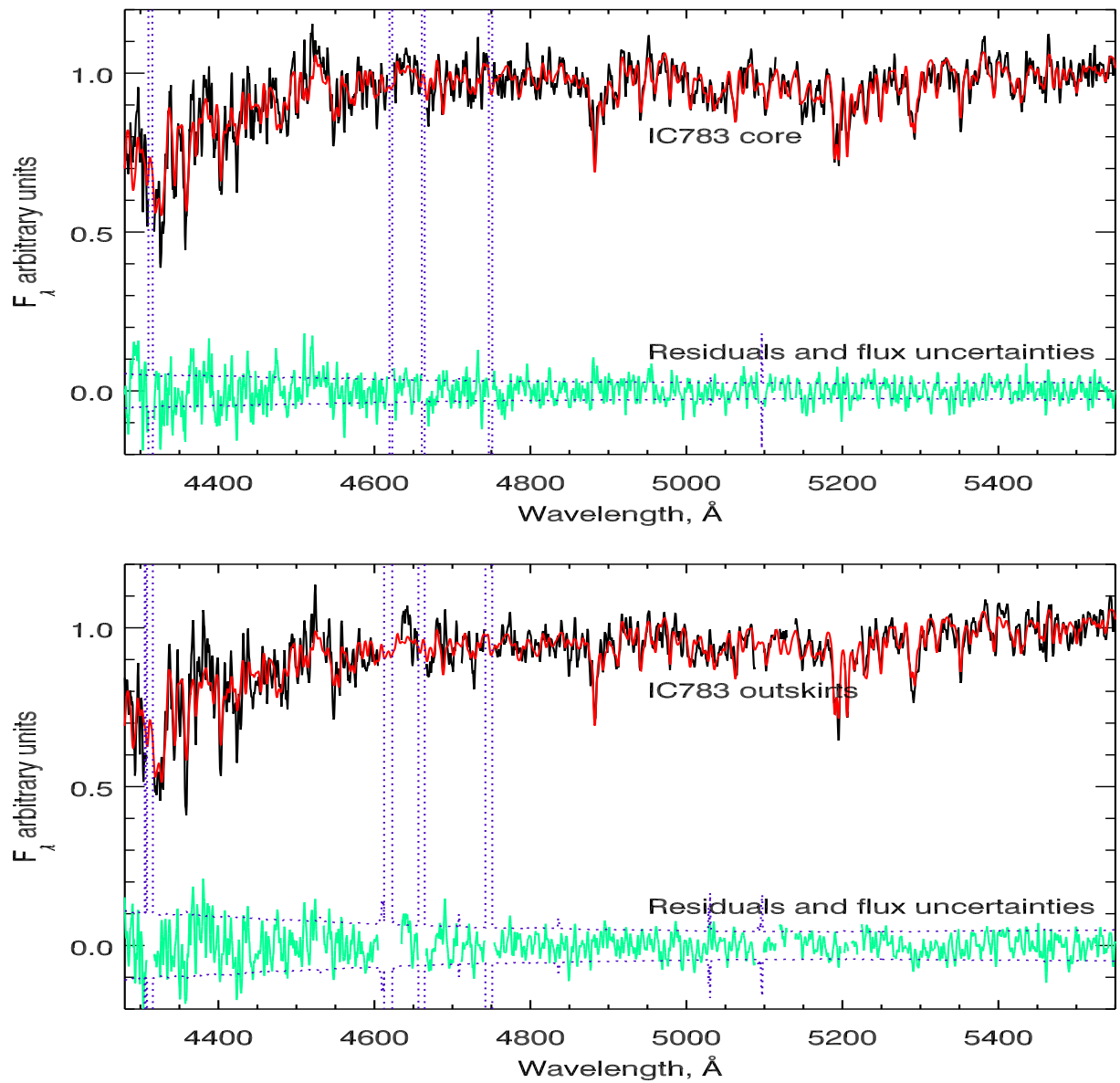


Рис. 2.9: Спектры центральной части и периферии галактик IC 783 и наилучшими моделями простого звездного населения PEGASE.HR SSP: наблюдаемый и синтетический спектры показаны черной и красной сплошными линиями, $\pm 1\sigma$ ошибки потоков показаны штриховыми фиолетовыми линиями, остаточные отклонения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

ки ($t = 8.6 \pm 0.9$ Gy). Также можно заметить ”синюю” полосу в распределении дисперсии скоростей (значения ниже на $\sim 10 \text{ km s}^{-1}$ 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 $17 \pm 4 \text{ km s}^{-1}$ на расстоянии 7 arcsec 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 ($Z = -0.60 \pm 0.05 \text{ dex}$) с плавным градиентом в сторону центра (до $Z = -0.40 \pm 0.05 \text{ dex}$).

Отношение массы к светимости для звездного населения в фильтре В: $(M/L)_{B*} = 2.8 \pm 0.4$ для диска и $(M/L)_{B*} = 4.0 \pm 0.6$ 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 arcsec. 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

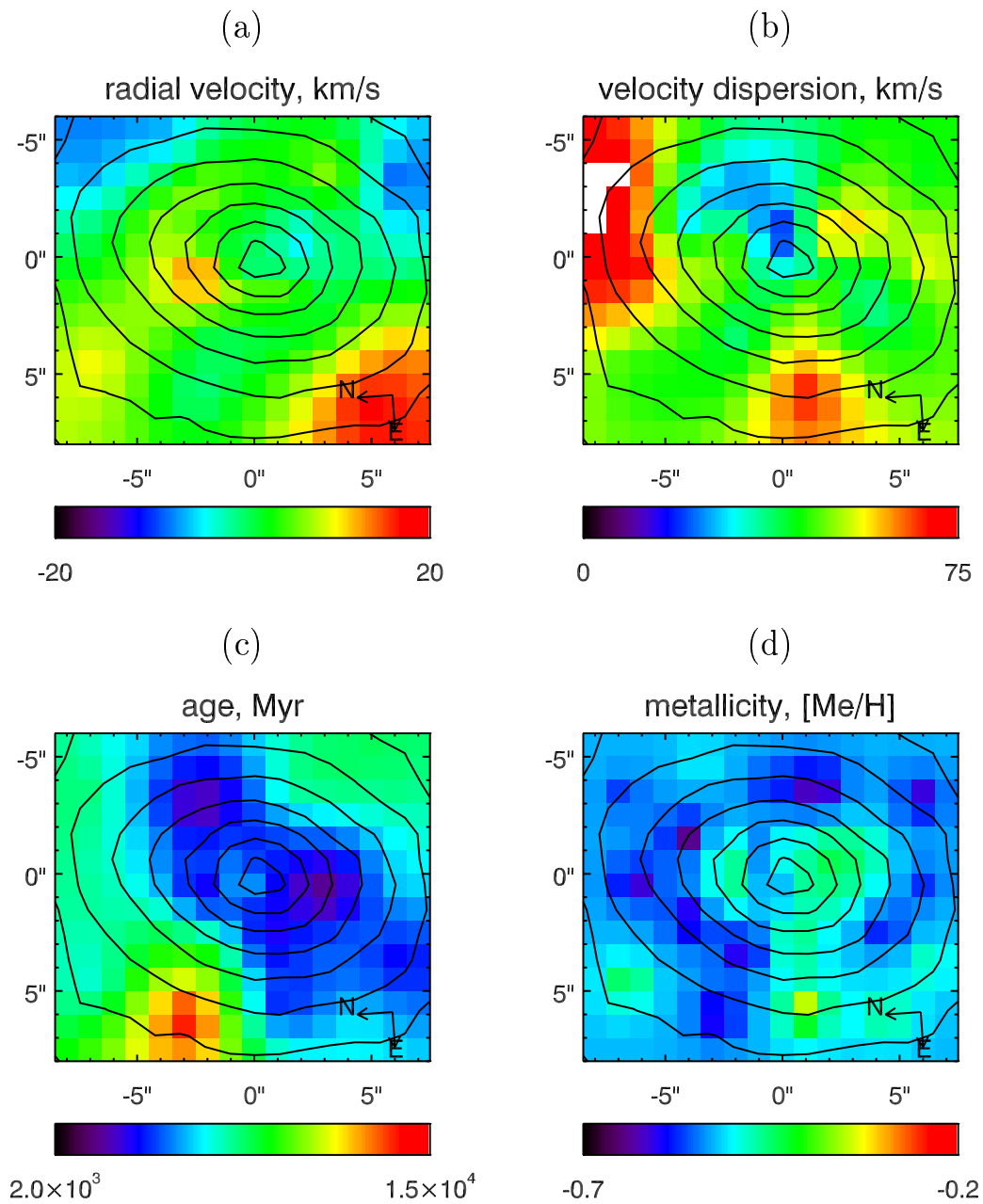


Рис. 2.10: Кинематика и звездное население IC 3468. Карты звездной кинематики и параметров звездного населения построены для адаптивного разбиения для отношения сигнал/шум 15. (a) лучевые скорости; (b) дисперсия скоростей звезд; (c) средний возраст; (d) средняя металличность.

самом центре галактики мы видим пространственно неразрешенное молодое ($t = 4.1 \pm 0.4$ Gyr), высокометалличное ($Z = -0.05 \pm 0.05$ 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.

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, Vlasjuk & 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 металлами звездным населением, соответствуют гипотезе диссипативного слияния, которое имело место несколько Gyr назад. Подобное диссипативное слияние должно инициировать вспышку звездообразования,

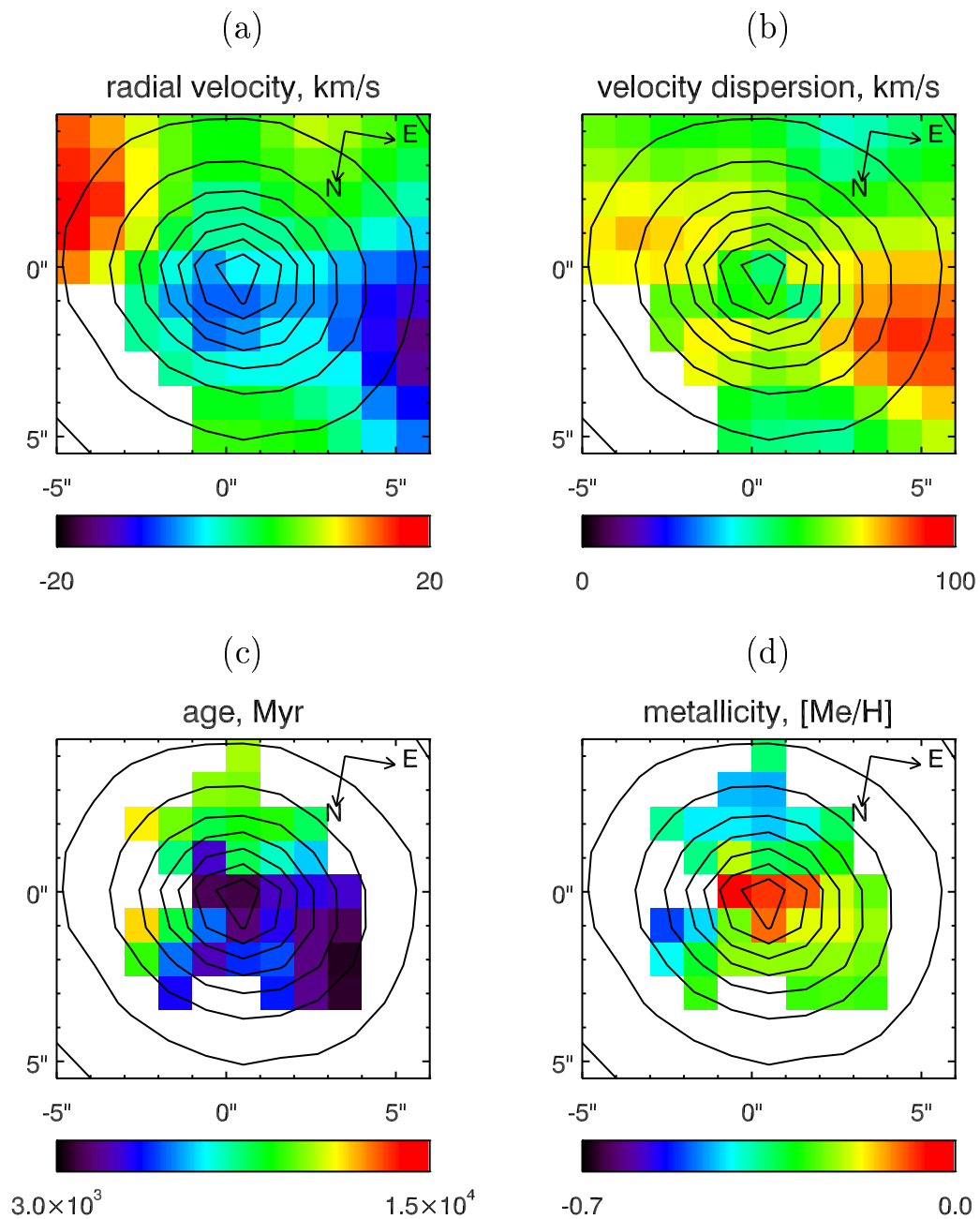


Рис. 2.11: Кинематика и звездное население IC 3509. Карты звездной кинематики и параметров звездного населения построены для адаптивного разбиения для отношения сигнал/шум 10. (a) лучевые скорости; (b) дисперсия скоростей звезд; (c) средний возраст; (d) средняя металличность.

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 случиться, 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 Мpc от центра скопления Дева. Таким образом, ее орбитальный период составит по крайней мере 4.5 Gyr (предполагая массу скопления $10^{14} M_{\odot}$). 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 M 100, разница лучевых скоростей в $\sim 270 \text{ km s}^{-1}$ – аргумент в пользу взаимодействия. Предполагается, группа M 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 $\sim 1000 \text{ km s}^{-1}$ и орбитальную скорость IC 783 по отношению к М 100 $\sim 300 \text{ km s}^{-1}$). 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 населением 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 Côté et al. 2006. Однако эта гипотеза может быть подтверждена только будущими наблюдениями.

Глава 3

Карликовые галактики в группах

В этой главе мы представим 3D спектроскопию двух необычных карликовых галактик в группах, для того чтобы продемонстрировать, как различные условия, создаваемые окружением, могут повлиять на их эволюцию.

Параметры наблюдений, представленных в этой главе, приведены в Таб. 3.1.

3.1 NGC 770 (группа NGC 772)

NGC 770 – эллиптическая галактика низкой светимости ($M_B = 18.2$), компаньон большой спиральной галактики NGC 772 и ярчайший ее спутник (Zaritski et al. 1997). Гигантская спиральная галактика NGC 772 ($M_B = -21.6$) присутствует в атласе пекулярных галактик как Arp 78 (Arp, 1966) и содержит заметную асимметричную спиральную ветвь. Лучевая скорость NGC 772, согласно Zaritsky et al. (1997), составляет 2468 km s^{-1} , что соответствует расстоянию 33 Мpc принимая $H_0 = 75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

Name	Date	seeing	t_{exp}	S/N _{cent}	σ_{cent}
NGC 770	2004/Oct/07	2''	2h	50	100
NGC 126	2006/Sep/07	1.3''	1h 20m	25	100
NGC 127	2005/Oct/01	1.5''	2h	20	90
NGC 130	2005/Oct/02	2''	1h 30m	25	120

Таблица 3.1: Параметры наблюдений эллиптических и линзовидных галактик низкой светимости в группах.

Светимость NGC 770 ($M_B = -18.2$) и дисперсия скоростей ее звезд ($110\text{--}120 \text{ km s}^{-1}$) указывает на ее промежуточное положение между гигантами и карликами. Спектроскопия NGC 770 не показывает наличия эмиссионных линий, хотя нейтральный водород обнаруживается по радионаблюдениям (Geha et al. 2005). Очень хорошее отношение сигнал-шум в данных, полученных с MPFS дает возможность для точных измерений всех параметров ($\Delta v \sim 1 \text{ km/s}$). Из-за сравнительно высокой дисперсии скоростей, дискретизация LOSVD позволяет измерить коэффициенты разложения Гаусса-Эрмита $h3$ и $h4$.

Мы видим впечатляющее противовращающееся ядро в этом объекте. Эта кинематическая особенность была опубликована в работе Geha et al. (2005). По следующим причинам можно считать это образование противовращающимся высокометаллическим сильно-наклоненным звездным диском, с расположением, практически соответствующим положению большой оси галактики:

- нерезкая маска показывает наличие вложенной структуры (Geha et al. 2005);
- карта дисперсий скоростей показывает повышенные значения в областях "переключения" лучевых скоростей, наблюдается полоса пониженных значений, перпендикулярная структурам в распределении возраста и металличности;
- карта коэффициента $h3$ показывает области с положительными и отрицательными значениями рядом с "переключениями" лучевых скоростей;
- распределения возраста и металличности четко показывают наличие выделенной структуры, практически совпадающей по ориентации с большой осью; структура имеет более молодой возраст ($t \sim 4.5 \text{ Gyr}$ vs 7 Gyr) и повышенную металличность ($[Fe/H] \sim -0.05$ vs -0.2) по сравнению с основным сфероидом.

Мы рассматриваем две возможности формирования подобного кинематически-выделенного ядра: (1) частично-диссипативное слияние,

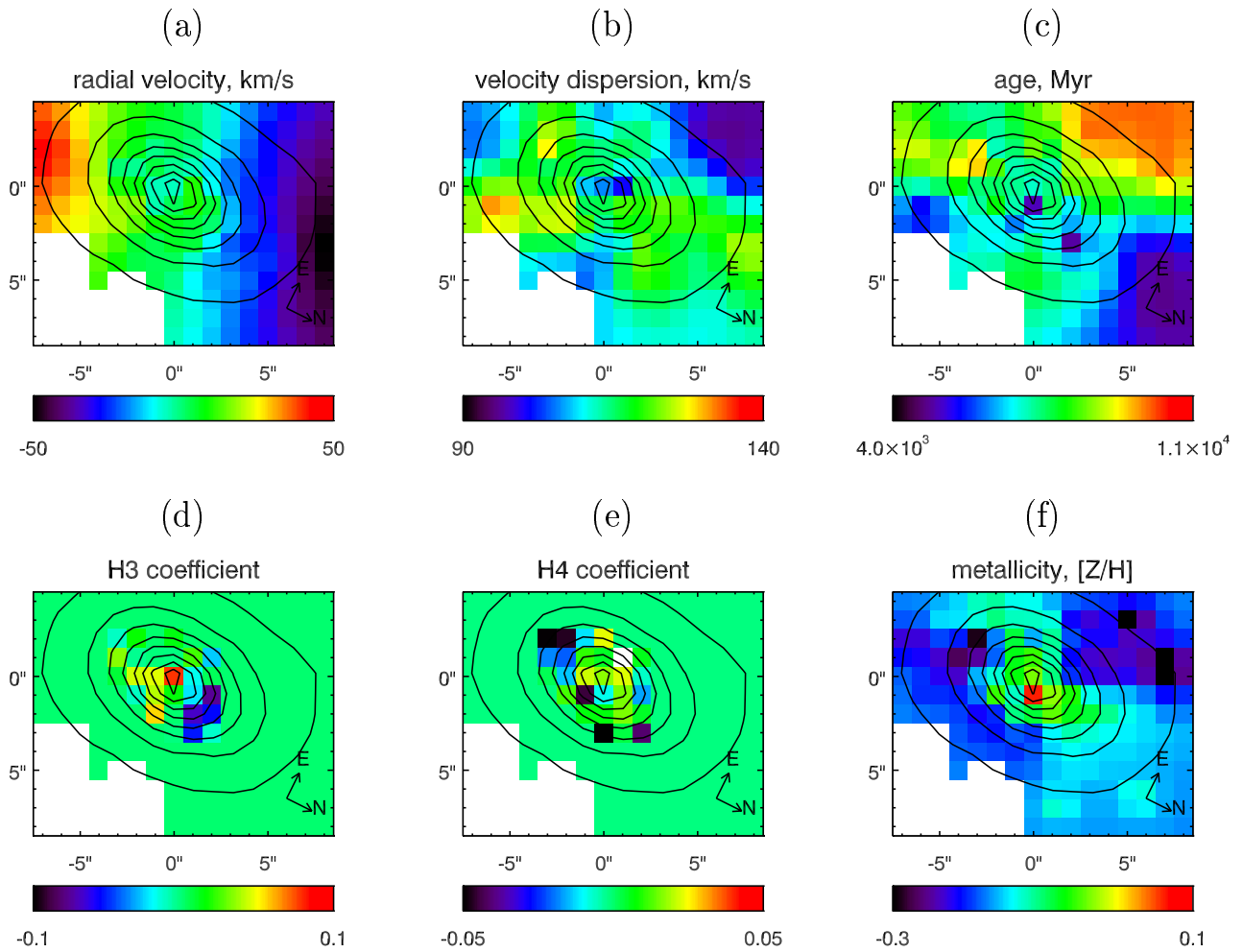


Рис. 3.1: Кинематика и звездное население NGC 770. Панели (a), (b), (d), (e) демонстрируют лучевую скорость, дисперсию скоростей, коэффициенты h_3 and h_4 параметризации Гаусса-Эрмита. На (c) и (f) показаны карты SSP-эквивалентных возрастов и металличностей.

которое индуцировало вспышку звездообразования около 4.5 Gyr назад, сформировавшую центральный звездный диск, который мы видим сейчас как противовращающееся население с повышенной металличностью; (2) диссипативная аккреция газа с расположенной рядом NGC 772. В следующем разделе мы продемонстрируем доказательства сходного процесса на похожий по параметрам объект, что является косвенным аргументом в поддержку второго сценария формирования кинематически-выделенного ядра в NGC 770.

3.2 NGC 127 (группа NGC 128)

Группа NGC 128 расположена на расстоянии около 55 Мpc. Из объектов с измеренными красными смещениями она содержит: гигантскую богатую газом S0 галактику NGC 128, гигантскую спиральную галактику раннего типа NGC 125, три линзовидных/эллиптических галактики низкой светимости в окрестности NGC 128 (ближе 100 кpc в проекции): NGC 126 ($M_B = -18.5$), NGC 127 ($M_B = -18.6$) и NGC 130 ($M_B = -19.0$), и несколько спиралей поздних типов, расположенных далее 300 кpc от центра группы.

NGC 128 – гигантская линзовидная галактика с балджем в форме ”земляного ореха” (peanut-shaped). Известно, что она содержит газовый диск, противовращающийся по отношению к звездному (Emsellem & Arsenault, 1997). Виден слабый газовый хвост в направлении NGC 127 (3.2).

Мы провели наблюдения с MPFS всех трех вышеупомянутых галактик низкой светимости: NGC 126, NGC 127 и NGC 130 в течение двух сетов наблюдений в октябре 2005 и сентябре 2006.

NGC 126 и NGC 130 не показывают наличия эмиссионных линий, звездное население в них относительно старое (5...7 Gyr) с примерно солнечной металличностью, кинематика относительно регулярна. Мы не обсуждаем здесь эти два объекта, поскольку они выглядят очень похоже на dE галактики в скоплениях, и, по-видимому, их эволюция регулируется сходными механизмами.

В противоположность, галактика NGC 127, расположенная на расстоянии около 1 arcmin от центра NGC 128 (16 кpc в проекции), – богатый газом объект, имеющий эллиптическую морфологию (согласно NED, HyperLeda). Пылевая полоса видна на изображении ЖТ к югу от ядра NGC 127 (см. Рис. 3.2). Ее спектр позволяет утверждать о текущей вспышке звездообразования. Используя данные MPFS мы можем исследовать кинематику как звезд, так и газа, и сделать оценки параметров звездного населения.

Средний возраст звездного населения NGC 127 оказывается весьма молодым – около 1 Gyr – с плавным градиентом от 1.5 на периферии до 0.8 в центре. Металличность слегка выше солнечной ($[Fe/H] = +0.2$ dex) везде, кроме самого центра галактики, где она показывает минимум (-0.1 dex). Од-

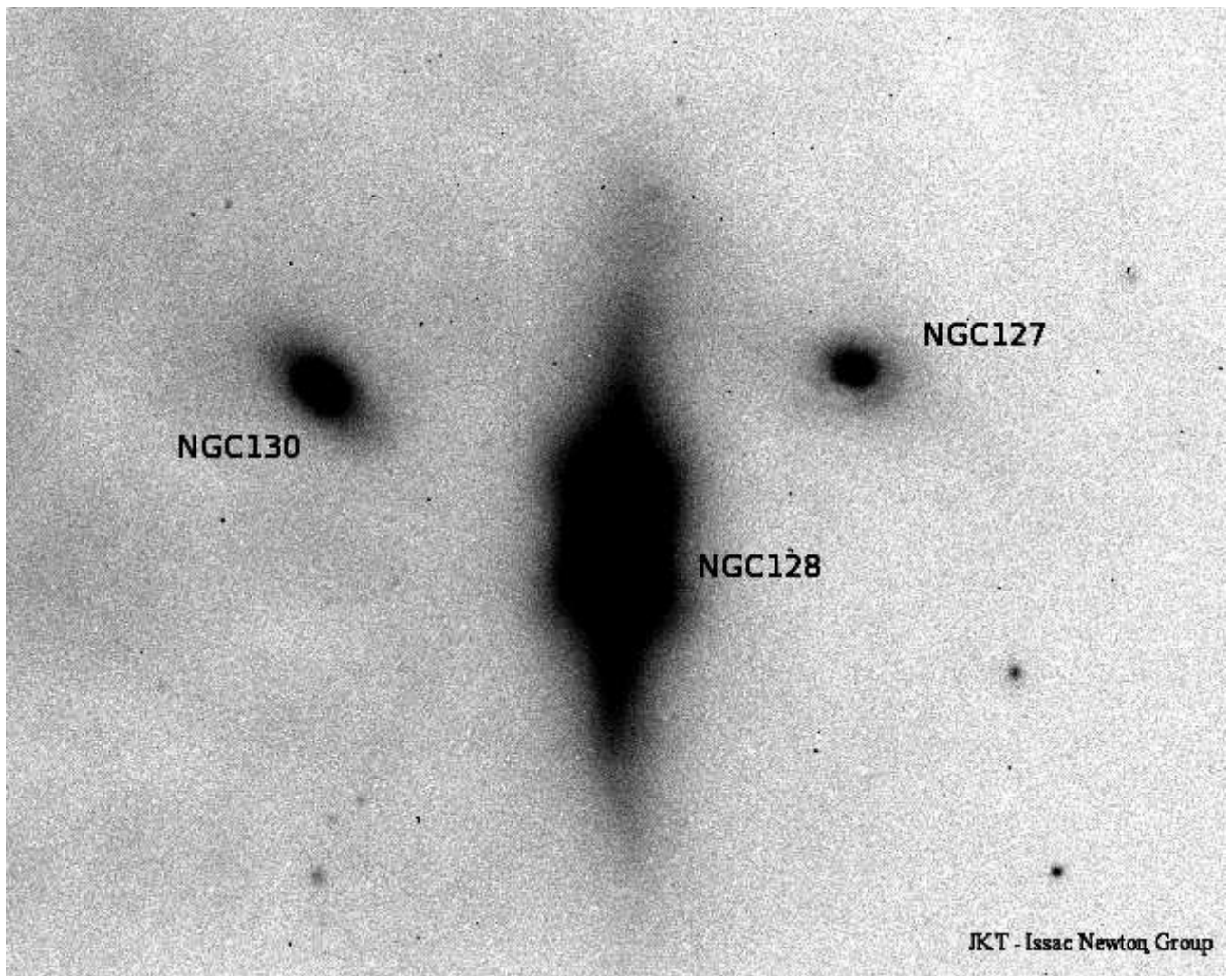


Рис. 3.2: Центральная часть группы NGC 127 в фильтре В. Изображение получено нв 1.0-м телескопе JKT (La Palma) и получено через архив группы телескопов им. Исаака Ньютона.

нако, принимая во внимания тот факт, что мы не включаем в рассмотрение аддитивный континуум, а спектр центральной части галактики может быть подвержен сильному влиянию небулярного континуума, это может быть связано со смещенными оценками металличности, вызванными его наличием (см. Главу 1). Аппроксимация была сделана после маскирования областей эмиссионных линий ($H\gamma$, $H\beta$, [OIII], и [NI]). Остаточные отклонения аппроксимации практически нулевые и содержат только яркие эмиссионные линии (см. Рис.3.3g).

Поле скоростей газа было рассчитано путем вписывания однокомпонентной гауссианы, свернутой с аппаратным контуром MPFS, в эмиссионную линию $H\beta$ в остаточных отклонениях после аппроксимации звездного населения. Скорость вращения газа ($\sim 100 \text{ km s}^{-1}$) выше, чем у звездной компоненты ($\sim 40 \text{ km s}^{-1}$). Поле скоростей газа показывает некую асимметрию в юго-восточной части NGC 127 (по направлению NGC 128): в этой области $v_{gas} - v_{stars}$ почти на 20 km s^{-1} выше по абсолютному значению, чем в симметричной области на северо-западе галактики, и достигает -60 km s^{-1} на расстоянии 6 arcsec от ядра NGC 127. Подобная асимметрия может быть связана с возмущенными движениями около области втекания газа в NGC 127.

Разница лучевых скоростей NGC 127 и NGC 128 составляет около -160 km s^{-1} . Принимая во внимание наличие газового моста между ними и кинематических проявлений NGC 127, мы можем предложить следующий сценарий: NGC 127 недавно прошла перицентр орбиты вокруг NGC 128, и сейчас мы наблюдаем перетекание газа из NGC 128 в NGC 127. Этот процесс мог бы привести к формированию противовращающегося ядра, похожего на то, что наблюдается в NGC 770, если бы ориентация углового момента падающего газа была противоположной. Если предположить, как будет выглядеть NGC 127, если устранить из нее газ (и, соответственно, остановить звездообразование) после нескольких Gyr пассивной эволюции, то она будет неотличима от "нормальных" dE галактик по морфологии и светимости (ее абсолютная величина станет примерно на 2 mag слабее), но только по относительно высокой металличности.

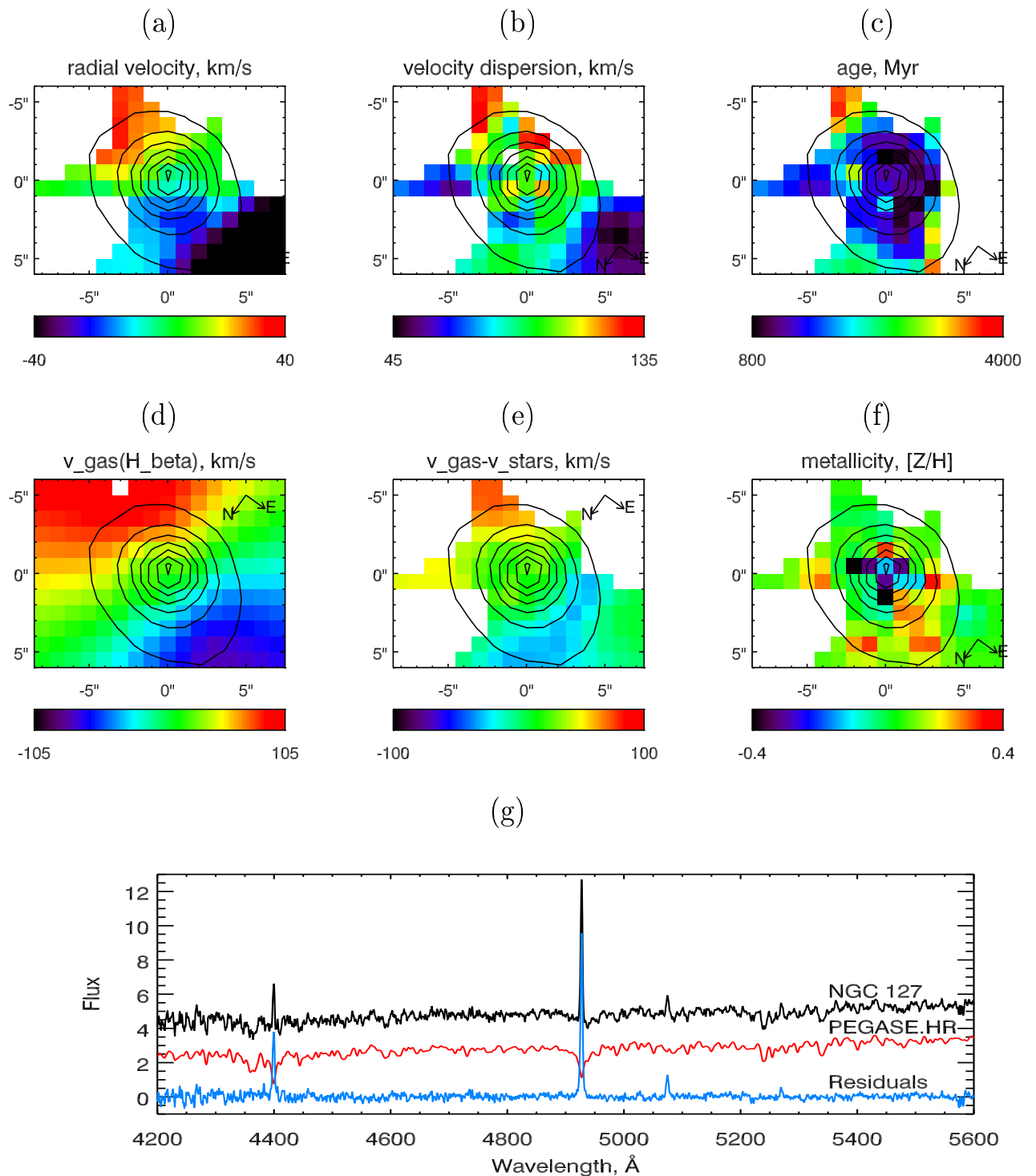


Рис. 3.3: NGC 127: SSP-эквивалентные параметры звездного населения, кинематика звезд и газа. Панели (a) и (b) показывают поле скоростей и карту дисперсий скоростей звезд; (c) SSP-эквивалентный возраст; (d) лучевая скорость газа, измеренная по эмиссионной линии $\text{H}\beta$; (e) разность лучевых скоростей газа и звезд; (f) металличность; (g) аппроксимация спектра в центральной части NGC 127.

Процесс медленной аккреции, которому благоприятствуют низкие относительные скорости в динамически холодном окружении групп галактик, кажется довольно маловероятным сценарием для формирования вложенных структур в dE галактиках, населяющих более плотные области Вселенной, такие как скопления галактик.

Глава 4

Исследование галактик в скоплении Abell 496

Abell 496 – скопление галактик 1-го класса богатства (Abell 1958) типа cD (Struble & Rood 1987) на красном смещении 0.0335 (Durret et al. 2000 и ссылки в ней). Для значения $H_0=72 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ модуль расстояния составляет 35.71 ($d = 139 \text{ Mpc}$), что соответствует масштабу 40.4 kpc/arcmin. Abell 496 – скопление галактик с измеренными красными смещениями для нескольких сотен объектов. Анализ распределения красных смещений для 466 галактик в направлении скопления показали наличие нескольких под-структур на луче зрения; однако, красные смещения 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).

4.1 Наблюдения и обработка данных

4.1.1 Фотометрические наблюдения и обработка данных

Прямые снимки были получены на Канадо-Франко-Гавайском телескопе с камерой Megacam осенью 2003 года (program 03BF12, P.I. V. Cayatte). Поле

зрения Мегасат составляет $1^\circ \times 1^\circ$, с размером пикселя 0.187 arcsec. Глубокие изображения были получены в фильтрах u, g, r и i.

Обработка этих изображений (коррекция bias, плоского поля, фотометрические и астрометрические калибровки) была произведена сотрудниками центра данных Тегаріх в IAP, Франция. Программный пакет SExtractor был использован для обработки изображения в фильтре r (которое имело наилучшее качество изображения) чтобы обнаружить объекты и определить их положения и звездные величины. В частности, были измерены апертурные звездные величины в 1.2 arcsec диафрагмах для подготовки спектральных наблюдений со спектрографом Giraffe (см. ниже).

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 О. 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.

4.1.2 Спектральные наблюдения и обработка данных

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 arcmin и содержит 120 световодов диаметром 1.3 arcsec. Использовалась дифракционная решетка 600 gr/mm в режиме LR4, обеспечивая спектральное разрешение порядка $R = 6300$ в диапазоне длин волн 5010-5831 Å.

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 x 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 адресу <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). В 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.

Галактики для наблюдений выбирались из вышеописанного каталога, следуя следующим приоритетам: высокий приоритет для объектов $17.5 < r_{1.2} < 20.75$; средний приоритет для $20.75 < r_{1.2} < 21.5$; низкий приоритет для $21.5 < r_{1.2} < 22$. Были получены 112 спектров галактик (некоторые световоды должны были использоваться для гидирующих звезд и спектров ночного неба).

Индивидуальные 1D-спектры были сложены при помощи пакета IRAF. Были измерены красные смещения, используя IRAF-контекст `gvsao.xcsao` при помощи различных опорных спектров звезд. Также красные смещения были получены методом аппроксимации спектров, описанным в этой работе, и значения совпали в пределах ошибок измерений.

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 52 из 112 галактик с измеренными красными смещениями оказались членами скопления. 46 из этих 52 имеют отношения сигнал-шум, достаточные для анализа кинематики и звездного населения.

Абсолютные величины вычислялись с использованием указанного выше модуля расстояния. Все измерения корректировались за внутrigалактиче-

ское поглощение согласно Schlegel et al. 1998.

4.2 Аппроксимация спектров и результаты

Для определения параметров кинематики и звездного населения мы использовали аппроксимацию наблюдений синтетическими спектрами PEGASE.HR (см. Главу 1).

Принимая во внимание высокое спектральное разрешение Giraffe в режиме MEDUSA ($R=7000$), модели PEGASE.HR, основанные на спектральной библиотеке высокого разрешения ($R=10000$) ELODIE.3, оказываются единственной альтернативой среди подобных моделей, позволяющей избежать ухудшения спектрального разрешения наблюдательных данных при проведении процедуры аппроксимации. Для получения несмещенных оценок дисперсий скоростей, необходимо учесть форму и вариации аппаратной функции спектрографа и свернуть модельные спектры с LSF, изменяющейся по ходу длины волны. Мы использовали метод определения LSF, описанный в первой главе, применяя его к спектрам сумеречного неба (солнечный спектр), полученным в той же конфигурации спектрографа Giraffe, что и данные для галактик Abell 496. Ширина аппаратной функции (σ_{inst}) плавно изменяется от 19 km s^{-1} на $5000\text{\AA}$ до 15 km s^{-1} на $5800\text{\AA}$, H3 остается стабильным около значения -0.01 , H4 – около -0.07 . Слегка отрицательные значения H4 тривиально объясняются: ширина световодов в режиме MEDUSA (1.2 arcsec) больше, чем нормальная ширина щели спектрографа, из-за чего LSF имеет П-образную форму.

Метод аппроксимации спектров не слишком чувствителен к присутствию H β в диапазоне длин волн: хотя оценки возрастов имеют большой ошибки при ее отсутствии, они остаются несмещенными (см. Главу 1).

Мы применили метод нерезкого маскирования с эллиптическим размытием (Lisker et al. 2006) к изображениям CFHT/Megacam для установления присутствия вложенных структур. Используя различные параметры размытия – от 1.5 до 4 arcsec мы субъективно классифицировали все объекты на три категории – без вложенных структур, со слабыми и с сильными структу-

рами следующих типов: бар, диск, спиральные рукава, кольцо (see Таб. 4.1). Оказалось, что 6 и 9 объектов имеют слабые и сильные структуры соответственно. Нужно подчеркнуть, что вложенные структуры не наблюдаются среди слабых галактик, и наоборот, яркие объекты довольно часто показывают наличие сильных и сложных вложенных систем.

В Таб.4.1 представлены значения лучевых скоростей, центральных дисперсий скоростей, SSP-эквивалентных возрастов и металличностей центральных областей галактик из нашей выборки, полученных путем аппроксимации спектров моделями PEGASE.HR. Помимо вышеперечисленного, приводится морфологическая классификация и присутствие вложенных структур (на основе анализа данных Megacam).

Принципиальное ограничение нашего метода, делающее невозможным корректное определение параметров звездного населения для объектов с несолнечными отношениями $[Mg/Fe]$, возникает из-за состава библиотеки ELODIE.3, используемой для спектрального синтеза PEGASE.HR: она включает только звезды из ближайшего окружения Солнца, для которых отношения $[Mg/Fe]$ связаны с металличностями (Chen et al. 2003 и ссылки в ней). Таким образом, аппроксимация наблюдательных данных, имеющих несолнечное отношение $[Mg/Fe]$, приведет к несовпадению моделей, которое в свою очередь может вызвать систематические ошибки определения параметров звездного населения. В Главе 1 мы показали, что повышенные значения $[Mg/Fe]$ не влияют на качество оценок возраста.

Для определения значений $[Mg/Fe]$ для галактик Abell 496 мы использовали модели Ликских индексов (Thomas et al. 2003). Для расчета Ликских индексов мы ухудшили разрешение путем сворачивания оригинальных спектров с гауссианой с шириной, соответствующей разнице спектрального разрешения, необходимого для Ликской системы, и дисперсии скоростей галактики с учетом аппаратного контура Giraffe (ширина которого оказывается пренебрежимо мала). Спектральный диапазон Giraffe в использованной нами конфигурации ($5010\text{\AA} < \lambda < 5800\text{\AA}$) и среднее красное смещение галактик $z = 0.033$ позволило вычислить следующие Ликские индексы: Fe_{5015} , Mgb ,

IAU Name	M(B)	morph.	v_r , km/s	σ_0 , km/s	t , Gyr	Z , dex	emb.str.	
A496J043333.53-131852.6	-18.79	SBa	11704 ± 1.5	82 ± 1.5	5.6 ± 0.5	-0.07 ± 0.03	B	s
A496J043346.71-131756.2	-19.06	S0	8365 ± 1.3	72 ± 1.3	14.1 ± 2.2	-0.43 ± 0.02	S	s
A496J043331.48-131654.6	-18.76	SO/SA	9586 ± 1.0	50 ± 1.1	6.8 ± 0.8	-0.26 ± 0.03	S/D	s
A496J043333.17-131712.6	-18.89	cE/E	9870 ± 2.0	123 ± 2.3	15.5 ± 1.9	-0.07 ± 0.03	-	
A496J043342.10-131653.7	-18.24	S0/dS0	9517 ± 2.1	77 ± 2.1	10.0 ± 1.5	-0.33 ± 0.05	B/R?	s
A496J043341.69-131551.8	-19.11	cE/E	9770 ± 1.8	179 ± 2.0	16.3 ± 1.7	-0.08 ± 0.02	-	
A496J043352.77-131523.8	-18.35	S0/dS0	8926 ± 1.9	52 ± 2.0	9.6 ± 2.3	-0.42 ± 0.08	D?	w
A496J043332.07-131518.1	-18.38	dE/E	9954 ± 1.4	79 ± 1.4	13.1 ± 1.8	-0.43 ± 0.03	-	
A496J043337.35-131520.2		cE	9753 ± 1.3	104 ± 1.5	16.4 ± 1.9	-0.04 ± 0.02	-	
A496J043338.22-131500.7		cE/E	10292 ± 2.9	145 ± 3.2	15.3 ± 2.7	-0.19 ± 0.03	-	
A496J043339.72-131424.6	-16.80	dE	10138 ± 4.3	24 ± 5.6	15.7 ± 15.5	-0.92 ± 0.15	-	
A496J043401.57-131359.7	-18.97	S0	10281 ± 1.6	148 ± 1.7	13.3 ± 1.1	-0.25 ± 0.02	-	
A496J043403.19-131310.6	-19.39	SB0/SBa	8952 ± 1.8	85 ± 1.9	13.8 ± 2.3	-0.27 ± 0.03	S	s
A496J043339.07-131319.7	-16.26	dE	10815 ± 2.8	23 ± 4.0	4.6 ± 3.0	-0.08 ± 0.18	-	
A496J043413.08-131231.6	-17.22	dE	10199 ± 6.0	42 ± 7.0	14.3 ± 13.5	-0.83 ± 0.14	-	
A496J043408.50-131152.7	-17.31	dE/dS0	9751 ± 17	47 ± 18	8.3 ± 19.2	-0.50 ± 0.71	B/D	w
A496J043334.54-131137.1	-16.59	dE	8442 ± 7.0	25 ± 9.3	2.6 ± 1.9	0.03 ± 0.54	-	
A496J043351.54-131135.5	-17.06	dS0/dE	9459 ± 2.1	21 ± 3.3	2.4 ± 0.9	-0.62 ± 0.21	-	
A496J043411.72-131130.2	-15.68	dE	10497 ± 15	26 ± 21	1.0 ± 1.3	0.20 ± 0.96	-	
A496J043413.00-131003.5	-18.86	S0	10835 ± 1.3	50 ± 1.4	8.9 ± 1.3	-0.21 ± 0.05	-	
A496J043355.55-131024.9	-16.75	dS0/dE	8430 ± 3.6	20 ± 4.9	14.4 ± 18.1	-0.35 ± 0.17	-	
A496J043342.83-130846.8	-18.54	S0/E	10533 ± 1.6	54 ± 1.6	7.5 ± 1.4	-0.56 ± 0.06	-	
A496J043329.79-130851.7	-17.12	dE	8640 ± 3.1	30 ± 4.0	3.7 ± 1.8	-0.59 ± 0.10	-	
A496J043410.60-130756.7	-17.39	dS0	8373 ± 5.3	36 ± 6.2	3.7 ± 2.7	-0.30 ± 0.13	-	
A496J043359.03-130626.7	-18.13	dS0	10552 ± 2.3	25 ± 3.1	4.4 ± 2.0	-0.46 ± 0.12	-	
A496J043348.59-130558.3	-17.72	dE	9777 ± 1.4	46 ± 1.5	11.1 ± 2.1	-0.37 ± 0.06	-	
A496J043349.08-130520.5	-18.56	S0/Sa	9770 ± 1.8	56 ± 1.8	9.5 ± 2.0	-0.43 ± 0.07	S	w
A496J043343.04-130514.1	-18.03	dS0	9681 ± 1.8	56 ± 1.9	12.7 ± 3.3	-0.45 ± 0.05	-	
A496J043345.67-130542.2	-17.91	dS0	9689 ± 1.3	46 ± 1.4	5.4 ± 0.8	-0.25 ± 0.05	-	
A496J043350.17-125945.4	-16.65	dS0	10381 ± 8.3	38 ± 10	2.9 ± 3.4	-0.65 ± 0.45	-	
A496J043356.18-125913.1	-18.58	dE	11203 ± 1.0	42 ± 1.3	0.84 ± 0.04	-0.28 ± 0.04	-	
A496J043343.04-125924.4	-16.92	dS0/dE	10221 ± 4.7	23 ± 6.7	4.9 ± 4.1	-0.38 ± 0.33	D	w
A496J043326.49-131717.8	-17.73	dS0	8942 ± 4.1	37 ± 4.9	4.8 ± 3.2	-0.24 ± 0.19	D	w
A496J043318.95-131726.9	-17.47	dE	8625 ± 3.5	49 ± 3.7	5.3 ± 1.8	-0.32 ± 0.14	-	
A496J043325.15-131715.9	-15.92	dE	9598 ± 5.3	8 ± 15	17.1 ± 44.0	-0.36 ± 0.27	-	
A496J043317.75-131536.6	-17.18	dS0/dE	11064 ± 5.5	20 ± 8.5	2.4 ± 1.6	-0.32 ± 0.42	B?	w
A496J043325.40-131414.6	-17.27	dE	8374 ± 2.6	38 ± 2.9	8.5 ± 3.6	-0.32 ± 0.14	-	
A496J043324.91-131342.6	-17.82	dE/E	9199 ± 2.2	41 ± 2.4	10.6 ± 3.6	-0.48 ± 0.09	-	
A496J043306.97-131238.8	-18.33	SB0/SBa	8915 ± 2.4	47 ± 2.7	4.8 ± 1.6	-0.12 ± 0.09	B	s
A496J043324.61-131111.9	-16.28	dE	9594 ± 3.8	18 ± 6.2	4.7 ± 4.6	-0.23 ± 0.26	-	
A496J043325.10-130906.6	-16.61	dE	10404 ± 9.0	32 ± 11	2.0 ± 1.7	-0.25 ± 0.45	-	
A496J043312.08-130449.3	-17.10	dE	9197 ± 6.0	30 ± 7.4	10.0 ± 13.5	-0.65 ± 0.33	-	
A496J043321.37-130416.6	-17.61	dS0/dSa	7735 ± 1.8	26 ± 2.5	1.2 ± 0.1	-0.55 ± 0.15	B/S/R?	s
A496J043325.54-130408.0	-16.51	dE	11094 ± 8.9	26 ± 12	1.7 ± 2.1	-0.48 ± 0.46	-	
A496J043320.35-130314.9	-19.40	SB0	8764 ± 1.0	73 ± 1.0	7.3 ± 0.6	-0.11 ± 0.02	B/R/S?	s
A496J043308.85-130235.6	-19.18	Sc	10862 ± 1.7	45 ± 1.9	4.6 ± 1.0	-0.24 ± 0.06	D	s

¹ тип вложенных структур B: bar, D: disc, R: ring, S: spiral; и амплитуда: сильная (s) или слабая (w)

Таблица 4.1: Абсолютные величины, лучевые скорости, дисперсии скоростей, SSP-эквивалентные возрасты и металличности галактик Abell 496.

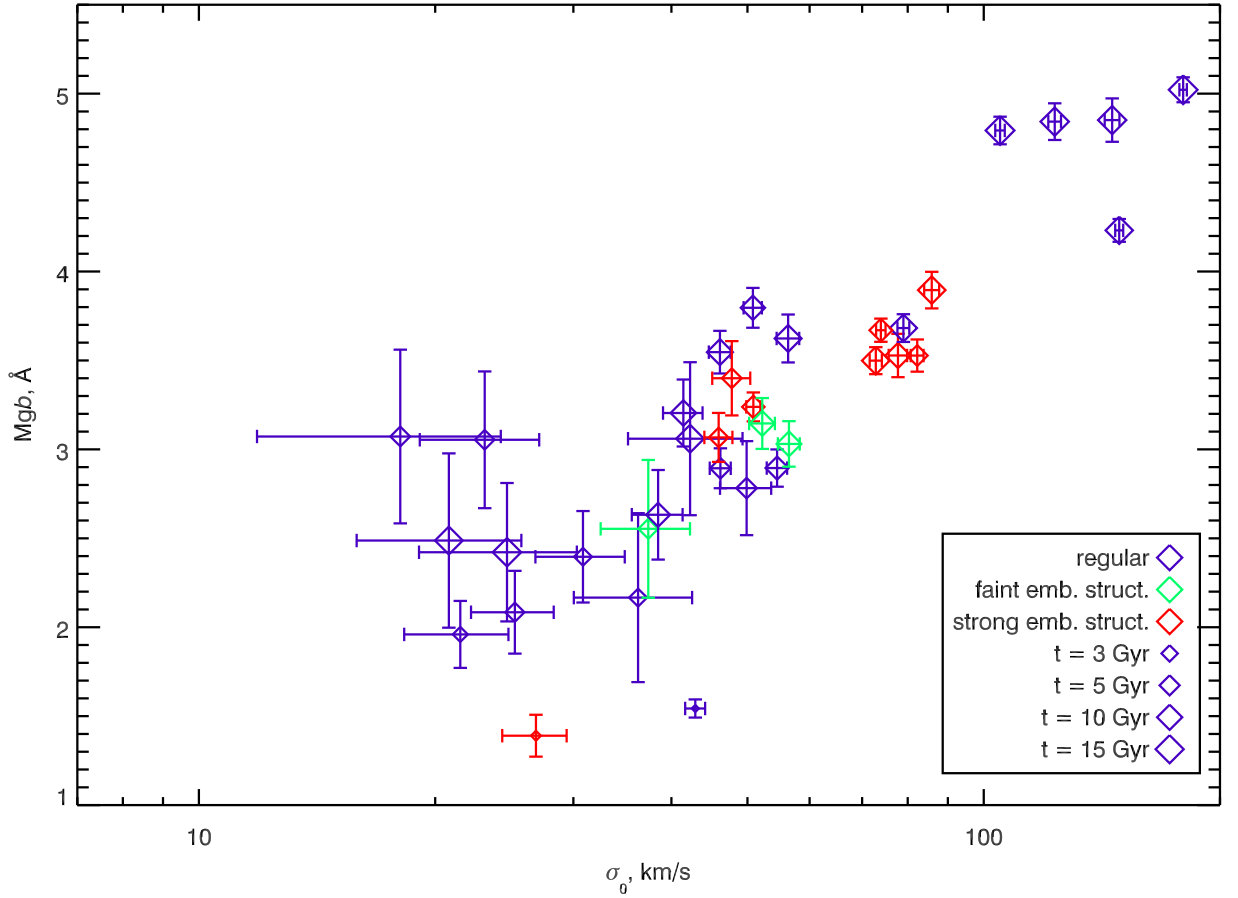


Рис. 4.1: Соотношение $Mgb - \sigma_0$. Показаны только объекты с $\Delta(Mgb) < 0.5 \text{ \AA}$.

Fe_{5270} , Fe_{5335} и Fe_{5406} . Ошибки измерений индексов рассчитывались согласно работе Cardiel et al. (1998). Измерения индексов и рассчитанные на их основе значения отношения $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ представлены в Таб. 4.2.

Большинство маломассивных галактик в нашей выборке показывают значения $-0.15 < [\text{Mg}/\text{Fe}] < 0.15$. Соответственно, мы считаем, что оценки средней металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$ для них не содержат систематических ошибок.

На Рис. 4.1, 4.2, and 4.3 приведены измерения Mgb , $\langle \text{Fe} \rangle = 0.72\text{Fe}_{5270} + 0.28\text{Fe}_{5335}$ и центральных дисперсий скоростей. Легко заметить выраженную корреляцию между Mgb и $\log \sigma_0$ для $\sigma_0 > 25 \text{ km s}^{-1}$. Массивные галактики стремятся к более высоким отношениям $[\text{Mg}/\text{Fe}]$.

IAU Name	Fe ₅₀₁₅	Mgb	Fe ₅₂₇₀	Fe ₅₃₃₅	Fe ₅₄₀₆	[Mg/Fe]
A496J043333.53-131852.6	4.88 ± 0.19	3.53 ± 0.09	2.77 ± 0.10	2.44 ± 0.11	1.75 ± 0.09	0.13 ± 0.10
A496J043346.71-131756.2	3.58 ± 0.17	3.50 ± 0.08	2.61 ± 0.08	2.13 ± 0.10	1.31 ± 0.07	0.21 ± 0.08
A496J043331.48-131654.6	4.23 ± 0.17	3.24 ± 0.08	2.93 ± 0.09	2.12 ± 0.10	1.33 ± 0.08	0.05 ± 0.09
A496J043333.17-131712.6	4.87 ± 0.23	4.84 ± 0.10	3.33 ± 0.11	2.64 ± 0.13	1.77 ± 0.10	0.22 ± 0.09
A496J043342.10-131653.7	4.57 ± 0.26	3.53 ± 0.12	2.80 ± 0.13	2.19 ± 0.15	1.42 ± 0.12	0.15 ± 0.12
A496J043341.69-131551.8	4.59 ± 0.15	5.02 ± 0.07	2.96 ± 0.08	2.55 ± 0.09	1.73 ± 0.07	0.35 ± 0.07
A496J043352.77-131523.8	3.38 ± 0.31	3.15 ± 0.14	2.85 ± 0.16	2.49 ± 0.18	1.62 ± 0.14	0.00 ± 0.14
A496J043332.07-131518.1	4.37 ± 0.17	3.68 ± 0.08	2.53 ± 0.09	2.01 ± 0.10	1.41 ± 0.07	0.28 ± 0.08
A496J043337.35-131520.2	5.58 ± 0.17	4.79 ± 0.08	3.26 ± 0.08	2.97 ± 0.10	1.95 ± 0.07	0.19 ± 0.07
A496J043338.22-131500.7	4.14 ± 0.27	4.85 ± 0.12	2.65 ± 0.14	2.10 ± 0.16	1.75 ± 0.12	0.43 ± 0.09
A496J043339.72-131424.6	4.94 ± 0.80	2.42 ± 0.39	1.34 ± 0.44	0.81 ± 0.51	0.68 ± 0.38	0.36 ± 0.24
A496J043401.57-131359.7	3.92 ± 0.14	4.23 ± 0.06	2.84 ± 0.07	2.33 ± 0.08	1.60 ± 0.06	0.27 ± 0.07
A496J043403.19-131310.6	3.36 ± 0.22	3.90 ± 0.10	2.82 ± 0.11	2.33 ± 0.13	1.60 ± 0.10	0.20 ± 0.10
A496J043339.07-131319.7	4.25 ± 0.81	3.05 ± 0.38	3.36 ± 0.41	1.82 ± 0.49	1.21 ± 0.37	-0.11 ± 0.32
A496J043413.08-131231.6	2.57 ± 0.93	3.06 ± 0.43	1.90 ± 0.49	1.90 ± 0.56	0.47 ± 0.42	0.41 ± 0.42
A496J043408.50-131152.7	3.39 ± 2.54	3.40 ± 1.19	1.53 ± 1.40	1.63 ± 1.61	1.46 ± 1.18	0.45 ± 0.72
A496J043334.54-131137.1	6.10 ± 1.71	1.71 ± 0.86	2.15 ± 0.94	1.80 ± 1.08	1.58 ± 0.79	-0.11 ± 0.51
A496J043351.54-131135.5	1.55 ± 0.40	1.96 ± 0.19	2.80 ± 0.21	1.65 ± 0.24	0.93 ± 0.18	-0.30 ± 0.23
A496J043411.72-131130.2	3.21 ± 2.97	1.34 ± 1.48	2.61 ± 1.61	0.35 ± 1.95	-0.12 ± 1.45	-0.12 ± 0.46
A496J043413.00-131003.5	4.81 ± 0.24	3.80 ± 0.11	2.68 ± 0.12	2.27 ± 0.14	1.55 ± 0.11	0.23 ± 0.11
A496J043355.55-131024.9	3.00 ± 1.02	2.49 ± 0.49	2.84 ± 0.52	2.17 ± 0.61	1.98 ± 0.44	-0.14 ± 0.45
A496J043342.83-130846.8	3.51 ± 0.22	2.89 ± 0.10	2.15 ± 0.12	1.99 ± 0.13	1.52 ± 0.10	0.25 ± 0.13
A496J043329.79-130851.7	3.60 ± 0.54	2.40 ± 0.26	2.33 ± 0.29	0.96 ± 0.34	0.82 ± 0.25	0.16 ± 0.30
A496J043410.60-130756.7	5.49 ± 0.96	2.17 ± 0.47	2.30 ± 0.52	2.26 ± 0.60	1.20 ± 0.45	-0.11 ± 0.49
A496J043359.03-130626.7	3.94 ± 0.48	2.08 ± 0.23	1.68 ± 0.26	2.06 ± 0.30	1.78 ± 0.22	0.11 ± 0.23
A496J043348.59-130558.3	3.77 ± 0.26	3.55 ± 0.12	2.70 ± 0.13	2.38 ± 0.15	1.71 ± 0.11	0.16 ± 0.12
A496J043349.08-130520.5	3.82 ± 0.27	3.03 ± 0.13	2.51 ± 0.14	2.06 ± 0.16	1.53 ± 0.12	0.15 ± 0.14
A496J043343.04-130514.1	4.64 ± 0.28	3.62 ± 0.13	2.42 ± 0.15	1.86 ± 0.17	1.28 ± 0.13	0.31 ± 0.12
A496J043345.67-130542.2	4.87 ± 0.23	2.89 ± 0.11	2.92 ± 0.12	2.28 ± 0.14	1.68 ± 0.11	-0.06 ± 0.12
A496J043350.17-125945.4	2.59 ± 1.23	1.77 ± 0.61	1.14 ± 0.68	2.44 ± 0.76	1.84 ± 0.56	0.13 ± 0.34
A496J043356.18-125913.1	1.15 ± 0.10	1.54 ± 0.05	1.42 ± 0.06	1.29 ± 0.07	0.77 ± 0.05	0.11 ± 0.08
A496J043343.04-125924.4	2.64 ± 1.10	2.90 ± 0.52	2.23 ± 0.58	2.36 ± 0.67	3.15 ± 0.46	0.17 ± 0.42
A496J043326.49-131717.8	4.38 ± 0.82	2.55 ± 0.39	3.54 ± 0.42	1.91 ± 0.49	1.70 ± 0.36	-0.24 ± 0.27
A496J043318.95-131726.9	3.97 ± 0.56	2.78 ± 0.26	3.02 ± 0.29	2.18 ± 0.33	1.42 ± 0.25	-0.11 ± 0.24
A496J043325.15-131715.9	2.08 ± 1.79	4.80 ± 0.76	2.81 ± 0.89	2.29 ± 1.03	1.88 ± 0.76	0.37 ± 0.51
A496J043317.75-131536.6	4.68 ± 1.21	2.94 ± 0.59	1.62 ± 0.68	1.22 ± 0.78	0.55 ± 0.60	0.48 ± 0.49
A496J043325.40-131414.6	4.75 ± 0.51	2.63 ± 0.25	2.11 ± 0.28	2.01 ± 0.32	1.69 ± 0.23	0.19 ± 0.28
A496J043324.91-131342.6	2.86 ± 0.41	3.20 ± 0.19	3.00 ± 0.21	1.69 ± 0.24	1.41 ± 0.18	0.07 ± 0.18
A496J043306.97-131238.8	3.91 ± 0.45	3.40 ± 0.21	2.59 ± 0.23	2.05 ± 0.27	1.77 ± 0.20	0.20 ± 0.19
A496J043324.61-131111.9	4.52 ± 1.04	3.07 ± 0.49	2.45 ± 0.55	2.04 ± 0.63	0.76 ± 0.48	0.18 ± 0.40
A496J043325.10-130906.6	2.22 ± 1.62	2.28 ± 0.77	1.68 ± 0.88	1.66 ± 1.02	0.83 ± 0.77	0.22 ± 0.47
A496J043312.08-130449.3	3.07 ± 1.15	2.70 ± 0.55	2.17 ± 0.62	1.27 ± 0.73	0.64 ± 0.55	0.30 ± 0.59
A496J043321.37-130416.6	2.66 ± 0.24	1.39 ± 0.12	1.74 ± 0.13	1.13 ± 0.15	1.21 ± 0.11	-0.03 ± 0.13
A496J043325.54-130408.0	2.02 ± 1.52	2.28 ± 0.73	0.94 ± 0.85	2.61 ± 0.94	0.59 ± 0.75	0.30 ± 0.51
A496J043320.35-130314.9	5.48 ± 0.13	3.67 ± 0.07	2.94 ± 0.07	2.50 ± 0.08	1.39 ± 0.06	0.10 ± 0.08
A496J043308.85-130235.6	4.63 ± 0.29	3.07 ± 0.14	2.46 ± 0.15	2.46 ± 0.18	1.71 ± 0.13	0.12 ± 0.14

Таблица 4.2: Измерения некоторых Ликских индексов и вычисленные значения [Mg/Fe] согласно Thomas et al. (2003). Все значения индексов приведены в Å, [Mg/Fe] в dex.

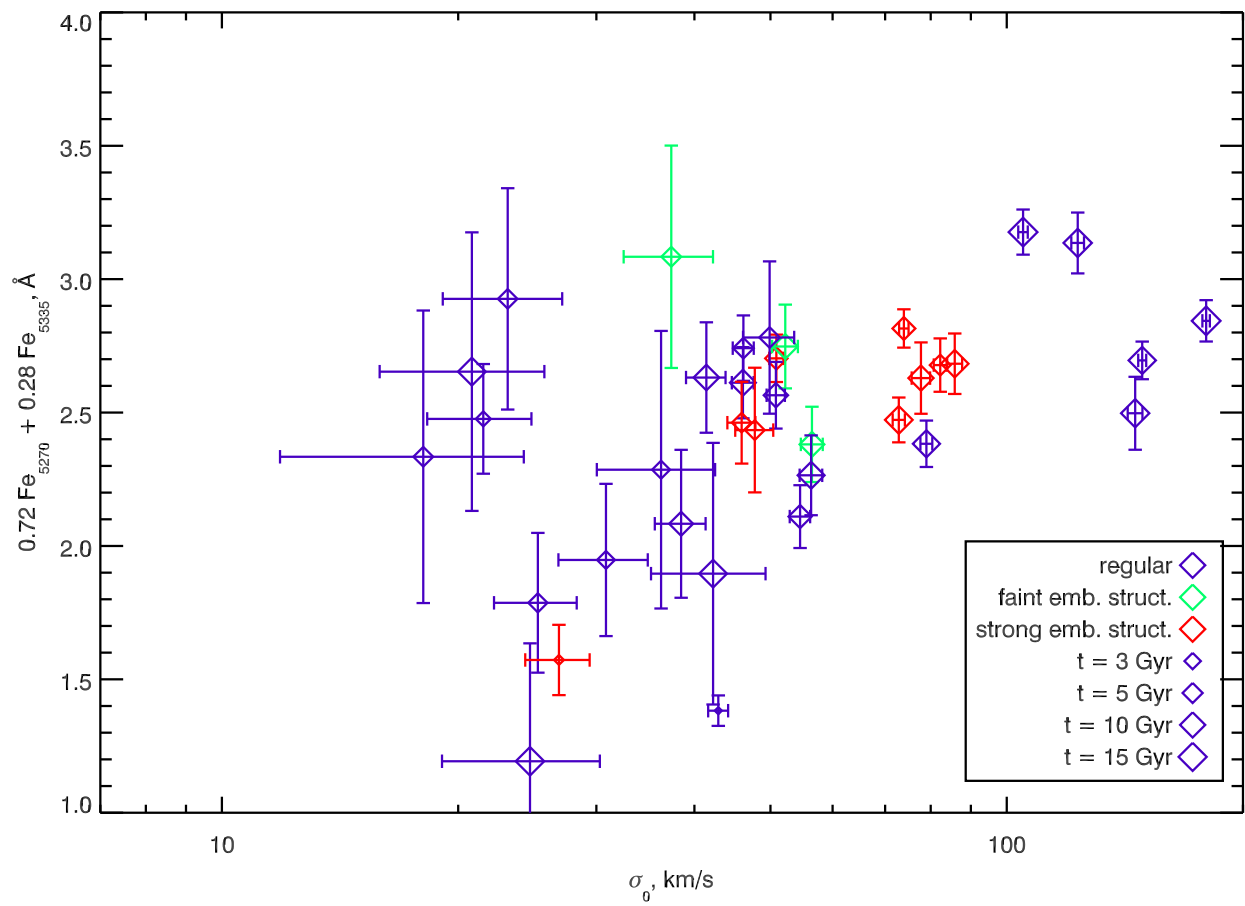


Рис. 4.2: Соотношение $\langle \text{Fe} \rangle$ - σ_0 . Показаны только объекты с $\Delta(\text{Mgb}) < 0.5 \text{ \AA}$.

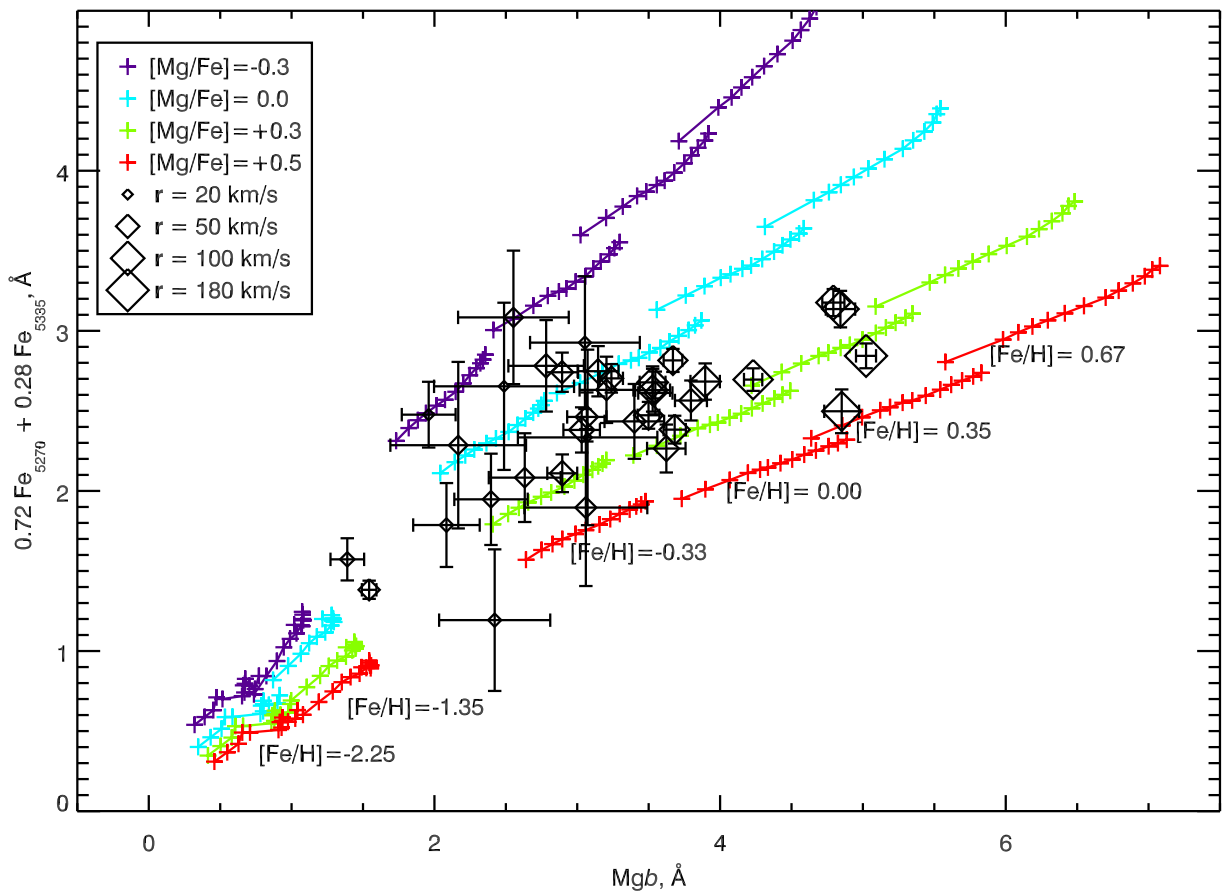


Рис. 4.3: Mgb vs $\langle Fe \rangle$ с индикацией центральных дисперсий скоростей размерами значков. Показаны сетки моделей Thomas et al. (2003) для различных значений $[\alpha/Fe]$. Показаны только объекты с $\Delta(Mgb) < 0.5 \text{ \AA}$.

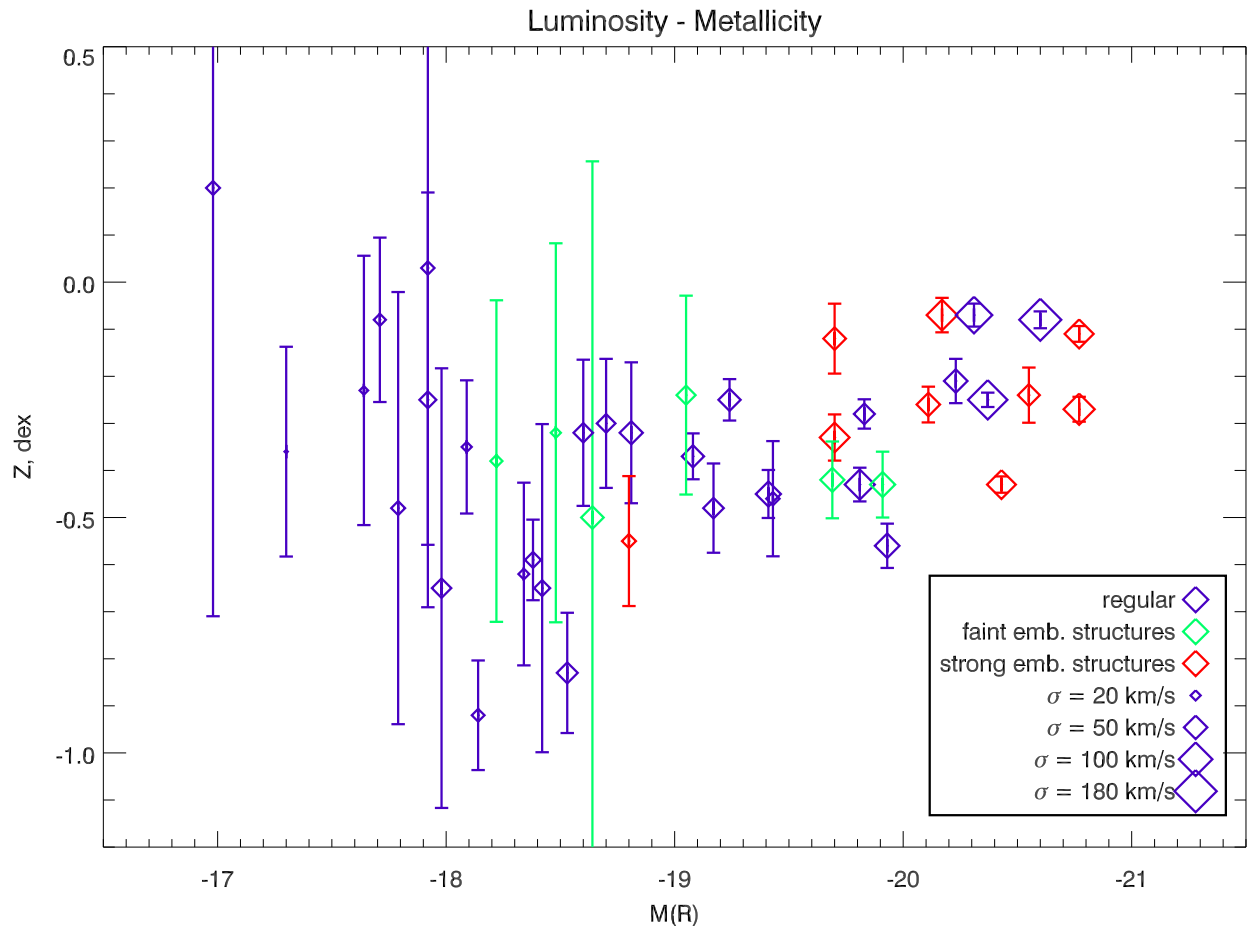


Рис. 4.4: Зависимость светимости (в фильтре R) - металличности. Отражено наличие вложенных структур.

На рисунках 4.4 and 4.5 показаны соотношения светимость–металличность и светимость–возраст. Хорошо видно, что галактики низких светимостей имеют тенденцию к низким металличностям и молодым возрастам, хотя разброс в оценках возраста достаточно велик из-за низких отношений сигнал-шум в спектрах слабых объектов.

4.3 Фундаментальные Соотношения

Совместный анализ фотометрических и кинематических данных предоставляет возможность исследования фундаментальных параметров галактик из нашей выборки и их сравнения с опубликованными данными.

Соотношение Faber-Jackson (Faber & Jackson 1976), отражающее связь ди-

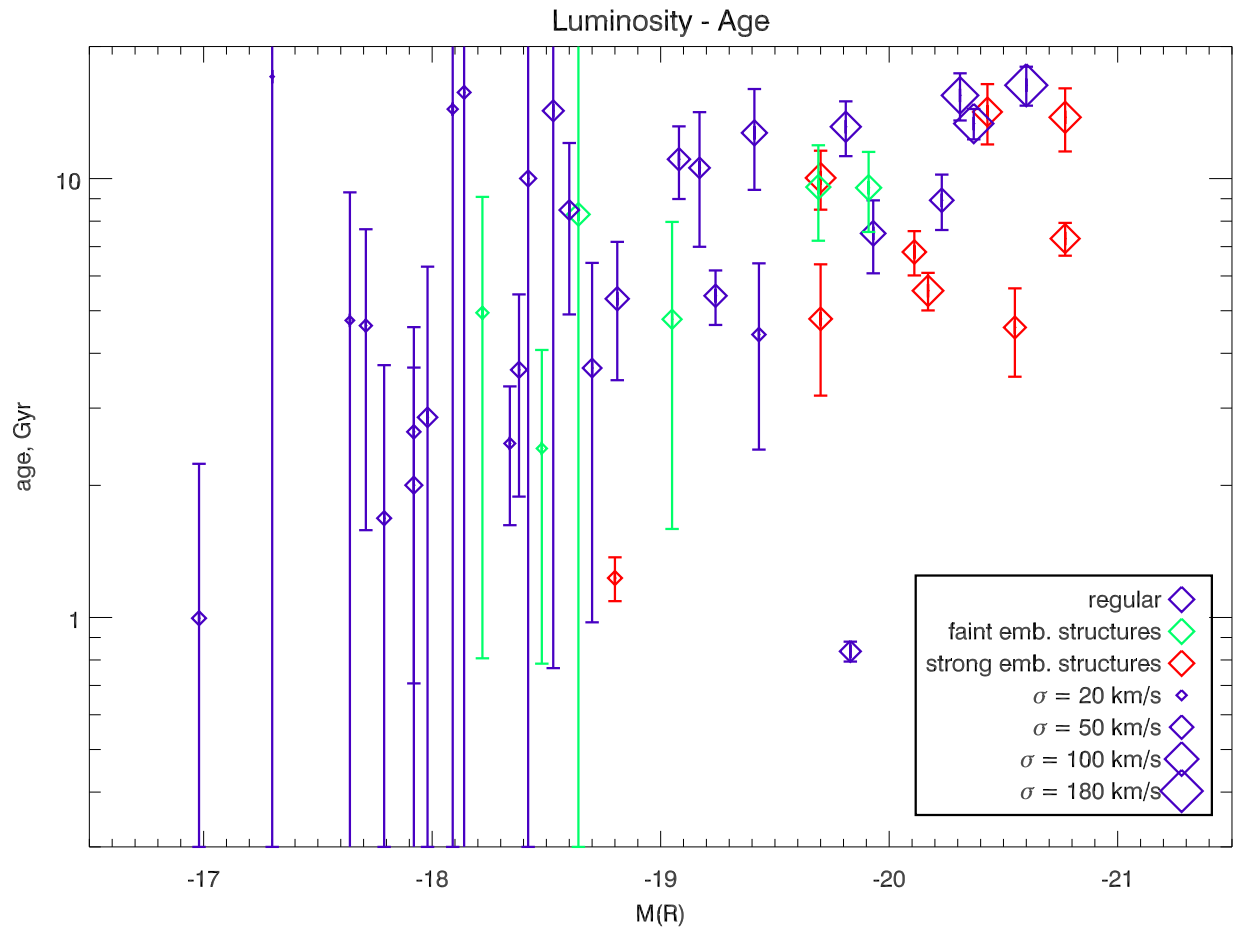


Рис. 4.5: Зависимость светимости (в фильтре R) - возраст. Отражено наличие вложенных структур.

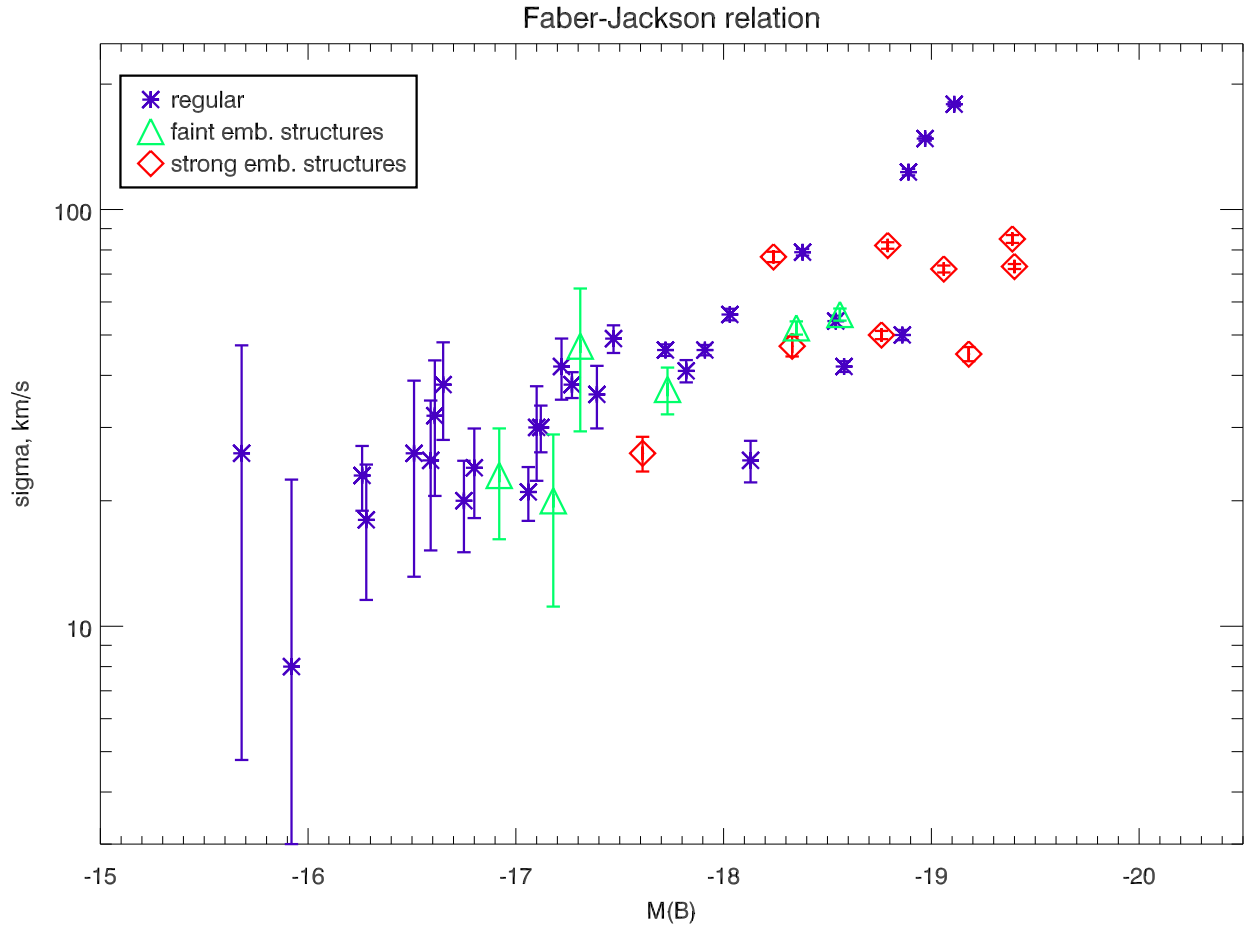


Рис. 4.6: Соотношение Faber-Jackson.

намической и звездной масс показано на Рис. 4.6.

Мы построили фундаментальную плоскость (Djorgovski & Davis 1987) путем комбинации кинематических данных и результатов поверхностной фотометрии. Уравнение из работы Djorgovski & Davis (1987), переписанные с использованием R_e , I_e , и σ_0 (см. Guzman et al. 1993) можно привести к следующему виду:

$$\log R_e = -8.666 + 0.314\mu_B + 1.14 \log \sigma_0, \quad (4.1)$$

где μ_{eff} – эффективная поверхностная яркость в диапазоне В в единицах mag arcsec^{-2} , R_e – эффективный радиус в крс, и σ_0 – центральная дисперсия скоростей в km s^{-1} .

Вид фундаментальной плоскости с ребра показан на Рис. 4.7. Зависимость отклонений фундаментальной плоскости от SSP-эквивалентных возрастов по-

казано на Рис. 4.7(bottom). Можно заметить анти-корреляцию этих отклонений с возрастом, что может быть объяснено более высокими поверхностными яркостями звездного населения с более молодым возрастом при фиксировании остальных параметров.

4.4 Обсуждение и Выводы

Обычно рассматриваются два сценария устранения газа из dE галактик: (1) галактические ветры на ранних этапах эволюции звездного населения (взрывы сверхновых); (2) выметание газа лобовым давлением при пересечении центра скопления. Идея галактических ветров основана на предположении о том, что гравитационное поле маленьких галактик не достаточно сильное, чтобы удержать межзвездную среду от выметания взрывами сверхновых второго типа SN II во время первого интенсивного эпизода звездообразования.

Этот сценарий ведет к быстрой потере газа и остановке звездообразования в течение короткого времени после его начала (10–100 Myr). Соответственно, более поздние взрывы SN Ia не дадут вклада в обогащение звездного населения железом. Таким образом, короткая продолжительность эпизода звездообразования приведет к переобогащению α -элементами ($[\alpha/\text{Fe}] > 0$). Это явление наблюдается в шаровых скоплениях и, довольно часто, в гигантских галактиках ранних типов (Sil'chenko 2006, Kuntschner et al. 2006). Если газ устраняется из dE галактик галактическими ветрами, следует ожидать повышенного значения $[\text{Mg}/\text{Fe}]$, и эффект должен усиливаться при уменьшении динамической массы галактик.

Однако, в случае Abell 496, $[\text{Mg}/\text{Fe}]=0$ практически для всех маломассивных объектов ($\sigma_0 < 60 \text{ km/s}$). Следовательно мы не можем рассматривать сценарий галактических ветров как единственное объяснение наблюдаемых свойств dE галактик. Но обойтись полностью без участия этого механизма затруднительно, так как существует наблюдаемая корреляция между металличностью и светимостью (Рис.4.4). Мы можем сделать вывод, что наблюдаемые солнечные отношения $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ в маломассивных объектах накладывают нижнее ограничение на продолжительность эпизода звездообразования

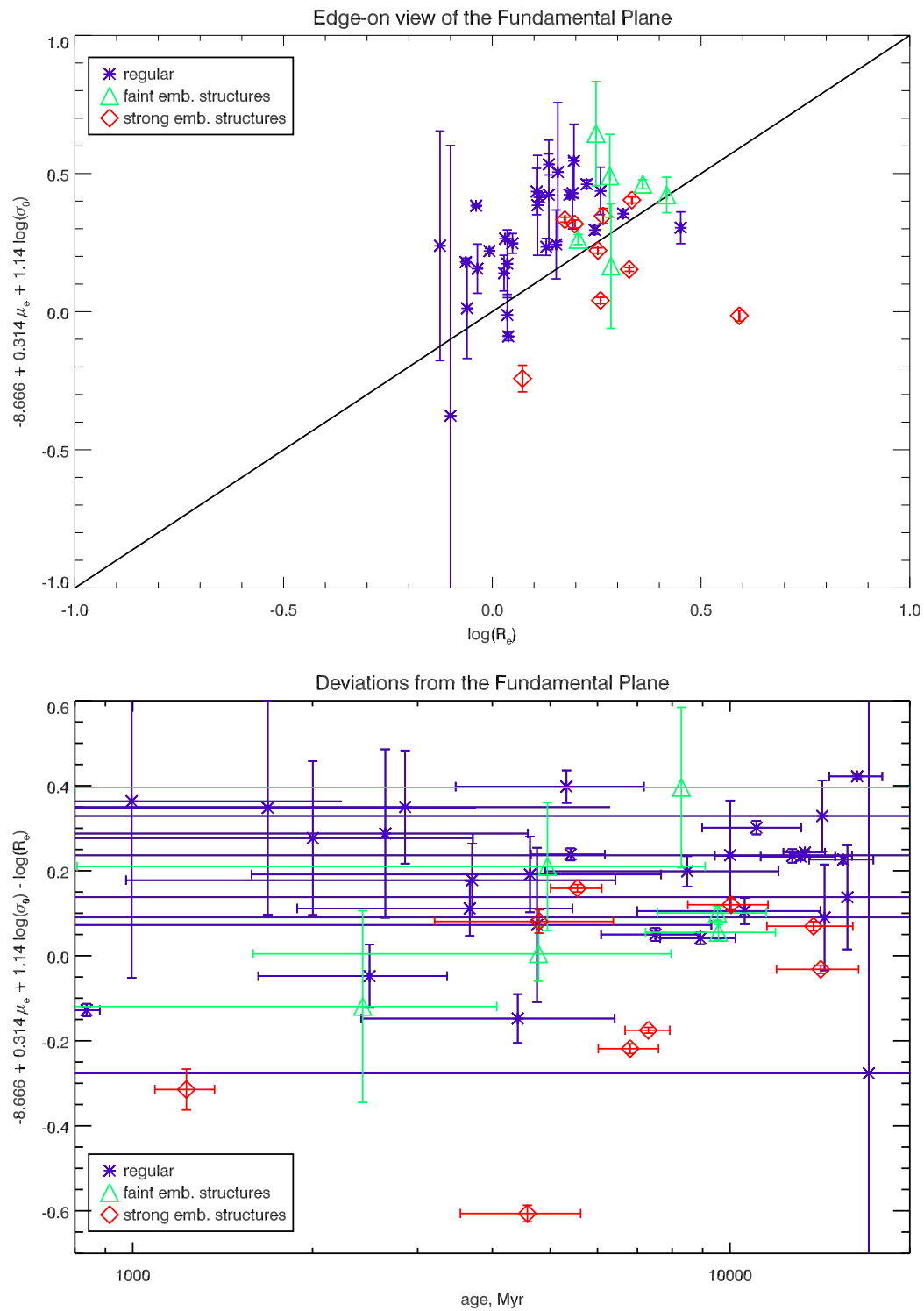


Рис. 4.7: Вид с ребра на фундаментальную плоскость (сверху) и отклонения от нее в зависимости от возраста (снизу). Отражено наличие вложенных структур.

в 1–2 Gyr – минимального времени, необходимого для обогащения звездного населения железом (Matteucci 1994). С другой стороны, выметание газа лобовым давлением из галактик поздних типов выглядит вполне приемлемым сценарием. Если предположить, что галактики поздних типов формируются во внешних частях скопления, а затем падают на центральную часть, запас времени оказывается достаточным для осуществления обогащения железом: типичное время падения порядка нескольких Gyr.

Если выметание газа лобовым давлением играет ключевую роль в процессе удаления газа, следует ожидать значительного разброса средних возрастов маломассивных объектов, которые могут полностью потерять газ при первом пересечении центра скопления, так как это событие может наступить в любой момент в течение жизни галактики. Из-за недостаточной статистики, анализируя наши данные, мы не можем дать однозначный ответ, обусловлен ли разброс оценок возрастов (Рис. 4.5) эффектами лобового давления или недостаточной точностью измерений – требуются более глубокие наблюдения более широкой выборки галактик.

Присутствие слабых вложенных дисков в некоторых галактиках – еще один важный аргумент в пользу эволюционной связи между карликовыми галактиками поздних и ранних типов. Этот результат согласуется с N-body моделированием морфологической эволюции галактик поздних типов в скоплениях (Mastropietro et al. 2005), показывающей, что диски не будут полностью разрушены. Наш основной вывод – dE галактики происходят от галактик поздних типов, сформировавшихся во внешних частях скопления, испытавших приливное взаимодействие с потенциалом скопления и другими галактиками и воздействие лобового давления межгалактической среды при пересечении центра скопления.

4.5 Приложение: cE галактика в скоплении Abell 496

Мы открыли объект, принадлежащий к очень редкому классу компактных эллиптических галактик (cE). В настоящее время известны только 5 представителей этого типа: M32, NGC4486B, NGC5846A и два объекта, обнаружен-

ные недавно в скоплении Abell 1689 (Mieske et al. 2005).

Компактные эллиптические галактики очень сильно отличаются от диффузных галактик. На диаграмме Kormendy (Kormendy, 1985) они (сЕ) расположены на продолжении последовательности (в сторону уменьшения эффективного радиуса), формируемой гигантскими эллиптическими галактиками и балджами спиралей, в то время как диффузные галактики формируют отдельную ветвь. Мы нашли шестой объект класса сЕ практически в самом центре скопления (расстояние в проекции 16 кpc). Как и три из пяти известных сЕ галактик, он расположен в гало большой галактики: центральной CD галактики скопления Abell 496 (PGC 15524). Центральная дисперсия скоростей, 105 km s^{-1} , довольно высока для светимости этого объекта, что может рассматриваться как свидетельство в пользу наличия центральной черной дыры, что установлено для M 32 по присутствию пика в распределении дисперсии скоростей около ее центра (Simien & Prugniel, 2002). Параметры звездного населения сЕ галактики в Abell 496: $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.04 \pm 0.04 \text{ dex}$; $[\text{Mg}/\text{Fe}] = 0.15 \pm 0.07 \text{ dex}$; $t = 16 \pm 3 \text{ Gyr}$. Оно оказывается существенно старше, чем население M 32 ($t=7 \text{ Gy}$, Caldwell et al. 2003, Rose et al. 2005), хотя металличность этих объектов практически совпадает.

Спектр и его наилучшая аппроксимация моделью PEGASE.HR показаны на Рис. 4.8.

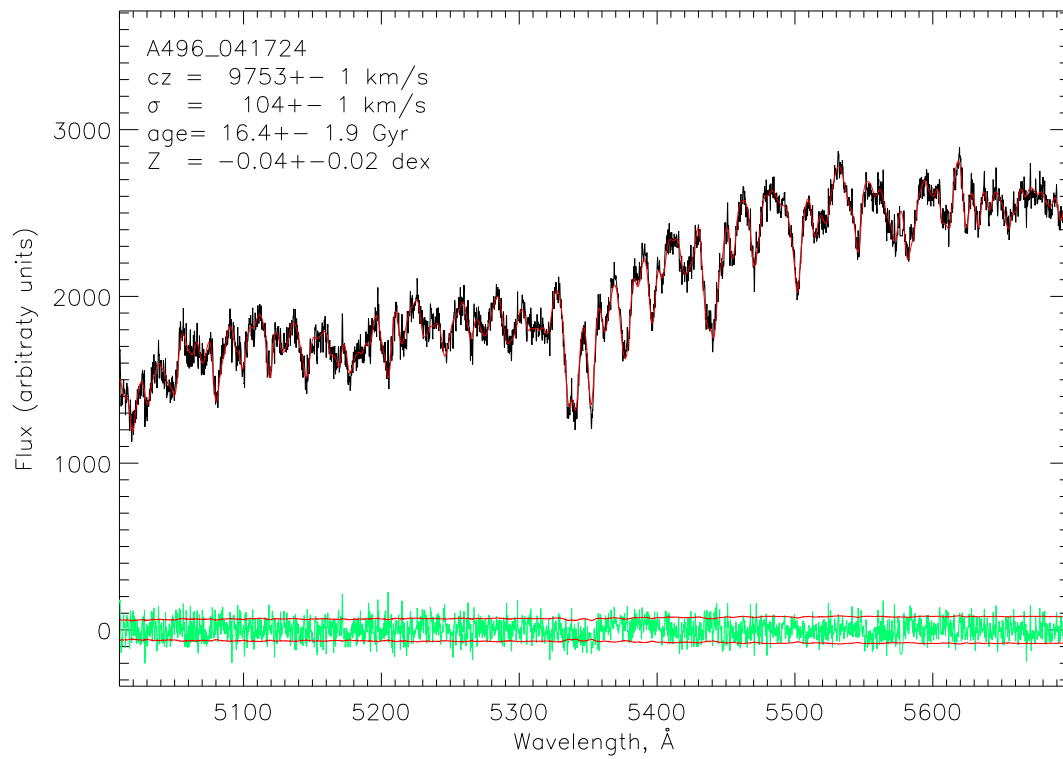


Рис. 4.8: Спектр компактной эллиптической галактики (сЕ), открытой в скоплении Abell 496.

Заключение

Диссертация посвящена наблюдательному исследованию эволюции карликовых эллиптических галактик. Несмотря на то, что эти объекты являются самым распространенным типом галактик во Вселенной, их происхождение и эволюция до сих пор остаются предметом дискуссий. Основываясь на морфологическом сходстве, большинство исследователей сходятся во мнении об эволюционной связи карликовых эллиптических галактик с карликовыми иррегулярными: в результате секулярной эволюции dIrr галактики превращаются в dE. Из наблюдений известно, что в dE галактиках в настоящее время не происходит процесс звездообразования и отсутствует ионизованный газ. Таким образом фундаментальной проблемой в построении теории эволюции dE галактик является выбор сценария потери газа и, как следствие, остановки звездообразования. Хотя на текущий момент опубликованы довольно большие выборки спектральных данных для dE галактик, ни одна из групп авторов не пыталась установить связь между внутренней кинематикой и звездными населением в этих объектах. В данной работе приводится попытка совместного анализа этих характеристик, основанная на высококачественном наблюдательном материале, полученном на крупных телескопах.

В Главе 1 представлен новый метод аппроксимации наблюдаемых спектров галактик моделями, полученными в результате эволюционного моделирования. Благодаря высокой чувствительности, метод открывает новые горизонты в исследовании кинематики и звездного населения по абсорбционным спектрам.

В Главах 2-4 представлен анализ наблюдений карликовых эллиптических галактик в скоплениях и группах, полученный на панорамном спектрографе MPFS (6-м телескоп БТА САО РАН), мультиобъектном спектрографе Giraffe-

FLAMES (8-м телескоп VLT, ESO) и камере широкого поля Megacam (3.6-м телескоп CFHT). Данная работа является первым в мире примером исследования выборки карликовых эллиптических галактик методами панорамной спектроскопии.

Проведенный в работе анализ позволяет утверждать, что окружение играет ключевую роль в эволюции карликовых галактик. Только выметание газа лобовым давлением в скоплениях, центральных частях групп галактик, содержащих горячий газ, либо гало крупных галактик, не противоречит ни одному из наблюдаемых проявлений dE галактик. Еще один сценарий, который нельзя полностью исключать – приливное взаимодействие с другими членами скопления или группы. Хотя эта возможность предсказывается космологическими моделями, она реализуется только в том случае, если прямым наблюдениям доступно не более 1 процента членов скоплений, а остальные представляют собой только гало темной материи без присутствия видимого вещества.

На реальном примере продемонстрирована возможность формирования вложенных дисков (в том числе противовращающихся) в dE галактиках при нахождении в динамически холодном окружении – в группах галактик.

Несмотря на то, что методика панорамной спектроскопии в последние годы получила широкое распространение, до сих пор не существует общепринятых стандартов для хранения и доступа к 3D-данным. Этот вопрос стал еще более актуальным в связи с бурным развитием проекта "Международная Виртуальная Обсерватория". В приложении к диссертации приведен способ построения полного и самодостаточного описания данных 3D-спектроскопии (модель данных), необходимого для организации доступа к подобным данным, и, соответственно, для создания архивов обработанных данных, готовых для научного анализа (science-ready data).

На защиту выносятся

1. Методика определения параметров внутренней кинематики и оценки параметров звездного населения галактик по спектрам, интегрированным

вдоль луча зрения, основанная на аппроксимации наблюдений синтетическими спектрами звездного населения. При применении методики к оптическим спектрам среднего разрешения ($R = 2000$) точность оценки параметров звездного населения улучшается в 3–5 раз по сравнению с существующими подходами (например, измерением Ликских индексов).

2. Двумерные поля лучевых скоростей звезд, двумерные пространственные распределения дисперсий скоростей и SSP-эквивалентных параметров звездного населения (возраст и металличность) карликовых эллиптических и линзовидных галактик в скоплении Дева: IC 783, IC 3468, IC 3509 и IC 3653, и галактик низкой светимости в группах: NGC 127 (группа NGC 128) и NGC 770 (группа NGC 772); двумерное поле скоростей ионизованного газа в галактике NGC 127, полученные в результате анализа данных панорамной спектроскопии на 6-м телескопе БТА САО РАН (спектрограф MPFS). Все эти характеристики получены впервые в мире для галактик данного типа.
3. Каталог параметров, содержащий лучевые скорости, центральные дисперсии скоростей, измерения Ликских индексов, SSP-эквивалентные значения возрастов, металличностей и обилия α -элементов в 46 галактиках ранних типов (из них 25 галактик - карликовые эллиптические и карликовые линзовидные) скопления Abell 496, полученные в результате анализа данных мультиобъектной спектроскопии на 8-м телескопе VLT (спектрограф FLAMES-GIRAFFE). Точность приведенных измерений в 3–8 раз превосходит точность опубликованных данных для похожих выборок карликовых галактик.
4. Открытие эволюционно-выделенных ядер в карликовых эллиптических галактиках в скоплении Дева. Принимая во внимание этот результат и сложную кинематику наблюдавшихся галактик, свидетельствующую в пользу наличия вложенных звездных дисков, сделан вывод о наиболее вероятном механизме потери газа в карликовых эллиптических галактиках – выметании газа лобовым давлением.

5. Методика универсального описания, хранения и механизмы доступа к данным панорамной спектроскопии в Виртуальной Обсерватории. Эта методика является ключевым моментом для создания архивов данных 3D-спектроскопии.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность научным руководителям: О. К. Сильченко и Philippe Prugniel. Автор признателен поддержке всех своих со-авторов и коллабораторов, в частности: Victor Afanasiev (SAO RAS, Russia), Francois Bonnarel (CDS, Strasbourg, France), Veronique Cayatte (Observatoire de Paris-Meudon, France), Sven De Rijcke (University of Ghent, Belgium), Marie-Lise Dubernet (Observatoire de Paris-Meudon, France), Florence Durret (IAP, France), Mina Koleva (CRAL Observatoire de Lyon, France / University of Sofia, Bulgaria), Mireille Louys (CDS, Strasbourg, France), Pierre Le Sidaner (Observatoire de Paris-Meudon, France), Jonathan McDowell (Harvard-Smithsonian CfA, USA), Chantal Petit (CRAL Observatoire de Lyon, France), Francois Simien (CRAL Observatoire de Lyon). Особая благодарность Алексею Моисееву за поддержку наблюдений карликовых галактик на 6-м телескопе САО РАН. Визиты автора во Францию поддерживались грантом CNRS и фондом EGIDE (через Отдел Науки и Технологий посольства Франции в России). Диссертация написана в рамках гранта молодых ученых фонда INTAS: Young Scientist Fellowship (04-83-3618). Исследования карликовых галактик поддерживаются в рамках совместного российско-бельгийского проекта РФФИ-Flaanders (RFBR-05-02-19805-MF_a). Автор признателен научным орг. комитетам следующих конференций, предоставлявших финансовую поддержку для участия в них: JENAM-2004, ADASS, "Mapping the Galaxy and Nearby Galaxies", "Science Perspectives for 3D Spectroscopy", и Международному Астрономическому Союзу за выделение гранта на участие в IAU Colloquium 198. Особые благодарности Комитету по Тематике Больших Телескопов РАН за предоставление наблюдательного времени на 6-м телескопе САО РАН. Мы благодарны сотрудникам центра астрономических данных

Тегаріх (Парижский Институт Астрофизики) за компетентность и эффективность в обработке изображений Megacam.

Особые благодарности аспиранту астрономического отделения физического ф-та МГУ Ивану Золотухину за неоценимую помощь в создании русского варианта диссертации.

Отдельная благодарность родителям: Владимиру и Людмиле Чилингарян за моральную поддержку во время выполнения диссертации.

Приложение А

3D-спектры в Виртуальной Обсерватории

А.1 3D-спектроскопия, краткое введение

Полевая (или 3D) спектроскопия – современная методика астрономических наблюдений, предложенная Georges Courtés в конце 60х. Ее идея состоит в получении спектра для каждой точки поля зрения спектрографа.

Один из подходов предполагает использование сканирующего интерферометра Фабри-Перо (IFP). В этом случае результат обработки данных представляет собой набор прямых изображений, полученных в очень узком спектральном диапазоне, причем диапазоны немного пересекаются для соседних изображений. Эта структура, содержащая как спектральную, так и пространственную информацию, называется кубом данных – она содержит короткий спектр в каждом пространственном пикселе. Кубы данных IFP обычно имеют сравнительно короткое спектральное измерение, но широкие диапазоны по пространственным координатам. Похожий подход используется в течение последних нескольких десятков лет в радиоастрономии, и данные выглядят сходным образом.

Другой подход состоит в ”нарезании” поля зрения с помощью микролинзового блока либо специального резателя изображения (Integral Field Unit, or IFU). Результат нарезания становится одномерным (как щель) и подается на вход ”классического” спектрографа (см. обзор различных методик нарезания изображения в Pécontal-Rousset et al., 2004). Результирующий куб данных

обычно содержит короткие пространственные измерения, но длинное спектральное, которое может быть на один-два порядка длиннее.

Первые реализации 3D-спектрографов появились в 80х и немедленно продемонстрировали преимущества этой методики при изучении как звездобразных, так и протяженных объектов. В настоящее время в мире активно используется более десятка 3D-спектрографов, они установлены практически на всех крупных телескопах. Эти инструменты производят растущий объем 3D-данных, и вопрос распространения этих данных в Виртуальной Обсерватории стал важным и актуальным.

Создание архива данных предполагает определение следующих необходимых метаданных: **Data Description: Описание Данных**, **Data Storage Format: Формат Хранения Данных** и **Query Interface and Data Retrieval: Интерфейс Доступа и Извлечение Данных**. В то время, как существует хорошее и универсальное решение для формата хранения данных – формат Euro3D FITS, разработанный научно-исследовательской сетью Euro3D (Kissler-Patig et al. 2004), два оставшихся аспекта полагаются на Виртуальную Обсерваторию.

A.2 IVOA Characterisation Data Model

Абстрактное, самодостаточное и стандартизованное описание астрономических данных известно как "модель данных". Предполагается, что такое описание должно быть эффективным для любого сорта обработки и анализа данных. Рабочая группа Data Modeling Международного Альянса Виртуальных Обсерваторий (IVOA) занимается разработкой моделей для различных типов астрономических данных, каталогов, и более общих понятий, таких как "величина" (Quantity). Наиболее общее описание наблюдаемых или теоретических данных будет производиться с помощью будущей модели данных Observational DM (McDowell et al. 2004 in prep.). Ее основные подклассы: Observation, DataCollection, Curation, Provenance и Characterisation. Последний из них предоставляет физическое описание данных, в то время как остальные имеют дело больше со специфической информацией для данного

инструмента либо социологическими вопросами. Characterisation была выделена в отдельную модель данных (McDowell et al. 2006 in prep.), интенсивно разрабатывающуюся в настоящее время.

Characterisation DM – способ сказать где, насколько протяженно и в каком направлении, расположен набор наблюдательных данных в многомерном пространстве параметров, имеющем следующие оси: **spatial: пространственная**, **temporal: временная**, **spectral: спектральная**, **observed: наблюдаемая** (e.g. поток), **polarimetric: поляриметрическая**, как и другие произвольные оси. Для каждой оси существуют три характеризующих свойства: **coverage: покрытие**, **resolution: разрешение** и **sampling: дискретизация**. Каждая ось также содержит специфический подкласс **axisFrame**, предназначенный для определения ошибок, а также включающий некоторые специфические для данной оси метаданные. Для каждой их осей могут быть даны четыре уровня характеристики, соответствующие различной детализации описания:

1. **location: положение** или **reference value: опорное значение**, задающее среднее положение данных на текущей оси параметров
2. **bounds: границы** для описания минимальной и максимальной границ интервала
3. **support: поддержка**, более точно описывающий регионы на оси параметров в виде набора отрезков (или многоугольников)
4. **map: карта**, показывающая детальную карту "чувствительности", содержащую абсолютный "коэффициент пропуска" для каждого элемента объема пространства параметров

Первые два уровня характеристики предоставляют общую информацию, которая обычно уже существует в метаданных, предоставленных различными системами обработки данных, либо относительно просто вычисляется на основе обработанных данных. Эти уровни могут быть легко предоставлены как параметры с возможностью поиска сервисами доступа к данным (например, Simple Spectral Access Protocol (Tody et al. 2006 in prep.) допускает

параметры, специфичные для данного сервиса).

А.3 Характеризация 3D данных

Из-за сложности 3D данных мы предлагаем центрам астрономических данных предоставлять только два уровня метаданных для всего куба данных. Дальнейшие уровни могут быть даны дополнительно для каждого пространственного элемента (в случае IFU данных) или спектрального канала куба (для данных IFP или радио-данных).

Мы представляем способ характеристики данных IFU (в действительности, другие типы 3D данных могут быть охарактеризованы похожим образом). На Рис. А.1 Рис. А.2 мы демонстрируем, как вычислять метаданные characterisation для спектральной, пространственной и наблюдаемой осей реального IFU наблюдения. Мы разработали программный пакет для вычисления метаданных characterisation для IFU-данных в формате Euro3D. Мы также предлагаем внести некоторые модификации в формат Euro3D FITS для хранения информации временной (temporal) оси и разрешения.

”Живой” пример первых двух уровней метаданных characterisation куба данных, полученного с Мультизрачковым Волоконным Спектрографом (MPFS), установленном на 6-м телескопе CAO РАН, в формате XML доступен по следующей ссылке <http://www.sai.msu.su/~chil/VO/CharMPFS.xml>

А.4 Заключение

Моделирование данных – важнейший момент для построения архивов данных и средств обработки и анализа данных в рамках Виртуальной Обсерватории. Модель данных Characterisation DM имеет достаточную гибкость и полноту, чтобы применяться даже к таким сложным данным, как данные 3D-спектроскопии.

Принимая во внимание наличие модели данных Characterisation DM и расширяемости протокола Simple Spectral Access Protocol, мы заключаем, что су-

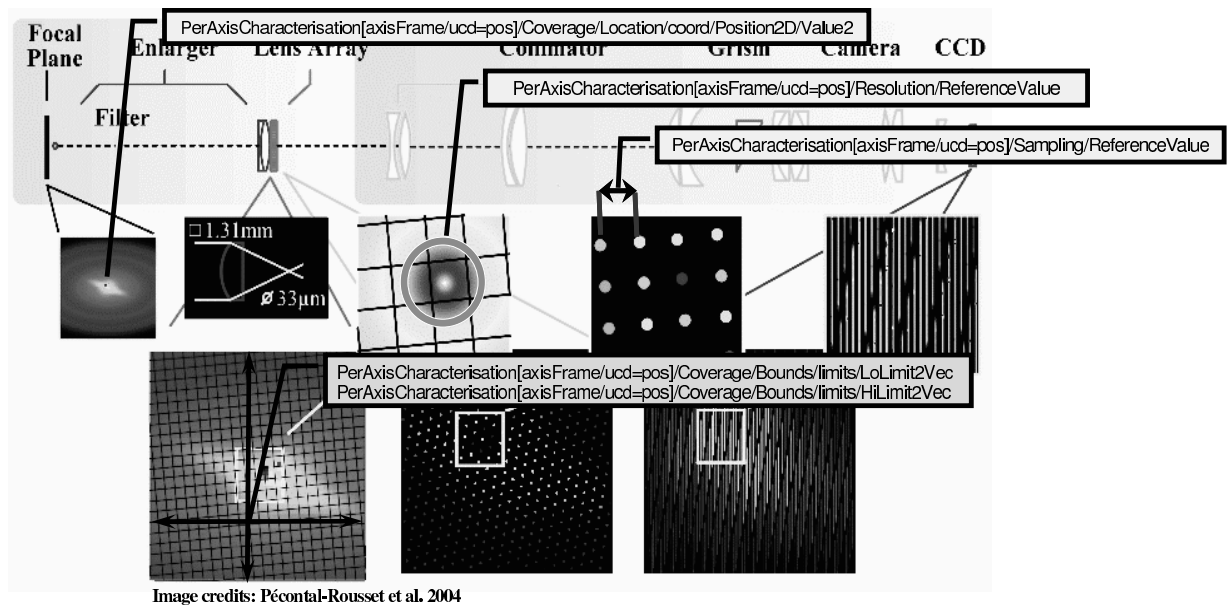
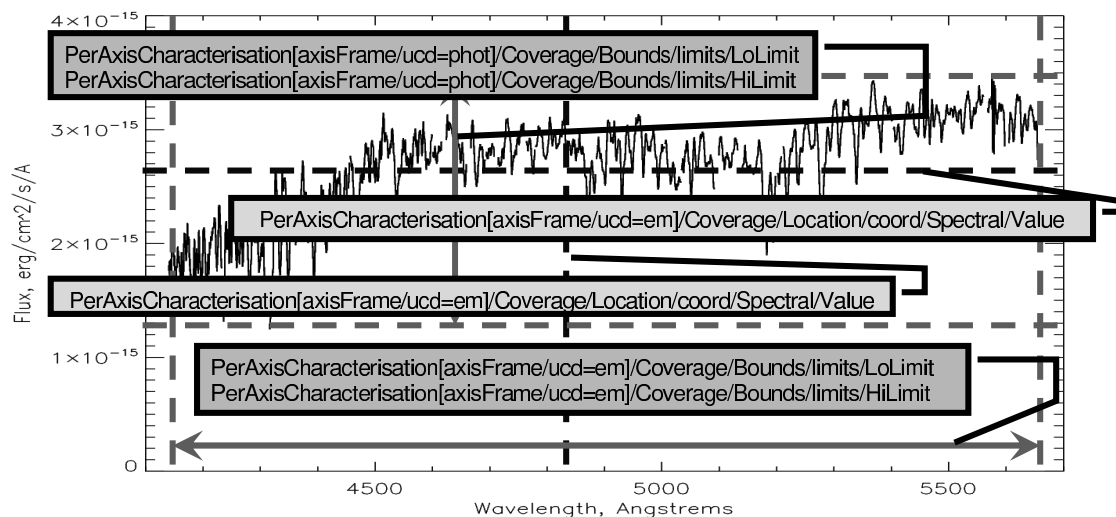


Рис. А.1: Пространственная ось для данных IFU спектроскопии.



PerAxisCharacterisation[axisFrame/ucd=em]/Resolution/ReferenceValue $\Rightarrow$ mean spectral resolution (FWHM)
PerAxisCharacterisation[axisFrame/ucd=em]/Sampling/ReferenceValue $\Rightarrow$ mean sampling (usually constant)
PerAxisCharacterisation[axisFrame/ucd=phot]/Resolution/ReferenceValue $\Rightarrow$ equivalent of 1 e^- (for CCD)
PerAxisCharacterisation[axisFrame/ucd=phot]/Sampling/ReferenceValue $\Rightarrow$ equivalent of 1 ADU (for CCD)

PerAxisCharacterisation[axisFrame/ucd=em]/Resolution/Bounds/limits can be computed using special techniques
PerAxisCharacterisation[axisFrame/ucd=em]/Sampling/Bounds/limits are not defined
PerAxisCharacterisation[axisFrame/ucd=phot]/Resolution/Bounds/limits are $[1\text{e}^-, 1\text{e}^-]$ for CCD
PerAxisCharacterisation[axisFrame/ucd=phot]/Sampling/Bounds/limits are $[1\text{ADU}, 1\text{ADU}]$ for CCD

Рис. А.2: Спектральная и наблюдаемая оси для данных IFU спектроскопии
 Процедура должна быть выполнена для всех спектральных сегментов.

ществуют вся необходимая инфраструктура для построения архивов готовых для использования (science-ready) 3D-данных, и средств для работы с ними. Мы ожидаем появление первых архивов 3D-данных в начале 2006 года.

Литература

Abadi, Mario G.; Moore, Ben; Bower, Richard G.; 1999, MNRAS, v.308, p.947

Abell, George O.; 1958, ApJS, v.3, p.211

Aguerri, J. A. L.; Debattista, Victor P.; Corsini, Enrico Maria; 2003, MNRAS, v.338, p.465

Aparicio, A.; 1994, ApJL, v.437, L27

Arp, Halton; 1966, ApJS, v.14, p.1

Baade, W.; 1944, ApJ, v.100, p.137

Babul, Arif; Rees, Martin J.; 1992, MNRAS, v.255, p.346

Bacon, R.; Adam, G.; Baranne, A.; Courtes, G.; Dubet, D.; Dubois, J. P.; Emsellem, E.; Ferruit, P.; Georgelin, Y.; Monnet, G.; Pecontal, E.; Rousset, A.; Say, F.; 1995, A&A Supplement, v.113, p.347

Barazza, F. D.; Binggeli, B.; Jerjen, H.; 2002, A&A, v.391, p.823

Bender, R.; 1990, A&A, v.229, p.441

Bender, R.; Nieto, J.-L.; 1990, A&A, v.239, p.97

Bertola, F.; Capaccioli, M.; 1975, ApJ, v.200, p.439

Binggeli, B.; Sandage, A.; Tammann, G. A.; 1985, AJ, v.90, p.1681

Binggeli, Bruno; Tammann, G. A.; Sandage, Allan; 1987, AJ, v.94, p.251

Binggeli, B.; Tarengi, M.; Sandage, A.; 1990, A&A, v.228, p.42

Binney, J.; 1976, MNRAS, v.177, p.19

- Blanchard, A.; Valls-Gabaud, D.; Mamon, G. A.; 1992, A&A, v.264, p.365
- Bottema, R.; 1988, A&A, v.197, p.105
- Bruzual, G.; Charlot, S.; 2003, MNRAS, v.344, p.1000
- Burstein, D.; Faber, S. M.; Gaskell, C. M.; Krumm, N.; 1984, ApJ, v.287, p.586
- Buyle, P.; De Rijcke, S.; Michielsen, D.; Baes, M.; Dejonghe, H.; 2005, MNRAS, v.360, p.853
- Caldwell, Nelson; Rose, James; Concannon, Kristi; 2003, AJ, v.125, p.2891
- Cappellari, Michele; Copin, Yannick; 2003, MNRAS, v.342, p.345
- Cappellari, Michele; Emsellem, Eric; 2004, PASP, v.116, p.138
- Cardiel, N.; Gorgas, J.; Cenarro, J.; Gonzalez, J. J.; 1998, A&AS, v.127, p.597
- Carraro, Giovanni; Chiosi, Cesare; Girardi, Léo; Lia, Cesario; 2001, MNRAS, v.327, p.69
- Cayatte, V.; Kotanyi, C.; Balkowski, C.; van Gorkom, J. H.; 1994, AJ, v.107, p.1003
- Chen, Yang; Zhao, G.; Nissen, P. E.; Bai, G. S.; Qiu, H. M.; 2003, ApJ, v.591, p.925.
- Chiosi, Cesare; Carraro, Giovanni; 2002, MNRAS, v.335, p.335
- Conselice, C.; Gallagher, J.; Wyse, R.; 2001, ApJ, v.559, p.791
- Conselice, C.; O'Neil, K.; Gallagher, J.; Wyse, R. ; 2003, ApJ, v.591, p.167
- Côté, Patrick; Blakeslee, John; Ferrarese, Laura; Jordán, Andrés; Mei, Simona; Merritt, David; Milosavljević, Milos; Peng, Eric; Tonry, John; West, Michael; 2004, ApJS, v.153, p.223
- Côté, Patrick; Piatek, Slawomir; Ferrarese, Laura; Jordán, Andrés; Merritt, David; Peng, Eric W.; Haegan, Monica; Blakeslee, John P.; Mei, Simona; West, Michael J.; Milosavljevi, Milo; Tonry, John L.; 2006, ApJS, v.165, p.57
- Da Costa, G. S.; Armandroff, T. E.; 1990, AJ, v.100, p.162

- De Bruyne, V.; De Rijcke, S.; Dejonghe, H.; Zeilinger, W. W.; 2004, MNRAS, v.349, p.461
- De Rijcke, S.; Dejonghe, H.; Zeilinger, W. W.; Hau, G. K. T.; 2001, ApJ, v.559, L21
- De Rijcke, S.; Dejonghe, H.; Zeilinger, W. W.; Hau, G. K. T.; 2004, A&A, v.426, p.53
- De Rijcke, S.; Michielsen, D.; Dejonghe, H.; Zeilinger, W. W.; Hau, G. K. T. ; 2005, A&A, v.438, p.491
- Dekel, A.; Silk, J.; 1986, ApJ, Part 1, v.303, p.39
- Djorgovski, S.; Davis, Marc; 1987, ApJ, Part 1, v.313, p.59
- Durret, F.; Adami, C.; Gerbal, D.; Pislari, V.; 2000, A&A, v.356, p.815
- Durret, F.; Lima Neto, G. B.; Adami, C.; Bagchi, J.; Covone, G.; Forman, W.; Kneib, J.-P.; Slezak, E.; Soucail, G.; 2005, SF2A-2005: Semaine de l'Astrophysique Francaise, meeting held in Strasbourg, France, June 27 - July 1, 2005, Edited by F. Casoli, T. Contini, J.M. Hameury and L. Pagani. Published by EdP-Sciences, Conference Series, 2005, p.709
- Efstathiou, G.; 1992, MNRAS, v.256, p.43P
- Emsellem, E.; Arsenault, R.; 1997, A&A, v.318, L39
- Emsellem, Eric; Cappellari, Michele; Peletier, Reynier F.; McDermid, Richard M.; Bacon, R.; Bureau, M.; Copin, Y.; Davies, Roger L.; Krajnovic, Davor; Kuntschner, Harald; Miller, Bryan W.; de Zeeuw, P. Tim; 2004, MNRAS, v.352, p.721
- Faber, S. M.; 1972, A&A, v.20, p.361
- Faber, S. M.; Jackson, R. E.; 1976, ApJ, v.204, p.668
- Ferguson, Henry C.; Binggeli, Bruno; 1994, A&A Review, v.6, p.67
- Ferrarese, Laura; Côté, Patrick; Jordán, Andrés; Peng, Eric W.; Blakeslee, John P.; Piatek, Slawomir; Mei, Simona; Merritt, David; Milosavljevic, Milos; Tonry, John L.; West, Michael J.; 2006, ApJS, v.164, p.334

- Fioc, M.; Rocca-Volmerange, B.; 1997, A&A, v.326, p.950
- Gavazzi, G.; Boselli, A.; Donati, A.; Franzetti, P.; Scoddeggio, M.; 2003, A&A, v.400, p.451
- Geha, M.; Guhathakurta, P.; van der Marel, R. P.; 2002, AJ, v.124, p.3073
- Geha, M.; Guhathakurta, P.; van der Marel, R. P.; 2003, AJ, v.126, p.1794
- Geha, M.; Guhathakurta, P.; van der Marel, R. P.; 2005, AJ, v.129, p.2617
- Gunn, James E.; Gott, J. Richard, III; 1972, ApJ, v.176, p.1
- Guzman, R.; Lucey, J. R.; Bower, R. G.; 1993, MNRAS, v.265, p.731
- Icke, V.; 1985, A&A, v.144, p.115
- Jansen, Rolf A.; Fabricant, Daniel; Franx, Marijn; Caldwell, Nelson; 2000, ApJS, v.126, p.331
- Jerjen, H.; Kalnajs, A.; Binggeli, B.; 2000, A&A, v.358, p.845
- Kenney, Jeffrey D. P.; Koopmann, Rebecca A.; 1999, AJ, v.117, p.181
- Kissler-Patig, M.; Copin, Y.; Ferruit, P.; Pécontal-Rousset, A.; Roth, M. M. ; 2004, Astronomische Nachrichten, v.325, p.159
- Kormendy, J.; 1985, ApJ, v.295, p.73
- Kuijken, K.; Merrifield, M. R.; 1993, MNRAS, v.264, p.712
- Kuntschner, H.; 2004, A&A, v.426, p.737
- Kuntschner, Harald; Emsellem, Eric; Bacon, R.; Bureau, M.; Cappellari, Michele; Davies, Roger L.; de Zeeuw, P. T.; Falcón-Barroso, Jesús; Krajnovic, Davor; McDermid, Richard M.; Peletier, Reynier F.; Sarzi, Marc; 2006, MNRAS, v.369, p.497
- Le Borgne, D.; Rocca-Volmerange, B.; Prugniel, P.; Lançon, A.; Fioc, M.; Soubiran, C.; 2004, A&A, v.425, p.881
- Leitherer, Claus; Robert, Carmelle; Drissen, Laurent; 1992, ApJ, v.401, p.596

- Lin, Douglas N. C.; Murray, Stephen D.; 1992, ApJ, v.394, p.523
- Lisker, Thorsten; Grebel, Eva K.; Binggeli, Bruno; 2006, AJ, v.132, p.497
- Lu, Limin; Wolfe, Arthur M.; Turnshek, David A.; 1991, ApJ, v.367, p.19
- Makarov, D. I.; Makarova, L. N.; 2004, Astrophysics (English translation of Astrofizika), v.47, p.229
- Marcolini, A.; Brighenti, F.; D'Ercole, A.; 2003, MNRAS, v.345, p.1329
- Mastropietro, Chiara; Moore, Ben; Mayer, Lucio; Debattista, Victor P.; Piffaretti, Rocco; Stadel, Joachim; 2005, MNRAS, v.364, p.607
- Matteucci, Francesca; 1994, A&A, v.288, p.57
- McDowell, J. et al., 2004, IVOA Data Model for Astronomical Observation (in preparation)
- J. McDowell, F. Bonnarel, I. Chilingarian, M. Louys, A. Micol, and A. Richards, 2006, IVOA Data Model for Astronomical DataSet Characterisation (in preparation)
- Michielsen, D.; De Rijcke, S.; Dejonghe, H.; Zeilinger, W. W.; Hau, G. K. T. ; 2003, Astrophysics and Space Science, v.284, p.635
- Mieske, S.; Infante, L.; Hilker, M.; Hertling, G.; Blakeslee, J. P.; BenMtez, N.; Ford, H.; Zekser, K.; 2005, A&A, v.430, L25
- Moiseev, A. V.; 2001, Bulletin of the Special Astrophysical Observatory (Izvestiya Spetsial'noi Astrofizicheskoi Observatorii), v.51, p.11
- Moultaka, J.; Pelat, D.; 2000, MNRAS, v.314, p.409
- Moultaka, J.; Boisson, C.; Joly, M.; Pelat, D.; 2004, A&A, v.420, p.459
- Nulsen, P. E. J.; 1982, MNRAS, v.198, p.1007
- Ocvirk, P.; Lancon, A.; Pichon, C.; Prugniel, P.; Thiébaud, E.; Le Borgne, D.; Rocca-Volmerange, B.; Fioc, M.; Soubiran, C.; 2003, SF2A-2003: Semaine de l'Astrophysique Française, meeting held in Bordeaux, France, June 16-20, 2003.

Eds.: F. Combes, D. Barret, T. Contini, and L. Pagani. EdP-Sciences, Conference Series, p.309.

Ocvirk, P.; Pichon, C.; Lançon, A.; Thiébaud, E.; 2006, MNRAS, v.365, p.46

Ocvirk, P.; Pichon, C.; Lançon, A.; Thiébaud, E.; 2006, MNRAS, v.365, p.74

Pasquini, L.; Avila, G.; Blecha, A.; Cacciari, C.; Cayatte, V.; Colless, M.; Damiani, F.; de Propriis, R.; Dekker, H.; di Marcantonio, P.; Farrell, T.; Gillingham, P.; Guinouard, I.; Hammer, F.; Kaufer, A.; Hill, V.; Marteaude, M.; Modigliani, A.; Mulas, G.; North, P.; Popovic, D.; Rossetti, E.; Royer, F.; Santin, P.; Schmutzer, R.; Simond, G.; Vola, P.; Waller, L.; Zoccali, M.; 2002, The Messenger, No. 110, p.1

Paturel, G.; Petit, C.; Prugniel, Ph.; Theureau, G.; Rousseau, J.; Brouty, M.; Dubois, P.; Cambrésy, L.; 2003, A&A, v.412, p.45

Pécontal-Rousset, A.; Bacon, R.; Copin, Y.; Emsellem, E.; Ferruit, P.; Pécontal, E.; 2004, Astronomical Data Analysis Software and Systems (ADASS) XIII, Proceedings of the conference held 12-15 October, 2003 in Strasbourg, France. Edited by Francois Ochsenbein, Mark G. Allen and Daniel Egret. ASP Conference Proceedings, Vol. 314. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2004., p.491

Pedraz, S.; Gorgas, J.; Cardiel, N.; Sánchez-Blázquez, P.; Guzmán, R. ; 2002, MNRAS, v.332, L59

Peng, Chien Y.; Ho, Luis C.; Impey, Chris D.; Rix, Hans-Walter; 2002, AJ, v.124, p.266

Phillipps, S.; Driver, S. P.; Couch, W. J.; Smith, R. M.; 1998, ApJL v.498, L119

Prugniel, Ph.; Simien, F.; 1994, A&A, v.282, L1

Prugniel, P.; Simien, F.; 1996, A&A, v.309, p.749

Prugniel, P.; Simien, F.; 1997, A&A, v.321, p.111

Prugniel, Ph.; Soubiran, C.; 2001, A&A, v.369, p.1048

- Prugniel, Ph.; Soubiran, C.; 2004, eprint arXiv:astro-ph/0409214
- Prugniel, Ph.; Golev, V.; Maubon, G.; 1999, A&A, v.346, L25
- Prugniel, Philippe; Chilingarian, Igor; Sil'Chenko, Olga; Afanasiev, Victor; 2005, Near-fields cosmology with dwarf elliptical galaxies, IAU Colloquium Proceedings of the international Astronomical Union 198, Held 14-18 March, Switzerland, edited by Jerjen, H.; Binggeli, B. Cambridge: Cambridge University Press, 2005., p.73-76
- Richstone, D. O.; Tremaine, S.; 1986, AJ, v.92, p.72
- Rix, Hans-Walter; White, Simon D. M.; 1992, MNRAS, v.254, p.389
- Rose, James A.; Arimoto, Nobuo; Caldwell, Nelson; Schiavon, Ricardo P.; Vazdekis, Alexandre; Yamada, Yoshihiko; 2005, AJ, v.129, p.712
- Saha, P.; Williams, T. B.; 1994, AJ, v.107, p.1295
- Salpeter, Edwin E.; 1955, ApJ, v.121, p.161
- Sargent, W. L. W.; Schechter, P. L.; Boksenberg, A.; Shortridge, K.; 1977, ApJ, v.212, p.326
- Schlegel, David; Finkbeiner, Douglas; Davis, Marc; 1998, ApJ v.500, p.525
- Sil'chenko, O. K.; 1992; Full Doctor of Science Thesis, Moscow State University.
- Sil'chenko, O. K.; 1997, Astronomy Reports, v.41, p.567
- Sil'chenko, O. K.; 2006, ApJ, v.641, p.229
- Sil'chenko O., Shapovalova A., 1989, SoSAO, 60, 44
- Sil'chenko, O. K.; Afanas'ev, V. L.; Vlasyuk, V. V.; 1992, Astronomicheskij Zhurnal, v.69, p.1121
- Simien, F.; Prugniel, Ph.; 2002, A&A, v.384, p.371
- Statler, Thomas S.; 1991, ApJL, v.382, L11
- Struble, Mitchell F.; Rood, Herbert J.; 1987, ApJS, v.63, p.555

- Thomas, Daniel; Maraston, Claudia; Bender, Ralf; 2003, MNRAS, v.339, p.897
- Thomas, D.; Brimioulle, F.; Bender, R.; Hopp, U.; Greggio, L.; Maraston, C.; Saglia, R. P.; 2006, A&A, v.445, L19
- Tonry, J.; Davis, M.; 1979, AJ, v.84, p.1511
- Tinsley, Beatrice M.; 1968, ApJ, v.151, p.547
- Tinsley, B. M.; 1972, ApJ, v.178, p.319
- Tinsley, B. M.; 1972, A&A, v.20, p.383
- Tody, D. et al, 2006, IVOA Simple Spectral Access Protocol (in preparation)
- van Zee, Liese; Skillman, Evan D.; Haynes, Martha P.; 2004, AJ, v.128, p.121
- van Zee, Liese; Barton, Elizabeth J.; Skillman, Evan D.; 2004, AJ, v.128, p.2797
- van der Marel, Roeland P.; Franx, Marijn; 1993, ApJ, v.407, p.525
- van der Marel, R. P.; 1994, MNRAS, v.270, p.271
- Vazdekis, A.; Arimoto, N.; 1999, ApJ, v.525, p.144
- Vazdekis, A.; 1999, ApJ, v.513, p.224
- Vlasyuk, V. V.; Sil'chenko, O. K.; 2000, A&A, v.354, p.28
- Wood, David B.; 1966, ApJ, v.145, p.36
- Worthey, Guy; 1994, ApJS, v.95, p.107
- Worthey, Guy; Faber, S. M.; Gonzalez, J. J.; 1992, ApJ, v.398, p.69
- Worthey, Guy; Faber, S. M.; Gonzalez, J. Jesus; Burstein, D.; 1994, ApJS, v.94, p.687
- Worthey, Guy; Ottaviani, D. L.; 1997, ApJS v.111, p.377
- Yoshii, Y.; Arimoto, N.; 1987, A&A, v.188, p.13
- Zaritsky, Dennis; Smith, Rodney; Frenk, Carlos; White, Simon D. M.; 1997, ApJ, v.478, p.39