

На правах рукописи
УДК 524.7/524.82

Чилингарян Игорь Владимирович

**ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ КАРЛИКОВЫХ
ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ГАЛАКТИК**

Специальность: 01.03.02 – астрофизика, радиоастрономия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена на кафедре Экспериментальной астрономии Физического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

Научный руководитель: доктор физико-математических наук Сильченко Ольга Касьяновна, зав.отделом Физики эмиссионных звезд и галактик ГАИШ МГУ

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук Ефремов Юрий Николаевич, главный научный сотрудник отдела Изучения Галактики и переменных звезд ГАИШ МГУ
- кандидат физико-математических наук Макаров Дмитрий Игоревич, старший научных сотрудник Лаборатории внегалактической астрофизики и космологии САО РАН

Ведущая организация: Институт астрономии РАН

Защита состоится 23 ноября 2006 года в 13⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д501.001.86 в Государственном астрономическом институте им. П. К. Штернберга МГУ по адресу: 119992, г. Москва, Университетский проспект, дом 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАИШ МГУ.

Автореферат разослан 20 октября 2006 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
к.ф.-м.н.

С. О. Алексеев

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 анизотропными дисперсиями скоростей), многие из них содержат вложенные структуры – диски, бары, некоторые показывают наличие межзвездной среды, ряд объектов обнаруживает кинематически-выделенные ядра. Все эти проявления позволяют связать происхождение карликовых эллиптических галактик с дисковыми карликовыми галактиками поздних типов, испытавшими морфологическую трансформацию и потерявшими газ за время жизни в скоплениях или группах.

Для аргументированного выбора сценария эволюции карликовых эллиптических галактик было решено исследовать связь звездной кинематики и параметров звездного населения (возраст, металличность, обилие α -элементов), применяя панорамную спектроскопию близких галактик 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, интегриро-

ванным 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 исследование 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

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.

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] – создание методики анализа спектров и ее реализация в виде программного пакета, анализ спектральных данных и научная интерпретация полученных результатов

- В работе [7] – предоставление методики в виде программного пакета для анализа спектров
- В работе [8] – применение модели данных Characterisation DM к данным панорамной спектроскопии, создание примеров метаданных для наблюдений со спектрографом MPFS
- В работе [10] – применение модели данных Characterisation DM к данным длиннощелевой и панорамной спектроскопии, сканирующего интерферометра, 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 **заклучении** 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.

Содержание работы по главам

Глава 1: Метод аппроксимации спектров

В начале главы дан краткий обзор существующих методов восстановления звездной кинематики и параметров звездного населения

Предложен новый метод анализа спектров, позволяющий определить одновременно параметры звездной кинематики и характеристики звездного населения. Метод основан на алгоритме нелинейной оптимизации следующего функционала:

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

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 LOSVD по полиномам Эрмита соответственно.

Определение параметров аппаратной функции спектрографа (LSF) является очень важным этапом обработки данных для последующего анализа кинематики и звездного населения. Приводится алгоритм определения LSF и ее вариаций по диапазону длин волн и полю зрения 3D-спектрографа (или высоте щели длиннощелевого инструмента).

Далее приводится исследование стабильности метода по отношению к ошибкам различных параметров, возможных систематических ошибок при наличии аддитивных помех (например, некорректное вычитание фона ночного

неба). Проводится сравнение результатов для различных диапазонов длин волн, при наличии или присутствии индикаторов возраста (Бальмеровских линий), при несолнечных отношениях $[\alpha/\text{Fe}]$ (на основе анализа большой выборки спектров Nearby Field Galaxy Survey).

Проведенное исследование указывает на преимущества метода по сравнению с традиционным подходом, использующим Ликские индексы для солнечных отношений обилий элементов, и на применимость метода для определения возрастов даже при несолнечных отношениях $[\text{Mg}/\text{Fe}]$.

Глава 2: Карликовые галактики в скоплении Дева

Глава посвящена исследованиям карликовых эллиптических галактик из скопления Дева и основана на анализе данных, полученных на спектрографе MPFS (6-м телескоп САО РАН). Также анализировались архивные фотометрические данные, полученные на Hubble Space Telescope в рамках обзора Virgo Cluster ACS Survey.

Первый объект – IC 3653 представляет собой достаточно яркую карликовую эллиптическую галактику (рядом авторов классифицируемую как dS0). Анализ поля скоростей выявил наличие вложенного звездного диска. Результат подтверждается анализом глубоких прямых снимков, полученных на HST – дископодобная структура видна в картах цвета. Приводятся двумерные карты распределения параметров звездного населения (возраст, металличность) и звездной кинематики (поле лучевых скоростей и дисперсий скоростей). Ядро, видимое на изображениях HST, четко выделяется на картах металличности. Сделаны аргументированные предположения о происхождении вложенного диска в этой галактики: морфологическая трансформация карликовой иррегулярной галактики в карликовую эллиптическую посредством выметания газа лобовым давлением, либо приливными взаимодействиями с другими членами скопления

Вторая часть главы посвящена открытию молодых ядер в карликовых эллиптических галактиках IC 783, IC 3468 и IC 3509. Подобный феномен известен более 10 лет в гигантских галактиках ранних типов, но в объектах

низкой светимости он обнаружен и спектроскопически подтвержден впервые. На основе полученных данных дается интерпретация о формировании молодого ядра как результата действия лобового давления: эффективность действия лобового давления оказывается различной при повторных проходах через центр скопления – в этом случае при первом проходе газ мог быть удален только с периферии галактики, а в центре звездообразование продолжилось, либо даже усилилось из-за увеличения плотности среды, однако при втором проходе через центральную часть скопления давление оказалось достаточным для полного удаления газа даже из центральных частей галактики.

Глава 3: Карликовые галактики в группах

В третьей главе обсуждаются результаты анализа данных панорамной спектроскопии (MPFS) для двух необычных карликовых галактик в группах – NGC 770 и NGC 127. Первая из галактик (NGC 770) показывает наличие контр-вращающегося ядра, которое мы связываем с относительно молодым звездным диском, вложенным в основное тело галактики. Подобная структура может возникнуть как результат либо диссипативного слияния, либо диссипативной аккреции газа с соседней гигантской спиральной галактики.

В NGC 127 наблюдается вспышка звездообразования, происходящая в настоящее время. Газовая кинематика, восстановленная по эмиссионной линии $H\beta$ и ее сравнение с кинематикой звездного населения, позволяет судить о перетекании газа с расположенной рядом гигантской линзовидной галактики NGC 128. Пространственное расположение и взаимные скорости подтверждают это предположение. Если бы угловой момент падающего газа был направлен в другую сторону, в NGC 127 бы произошло формирование противовращающегося диска.

Динамически холодное окружение, наблюдаемое в группах галактик, может способствовать формированию вложенных эволюционно- и динамически выделенных под-структур в карликовых галактиках, являющихся спутниками гигантских богатых газом систем, путем медленной аккреции газа. Этот

сценарий будет существенно менее вероятным в скоплениях или богатых группах, где относительные скорости членов велики.

Глава 4: Исследование галактик скопления Abell 496

Представлены исследования выборки 46 галактик в скоплении Abell 496, 28 из которых являются карликовыми dE или dS0 галактиками с дисперсиями скоростей от 20 до 80 km/s. Исследования основаны на глубокой 4-цветной фотометрии, выполненной на 3.6-м телескопе CFHT с помощью камеры широкого поля, и мультиобъектной спектроскопии высокого разрешения ($R=7000$) с 8-м телескопа ESO VLT (спектрограф Giraffe). Ликские индексы использованы для определения отношений элементов $[Mg/Fe]$. Новый метод аппроксимации спектров, описанный в первой главе, применен к спектральным данным для определения лучевых скоростей, центральных дисперсий скоростей, средних возрастов и металличностей галактик нашей выборки.

Основные результаты включают:

- Около четверти всех объектов обнаруживают под-структуры – вложенные диски, бары, спирали и т.п.
- Карликовые галактики оказываются моложе, чем гигантские – наблюдается корреляция между светимостью и возрастом, хотя и с увеличивающимся разбросом на низких светимостях
- Видна тесная связь между отношением $[Mg/Fe]$ и центральной дисперсией скоростей для массивных объектов ($\sigma_0 > 60$ km/s), для менее массивных объектов $[Mg/Fe] = 0$ в пределах точности измерений
- Положение dE галактик на фундаментальной плоскости соответствует теоретическим предсказаниям, обсуждаемым в современных работах.
- Отклонение от фундаментальной плоскости антикоррелирует с возрастом – чем объект моложе, тем он дальше отстоит от зависимости, построенной для гигантских галактик

Продемонстрированные результаты исключают возможность потери газа карликовыми галактиками в результате быстрого процесса (например, галак-

тические ветры, вызванные сверхновыми звездами), поскольку в этом случае мы бы видели антикорреляцию между металличностью и $[Mg/Fe]$. Таким образом предпочтение отдается факторам окружения – лобовому давлению и приливному взаимодействию с другими членами скопления.

В приложении к Главе 4 продемонстрировано открытие объекта очень редкого класса – компактной эллиптической галактики в скоплении Abell 496. Это 6-й объект класса сЕ, известный на данный момент.

Приложение: Данные 3D-спектроскопии в Виртуальной Обсерватории

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).

Метод основан на использовании одной из наиболее общих и абстрактных моделей данных, разработка которых ведется в Международном Альянсе Виртуальных Обсерваторий (IVOA): Characterisation Data Model. Эта модель данных описывает расположение наблюдательных или теоретических данных в многомерном пространстве физических параметров. Измерения этого пространства могут включать следующие оси: пространственная (Spatial Axis: небесные координаты), временная (Time Axis: временная характеристика получения наблюдений), спектральная (Spectral Axis: расположение данных в пространстве длин волн или частот), наблюдаемая (Observable Axis: к примеру, измеренная спектральная плотность потоков).

Применение Characterisation Data Model к описанию данных панорамной спектроскопии предоставляет возможность реализовать механизмы доступа к этому типу данных с использованием сложных многопараметрических запро-

сов, позволяющих быстро и эффективно выбирать лишь те наборы данных, которые интересуют исследователя.

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., Silchenko 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., Silchenko 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., Silchenko 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.