

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

На правах рукописи
УДК 524.7/524.82

Чилингарян Игорь Владимирович

**ЭВОЛЮЦИЯ ГАЛАКТИК РАННИХ ТИПОВ: НАБЛЮДЕНИЯ,
МОДЕЛИРОВАНИЕ, ВИРТУАЛЬНАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ**

Специальность: 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации

на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Москва – 2010

Работа выполнена в отделе физики эмиссионных звезд и галактик
Государственного астрономического института имени П. К. Штернберга
МГУ

Научный консультант:

доктор физико-математических наук Сильченко Ольга Касьяновна,
заведующая отделом физики эмиссионных звезд и галактик ГАИШ МГУ

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук Дамбис Андрей Карлович,
ведущий научный сотрудник отдела изучения Галактики и переменных
звезд ГАИШ МГУ
- доктор физико-математических наук Малков Олег Юрьевич, ведущий
научный сотрудник Центра астрономических данных института
астрономии РАН
- доктор физико-математических наук Решетников Владимир Петрович,
ведущий научный сотрудник лаборатории наблюдательной астрофизики
научно-исследовательского астрономического института имени В. В.
Соболева СПбГУ

Ведущая организация:

Астрокосмический центр ФИАН

Защита состоится 7 октября 2010 года в 14⁰⁰ 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 7 сентября 2010 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

С. О. Алексеев

Общая характеристика работы

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

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

Недавние исследования показали огромное разнообразие наблюдательных проявлений диффузных эллиптических галактик: встречаются вращающиеся и невращающиеся галактики (по-видимому поддерживаемые анизотропными дисперсиями скоростей), многие из них содержат вложенные структуры – диски, бары, некоторые показывают наличие межзвездной среды, ряд объектов обнаруживает кинематически выделенные ядра. Все эти проявления позволяют связать происхождение карликовых эллиптических галактик с дис-

ковыми карликовыми галактиками поздних типов, испытавшими морфологическую трансформацию и потерявшими газ за время жизни в скоплениях или группах.

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

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

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

В результате исследований, выполненных автором за период с 2003 г. по 2010 г., разработан ряд оригинальных методов анализа спектральных и фо-

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

Актуальность темы

В настоящее время исследование эволюции галактик является одной из основных и наиболее популярных задач современной астрофизики. Галактики ранних типов представляют основное население скоплений галактик и некоторых массивных групп, в соответствии с известной зависимостью морфология–плотность. Механизмы эволюции галактик весьма разнообразны, но в общем все они могут быть разделены на две категории. Внутренние механизмы связаны с процессами, происходящими в самой галактике вне связи с окружением, такими как, к примеру, обогащение межзвездной среды металлами в процессе звездообразования, формирование баров и спиральных ветвей в дисках галактик в результате развития неустойчивостей. Внешние механизмы обусловлены гравитационным или газодинамическим взаимодействием галактики с соседями в скоплении или группе, потенциалом самого скопления, либо межгалактической средой в нем. Очевидно, что эффективность различных эволюционных механизмов будет сильно отличаться для галактик разных масс и в разном окружении.

Механизмы эволюции карликовых галактик ранних типов, являющихся самым многочисленным населением в скоплениях, исследованы гораздо хуже, чем для гигантских систем (как эллиптических, так и спиральных). При-

нимая во внимание последние данные о параметрах звездного населения в dE/dS_0 галактиках, а именно: относительно высокие металличности и молодые возрасты, первоначальная идея о том, что они являются прошедшим пассивную эволюцию “строительным материалом” для более крупных звездных систем, не выдерживает критики. Таким образом, вопрос о происхождении и эволюции карликовых галактик ранних типов является краеугольным камнем для понимания эволюции звездных систем в целом.

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

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

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

Цель работы

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

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

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

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

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

Научная новизна работы

1. Разработан ряд оригинальных методов анализа данных, в том числе: оценка параметров звездного населения и кинематики с помощью анализа спектров, интегрированных вдоль луча зрения; многокомпонентная декомпозиция профилей яркости галактик; аналитические приближения k -поправок для галактик на малых красных смещениях.
2. Впервые получены данные панорамной спектроскопии для карликовых эллиптических и линзовидных галактик в скоплениях; получены поля

скоростей и пространственные распределения параметров звездного населения; впервые получены профили параметров звездного населения для карликовых галактик ранних типов; получены параметры звездного населения, оценки химического состава и центральные дисперсии скоростей для статистически значимой выборки карликовых эллиптических галактик в скоплении Abell 496.

3. Открыты химически- и эволюционно-выделенные ядра, а также несколько новых кинематически-выделенных ядер в карликовых эллиптических галактиках; на основе полученных результатов сделан вывод о наиболее вероятном сценарии формирования dE галактик – выметании газа лобовым давлением межгалактической среды и гравитационным взаимодействием с другими членами скопления (“gravitational harassment”).
4. Получены оценки параметров звездного населения для выборки ультракомпактных эллиптических галактик в скоплении Печь, впервые получены оценки количества темной материи в этих объектах и сделан вывод о несовместимости начальной функции масс Солпитера с результатами наблюдений.
5. В скоплении Дева открыта галактика (M59cO) нового типа – переходный объект от ультракомпактных карликовых к компактными эллиптическим галактикам.
6. С помощью методов Виртуальной Обсерватории в близких скоплениях открыты более 20 компактных эллиптических галактик, что превращает этот класс объектов из “уникальных” в “обычные в некоторых условиях окружения”; сделан вывод о важности потери звездной массы галактиками ранних типов за счет приливных взаимодействий с потенциалом скопления.
7. Предложена новая концепция научного исследования в астрономии – последовательное применение “Виртуальная Обсерватория – наблюдательная программа – численное моделирование”.

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

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

Практическая ценность

1. Предложенная методика аппроксимации спектров дает такую же точность параметров звездного населения, как существующие методики (Ликские индексы), но для данных с отношением сигнал-шум в 2-5 раз ниже, что позволяет существенно сократить продолжительность экспозиции и делает возможным исследования объектов низкой поверхностной яркости, недоступных ранее; разработанная методика позволила успешно анализировать наблюдения карликовых эллиптических галактик, имеющих низкие поверхностные яркости, и в будущем позволит провести переобработку уже существующих абсорбционных спектров на качественно новом уровне.

2. Предложенные алгоритмы вычисления k -поправок имеют важнейшее значение в современных внегалактических исследованиях в связи с простотой их использования и достигаемой высокой точностью коррекции звездных величин на красных смещениях $z < 0.5$.
3. Представленная база данных результатов Tree-SPH моделирования изолированных и взаимодействующих галактик GalMer имеет широкие перспективы использования во внегалактических исследованиях, основанных как на наблюдениях, так и на моделировании; предложенный высокоэффективный алгоритм моделирования спектрофотометрических свойств галактик можно применять к результатам Tree-SPH моделирования, выполняемых в рамках других проектов и научных задач.
4. Предложенная в данной диссертации концепция научного исследования “Виртуальная Обсерватория – наблюдательная программа – численное моделирование” имеет междисциплинарный аспект, поскольку данный подход может применять в любой отрасли науки, где к данным эксперимента или моделирования предоставлен свободный доступ через Интернет.

На защиту выносятся

1. NBURSTS – новая методика одновременного определения кинематических параметров звездных подсистем галактик и параметров их звездных населений по спектрам, интегрированным вдоль луча зрения, основанная на аппроксимации наблюдений синтетическими спектрами звездного населения;
2. Методика автоматизированного поиска компактных эллиптических галактик средствами Виртуальной Обсерватории (workflow) и новая концепция астрономического исследования в эпоху e-Science: Виртуальная Обсерватория – наблюдения – численное моделирование;
3. Методика расчета k -поправок для галактик на красных смещениях $z < 0.5$ при минимальном доступном наборе наблюдательных данных и ана-

литическое приближения для зависимости k -поправок от красного смещения для галактик ранних типов;

4. Результаты анализа данных длиннощелевой и 3D-спектроскопии для карликовых галактик в скоплении Девы и мультиобъектной спектроскопии объектов в скоплении Abell 496 методом NBURSTS: двумерные поля лучевых скоростей, дисперсий скоростей, SSP-эквивалентных оценок возраста и металличности для 5 галактик; радиальные профили кинематики, возраста и металличности для 31 галактики; каталог параметров, содержащий лучевые скорости, центральные дисперсии скоростей, измерения Ликских индексов, SSP-эквивалентные значения возрастов, металличностей и обилия α -элементов в 46 галактиках в скоплении Abell 496
5. Открытие эволюционно выделенных ядер в 14 карликовых эллиптических галактиках в скоплении Дева и кинематически выделенных ядер в 4 из них, что позволяет сделать вывод о внешних механизмах эволюции карликовых эллиптических галактик: выметании газа лобовым давлением, приливным эффектам, а также слияниях, обычно не рассматривающихся для галактик столь малых линейных размеров.
6. Каталог параметров звездного населения, дисперсий скоростей звезд, динамических и фотометрических отношений масса-светимость для выборки ультракомпактных карликовых галактик в скоплении Печь; вывод о противоречии начальной звездной функции масс Солпитера результатам наблюдений и о малом содержании темной материи в них. Открытие в скоплении Дева карликовой галактики переходного типа от ультракомпактных карликовых к компактным эллиптическим (M59cO) и выводы о ее формировании путем приливного обдирания существенно более массивной дисковой галактики
7. Открытие второй компактной эллиптической галактики в группе NGC5846, двумерные поля скоростей, дисперсий скоростей и параметров звездного населения для этой галактики. Открытие 22 компактных эллиптических галактик в близких скоплениях галактик методами Виртуальной Обсер-

ватории, каталог их кинематических параметров и параметров звездных населений. Вывод о важности механизма приливного обдирания галактик потенциалом скопления или группы в общей картине эволюции галактик.

8. База данных GalMer, доступная в Виртуальной Обсерватории, содержащая результаты численного TreeSPH моделирования процесса слияния галактик для тысяч конфигураций (орбиты, отношения масс, морфологические типы); эффективные алгоритмы визуализации результатов моделирования; метод моделирования спектрофотометрических свойств галактик путем применения моделей звездного населения PEGASE.2/HR к результатам TreeSPH моделирования
9. Результаты анализа двумерных распределений кинематических параметров и параметров звездных населений, полученные по данным панорамной спектроскопии, для дисковых галактик ранних типов: SDSS J230743.41+152558.4, NGC 4245, NGC 4267, NGC 4340, NGC 4477, NGC 4596, NGC 4643, NGC 4754, NGC 7743. Вывод о сложной истории звездообразования в их центральных областях и о ключевой роли секулярной эволюции в формировании морфологии дисковых галактик ранних типов.
10. Каталог, содержащий параметры звездных населений, апертурную и интегральную фотометрию в оптическом и ближнем ИК диапазонах для 100000 близких галактик; выводы о трудностях современных сценариев формирования галактик из “красной последовательности”.

Основные результаты опубликованы в следующих работах:

1. **A population of compact elliptical galaxies detected with the Virtual Observatory** / I. Chilingarian, V. Cayatte, Y. Revaz et al. // *Science*. — 2009. — December. — Vol. 326. — Pp. 1379–1382.
2. **Молодые ядра в карликовых эллиптических галактиках** / И. В. Чилингарян, О. К. Сильченко, В. Л. Афанасьев, Ф. Прюньэль // *Письма в астрономический журнал*. — 2007. — Май. — Том 33. — Стр. 292–298.

3. **История звездообразования в центральной области галактики с баром NGC 4245** / О. К. Сильченко, И. В. Чилингарян, В. Л. Афанасьев // *Письма в астрономический журнал*. — 2009. — Февраль. — Том 35. — Стр. 75–86.
4. **Kinematics and stellar populations of the dwarf elliptical galaxy IC 3653** / I. V. Chilingarian, P. Prugniel, O. K. Sil'chenko, V. L. Afanasiev // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2007. — April. — Vol. 376. — Pp. 1033–1046.
5. **Discovery of a new M 32-like "compact elliptical" galaxy in the halo of the Abell 496 cD galaxy** / I. Chilingarian, V. Cayatte, L. Chemin et al. // *Astron. Astrophys.* — 2007. — May. — Vol. 466. — Pp. L21–L24.
6. **SDSSJ124155.33+114003.7 - a missing link between compact elliptical and ultracompact dwarf galaxies** / I. V. Chilingarian, G. A. Mamon // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2008. — March. — Vol. 385. — Pp. L83–L87.
7. **Kinematics and stellar populations of low-luminosity early-type galaxies in the Abell 496 cluster** / I. V. Chilingarian, V. Cayatte, F. Durret et al. // *Astron. Astrophys.* — 2008. — July. — Vol. 486. — Pp. 85–97.
8. **Stellar population constraints on the dark matter content and origin of ultra-compact dwarf galaxies** / I. V. Chilingarian, V. Cayatte, G. Bergond // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2008. — November. — Vol. 390. — Pp. 906–912.
9. **Evolution of galaxies in pairs: Learning from simulations** / P. Di Matteo, F. Combes, I. Chilingarian et al. // *Astronomische Nachrichten*. — 2008. — Vol. 329. — P. 952.
10. **Evolution of dwarf early-type galaxies - I. Spatially resolved stellar populations and internal kinematics of Virgo cluster dE/dS0 galaxies** / I. V. Chilingarian // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2009. — April. — Vol. 394. — Pp. 1229–1248.
11. **Internal kinematics and stellar populations of the poststarburst galaxy SDSS J230743.41+152558.4** / I. V. Chilingarian, S. De Rijcke,

- P. Buyle // *Astrophys. J.* — 2009. — June. — Vol. 697. — Pp. L111–L115.
12. **NGC 6340: an old S0 galaxy with a young polar disc. Clues from morphology, internal kinematics, and stellar populations** / I. V. Chilingarian, A. P. Novikova, V. Cayatte et al. // *Astron. Astrophys.* — 2009. — September. — Vol. 504. — Pp. 389–400.
 13. **Analytical approximations of k -corrections in optical and near-infrared bands** / I. Chilingarian, A. Melchior, I. Zolotukhin // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2010. — July. — Vol. 405 — Pp. 1409–1420.
 14. **SDSSJ150634.27+013331.6: the second compact elliptical galaxy in the NGC5846 group** / I. Chilingarian, G. Bergond // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2010. — June. — Vol. 405 — Pp. 11–15.
 15. **Истории звездообразования в центрах линзовидных галактик с барами и чисто экспоненциальными внешними дисками по данным SAURON** / О. Сильченко, И. Чилингарян // *Письма в астрономический журнал, в печати.* — 2010. — Март.
 16. **The GalMer database: Galaxy mergers in the virtual observatory** / I. Chilingarian, P. Di Matteo, F. Combes et al. // *Astron. Astrophys. in press.* — 2010. — March. — P. arXiv:1003.3243.
 17. **Dynamical versus stellar masses of ultracompact dwarf galaxies** / I. Chilingarian, S. Mieske, M. Hilker, L. Infante // *Mon. Not. R. Astron. Soc. in press.* — 2010. — March.
 18. **Internal kinematics and stellar populations of dE galaxies: clues to their formation/evolution** / P. Prugniel, I. Chilingarian, O. Sil'chenko, V. Afanasiev // *IAU Colloq. 198: Near-fields cosmology with dwarf elliptical galaxies* / Ed. by H. Jerjen, B. Binggeli. — 2005. — Pp. 73–76.
 19. **NBursts: Simultaneous extraction of internal kinematics and parametrized SFH from integrated light spectra** / I. Chilingarian, P. Prugniel, O. Sil'chenko, M. Koleva // *Stellar Populations as Building Blocks of Galaxies* / Ed. by A. Vazdekis, R. R. Peletier. — Vol. 241 of *IAU*

Symposium. — Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. — August. — Pp. 175–176, arXiv:0709.3047.

20. **Validation of stellar population and kinematical analysis of galaxies** / M. Koleva, N. Bavouzet, I. Chilingarian, P. Prugniel // *Science Perspectives for 3D Spectroscopy* / Ed. by M. Kissler-Patig, J. R. Walsh, M. M. Roth. — 2007. — P. 153.
21. **Low luminosity early-type galaxies in the NGC 128 group** / I. Chilingarian, O. Sil'chenko, V. Afanasiev, P. Prugniel // *Pathways Through an Eclectic Universe* / Ed. by J. H. Knapen, T. J. Mahoney, A. Vazdekis. — Vol. 390 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. — 2008. — June. — P. 296.
22. **Middleware for data visualization in VO-enabled data archives** / I. Zolotukhin, I. Chilingarian // *Astronomical Data Analysis Software and Systems XVII* / Ed. by R. W. Argyle, P. S. Bunclark, J. R. Lewis. — Vol. 394 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. — 2008. — August. — Pp. 393–+.
23. **Visualization of complex observational and theoretical datasets in the virtual observatory** / I. Chilingarian, I. Zolotukhin // *Astronomical Data Analysis Software and Systems XVII* / Ed. by R. W. Argyle, P. S. Bunclark, J. R. Lewis. — Vol. 394 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. — 2008. — August. — Pp. 351–+.
24. **Virtual observatory for astronomers: Where are we now?** / I. V. Chilingarian // *Multi-wavelength Astronomy and Virtual Observatory* / Ed. by D. Baines & P. Osuna. — 2009. — July. — Pp. 165–+.

Апробация результатов работы

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

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

Публикации и личный вклад автора

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

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и содержит: 288 страниц, 100 рисунков, 40 таблиц. Список литературы насчитывает 425 наименований. В начале каждого раздела приводится ссылка на опубликованный вариант результатов.

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

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

В **третьей главе** представлены результаты исследования компактных эл-

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

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

пии. В заключительной части описывается процедура построения каталога спектральных распределений энергии для сотен тысяч галактик по данным фотометрических обзоров и приводятся примеры использования этих данных для изучения эволюции галактик ранних типов.

В **заключении** приводятся выводы, выносимые на защиту.

Содержание работы по главам

Глава 1: Методы анализа спектральных и фотометрических данных

Метод аппроксимации спектров NBURSTS

В начале раздела дан краткий обзор существующих методов восстановления звездной кинематики и параметров звездного населения по интегральным спектрам звездных систем.

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 звезд вдоль луча зрения); F_i и ΔF_i – наблюдаемые (монохроматические) 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, характеризующиеся полиномами Лежандра порядков p и q ; t – возраст звезд, Z – их 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 и возможных систематических ошибок при наличии аддитивных помех (пример аддитивной помехи – некорректное вычитание фона ночного неба). Проводится сравнение результатов для различных диапазонов длин волн, при наличии или отсутствии индикаторов возраста (Бальмеровских линий), при несолнечных отношениях химических элементов $[\alpha/\text{Fe}]$ (на основе анализа большой выборки спектров Sloan Digital Sky 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 звездных систем даже при несолнечных отношениях $[\text{Mg}/\text{Fe}]$.

Декомпозиция профилей яркости галактик

Приведено описание метода одно- двух- и трехкомпонентного моделирования профилей яркости галактик с учетом аппаратной функции телескопа методом одновременной нелинейной минимизации всех параметров. Особое внимание уделено алгоритму поиска начального приближения. Приведен пример трехкомпонентной декомпозиции профиля яркости линзовидной галактики NGC 6340.

Аналитические аппроксимации k -поправок

Для сравнения фотометрических параметров галактик, расположенных на различных красных смещениях, необходимо корректировать потоки за эффективное изменение длин волн фильтров при отнесении их в систему отсчета галактики, т.е. применять так называемые k -поправки. Традиционные подходы к их вычислению основаны на аппроксимации наблюдаемых распределений энергии в спектре (SED) галактики и таким образом требуют наличия многоцветных фотометрических данных. В главе показывается, что k -поправки для наиболее широко используемых оптических и ИК фильтров могут быть достаточно точно аппроксимированы двухмерным полиномом, зависящим всего лишь от двух параметров: красного смещения и одного наблюдаемого цвета. В главе приведены степенные функции для приближенного вычисления k -поправок в полосах SDSS u, g, r, i, z и UKIRT WFCAM $Y, J,$

H и K для галактик на красных смещениях $z < 0.5$. Приближение основано на значениях, вычисленных эмпирически путем аппроксимации объединенных SED в оптическом и ближнем ИК диапазонах для выборки из 10^5 галактик, созданной при помощи Виртуальной Обсерватории. Для ярких красных галактик в главе приводится специальная аппроксимация k -поправок как функций только красного смещения. Для двух фильтров, SDSS g и r , выполняется проверка предложенных приближений путем вычисления k -поправок напрямую из спектров SDSS DR7.

Глава 2: Карликовые эллиптические и линзовидные галактики

Глава посвящена исследованиям карликовых эллиптических галактик в скоплениях и основана на анализе данных, полученных на спектрографе MPFS (6-м телескоп CAO РАН), FLAMES/Giraffe (VLT ESO) и архивных спектральных данных с 5-м телескопа Паломарской обсерватории и 1.93-м телескопа Обсерватории Верхнего Прованса. Также анализировались архивные фотометрические данные, полученные на Hubble Space Telescope в рамках обзора Virgo Cluster ACS Survey и в обзоре Sloan Digital Sky 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 повышенным содержанием тяжелых элементов. Сделаны аргументированные предположения о происхождении вложенного диска в этой галактике: предложен сценарий морфологической трансформации 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 формирования молодого ядра как результата действия лобового давления: эффективность действия лобового давления оказывается различной при повторных проходах галактики 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 после ядерной вспышки звездообразования, при втором проходе через центральную часть скопления, давление оказалось достаточным для полного удаления остатков газа даже из центральных частей галактики.

В третьей части главы представлены исследования выборки из 46 галактик в скоплении Abell 496; 28 из исследованных объектов являются карликовыми dE или dS0 галактиками с дисперсиями скоростей от 20 до 80 км/с. 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 исследования галактик скопления Abell 496:

- 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

ей скоростей для массивных объектов ($\sigma_0 > 60$ км/с), для менее массивных объектов $[\text{Mg}/\text{Fe}] = 0$ в пределах точности измерений.

В четвертой части главы приводятся результаты анализа длиннощелевых спектров для большой выборки карликовых галактик ранних типов в скоплении Дева. Представлены радиальные профили кинематических параметров и параметров звездных населений, измерены градиенты металличности. В 14 объектах открыты эволюционно выделенные ядра, в 4 их них – кинематически выделенные ядра. Полученные результаты позволяют сделать вывод о доминировании внешних механизмах эволюции карликовых эллиптических галактик, включающих выметание газа лобовым давлением межгалактической среды, приливные эффекты, а также слияния, обычно не рассматривающиеся для галактик столь малых линейных размеров.

Глава 3: Компактные эллиптические и ультракомпактные галактики

Глава посвящена исследованиям компактных эллиптических (сЕ) и ультракомпактных карликовых (UCD) галактик.

В первой и второй частях приводится анализ данных спектроскопии среднего ($R=7000$) и высокого ($R=15000$) разрешения, полученных на спектрографе FLAMES/Giraffe (телескоп ESO VLT), для двух выборок компактных звездных систем в скоплении галактик Печь. В результате получены оценки звездных масс и улучшены оценки динамических масс для 6 (первая часть) и 24 (вторая часть) ультракомпактных карликовых галактик. Показано, что использование в моделях начальной функции масс Солпитера приводит к слишком большим оценкам звездных масс, превышающих динамические оценки, что указывает на неприменимость этой начальной функции масс. Произведены оценки содержания темной материи в галактиках и получены результаты, свидетельствующие об очень низком содержании темной материи в UCD либо полном ее отсутствии.

В третьей части представлено открытие объекта переходного типа от ультракомпактных карликовых к компактным эллиптическим галактикам вблизи гигантской эллиптической галактики M 59 в скоплении Дева. Все данные,

использованные в работе, были найдены в архивах с использованием технологий Виртуальной Обсерватории. Получены оценки параметров звездного населения (оно оказалось достаточно старым и очень богатым металлами) и дисперсии скоростей звезд, однозначно свидетельствующие в пользу сценария приливного обдирания более массивной галактики-прародителя в процессе взаимодействия с M 59.

В четвертой части представлено открытие компактной эллиптической галактики в скоплении Abell 496, сделанное по тем же данным, что использовались во второй главе. Эта галактика в момент открытия в 2007 году стала шестым известным объектом данного класса во Вселенной. Исследованы свойства ее звездного населения и внутренняя кинематика. Параметры звездного населения (старое, богатое металлами и с высоким отношением обилия элементов $[Mg/Fe]$) абсолютно не соответствуют тому, что ожидается от объекта столь низкой светимости. На основе последующего анализа сделан вывод о происхождении A496cE путем приливного обдирания линзовидной галактики средней светимости гравитационным полем центральной cD галактики скопления Abell 496.

В пятой части представлено открытие методами Виртуальной Обсерватории и последующее исследование методом панорамной спектроскопии, выполненной с помощью спектрографа PMAS на 3.5-м телескопе обсерватории Калар-Альто, компактной эллиптической галактики в группе NGC 5846, которая стала второй галактикой этого типа в данной группе. Было обнаружено довольно сильное вращение звезд, пик дисперсии скоростей в центре, а также радиальный градиент металличности в ее старом звездном населении. Было построено распределение энергии в спектре этого объекта от дальнего УФ (1500 Å) до ближнего ИК (8 μm) диапазонов и показано, что оно идеально описывается моделью простого звездного населения (SSP). Все наблюдательные свойства подтверждают сценарий приливного обдирания более массивной галактики-прародителя как способа формирования NGC 5846cE.

В заключительной, шестой части главы представлено открытие 21 cE галактики в близких скоплениях, сделанное при помощи автоматизированной системы сбора и анализа данных (workflow) в Виртуальной Обсерватории.

Данная система была специально разработана для поиска сЕ галактик на изображениях HST, и ее применение к изображениям центральных частей скоплений галактик выявило 55 кандидатов в сЕ, 14 из которых удалось сразу же подтвердить по доступным в литературе измерениям их лучевых скоростей либо анализом спектров, доступных в архивах. Еще для 7 кандидатов были получены спектральные данные на 6-м телескопе БТА САО РАН (редуктор SCORPIO в многощелевой моде), и все они были подтверждены как новые сЕ галактики. После этого было произведено численное моделирование процесса потери звездной массы (обдирания) дисковой галактикой за счет приливных эффектов в центральной части скопления галактик, результаты которого оказались в хорошем согласии с наблюдательными данными.

Глава 4: Средние по светимости и гигантские галактики ранних типов

В главе описываются результаты моделирования и наблюдательных исследований гигантских галактик ранних типов.

В первой части Представлена база данных GalMer, содержащая результаты TreeSPH моделирования изолированных и взаимодействующих галактик, а также вновь разработанные продвинутые механизмы визуализации данных и реализацию алгоритма моделирования спектрофотометрических свойств галактик. База данных содержит результаты около тысячи численных экспериментов для пар взаимодействующих галактик различных морфологических типов, масс, на различных орбитах и с различными параметрами взаимной ориентации. Приводятся примеры научного использования базы данных, в том числе интерпретация сложного наблюдаемого профиля плотности в линзовидной галактике NGC 6340. База данных GalMer является первым ресурсом Виртуальной Обсерватории, предоставляющим доступ к подобного рода результатам моделирования и методам их анализа.

Во второй части описываются исследования E+A галактики (галактики с морфологией раннего типа, но с молодым звездным населением) SDSS J230743.41+152558.4 методом панорамной спектроскопии с помощью спектрографа VIMOS (ESO VLT). Приводятся результаты анализа ее спектров

методом NBURSTS в виде двумерных карт лучевых скоростей звезд, их дисперсий скоростей, возрастов и металличностей. Определена ее массы и оценен динамический статус, кратко обсуждаются проблемы эволюции цветов галактик ранних типов. Данная работа является первым применением панорамной спектроскопии для изучения E+A (poststarburst) галактик, и первой опубликованной статьей с результатами по звездной кинематике и исследованию свойств звездного населения, основанной на данных VIMOS-IFU.

В третьей и четвертых частях представлены результаты исследования звездных населений в галактике раннего типа промежуточной массы NGC 4245 и семи линзовидных галактиках с барами и чисто экспоненциальными внешними дисками по данным панорамной спектроскопии. Во всех галактиках были найдены химически выделенные ядра, а в некоторых – еще и молодое звездное население в них. В NGC 4245 за химически выделенное ядро мы вероятно принимаем бывшее ультракомпактное кольцо звездообразования с радиусом не более 100 пк, располагавшееся на внутреннем линдбладовском резонансе ныне исчезнувшего ядерного бара. Обсуждаются сценарии происхождения как выделенных ядер, так и линзовидных галактик в целом.

В заключительной, пятой части описывается процедура построения каталога спектральных распределений энергии для сотен тысяч галактик по данным фотометрических обзоров и приводятся примеры использования этих данных для изучения эволюции галактик ранних типов. Представлены диаграммы цвет–величина в оптическом и ближнем ИК диапазонах для сотен тысяч галактик и показана связь цветов с возрастными звездными населением. Кратко обсуждаются проблемы современных теорий эволюции галактик ранних типов в свете полученных результатов.