

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

УДК 520.8; 524.7



Катков Иван Юрьевич

**Свойства и происхождение изолированных
линзовидных галактик**

01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2014

Работа выполнена на кафедре астрофизики и звездной астрономии физического факультета Московского Государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Научный руководитель:

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

Официальные оппоненты:

- *доктор физико-математических наук*, профессор кафедры астрофизики математико-механического факультета Санкт-Петербургского университета **Решетников Владимир Петрович**
- *доктор физико-математических наук*, профессор, зав. кафедрой физики космоса физического факультета Южного Федерального Университета **Щекинов Юрий Андреевич**

Ведущая организация: Институт Астрономии Российской Академии Наук

Защита состоится 22 мая 2014 года в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д501.001.86 в Государственном астрономическом институте имени П.К. Штернберга МГУ, расположенном по адресу: 119992, г. Москва, Университетский пр-т, д. 13.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (119991, г. Москва, Ломоносовский пр-т., д. 27, Фундаментальная библиотека) и на сайте:

<http://sai.msu.ru/dissovet/2014.html>.

Автореферат разослан 21 марта 2014 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук



С.О. Алексеев

Общая характеристика работы

Актуальность

Одной из важнейших задач современной астрофизики является изучение вопросов формирования и эволюции галактик. Решение этой задачи сопряжено с выявлением наиболее значимых физических факторов и процессов, определяющих эволюционный путь галактик. Как описательные методы, так и детальные численные расчеты дают предсказания для свойств рассматриваемых галактик, поэтому сравнение их с наблюдениями является решающим фактором при выборе сценария эволюции. Все общепринятые предлагаемые механизмы формирования линзовидных галактик заключаются в морфологической перестройке спиральных галактик в линзовидные в результате динамического влияния со стороны окружения [1–7]. Однако около 15% близких галактик поля составляют линзовидные галактики [8], также известны примеры сильно изолированных S0 галактик [9]. Для таких галактик эффекты окружения малоэффективны. Актуальность представленных в диссертационной работе исследований определяется недостатком глубоких наблюдений *изолированных* линзовидных галактик и отсутствием для этих объектов “ниши” в общепринятых сценариях формирования S0 галактик. Стоит отметить важность наблюдений методами глубокой спектроскопии на крупных телескопах, которые позволяют получить информацию не только о центральных частях галактик, но и уйти в область дисков – основных структурных компонентов любой дисковой галактики. Построение детального сценария формирования и эволюции галактики без учета соотношения свойств структурных компонентов невозможно.

Цель диссертационной работы

Исследование линзовидных галактик в сильно разреженном окружении, где динамическое влияние со стороны других галактик минимально и стандартные механизмы формирования линзовидной галактики, обсуждаемые в литературе, малоэффективны. Поставленная цель подразумевает решение следующих задач:

1. Выделение из близких галактик, которые являются наиболее подходящими для проведения детальных исследований, объектов, удовлетворяющих необходимым критериям изолированности. Составление выборки исследуемых галактик.
2. Проведение спектральных наблюдений на крупных оптических телескопах и анализ полученного материала современными методами, в том числе разработанными соискателем.

Научная новизна

- В настоящей работе впервые строго изолированные линзовидные галактики выделяются в обособленную группу для детального исследования методами глубокой оптической спектроскопии. Впервые выполнены такие исследования с использованием крупных оптических телескопов.
- Впервые проведены детальные исследования двух линзовидных галактик NGC 4124 и IC 719 со следами недавнего падения газа на их диски.
- Разработаны усовершенствованные алгоритмы вычитания вклада спектра ночного неба для данных длиннощелевой спектроскопии, которые эффективно учитывают вариации инструментального контура вдоль щели.

- Впервые разработаны методики анализа оптических спектров галактик с использованием эволюционных моделей звездных населений для случаев: а) непараметрического восстановления распределения звезд по скоростям на луче зрения и б) одновременного определения параметров кинематики и свойств звездных населений при двухкомпонентной декомпозиции спектра.

Практическая значимость

- Разработанная методика вычитания спектра ночного неба с учетом вариаций инструментального контура вдоль щели может быть применена для спектральных данных с любого спектрографа; кроме того, методику можно адаптировать к данным многощелевой спектроскопии и к данным панорамной спектроскопии.
- Методика непараметрического восстановления распределения звезд по скоростям на луче зрения и методика одновременного определения параметров кинематики и свойств звездных населения при двухкомпонентной декомпозиции спектра могут быть использованы для исследования галактик с заподозренным противовращением звездных дисков, а также для определения свойств звезд балджа и диска в областях, где их вклад в интегральный спектр сопоставим.
- Построенная выборка изолированных линзовидных галактик может быть использована другими исследователями для изучения эффектов окружения.
- Полученные свойства и параметры изолированных галактик могут и должны быть использованы при построении космогонических сценариев формирования и эволюции внегалактических объектов.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика вычитания спектра ночного неба при длиннощелевых наблюдениях в случае вариаций инструментального контура спектрографа вдоль щели. Методика непараметрического восстановления функции распределения звезд по скоростям вдоль луча зрения и методика определения параметров кинематики и свойств звездных населений неразрешенных систем путем попиксельной аппроксимации спектров для сложного двухкомпонентного звездного населения.
2. Выборка из 281 линзовидной галактики местного Сверхскопления и его окрестностей, удовлетворяющих сильным критериям изолированности.
3. Измерения среднего возраста и металличности звездных населений структурных компонентов изолированных линзовидных галактик, свидетельствующие об отсутствии у изолированных линзовидных галактик выделенной эпохи формирования балджей и дисков.
4. Оценка доли изолированных линзовидных галактик с наличием масштабной подсистемы ионизованного газа и частоты встречаемости случаев кинематического рассогласования газа и звезд. Вывод о том, что наиболее вероятным источником газовой аккреции на изолированные линзовидные галактики является подсистема богатых газом карликовых спутников.
5. Детальные спектральные и фотометрические исследования двух линзовидных галактик — NGC 4124 и IC 719,— демонстрирующие свидетельства недавнего приобретения их дисками газа извне.

Основные публикации по теме диссертации

Статьи в рецензируемых изданиях:

1. Katkov I. Yu., Sil'chenko O. K., Afanasiev V. L., **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Vol. 438, issue 4, p. 2798 (2014); *Decoupled gas kinematics in isolated S0 galaxies*;
2. Katkov I. Yu., Sil'chenko O. K., Afanasiev V. L., **The Astrophysical Journal**, Vol. 769, issue 2, article id. 105, 10 pp (2013); *Lenticular Galaxy IC 719: Current Building of the Counterrotating Large-scale Stellar Disk*;
3. Katkov I., Chilingarian I., Sil'chenko O., Zasov A., Afanasiev V., **Baltic Astronomy**, Vol. 20, p. 453 (2011); *A Complex Stellar Line-of-Sight Velocity Distribution in the Lenticular Galaxy NGC 524*;
4. Катков И. Ю., Сильченко О. К., Афанасьев В. Л., **Астрофизический Бюллетень**, том 69, номер 2, стр. 129 (2014); *Свойства звездных населений изолированных линзовидных галактик*;
5. Засов А. В., Сильченко О. К., Катков И. Ю., Додонов С. Н., **Письма в Астрономический журнал**, том 39, номер 1, стр. 1 (2013); *Кинематика и звездное население линзовидной галактики NGC 4124*.

В сборниках трудов конференций и препринтах:

1. Katkov I. Yu., arXiv:1403.4006, *Isolated lenticular galaxies: properties and evolution*;
2. Katkov I. Yu., Chilingarian I. V., ASPC 442, 143 (2010); *A new sky subtraction technique for low surface brightness data*;
3. Katkov I. Yu., Chilingarian I. V., IAUS 284, 69 (2012); *Multi-component parametric inversion of galaxy kinematics and stellar populations using full spectral fitting*.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на семинарах и конференциях:

1. Конференция Astronomical Data Analysis Software and Systems (ADASS-XX) (Boston, MA, USA), постер: “*A New Sky Subtraction Technique for Low Surface Brightness Data*”, ноябрь 2010
2. Конференция 8th Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics (Divchibare, Serbia), доклад: “*A Complex Stellar Line-of-Sight Velocity Distribution in the Lenticular Galaxy NGC 524*”, июнь 2011
3. 284-й симпозиум Международного Астрономического Союза “The Spectral energy distribution of galaxies” (Preston, UK), 2 постера: “*Multi-component parametric inversion of galaxy kinematics and stellar populations using full spectral fitting*”; “*NBursts+phot: parametric recovery of galaxy star formation histories from the simultaneous fitting of spectra and broad-band spectral energy distributions*”, сентябрь 2011
4. Конференция EWASS, SpS4 Structure of galaxy disks shaped by secular evolution and environmental processes (Rome, Italy), постер: “*Lenticular Galaxy IC 719: Current Building of the Counterrotating Large-scale Stellar Disk*”, июль 2012
5. Конференция Multi-Spin Galaxies (Naples, Italy), доклад: “*Decoupled gas kinematics in isolated early-type disc galaxies*”, сентябрь 2013
6. Семинар ESO Lunch Talks Seminar (Garching, Germany), доклад: “*Full spectral fitting techniques: shedding light on unresolved stellar populations*”, декабрь 2013

Личный вклад

Соискатель самостоятельно разработал методики вычитания вклада ночного неба в спектр при длиннощелевых наблюдениях с учетом вариаций контура вдоль щели, методику непараметрического восстановления кинематики звезд по абсорбционным спектрам. Разработка метода двухкомпонентной декомпозиции спектра велась на основе алгоритма попиксельной аппроксимации наблюдаемых спектров NBURSTS при совместном участии автора этого алгоритма – И. В. Чилингаряна (CfA, ГАИШ МГУ). Соискателем была выполнена первичная редукция спектральных данных SCORPIO/SCORPIO-2 и анализ всех спектральных данных методом попиксельной аппроксимации спектров. Получение фотометрических оценок и Ликских индексов проводились О. К. Сильченко (ГАИШ МГУ); первичная редукция данных с телескопа SALT – А. Ю. Князевым (SAAO, ГАИШ МГУ). Анализ свойств окружения близких галактик и составление выборки изолированных линзовидных галактик проводились диссертантом при тесном взаимодействии с Д. И. Макаровым (САО РАН). Обсуждение, интерпретация полученных результатов и написание текстов публикаций – в равных долях с другими соавторами.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 172 страницы, включая 38 рисунков, 6 таблиц и 2 приложения. Библиография включает 174 наименования на 12 страницах.

Во **введении** приведен обзор литературы по рассматриваемой проблеме, обсуждается актуальность работы, цели и задачи исследования, научная новизна, научная и практическая ценность полученных результатов. Также формулируются основные результаты и положения, выносимые на защиту,

и приводится список работ, в которых опубликованы основные результаты диссертации.

Глава 1 посвящена описанию наблюдений и методов обработки полученных данных для выборки исследуемых изолированных линзовидных галактик. В начале главы приводится описание режимов наблюдений на 6 метровом телескопе БТА Специальной Астрофизической Обсерватории РАН и на Большом Южно-Африканском телескопе (SALT, Southern African Large Telescope), действующем в Южно-Африканской Астрономической обсерватории (SAAO, Southern African Astronomical Observatory). Далее излагаются основные этапы первичной редукции наблюдательных данных, полученных на обоих телескопах в режиме длиннощелевых спектральных наблюдений. Описывается используемая нами методика попиксельной аппроксимации наблюдаемых спектров моделями звездных населений NBURSTS для определения радиальных профилей лучевых скоростей звезд, дисперсии скоростей, возраста и металличности звездного населения и для выделения чисто эмиссионного спектра.

При обработке длиннощелевых спектров протяженных объектов очень низкой поверхностной яркости достаточно остро стоит проблема вычитания вклада в спектр ночного неба. Стандартные методы вычитания спектра ночного неба не всегда справляются со своей задачей в случае сильных вариаций инструментального контура вдоль щели, что приводит к появлению артефактов в спектре галактики, которые как мы показали, могут внести систематические ошибки в оценки металличности звездного населения и дисперсии скоростей звезд. Мы предлагаем несколько новых методов построения модели спектра ночного неба с учетом вариаций инструментального контура.

Также в главе излагаются разработанные нами методы непараметрического восстановления распределения звезд по скоростям на луче зрения (line-of-sight velocity distribution, LOSVD) и метод одновременного определе-

ния параметров кинематики и свойств звездных населений при двухкомпонентной декомпозиции спектра. Описывается пример использования обоих методик для исследования линзовидной галактики NGC 524, где удалось по спектру, полученному на БТА, выделить динамически горячий, медленно вращающийся компонент (балдж) на фоне быстро вращающегося динамически холодного диска и оценить их параметры звездных населений.

В **главе 2** излагается методический аппарат, разработанный в Лаборатории внегалактической астрофизики и космологии САО РАН и используемый нами для исследования статистических свойств окружения галактик Местного Сверхскопления и его окрестностей. Показано, что распределение галактик по индексу изолированности, характеризующему динамическое влияние одной галактики на другую, в плотном окружении качественно отличается от распределения галактик в разреженном окружении.

Была построена представительная выборка из 281 изолированной линзовидной галактики, объекты которой сравнивались по интегральным параметрам с галактиками других морфологических классов и окружений. Оказалось, что распределения изолированных галактик и S0 галактик в более плотном окружении по показателю цвета $B - J$ в целом очень похожи и существенных расхождений между ними не наблюдается. Из полученного списка изолированных S0 галактик были отобраны объекты для дальнейших детальных исследований с использованием крупных оптических телескопов БТА и SALT. Также в главе приводится краткое описание полученных результатов анализа длиннощелевых спектров для 22 детально исследуемых галактик.

В **главе 3** мы представили результаты исследований звездных населений изолированных линзовидных галактик на основе спектральных наблюдений на 6 метровом телескопе БТА и на телескопе SALT Южно-Африканской обсерватории. Мы обнаружили, что средние возраста звездного населения в нашей выборке изолированных линзовидных галактик заполняют полный диа-

пазон значений от 1.5 до > 15 млрд. лет, и, в отличие от S0-галактик в более плотных окружениях, изолированные галактики как правило имеют одинаковый возраст звезд в балджах и в дисках. Последнее утверждение позволяет сделать вывод о том, что для галактик в разреженном окружении механизмы омоложения балджа малоэффективны. Широкий диапазон возрастов звездных населений различных структурных компонентов изолированных S0 галактик, а также анализ обилия α -элементов в них, позволяет утверждать, что события звездообразования в изолированных линзовидных галактиках могли случаться в разное время и иметь различную длительность. Линзы и кольца повышенной звездной яркости, обнаруженные в 11 из 18 галактик (61%), имеют дисперсию скоростей звезд и химические свойства звездных населений, как правило, неотличимые от звездных населений дисков. При этом эпоха формирования колец (от 2 до 5 млрд. лет назад, $z = 0.2 - 0.5$) не зависит от возрастов дисков. Сделан вывод, что вероятно оформление морфологического типа линзовидной галактики в полной изоляции критически зависит от возможных режимов аккреции внешнего холодного газа.

В **главе 4** рассматриваются свойства ионизованного газа в изолированных S0 галактиках. В 13 галактиках из 18 ($72 \pm 11\%$) обнаружено наличие протяженных эмиссионных линий, свидетельствующих о крупномасштабной структуре ионизованного газа, при этом в $46 \pm 14\%$ (6/13) случаев ионизованный газ оказался кинематически обособлен по отношению к звездам. Доля галактик с протяженными газовыми структурами вполне согласуется с оценками, приводимыми другими авторами. При этом наша оценка доли сильно изолированных галактик с рассогласованной кинематикой ионизованного газа подтвердила ранние подозрения о влиянии окружения на статистику ионизованных структур. Мы показали, что в случае изотропной аккреции газа такое процентное соотношение согласуется с предположением о внешнем происхождении газа во всех изолированных галактиках. Анализ диагности-

ческих диаграмм выявил, что ионизованный газ в исследуемых галактиках может быть возбужден как ударным механизмом или излучением пост-AGB звезд, так и фотоионизацией молодыми звездами. Вероятно возбуждение газа зависит от геометрии падения вещества на галактику, что проявляется в видимой дихотомии механизмов возбуждения. Для 10 галактик удалось получить оценки обилия кислорода в областях звездообразования, которые оказались близкими к солнечному значению и согласующимися со сценарием приобретения газа из карликовых спутников путем приливной аккреции, исключая механизм аккреции первичного газа из космологических филаментов. Отсутствие корреляции “светимость галактики—металличность газа” подтверждает сделанный вывод о происхождении газа.

Глава 5 посвящена детальному исследованию двух линзовидных галактик, IC 719 и NGC 4124, у которых мы обнаружили следы недавней аккреции газа. Галактика IC 719 является уникальным объектом, потому что наряду с противовращающимся диском ионизованного газа, известным ранее, мы достоверно обнаружили и исследовали противовращающийся вторичный звездный диск. Исследование этой галактики было сделано не только на основе длиннощелевых данных, но также с привлечением данных панорамной спектроскопии со спектрографом SAURON. Противовращение газа к основному диску прослеживается до оптических границ галактики. Распределение интенсивностей эмиссионных линий показывает кольцевую структуру, а в соответствии с диагностическими диаграммами газ в кольце возбужден в основном излучением молодых звезд. Исследуя историю звездообразования методом двухкомпонентной декомпозиции спектров, который излагается в методической главе 1, мы также показали, что история аккреции газа на IC 719 заключалась в двух событиях, каждое из которых впоследствии инициировало вспышку звездообразования в диске галактики.

Вторую часть главы составляют результаты спектрального и фотометри-

ческого изучения локально изолированной линзовидной галактики NGC 4124, у которой обнаружен в центральной килопарсековой зоне наклоненный к основной плоскости диск ионизованного газа. По всей видимости, формирование этого диска связано с поглощением небольшого спутника, породившим также и позднюю вспышку звездообразования в центральной области, что подтверждается более низким средним возрастом (≈ 2 млрд. лет) звездного населения в центральной области по сравнению с возрастом звездного населения диска ($\approx 5 - 7$ млрд. лет).

В **заключении** обсуждаются основные результаты диссертации в контексте недавно предложенной О.К. Сильченко концепции формирования линзовидных галактик [10] и дальнейшие перспективы исследования.

В **приложении А** приводится таблица свойств окружения галактик из выборки 281 объектов. **Приложение В** состоит из иллюстративного материала для каждой галактики из списка 22 объектов, которые наблюдались на БТА и SALT. Приводятся радиальные профили скорости звезд и газа, дисперсии скоростей звезд и газа, возраста и металличности звездного населения.

Цитированная литература

1. Spitzer L., Jr., Baade W. Stellar Populations and Collisions of Galaxies. // *Astrophys. J.* 1951. — March. Vol. 113. P. 413.
2. Icke V. Distant encounters between disk galaxies and the origin of S 0 spirals // *Astron. and Astrophys.* 1985. — March. Vol. 144. Pp. 115–123.
3. Byrd G., Valtonen M. Tidal generation of active spirals and S0 galaxies by rich clusters // *Astrophys. J.* 1990. — February. Vol. 350. Pp. 89–94.
4. Moore B., Katz N., Lake G. et al. Galaxy harassment and the evolution of clusters of galaxies // *Nature.* 1996. — February. Vol. 379. Pp. 613–616.

5. Gunn J. E., Gott J. R., III. On the Infall of Matter Into Clusters of Galaxies and Some Effects on Their Evolution // *Astrophys. J.* 1972. — August. Vol. 176. P. 1.
6. Quilis V., Moore B., Bower R. Gone with the Wind: The Origin of S0 Galaxies in Clusters // *Science*. 2000. — Juny. Vol. 288. Pp. 1617–1620.
7. Larson R. B., Tinsley B. M., Caldwell C. N. The evolution of disk galaxies and the origin of S0 galaxies // *Astrophys. J.* 1980. — May. Vol. 237. Pp. 692–707.
8. Naim A., Lahav O., Buta R. J. et al. A comparative study of morphological classifications of APM galaxies // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 1995. — Juny. Vol. 274. Pp. 1107–1125.
9. Sulentic J. W., Verdes-Montenegro L., Bergond G. et al. The AMIGA sample of isolated galaxies. II. Morphological refinement // *Astron. and Astrophys.* 2006. — April. Vol. 449. Pp. 937–949.
10. Sil'chenko O. K., Proshina I. S., Shulga A. P., Kuposov S. E. Ages and abundances in large-scale stellar discs of nearby S0 galaxies // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 2012. — November. Vol. 427. Pp. 790–805.