

Мосенков Александр Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И
ДИНАМИКИ ВИДИМЫХ С РЕБРА
ГАЛАКТИК**

Специальность 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор

Решетников Владимир Петрович

Официальные оппоненты:

Сильченко Ольга Касьяновна

доктор физико-математических наук, профессор, зав. отделом физики эмиссионных звезд и галактик Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ имени М.В. Ломоносова

Осипков Леонид Петрович

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры космических технологий и прикладной астродинамики факультета прикладной математики-процессов управления СПбГУ

Ведущая организация: Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН

Защита состоится «17» декабря 2013 г. в 15 ч. 30 м. на заседании диссертационного совета Д 212.232.15 при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., д. 28, ауд. 2143 (Математико-механический факультет).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУ.

Автореферат разослан «_____» _____ 2013 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Орлов В.В.

Введение

В диссертационной работе изучаются спиральные галактики, видимые под большим углом к наблюдателю, то есть в ориентации “с ребра”. Эти галактики, как и все регулярные галактики (то есть без каких-либо особенностей в строении), представляют собой объекты, состоящие по крайней мере из двух компонентов — диска и балджа. Ориентированные таким образом галактики вызывают особый интерес, так как только в этом случае представляется возможным изучить вертикальную структуру дисков и балджей, которая может быть достаточно сложной, и отражать различные физические процессы, происходившие или происходящие в данный момент в галактике. Кроме того, появляется уникальная возможность изучать распределение пыли и газа в плоскости галактики, исследовать изгибы, изломы и обрывы дисков на периферии. Изучение влияния темного гало на толщину галактик также является важной проблемой, которая может быть разрешена только благодаря исследованию видимых с ребра галактик.

В литературе можно найти большое количество работ, посвященных галактикам, видимым с ребра. Изучались как отдельно взятые галактики, так и выборки, состоящие из десятков и даже сотен галактик ([1–3]). Были созданы специальные каталоги плоских галактик, содержащие множество видимых с ребра галактик поздних морфологических типов ([4–6]).

При изучении галактик были установлены важные наблюдательные факты ([1, 2, 7, 8]). Как правило, поверхностная яркость дисков (прямо зависящая от поверхностной плотности диска) изменяется с расстоянием от центра по экспоненциальному закону с характерным параметром — радиальным масштабом (или шкалой) h . Распределение поверхностной яркости перпендикулярно плоскости диска хорошо описывается с помощью экспоненциального закона (или более сложных законов, как, например, с помощью модели самогравитирующего изотермического слоя), причем характерный вертикальный масштаб z_0 оказы-

вается практически постоянным по всему диску. Балдж галактик описывается эмпирическим законом Серсика, в который, помимо прочих структурных параметров, входит показатель Серсика, характеризующий профиль распределения поверхностной яркости балджа.

Изучение зависимостей между структурными параметрами балджей и дисков представляет важную научную задачу. Результаты этого анализа необходимы для проведения численного моделирования, а также построения и уточнения теорий, связанных с формированием и эволюцией галактик.

Диссертация посвящена структурному и динамическому исследованию видимых с ребра галактик различных морфологических типов в двух диапазонах длин волн (оптический и ближний ИК). В эпоху развития виртуальных обсерваторий и больших цифровых обзоров неба становится крайне важным изучать представительные, статистически полные выборки галактик, содержащие объекты разных морфологических типов. В ходе обзора литературы автором было обнаружено, что существующие структурные исследования видимых с ребра галактик были выполнены в основном для небольших выборок, в которых разброс галактик по морфологическим типам очень невелик.

Для обработки большого количества наблюдательных данных требуется создание специального программного обеспечения, настроенного под работу с известными обзорами неба. Массовая фотометрическая декомпозиция видимых с ребра галактик (разложение изображения галактики на балдж и диск) на данный момент не реализована ни в одном известном автору пакете автоматической декомпозиции галактик.

Обзор литературы показывает, что существование некоторых корреляций между структурными параметрами галактик (см., напр., Vizaev & Mitronova 2002) объясняется в действительности использованием применяемых для анализа галактик моделей, а также характеристиками изучаемых выборок галактик. Такие зависимости являются псевдокорреляциями и не дают нового знания о структуре галактик.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

В настоящее время внегалактическая астрономия переживает эпоху обзоров, результатами которых являются данные о сотнях тысяч и миллионах галактик. Анализ такого количества объектов становится трудоемким процессом, а исследование каждого объекта вручную требует очень больших человеческих ресурсов.

Таким образом, возникает необходимость в разработке алгоритмов, позволяющих производить анализ изображений галактик в автоматическом режиме, сводя участие исследователя на данном этапе работы к минимуму, и тем самым решая проблему обработки большого числа изображений галактик. Применение методов автоматического анализа изображений к выборке дисковых галактик дает массив морфологических и структурных параметров для каждой галактики. Наличие такого массива позволяет провести статистические исследования этих параметров: получить функции распределения, найти корреляции параметров друг с другом, а также другими параметрами (кинематическими и фотометрическими), определить зависимость параметров от фотометрической полосы, в которой получено изображение.

Поиск различных корреляций интересен по двум причинам. Во-первых, они могут служить инструментом, позволяющим делать косвенные оценки различных характеристик галактик по уже известным параметрам. Во-вторых, наличие таких корреляций накладывает определенные ограничения на различные теории формирования и эволюции галактик: любая успешная теория должна объяснять такого рода зависимости.

Ранее многими авторами было произведено детальное исследование выборок галактик разных морфологических типов в разных цветовых полосах, в том числе с получением структурных параметров компонентов галактик. Декомпозиция (фотометрическое разложение изображений галактик на несколь-

ко компонентов, в первом приближении на балдж и диск) больших выборок галактик за последние несколько лет были проведены неоднократно. Однако детальное изучение вертикальной структуры дисков видимых с ребра галактик в разных цветовых полосах было проделано лишь несколькими авторами, причем на небольшом статистическом материале и в основном для галактик в узком диапазоне морфологических типов (как правило, поздних). Очевидно, что для формирования полной картины о вертикальной структуре галактик необходимо выполнить исследование, в котором будут изучены галактики разных типов, разной поверхностной яркости, относительной толщины диска и прочих характеристик.

Цели и задачи работы

Основная цель работы состоит в исследовании структуры и динамики видимых с ребра галактик. Основными задачами работы являются следующие:

- Построение каталога видимых с ребра галактик на основе обзора SDSS DR7.
- Разработка специального программного обеспечения, предназначенного для массовой обработки изображений галактик, видимых с ребра (включая выполнение двумерной декомпозиции, анализ формы балджа, изучение вида распределения поверхностной яркости перпендикулярно плоскости диска в зависимости от радиуса и пр.).
- Выполнение качественной двумерной декомпозиции для большой выборки видимых с ребра галактик, как ранних, так и поздних типов, с применением разработанного программного пакета.
- Анализ полученных результатов: построение распределений структурных параметров, а также различных корреляций между ними для выявления общих закономерностей и различий у галактик разных морфологических

типов.

- Анализ известных масштабных соотношений на основе исследований, проведенных разными авторами.

Научная новизна работы

В ходе работы над диссертацией разработаны новые методы исследования галактик, видимых с ребра, получен ряд новых результатов.

1. Разработан ряд оригинальных методов для анализа изображений видимых с ребра галактик, встроенных в новый программный пакет DECA, с помощью которого в автоматическом режиме можно надежно исследовать большие выборки регулярных галактик (не только галактик, видимых с ребра, но и произвольной ориентации в пространстве).
2. На основе обзора SDSS построен самый большой каталог видимых с ребра галактик, содержащий сведения о примерно 6000 галактик.
3. Для почти 500 галактик разных морфологических типов выполнен анализ наблюдаемого распределения яркости (декомпозиция) в нескольких фотометрических полосах: i (SDSS), J (2MASS), H (2MASS), K_s (2MASS) и K (UKIDSS).
4. Распределение видимого сжатия балджей для подвыборок с индексом Серсика $n \lesssim 2$ говорит о том, что такие балджи являются трехосными структурами, наблюдаемыми в разных проекциях. Балджи с $n \gtrsim 2$ являются, по-видимому, сфероидами, сплюснутыми у полюсов, и с умеренными сжатием. Трехосность балджей у галактик поздних типов может являться признаком наличия бара, который вырос в вертикальном направлении на долговременной шкале эволюции.

5. Для изученной выборки галактик эффективный радиус балджа $r_{e,b}$, радиальный масштаб h и вертикальный масштаб диска z_0 хорошо коррелируют друг с другом. Однако наблюдается заметный тренд для отношения $r_{e,b}/h$ при уменьшении величины показателя Серсика n . Так как показатель n является одним из индикаторов Хаббловского типа (но не единственным!), существование такого тренда ставит под сомнение гипотезу о том, что Хаббловская последовательность является независимой от масштабных параметров входящих в галактику компонентов. Найденная корреляция между параметрами z_0 и $r_{e,b}$ является новой и ранее не была описана.
6. Зависимость между сжатием диска z_0/h и относительной массой сферического компонента (включая темное гало) подтверждена не только для галактик без балджа, но и для галактик с массивными балджами.
7. Анализ исследований разных авторов для разных типов галактик впервые показал, что некоторые открытые ранее и активно обсуждаемые в литературе корреляции между параметрами галактик являются псевдокорреляциями. Они не несут новой информации о структуре галактик. Например, оказалось, что зависимость относительной толщины диска от его центральной поверхностной яркости является следствием применения модели абсолютно прозрачного экспоненциального диска для описания распределения поверхностной яркости дискового компонента, а также следствием характеристики исследуемой выборки галактик.

Научная и практическая ценность

Научная и практическая ценность работы состоит в следующем:

1. Составлен самый большой на данный момент каталог видимых с ребра галактик. Каталог содержит около 6000 объектов и является ценным источником наблюдательного материала при изучении вопросов формирования

и эволюции галактик.

2. Созданная автором программа DECA является единственной в своем роде программой, предназначенной для массового фотометрического исследования галактик, видимых с ребра, с возможностью декомпозиции изображения галактики на балдж и диск, учета обрывов и изгибов дисков, а также исследования формы балджа.
3. Полученные результаты декомпозиции для нескольких больших выборок галактик, видимых с ребра, являются уникальными, так как позволяют проанализировать вертикальную структуру дисков и балджей у галактик разных морфологических типов (S0-Sd) и изучить наблюдаемые соотношения между структурными параметрами галактик. Данные результаты могут быть использованы другими авторами при выполнении численного моделирования и проверок предсказаний теории формирования и эволюции галактик.
4. Критический анализ нескольких масштабных соотношений галактик, некоторые из которых оказались в действительности псевдокорреляциями, не дающими новой информации о структуре галактик. Данный факт должен учитываться при анализе разного рода зависимостей (не только в области астрофизики), когда используются сложные модели для описания наблюдаемых явлений и вводятся множественные допущения касательно принимаемых моделей.

Апробация и внедрение результатов работы

Результаты работы докладывались автором на семинаре кафедры астрофизики математико-механического факультета СПбГУ, на семинаре астрофизических подразделений ГАО РАН и на семинаре для молодых ученых ГАО РАН. Автор принимал участие в представлении докладов на 9-ти научных кон-

ференциях, а именно:

1. Международная конференция “Dynamics and Evolution of Disc Galaxies” (31 мая–4 июня 2010г., г. Пушино).
2. Международная конференция для молодых ученых “Fifty years of Cosmic Era: Real and Virtual Studies of the Sky” (21–25 ноября 2011 г., г. Ереван, Армения).
3. Всероссийская конференция “Актуальные проблемы внегалактической астрономии” (17–19 апреля 2012 г., г. Пушино).
4. Международная конференция “Galaxies: Origin, Dynamics, Structure and Astrophysical Disks” (14–15 мая 2012 г., г. Сочи).
5. 220 съезд Американского Астрономического Общества AAS 2012 (10–14 июня 2012 г., г. Анкоридж, США).
6. XXX конференция “Актуальные проблемы внегалактической астрономии” (8–11 апреля 2013 г., г. Пушино).
7. Всероссийская конференция “Современная звездная астрономия — 2013” (10–12 июня 2013 г., Пулковое).
8. Всероссийская конференция ВАК—2013 “Многоликая Вселенная” (23–27 сентября 2013 г., г. Санкт-Петербург).
9. Международная молодежная конференция “Science and progress” (30 сентября–4 октября 2013 г., г. Санкт-Петербург).

Пакет программ DECA используется на кафедре астрофизики СПбГУ. Результаты исследования внедрены в учебный и научный процесс.

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка цитируемой литературы (160 наименований) и приложения. Общий объем диссертации — 152 страницы, включая 50 рисунков и 16 таблиц.

Во **Введении** отражена краткая история проблемы, основные результаты в области исследования галактик, видимых с ребра, содержание диссертационной работы, актуальность темы, цели и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту, показана их научная новизна, кратко представлено содержание диссертации.

В **Главе 1** кратко описываются основные методы анализа изображений галактик, представляется обзор используемых в работе моделей для количественного описания глобальной фотометрической структуры галактик. Обсуждаются современные пакеты для выполнения фотометрической декомпозиции.

В **Главе 2** дается описание разработанной автором программы DECA, предназначенной для массового исследования структурных параметров галактик, видимых с ребра. Приводятся результаты тестирования программы на выборке модельных галактик, показывающие надежность выдаваемых программой результатов.

В **Главе 3** описывается составленная автором выборка галактик, видимых с ребра. Используются наблюдательные данные 2MASS обзора. Произведена декомпозиция 165 галактик в полосе J , 169 галактик в полосе H и 175 галактик в полосе K_s . Обсуждаются основные результаты декомпозиции: распределение параметров, корреляции между структурными параметрами диска и балджа, а также масштабные соотношения, включающие кинематические данные. Показано, что для галактик, видимых с ребра, наблюдается бимодальность в распределении параметра балджа n , ранее найденная для галактик, видимых под промежуточными углами. Галактики с классическими балджами ($n \gtrsim 2$) и псевдобалджами ($n \lesssim 2$) по-разному ведут себя на фундаментальной плоскости

для дисков, что, вероятно, говорит о различной физической природе данных объектов.

В **Главе 4** описывается процедура составления каталога видимых с ребра галактик, отобранных из обзора SDSS DR7. Обсуждается методика выделения галактик, видимых с ребра, содержащих различные особенности в строении (такие как изгибы дисков, сильные пылевые полосы вдоль плоскости диска, следы взаимодействия с другими галактиками, В/PS структуры в центральных частях галактик). Приводятся основные статистические свойства составленного каталога, делаются выводы о его полноте. Каталог содержит 5747 галактик с углами наклона i , близкими к 90° . Видимые с ребра галактики с особенностями выделены в отдельную выборку, насчитывающую 1865 объектов.

В **Главе 5** описывается процедура составления нескольких выборок галактик из каталога, представленного в **Главе 4**. SDSS-выборка в полосе i содержит 192 галактики с угловым диаметром $d(B) > 40''$ без наличия существенных особенностей в структуре и без визуального присутствия сильной пылевой полосы. UKIDSS-выборка получена с помощью пересечения созданного каталога галактик, видимых с ребра, с UKIDSS обзором. К отобранным галактикам с $d(B) > 50''$ были добавлены видимые с ребра галактики такого же углового размера из каталогов RFGC и 2MFGC, присутствующие в UKIDSS обзоре. Далее описывается алгоритм массовой декомпозиции сформированных выборок с помощью программы DECA. Проводится анализ и обсуждение полученных результатов. В частности, выяснено, что галактики с яркими и тусклыми балджами имеют различные распределения структурных параметров балджей и дисков. Показано, что относительная толщина дисков не зависит от вклада балджа в общую светимость галактики, то есть, например, тонкие диски могут наблюдаться как в галактиках ранних, так и поздних типов. Также найдено, что размеры балджей и дисков связаны между собой. Кроме того, обнаружено, что в исследованных выборках почти половина галактик имеет В/PS балджи. Видимое сжатие балджей $q_b = b/a$ (где a и b – большая и малая ось балджа

соответственно) имеет несколько характерных пиков, при этом большинство балджей, по видимому, являются сжатыми с полюсов сфероидами со средним значением сжатия $\langle q_b \rangle \approx 0.63$. Другие максимумы в распределении q_b , вероятно, связаны с В/PS балджами (т.е. с присутствием баров). Отсутствие корреляции между эффективной поверхностной яркостью балджа и показателем Серсика замечено впервые.

В **Главе 6** сравниваются результаты декомпозиции разных выборок галактик, видимых с ребра. Обсуждается известная корреляция между депроцированной центральной поверхностной яркостью дисков и их относительной толщиной. Показано, что данная корреляция является псевдокорреляцией. Она проявляет себя как следствие процедуры редукции центральной поверхностной яркости в модели абсолютно прозрачного экспоненциального диска. Кроме того, показано, что относительная толщина диска в галактиках разных морфологических типов коррелирует (с большим разбросом) с относительной массой сферического компонента: диски, погруженные в массивное темное гало, являются, в среднем, более тонкими.

В **Выводах и Заключение** приводится краткое обсуждение результатов исследования галактик, видимых с ребра, и перечислены основные выводы диссертационной работы.

В **Приложении А** приведен список галактик 2MASS-выборки из **Главы 3**.

В **Приложении В** приведен список галактик UKIDSS-выборки из **Главы 5**.

В **Приложении С** приведен список галактик SDSS-выборки из **Главы 5**.

Положения, выносимые на защиту

1. Каталог видимых с ребра галактик, отобранных из обзора SDSS DR7.
2. Программный пакет DECA, предназначенный для массовой декомпозиции регулярных галактик и включающий специальный блок для фотометрического анализа галактик, видимых с ребра.
3. Результаты декомпозиции для почти 500 видимых с ребра галактик в нескольких фотометрических полосах.
4. Новые корреляции между структурными параметрами балджей и дисков, как, например, соотношение между толщиной диска и эффективным радиусом балджа.
5. Галактики с разными типами балджей имеют разные распределения структурных параметров (эффективного радиуса балджа, видимого сжатия балджа, показателя Серсика и др.).

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 6-ти печатных работах, из них 2 статьи – в рецензируемых журналах, 1 статья – в сборнике трудов конференции и 3 – в сборниках тезисов докладов.

Основные результаты диссертации изложены в следующих статьях:

1. Mosenkov A. V., Sotnikova N. Ya., Reshetnikov V. P. 2MASS photometry of edge-on spiral galaxies - I. Sample and general results // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2010. – Vol. 401, 1. – P. 559–576
2. Sotnikova N.Ya., Reshetnikov V.P., Mosenkov A.V. Bulges and discs of spiral galaxies: edge-on perspective // Astronomical and Astrophysical Transactions. Journal of the Eurasian Astronomical Society, 2012. – Vol. 27, – 2. – P. 325–334

3. Mosenkov A.V., Sotnikova N.Ya., Reshetnikov V.P. Photometry of edge-on spiral galaxies: structural parameters and scaling relations of bulges // Fifty years of Cosmic Era: Real and Virtual Studies of the Sky, Proceedings of the Conference of Young Scientists of CIS Countries, held 21–25 Nov 2011, in Yerevan, Armenia –Yerevan, – 2012. – P. 187–192
4. Kautsch S.J., Bizyaev D., Mosenkov A.V., Sotnikova N.Ya., Reshetnikov V.P., Hillyer R.W., Yablokova N.V. The Catalog of Edge-on Disk Galaxies Found in SDSS // Bulletin of the American Astronomical Society, 2012. – Vol. 220, – P. 433.01
5. Savchenko S.S., Mosenkov A.V. Spiral structure and bulge/disc decomposition analysis // Conference abstracts. International Student Conference “Science and Progress”, held 30 Sep – 4 Oct 2013, in St. Petersburg, – Russia, – 2013., SOLO, – P. 136
6. А.В. Мосенков, В.П. Решетников, Н.Я. Сотникова, Структурные характеристики галактик, видимых с ребра // Всероссийская астрономическая конференция, Тезисы докладов, Санкт-Петербург, 23-27 сентября 2013, с.191

Личный вклад автора

В работе [1] автором выполнен поиск и отбор галактик, затем выполнена декомпозиция. Интерпретация осуществлена совместно. В работах [2], [3], [5] и [6] автором произведена обработка наблюдательного материала, интерпретация осуществлена совместно. В работе [4] совместно осуществлен отбор галактик, видимых с ребра, а также описаны некоторые статистические свойства построенного каталога.

Список литературы

1. van der Kruit P. C., Searle L. Surface Photometry of Edge-On Spiral Galaxies. II - the Distribution of Light and Colour in the Disk and Spheroid of NGC891 // *A&A*. 1981. Vol. 95. P. 116.
2. Pohlen M., Dettmar R.-J., Lütticke R., Schwarzkopf U. Three-dimensional modelling of edge-on disk galaxies // *A&AS*. 2000. Vol. 144. P. 405–428.
3. Bizyaev D., Mitronova S. Photometric parameters of edge-on galaxies from 2MASS observations // *A&A*. 2002. Vol. 389. P. 795–801.
4. Karachentsev I. D., Karachentseva V. E., Parnovskij S. L. Flat galaxy catalogue // *Astronomische Nachrichten*. 1993. Vol. 314. P. 97–222.
5. Karachentsev I. D., Karachentseva V. E., Kudrya Y. N. et al. The revised Flat Galaxy Catalogue. // *Bulletin of the Special Astrophysics Observatory*. 1999. Vol. 47. P. 5.
6. Mitronova S. N., Karachentsev I. D., Karachentseva V. E. et al. The 2MASS-selected Flat Galaxy Catalog // *Bulletin of the Special Astrophysics Observatory*. 2004. Vol. 57. P. 5–163.
7. Barteldrees A., Dettmar R.-J. Parameters of stellar disks from CCD surface photometry of edge-on galaxies // *A&AS*. 1994. Vol. 103. P. 475–502.
8. Yoachim P., Dalcanton J. J. Structural Parameters of Thin and Thick Disks in Edge-on Disk Galaxies // *AJ*. 2006. Vol. 131. P. 226–249.