

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

СОТНИКОВА Наталья Яковлевна

**ФОРМИРОВАНИЕ И ОСОБЕННОСТИ  
СТРУКТУРЫ  
КРУПНОМАСШТАБНЫХ ПОДСИСТЕМ В  
ГАЛАКТИКАХ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И  
НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ**

01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук,  
профессор,  
**Гнедин Юрий Николаевич**,  
Главная астрономическая обсерватория РАН  
зам. директора по научной работе

доктор физико-математических наук,  
профессор,  
**Расторгуев Алексей Сергеевич**,  
Московский государственный университет,  
зав. отделом Изучения Галактики и  
переменных звезд ГАИШ

доктор физико-математических наук,  
профессор,  
**Хоперсков Александр Валентинович**,  
Волгоградский государственный университет,  
зав. кафедрой информационных систем и  
компьютерного моделирования

**Ведущая организация:** Южный федеральный университет,  
Научно-исследовательский институт физики

Защита состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г. в 15 ч. 30 м. на заседании диссертационного совета Д212.232.15 на базе Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 28, Математико-механический факультет, ауд. 2143.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. М. Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9 и на сайте:

<http://spbu.ru/science/disser/soiskatelyu-uchjonoj-stepeni/dis-list/de tails/14/358>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

кандидат физико-математических наук,

Миланова Ю.В.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы исследования.** Проблема формирования и эволюции крупномасштабных структур у галактик является одной из фундаментальных в астрономии. Наблюдения, проведенные на спутниках COBE и WMAP, показали, что на ранних стадиях эволюции Вселенной возникли неоднородности, которые создали условия для образования галактик. Однако то, каким образом исходные неоднородности дали начало многообразным формам окружающих нас галактик, до сих пор остается предметом дискуссии.

Из спектра идей, предложенных для решения этих вопросов, в последние годы наибольшее внимание привлекают модели “иерархического скучивания”, согласно которым усложнение структуры галактик и появление в них различных подсистем связаны с аккрецией вещества извне, слияниями галактик и их взаимодействием. Более того, данные современных наблюдений говорят нам о том, что в галактиках до сих пор происходит процесс формирования отдельных структур. Так, например, происхождение многочисленных пространственных и кинематических подсистем в периферийных частях Млечного Пути (так называемом звездном гало), по-видимому, обусловлено продолжающимся взаимодействием нашей Галактики с близкими маломассивными спутниками (ссылки).

Взаимодействовать могут не только внешние объекты, но и отдельные компоненты галактик, например, звездный и газовый диски, звездный диск и темное гало. В этом случае процесс взаимодействия служит механизмом возникновения различных внутренних неустойчивостей, определяющих наблюдаемые особенности строения галактик (вертикальную структуру дисков, наличие спиральных рукавов, баров, изгибов и т.д.).

То, что взаимодействие — это один из основных механизмов формирования и преобразования структуры галактик, стало общепринятой точкой зрения. Однако для выяснения деталей действия этого механизма необходимы подробные исследования. Этим и определяется основное направление настоящей работы:

анализ структурных параметров основных крупномасштабных подсистем в галактиках и изучение поздних стадий формирования таких подсистем.

**Цели и задачи диссертационной работы.** Основной **целью** данной работы является исследование процессов гравитационного взаимодействия галактик и внутренних неустойчивостей в звездных дисках, которые оказывают существенное влияние на структуру и эволюцию галактик. Поставленная цель определяет несколько **задач**, решаемых в данной работе:

1. исследования, связанные с формированием внешних и внутренних газовых и звездных структур у галактик при их взаимодействии со спутниками;
2. статистическое исследование параметров вертикальной структуры звездных дисков спиральных галактик на основе данных о поверхностной фотометрии галактик, видимых с ребра, а также моделирование эволюции вертикальной структуры дисков, происходящей вследствие внутренних неустойчивостей.
3. разработка методов определения параметров темного гало в галактиках разных типов по данным о кинематике и морфологии далеких периферийных областей приливных хвостов и аккреционных колец во взаимодействующих системах, а также на основе масштабных соотношений для звездных дисков, включающих в качестве параметра относительную толщину дисков.

Для решения этих задач предполагается разработка методов моделирования звездных и газовых подсистем в галактиках, а также получение и анализ наблюдательного материала по фотометрии и кинематике изолированных и взаимодействующих галактик.

**Научная новизна.** Работы в данной области астрофизики очень активно проводятся во многих странах, однако, как правило, основное внимание исследователей сосредоточено на космологических и космогонических аспектах проблемы. Новизна подхода к решению вопросов, рассматриваемых в диссертации, состоит в том, что в здесь основной акцент делается главным образом на изучении поздних стадий формирования различных крупномасштабных структурных подсистем в галактиках и исследовании их взаимодействия друг с другом. Внимание в работе уделяется как общетеоретическому исследованию возможных последствий взаимодействия, так и моделированию конкретных систем на основе наблюдательных данных. При этом все полученные результаты являются оригинальными. Автором

1. впервые численно реализован аккреционный сценарий формирования полярных колец у галактик; этот результат стал стандартной ссылкой в литературе;
2. впервые были построены несколько моделей взаимодействующих систем с аккреционными деталями (NGC 5907, UGC 7388);
3. впервые построена модель знаменитой взаимодействующей системы NGC 4676, согласующаяся как с морфологией приливных хвостов, так и с кинематикой;
4. впервые четко классифицированы механизмы нагрева звездного диска в вертикальном направлении и поставлена точка в вопросе об эффективности нагрева изгибаемой неустойчивостью.

Реализованные при участии автора алгоритмы построения звездодинамических моделей не имеют аналогов в мире, а составленные при участии автора каталоги галактик, видимых с ребра, являются на сегодняшний день самыми обширными.

Проведенное исследование заполняет ряд пробелов в теории формирования крупномасштабной структуры галактик.

**Теоретическая и практическая значимость.** Научная значимость диссертации состоит в том, что она дает богатый фактический материал для выводов о ведущих процессах, ответственных за формирование особенностей структуры подсистем в галактиках (приливные хвосты, полярные кольца, внешние и внутренние кольца, вертикальная структура звездных дисков), и о связи этих особенностей с распределением темного вещества в галактиках. Практическую ценность имеют созданные большие каталоги галактик, видимых с ребра, и проведенная 2D декомпозиция большого числа объектов из этих каталогов. Статистический анализ параметров галактик, видимых с ребра, позволил изучить ряд корреляций между относительной толщиной дисков и другими структурными параметрами галактик, которые обсуждались в литературе и были получены на меньшем материале. В результате нам удалось внести ясность в некоторые спорные представления о вертикальной структуре дисков и закрыть несколько корреляций. Практическую ценность имеет пакет программ для газодинамических расчетов методом SPH, который имеет широкую область применимости — от моделирования околозвездных дисков до моделирования приливных структур и полярных колец у галактик. Комплекс программ на основе итерационного метода для построения  $N$ -body моделей равновесных звездных систем найдет применение при исследовании различных вопросов, касающихся динамики галактик. Особую ценность этот метод представляет для восстановления фазовых моделей конкретных галактик по наблюдаемой фотометрии и кинематике, а также для моделирования новых классов систем со сложной геометрией и анизотропией скоростей, не имеющих аналитических аналогов. Итерационный метод также окажется полезным в преподавании и уже был использован при проведении вычислительного спецпрактикума по динамической эволюции звездных систем. Такую же практическую ценность имеет полученный критерий выбора параметра сглаживания и шага интегрирования, и им

нужно руководствоваться при проведении N-body экспериментов.

### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Разработаны методы и алгоритмы построения численных моделей звездных систем и их крупномасштабных подсистем, включая газовые. Выполнена их численная реализация.
2. Построена *первая* фазовая модель галактики NGC 7217, восстановленная по наблюдательным данным. Определен динамический статус звездного диска этой галактики. Восстановленные параметры звездного диска были *впервые* использованы для определения динамического статуса внешнего газового кольца на основе критерия двухжидкостной неустойчивости. Численно реализованы фазовые модели темных гало, включая анизотропные.
3. *Впервые* численно реализован сценарий формирования полярного кольца у S0 галактики за счет захвата вещества из соседней галактики, богатой газом. Сделан вывод, независимый от кинематических соображений, о существовании массивных темных гало вокруг S0 галактик с полярными кольцами и оценены физические параметры гало.
4. Построена *новая* численная модель приливного хвоста главного компонента взаимодействующей системы NGC 4676 (Мышки) и сделан вывод о том, кинематика хвоста несовместима со стандартной моделью, которая воспроизводит только морфологические особенности объекта. Сделан вывод о наличии у галактик системы массивных протяженных темных гало. Предложен метод анализа распределения темного вещества в галактиках по данным о кинематике очень далеких периферийных областей приливных хвостов у взаимодействующих систем.
5. Построены *первые* численные модели формирования звездных петель вокруг галактик NGC 5907 и UGC 7388 в результате разрушения маломас-

сивного спутника. Даны ограничения на структурные параметры спутника и на характеристики темного гало главной галактики.

6. Выявлены и классифицированы механизмы нагрева звездного диска в вертикальном направлении; линейный критерий изгибной неустойчивости *впервые* четко согласован с результатами численных экспериментов; выявлена роль компактного балджа (или компактного гало) в развитии изгибной неустойчивости и роль изгибной неустойчивости в вековом разогреве звездных дисков.
7. Сделан вывод о неоднозначности соотношения между толщиной маргинально устойчивых звездных дисков и массой темного гало, который подтверждается как численными экспериментами, так и наблюдательными данными.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов основывается на применении оттестированных, опробованных и хорошо зарекомендовавших себя методик обработки и анализа наблюдательных данных и алгоритмов моделирования газодинамических течений и звездодинамических систем. Построенные модели физически непротиворечивы и согласуются с общетеоретическими представлениями о процессах, которые двигают эволюцию галактик. Важным свидетельством достоверности полученных в диссертации результатов является их апробация на всероссийских и международных конференциях, а также публикация основных положений диссертации в ведущих астрофизических журналах и цитируемость результатов.

Основные результаты диссертации докладывались на семинарах Астрономического отделения СПбГУ, ГАО РАН, ФТИ им. Иоффе, общегородском семинаре в ИТА РАН, семинаре обсерватории Туорла (Турку) и на многих международных и всероссийских конференциях. Диссертант лично докладывал свои результаты (в том числе, в форме приглашенных докладов) на конференциях: “Актуальные проблемы внегалактической астрономии” (Пушино, 1998,

1999, 2001, 2004, 2007, 2008, 2009, 2012), Всероссийской астрономической конференции ВАК-2001 (Санкт-Петербург, 2001), Всероссийской астрономической конференции ВАК-2004 (Москва, 2004), Всероссийской конференции “Астрономия 2006: традиции, настоящее и будущее” (Санкт-Петербург, 2006), “Galactic Dynamics” (Пулково, 2007), “The UX Ori Type Stars and Related Topics” (Ялта, 2008), “Planetary Formation and Extra-solar Planets” JENAM-2008 (Вена, 2008), “Modelling the Milky Way in the Era of Gaia” JD5, XXVII General assembly IAU (Рио-де-Жанейро, 2009), “Dynamics and Evolution of Disc Galaxies” (Пушино, Москва, 2010), “Minor Merging as a Driver of Galaxy Evolution” EWASS-2011 (Санкт-Петербург, 2011), “Modern Stellar Astronomy” (Пулково, 2013), “Multi-spin Galaxies” (Неаполь, 2013).

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 31 печатной работе [1–31], из них 28 статей в рецензируемых журналах и 3 статьи в сборниках трудов конференций [7, 18, 30].

**Личный вклад автора.** Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. В статьях, относящихся к первой главе и связанных с газодинамическими расчетами, Автору принадлежит решающий вклад в постановке задачи и равный вклад в анализе результатов. Пакеты газодинамических программ были написаны Автором, и им же проводились все газодинамические расчеты. В статьях по  $N$ -body моделированию Автор формулировал задачу и наравне с соавтором проводил анализ результатов, хотя идея итерационного метода и его программная реализация принадлежат соавтору С.А. Родионову. В статье [24], относящейся ко второй главе, Автором была построена фазовая модель галактики NGC 7217 и сделаны все оценки и выводы, касающиеся гравитационной неустойчивости газового диска на основе двухжидкостного критерия. Вклад Автора в анализ результатов равный с соавторами. Во второй статье [15] из второй главы Автору принадлежит постановочная часть задачи и определяющий вклад в анализе результатов. В работах, положенных в основу третьей

главы, Автору принадлежит решающий или наравне с соавторами вклад в постановочную часть и анализ результатов. Численные расчеты в этих работах (кроме статей [7, 8, 30]) производились Автором. В работах, положенных в основу четвертой главы, Автору принадлежит решающий вклад в постановочную часть (кроме работы [29]) и равный с соавторами вклад в анализ результатов. В статье [29] Автор принимал равное участие с соавторами на всех этапах работы. Все результаты, вынесенные на защиту, получены лично автором.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографии. В начале каждого раздела диссертации дается указание на основные статьи, в которых получены представляемые результаты. В конце каждой главы приводится список полученных результатов. Общий объем диссертации 398 страниц, из них 367 страниц текста, включая 121 рисунок и 8 таблиц. Библиография включает 387 наименований на 31 странице.

## Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения. Также в этой части приводится список конференций и работ, где были представлены результаты данного исследования, указан личный вклад автора.

В **Главе 1** представлены созданные пакеты программ, как газодинамических, так и звездодинамических, которые предназначены для описания различных явлений в галактиках. В **разделе 1.1** дается описание и результаты тестирования вычислительных программ, разработанных для изучения крупномасштабных транзиентных газовых структур в галактиках. Газодинамические величины определяются на основе трехмерного алгоритма с использованием так называемых “сглаженных частиц” (SPH). Представлены тестовые расчеты:

моделирование образования газовых колец вокруг сфероидальных галактик как результат поглощения маломассивного спутника, богатого газом, и приливных хвостов при взаимодействии галактик сравнимых масс. Представленные программы оказались универсальными и могут быть использованы для расчета газодинамических течений на других, отличных от галактических. В качестве примера приведены результаты моделирования СВ (circumbinary) дисков вокруг молодых двойных систем.

**Раздел 1.2** посвящен методике  $N$ -body моделирования. В §1.2.1 проанализирован критерий выбора параметра сглаживания потенциала  $\epsilon$  и шага интегрирования  $dt$  в  $N$ -body экспериментах при моделировании бесстолкновительной звездной системы. Величина  $\epsilon$  не может быть произвольной и слишком большой, поскольку, с одной стороны, это приводит к значительному искажению потенциала, а с другой — ставит сильные ограничения на пространственное разрешение структурных особенностей системы. Рассматривается зависимость временных изменений функции распределения изначально равновесной устойчивой модели от выбранных  $\epsilon$  и  $dt$  (в качестве моделей используются сферы Пламмера и Хернквиста). Исходя из этой зависимости, выводится критерий выбора  $\epsilon$  и  $dt$ . Данный критерий сравнивается с критерием выбора параметра сглаживания по Мериту [1], основанным на минимизации средней иррегулярной силы, действующей на частицу единичной массы. Наш критерий выбора  $\epsilon$  и  $dt$  может быть сформулирован следующим образом: значение  $\epsilon$  необходимо выбирать в 1.5 — 2 раза меньше, чем среднее расстояние между частицами в наиболее плотных областях, которые предполагается разрешать. При этом для корректного моделирования динамики системы шаг интегрирования должен быть обязательно подстроен под выбранное значение  $\epsilon$  (в среднем за один шаг частица должна проходить расстояние меньше, чем  $0.5\epsilon$ ).

В §1.2.2 пересмотрена методика моделирования дисковых галактик и предложен новый итерационный метод построения равновесных  $N$ -body моделей многокомпонентных галактик с заданным распределением плотности и нало-

женными кинематическими ограничениями самого разного рода. Метод основан на управляемой подстройке модели под равновесное решение с заданными параметрами или ограничениями. Его основная идея состоит в следующем. На первом этапе модель строится тем или иным приближенным методом. Далее модели дается возможность самостоятельно подстроиться под равновесное состояние, но при этом “придерживается” распределение плотности и, если надо, фиксируются требуемые параметры распределения по скоростям. Описаны основная концепция метода, различные рецепты его применения, приведены примеры его использования для построения равновесных сферически-симметричных, трехосных, анизотропных и многокомпонентных систем. Приложения метода включают не только создание начальных условий для моделирования эволюции  $N$ -body систем, но и построение моделей реальных галактик по их фотометрическим и кинематическим данным, в частности по кинематике вдоль луча зрения. В **разделе 1.3** приводятся выводы к первой главе.

Результаты Главы 1 опубликованы в статьях [1, 11, 13, 14, 16–18, 21–23, 27].

В **Главе 2** рассмотрена задача построения фазовой модели галактики по ограниченному наблюдательным данным, включающим поверхностную фотометрию и щелевую спектроскопию, а также демонстрируются возможности нашего итерационного метода для построения моделей анизотропных темных гало с различными профилями анизотропии.

**Раздел 2.1** посвящен изучению близкой изолированной дисковой галактики раннего типа NGC 7217 с кольцом звездообразования, наблюдаемой почти плашмя. Для этой галактики до сих пор не было согласия о структуре и происхождении ее подсистем. Была проанализирована внутренняя кинематика и свойства звездных населений этой галактики. Для анализа использовались спектральные данные в диапазоне длин волн  $4800 < \lambda < 5500 \text{ \AA}$ , полученные на 6-м телескопе БТА Специальной астрофизической обсерватории РАН. Указанный диапазон содержит множество абсорбционных линий, что дает информацию о звездной кинематике и составе звездного населения галактики. Кроме того, ту-

да попадает несколько эмиссионных линий,  $H\beta$ ,  $[OIII]$  и  $[NI]$ , что позволяли извлечь информацию о кинематике ионизованного газа, отношении интенсивностей линий и провести диагностику механизмов возбуждения ионизованного газа. Параметры внутренней кинематики и звездных населений NGC 7217 были получены путем моделирования полученного спектра методом NBURSTS [2], в котором используется сетка моделей звездных населений высокого разрешения (SSP) PEGASE.HR [3]. В итоге, сделан вывод, что профили возрастов и металличности NGC 7217 показывают три выделенных подсистемы, которые хорошо соответствуют тем, что проявляются при анализе структуры галактики согласно работе [4]: старый, богатый металлами балдж, доминирующий в области 0.4–1.2 кпк, внутренний диск в области 1.6–4 кпк со звездным населением среднего возраста — 5 млрд. лет и практически солнечной металличностью, и внешний, бедный металлами и относительно молодой диск ( $t = 2-3$  млрд. лет), проявляющийся после 4.8 кпк. Кинематические данные были использованы для восстановления эллипсоида скоростей и реконструкции радиальных профилей дисперсии скоростей звезд в трех направлениях ( $R$ ,  $\varphi$  и  $z$ ) в той области, где доминируют два экспоненциальных компонента (рис. 1). Из поведения профиля  $\sigma_z$  на рис. 1 видно, что динамически холодной подсистемой NGC 7217 является внутренний экспоненциальный компонент. Был также реконструирован

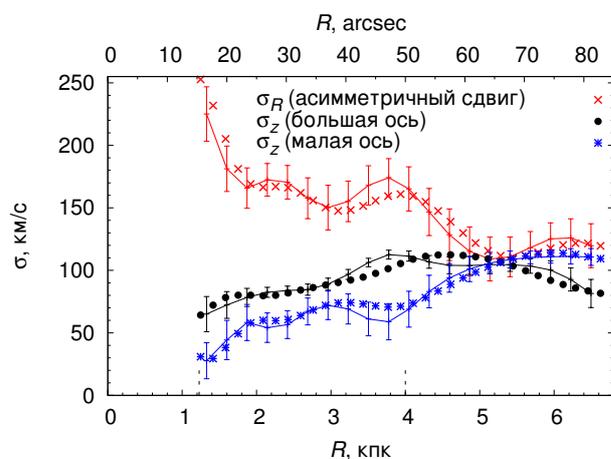


Рис. 1. Радиальные профили дисперсий скоростей  $\sigma_R$  и  $\sigma_z$ , реконструированные по данным вдоль большой и малой осей.

радиальный профиль толщины звездного диска через профиль  $\sigma_z$ . Равновесные уравнения Джинса были использованы для кинематических данных вдоль

большой и малой осей, что дало два независимых результата. В итоге, была восстановлена 3D модель галактики и сделан вывод, что внутренний диск довольно тонкий ( $z_0$  меняется от 0.2 до 0.7 кпк), в то время как внешний диск сильно расширяется наружу, и его полутолщина достигает 2.5 кпк в области внешнего кольца звездообразования. Данные по восстановленному профилю дисперсии скоростей  $\sigma_R$  для звезд были использованы для оценки устойчивости газового диска в рамках двухжидкостного подхода для определения критического значения поверхностной плотности газа [5, 6]  $\Sigma_{\text{cr},2} = \alpha \frac{\varkappa c}{3.36 G g(a, b)}$ , где  $a$  — отношение дисперсии скоростей звезд  $\sigma_R$  к скорости звука  $c$  в газе,  $\varkappa$  — эпизическая частота,  $b$  — отношение поверхностных плотностей звезд и газа, а  $g(a, b)$  — функция, полученная численно в работе [6]. Такой подход приводит к оценке критической плотности, по крайней мере, в три раза ниже той, что дана в работе [7]. Тем не менее, даже в этом случае поверхностная плотность газа в кольце ниже критической, хотя близка к ней (рис. 2). Таким образом, газ на внешнем кольце, даже в наиболее плотных областях ( $R = 6$  кпк), должен быть маргинально устойчивым, что не объясняет текущего там звездообразования.

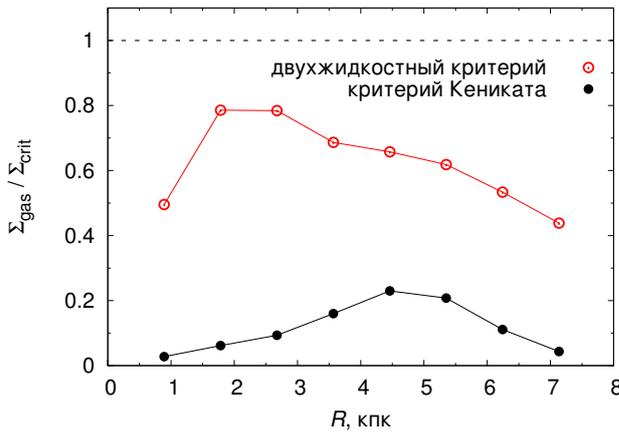


Рис. 2. Радиальный профиль отношения наблюдаемой поверхностной плотности газа к критической согласно одножидкостному критерию Кениката [8, 9] и критерию двухжидкостной неустойчивости. Штриховая линия указывает порог звездообразования.

В разделе 2.2 приводятся результаты использования итерационного метода (см. §1.2.2) для построения фазовых моделей ( $N$ -body моделей) анизотропных сферически-симметричных темных гало с заданным профилем анизотропии скоростей, которые могут использоваться во многих динамических задачах, где темное гало нужно описывать самосогласованным способом. Простые алго-

ритмы, использующие аналитические функции распределения DF, ограничены моделями специального класса, например, моделями типа Осипкова–Мерита [10–12] (модели ОМ). В **разделе 2.2** класс равновесных анизотропных моделей с заранее фиксированными свойствами существенно расширен. Построены модели, близкие к однородным (анизотропные сферы Пламмера), и с пиками плотности в центре (анизотропные сферы Хернквиста). Для моделей Пламмера, с профилем анизотропии, отличным от моделей ОМ, получены решения, неустойчивые относительно неустойчивости радиальных орбит. Для данного распределения плотности это дает возможность провести границу по реализуемой в действительности степени анизотропии. Вопрос об устойчивости анизотропных моделей является особенно актуальным применительно к моделям темного гало с распределением плотности, соответствующим космологическим темным гало (модель Наварро–Френка–Вайта, NFW [13, 14] и модель Мура и др., M99 [15]). Был построен ряд таких темных гало с профилем анизотропии, взятом из космологических расчетов. Эти фазовые модели могут служить непосредственными входными данными для исследования динамики таких систем в  $N$ -body расчетах. В **разделе 2.3** приводятся выводы ко второй главе.

Результаты Главы 2 опубликованы в статьях [15, 24].

**Глава 3** посвящена исследованию связи между параметрами темного гало и околополярными кольцами, а также другими приливными структурами. В **разделе 3.1** рассмотрены наблюдательные данные, касающиеся галактик с полярными кольцами и околополярными звездными петлями. В **§3.1.1** представлен анализ структурных особенностей галактик с оптическими полярными кольцами. Обнаружена четкая дихотомия для объектов этого класса. S0 галактики с большими балджами имеют только короткие узкие кольца, а галактики, в структуре которых доминирует диск, всегда показывают протяженные и широкие полярные кольца. С использованием газодинамических программ (см. раздел 1.1) был впервые численно реализован аккреционный сценарий формирования полярного кольца у S0 галактики. Это позволило объяснить наблюда-

емую дихотомию свойств галактик с полярными кольцами. Продемонстрировано, что аккреция вещества из галактики, богатой газом, является эффективным механизмом формирования полярных колец, в которые захватывается до 10% всего газа галактики-донора. Найдено, что пространственные размеры формирующихся колец определяются (при прочих равных условиях) распределением вещества в аккрецирующей галактике и тем самым выявлена зависимость размера образующегося кольца от степени компактности потенциала  $S_0$  галактики (рис. 3), что хорошо согласуется с наблюдательными данными. Показано, что существование очень протяженных полярных колец можно объяснить только наличием у галактик массивных темных гало. Сделаны оценки времени формирования кольца: примерно  $(7 - 9) \times 10^8$  лет для галактик без темного гало и несколько млрд. лет для галактик с массивными темными гало.

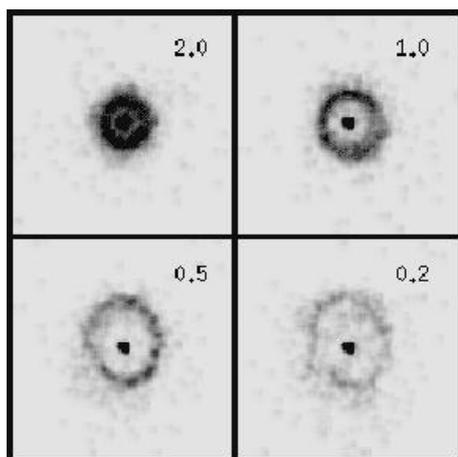


Рис. 3. Вид полярного кольца на момент времени  $t = 10$  после прохождения перицентра для четырех экспериментов. В верхнем правом углу — отношение массы балджа к массе диска. Размер каждого изображения  $30 \text{ кпк} \times 30 \text{ кпк}$ .

В §3.1.2 построены  $N$ -body модели взаимодействующих систем NGC 5907 и UGC 7388 и промоделировано образование околополярных звездных структур у этих галактик. У галактики NGC 5907 — спиральной галактики позднего типа (Sc), видимой под очень большим углом к лучу зрения (“с ребра”), — имеется слабая кольцеобразная деталь ( $\mu_R \sim 27 - 28^m / \square''$ ) [16]. Форма этой детали близка к эллипсу, вытянутому вдоль малой оси галактики так, что кольцо оказывается в околополярной плоскости галактики. При этом ядро галактики попадает примерно в фокус этого эллипса. По современным представлениям такие особенности ее оптической структуры, по всей видимости, свидетельствуют о происходя-

щем до настоящего времени взаимодействию с маломассивным спутником. Для проверки предположения о формировании крупномасштабного околополярного звездного кольца при аккреции на NGC 5907 карликовой галактики была предпринята серия численных экспериментов по моделированию разрушения карликового спутника, движущегося в полярной плоскости массивной галактики. Сравнение морфологии кольца в построенной модели с наблюдательными данными позволило получить ограничение на массу темного гало основной галактики в пределах размера самого кольца —  $\mathcal{M}_h(r < 52) \text{ кпк} / \mathcal{M}_{\text{gal}} \approx 3 - 4$ . Даны ограничения на время существования кольца ( $\leq 1.5$  млрд. лет после первого сближения галактик) и на структуру спутника — предшественника кольца. Для UGC 7388 — галактики позднего типа, видимой с ребра, — данные фотометрических наблюдений в голубой области спектра основного тела галактики и кривая вращения, полученная из спектральных наблюдений нейтрального водорода, использованы для построения динамической модели галактики. Диск этой галактики окружен двумя слабыми вытянутыми петлеобразными структурами с поверхностной яркостью в полосе  $B - \mu_B \sim 24^m / \square''$  и  $\mu_B \sim 25^m / \square''$ , соответственно. Присутствие второй детали, развернутой в проекции почти ортогонально по отношению к яркой петле, говорит о происхождении пекулярной структуры UGC 7388 в результате аккреции и приливного разрушения маломассивного спутника, остатки которого продолжают двигаться по розеткообразной орбите. Из анализа кривой вращения галактики UGC 7388 оценены вклады диска и темного гало для правдоподобных значений отношения массы к светимости и NFW модели темного гало. Определен диапазон значений параметров двух подсистем (диска и гало), которые описывают наблюдаемую кривую вращения. Построена двухкомпонентная равновесная  $N$ -body модель галактики. Из оценок суммарной светимости звездных петель были сделаны ограничения на массу разрушившегося спутника и построена его модель. Из анализа размеров петель и их геометрии были найдены ограничения на параметры пролета спутника. Варьирование параметров в пределах найденных ограничений позволило

провести численное моделирование разрушения спутника в гравитационном поле массивной галактики и выбрать на сетке моделей ту, которая наилучшим образом воспроизводит морфологию звездных петель. Главным итогом проведенных расчетов стало уточнение параметров темного гало (предварительно полученных из кривой вращения) на основе анализа морфологии протяженных звездных петель. Полученная в пределах четырех экспоненциальных масштабов диска масса темного гало составляет 1.28 масс диска.

В разделе 3.2 приводятся результаты спектральных наблюдений и моделирования кинематики хвоста главного компонента взаимодействующей галактики NGC 4676, а также исследование основных геометрических характеристик приливных хвостов у нескольких сотен близких и далеких взаимодействующих галактик. В §3.2.1 проведено детальное наблюдательное и теоретическое исследование взаимодействующей системы NGC 4676 (Мышки). По результатам оригинальных фотометрических и спектральных наблюдений определены основные структурные характеристики главной Мышки — NGC 4676A. Галактика характеризуется отсутствием четко выраженного балджа, наличием областей интенсивного звездообразования в околядерной области, необычно сильным градиентом показателей цвета от центра к периферии ( $0^m05 - 0^m10/\text{кпк}$ ) и пекулярным полем скоростей. Все эти особенности, по-видимому, обусловлены условиями видимости галактики (она наблюдается почти “с ребра”) и сильным гравитационным взаимодействием с NGC 4676B. По эмиссионным линиям  $\text{H}\alpha$  и  $[\text{NII}]\lambda 6583$  построена кривая лучевых скоростей излучающего газа вдоль разреза, проходящего через хвост главной Мышки. Скорости в приливном хвосте прослежены до расстояния  $\sim 95''$  (40.5 кпк) от ядра галактики. Из анализа кривой лучевых скоростей следует, что систематическая скорость хвоста по отношению к ядру галактики очень велика ( $\sim 300$  км/с). Разброс скоростей в приливном хвосте также очень велик. Особый акцент в исследовании сделан на изучении приливного хвоста. Посредством численного газодинамического моделирования (см. §1.1) показано, что кинематика хвоста несовместима

с классической моделью Мышек [17, 18] (модели ТТ и МБР), воспроизводящей только морфологические особенности объекта, а не кинематику. Сделан вывод, что кинематике хвоста лучше соответствуют следующие условия наблюдения системы: более предпочтительным является взгляд на систему из точки, повернутой примерно на  $90^\circ$  по сравнению с положением наблюдателя в классическом варианте ТТ и МБР. Большие значения лучевой скорости в хвосте объясняются наличием у галактик массивных темных гало. По спектральным наблюдениям в приливном хвосте главной Мышки выделены упорядоченно расположенные  $H\alpha$ -конденсации, являющиеся, по-видимому, гигантскими комплексами HII. Сделана нижняя оценка скорости текущего звездообразования —  $10^{-9} M_\odot/\text{год}/\text{пк}^2$ , которая сравнима со скоростью звездообразования в дисках нормальных галактик. На основе аналитических оценок и данных численных расчетов показано, что основной механизм звездообразования в приливном хвосте Мышки — крупномасштабная гравитационная неустойчивость в газе хвоста. Массы выделяемых в результате неустойчивости конденсаций и длина волны неустойчивых возмущений оказываются совместимыми с данными об оптических светимостях наблюдаемых областей HII и об их расположении.

В §3.2.2 приведены результаты анализа геометрических характеристик приливных хвостов близких и далеких взаимодействующих галактик. Выборка близких объектов включает более двухсот галактик, а далеких — около семисот. Далекие галактики были отобраны в нескольких глубоких полях Космического телескопа Хаббл (HDF-N, HDF-S, HUDF, GOODS, GEMS), и они находятся на среднем красном смещении  $\langle z \rangle = 0.65$ . Проанализированы распределения длин и толщин приливных образований и показано, что хвосты у далеких галактик выглядят короче, чем у близких. Отчасти этот эффект может быть связан с эффектами селекции, но, с другой стороны, он, возможно, является следствием общей эволюции размеров спиральных галактик с  $z$ . Показано, что положение взаимодействующих галактик на плоскости светимость галактики ( $L$ ) — длина приливного хвоста ( $l$ ) объясняется простой геометрической моделью, причем

верхняя огибающая наблюдаемого распределения имеет вид  $l \propto \sqrt{L}$ . В предположении, что приливные хвосты являются дугами окружностей, видимых под произвольными углами к лучу зрения, решена задача о связи наблюдаемого распределения сжатий хвостов с их длиной в угловой мере. Сделан вывод, что угловая длина приливных хвостов, визуально выделяемых у близких и далеких галактик, в среднем, превышает  $180^\circ$ .

**Раздел 3.3** посвящен исследованию слияния галактик сравнимых масс (major merger) и поглощению галактикой маломассивного спутника (minor merger). В §3.3.1 проанализировано положение взаимодействующих E/S0 галактик на фундаментальной плоскости (ФП). Проведено  $N$ -body моделирование близких столкновений и слияний двух сферических галактик. Были использованы две модели — сфера Пламмера и сфера Хернквиста. Проанализированы изменения центральной плотности, радиуса половинной массы и центральной дисперсии скоростей. Найдено, что близкие столкновения заметно изменяют эти параметры за короткий промежуток времени ( $10^7 - 10^8$  лет) после полного слияния галактик. Амплитуда изменения параметров сильно зависит от исходной концентрации вещества в начальной модели. В некоторых экспериментах рассматривались столкновение двух сферических галактик, включающих темное гало. В этом случае изменения параметров было менее выраженным, чем для экспериментов без темного гало. Проведенные численные эксперименты и анализ наблюдательных данных показали, что глобальные параметры галактик ранних типов устойчивы к сильным гравитационным возмущениям, которые практически не сдвигают параметры остатков слияния на Фундаментальной плоскости. Сделан вывод, что ФП остается по-прежнему хорошим методом определения расстояния, даже до скоплений, содержащих большое число взаимодействующих галактик.

В §3.3.2 исследован объект Malin 1 — уникальная галактика, необычайно низкой поверхностной яркости (LSB). Структура и происхождение галактики практически не изучены. Это связано с отсутствием детальных наблюда-

тельных данных, особенно данных спектроскопии высокого разрешения. Представлены результаты спектральных наблюдений галактики Malin 1. На основе изучения звездной кинематики внутренней части ( $r \leq 15$  кпк) Malin 1 приведены спектроскопические аргументы в пользу наличия у галактики небольшого спутника — Malin 1B, взаимодействующего с главной галактикой. Этот объект хорошо виден на многих опубликованных изображениях Malin 1, но не упоминается ни в каких астрономических базах данных. Malin 1B находится на проекционном расстоянии 14 кпк от ядра Malin 1 и имеет небольшую относительную скорость —  $65 \pm 16$  км/с, значение которой определено впервые. В настоящее время Malin 1 находится в процессе слияния с Malin 1B. Взаимодействие с Malin 1B может объяснить основные морфологические особенности центральной области Malin 1 — внутреннюю двухрукавную спиральную структуру, бар и внешний однорукавный спиральный узор. Исследовано крупномасштабное окружение Malin 1. Malin 1 находится в области относительно низкой плотности галактик, что типично LSB галактик. В ее окрестности обнаружена галактика SDSS J123708.91+142253.2. На основе простой кинематической модели показано, что эта галактика может быть ответственна за формирование протяженной оболочки низкой поверхностной яркости при лобовом столкновении с Malin 1 (в рамках сценария, предложенного в работе [19]).

В §3.3.3 спектральные наблюдения галактики NGC 7217 и сделанные на основе динамических аргументов выводы о структуре подсистем этой галактики (см. §2.1.2) были использованы для выводов о происхождении этих подсистем. Проведен анализ отношения интенсивностей линий в остатках от вычитания смоделированного спектра из наблюдаемого. Это позволило исключить околоядерную активность как механизм возбуждения околоядерного газа и сделать вывод, что пекулярная кинематика ионизованного газа в центральной области NGC 7217 связана с присутствием внутреннего полярного диска. Наблюдательные данные сравнивались с результатами численного моделирования слияний галактик с газом из базы GalMer. В результате наблюдаемая структура и кинематика

матика NGC 7217 была объяснена двумя событиями взаимодействия галактики со спутниками на разных начальных орбитах. Столкновение со спутником на ретроградной орбите приводит к появлению внутреннего полярного кольца, в то время как внешнее кольцо звездообразования и утолщение внешнего диска (см. §2.1.2) объясняются слиянием со спутником на прямой орбите. В **разделе 3.4** приводятся выводы к третьей главе.

Результаты Главы 3 опубликованы в статьях [2–8, 20, 24, 25, 30].

**Глава 4** посвящена изучению вертикальной структуры звездных дисков, механизмам, влияющим на разогрев дисков в вертикальном направлении, и масштабным соотношениям, включающим вертикальный масштаб распределения вещества. В **разделе 4.1** исследуются нелинейные стадии развития изгибной неустойчивости и ее роль в вековом росте дисперсии скоростей звезд в вертикальном направлении. В §4.1.1 представлены результаты исследования нелинейных стадий развития изгибной неустойчивости в звездных дисках с экспоненциальным профилем плотности вдоль  $R$ . В обширной серии численных  $N$ -body экспериментов с большим пространственным разрешением удалось детально просканировать пространство ключевых параметров ( $z_0$  — начальная толщина диска,  $Q_T$  — параметр Тумре,  $M_h/M_d$  — отношение массы темного гало к массе диска). Найдено, что неустойчивые моды носят глобальный характер, т.е. масштаб неустойчивых возмущений оказывается больше характерного масштаба изменения плотности в диске. Это говорит о том, процесс развития изгибной неустойчивости в неоднородных дисках будет протекать по-разному в разных частях галактики. Наш вывод согласуется с выводами работы [20]. Характерные времена насыщения неустойчивости порядка миллиарда лет, т.е. этот процесс более медленный, чем, скажем, нагрев при рассеяниях на неоднородностях в распределении вещества в диске. Выявлены различные механизмы нагрева диска в  $z$ -направлении. Подтверждено существование эффекта изгибной неустойчивости баров, впервые обнаруженного в работе [21]. Для большой серии моделей показано, что изгиб бара является неизбежной стадией его эво-

люции.

В §4.1.2 условия насыщения изгибных мод в неоднородных тонких звездных дисках, которые следуют из анализа дисперсионного уравнения, сопоставляются с теми, что получены на основе результатов  $N$ -body экспериментов. Подчеркивается, что в центральных областях неоднородных дисков запас прочности диска относительно развития изгибной неустойчивости меньше, чем для однородного слоя. Отмечается стабилизирующее влияние сфероидальной подсистемы (темное гало, балдж), которое, как оказывается, зависит не только от полной массы сферического компонента, но и от степени концентрации вещества к центру. Делается вывод о том, что для подавления изгибных возмущений, способствующих увеличению толщины диска, достаточным может оказаться наличие в спиральных галактиках очень компактного (не обязательно массивного) балджа. Данный вывод подтверждается результатами проведенных  $N$ -body экспериментов, в которых моделировалась эволюция почти равновесных, но неустойчивых неоднородных звездных дисков конечной толщины в присутствии сфероидальных компонент. Получено, что при одной и той же суммарной массе сферической составляющей (темное гало + балдж) конечная толщина диска оказывается существенно меньше в экспериментах, где присутствует концентрированный балдж. На рис. 4 показаны пять изображений, соответствующие поздним стадиям эволюции модельных дисков. Отношение полной массы сферического компонента к массе диска в пределах радиуса  $4h$  одинаково для всех моделей и равно  $\mu = 0.5$ , но масса сферического компонента по-разному распределена между балджем и темным гало. Когда вся масса сферического компонента принадлежит очень компактному балджу, галактика, даже на поздних стадиях эволюции, остается очень тонкой. Это означает, что диски галактик с компактными балджами могут быть столь же тонкими, как и диски, погруженные в массивное темное гало.

В §4.1.3 показано, что во многих  $N$ -body экспериментах по моделированию изолированных дисковых галактик конечной толщины присутствует чис-

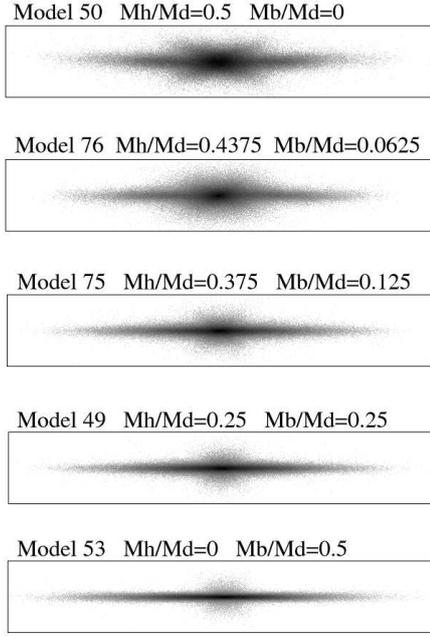


Рис. 4. Вид галактики с ребра на момент времени  $t = 3$  млрд. лет с начала эволюции. Масштаб рамки по горизонтали 60 кпк, по вертикали — 10 кпк. Относительная масса гало и балджа указана вверху каждой рамки.

ленный вертикальный нагрев, который медленно увеличивает вертикальную дисперсию скоростей и толщину звездных дисков. Даже для моделей с числом частиц  $N > 10^6$  в диске, этот нагрев может быть значительным и создавать иллюзию действия некоего физического механизма. Этот эффект похож на тот, что выявлен в численных экспериментах [22]. Так, например, медленный вертикальный нагрев в моделях с массивным темным гало является во многом численным эффектом, и при использовании достаточно большого числа частиц эффективность нагрева за счет этого механизма резко падает даже в присутствии “живого” гало. Показано, что в экспериментах с числом частиц, демфирующих указанный эффект, в отсутствие ящико-/арахисо-подобных структур изгибная неустойчивость нагревает звездный диск до значения отношения вертикальной дисперсии скоростей к радиальной  $\sigma_z/\sigma_R \approx 0.3$ , которое предсказывается линейной теорией. В присутствии ящико-/арахисо-подобных структур последнее утверждение верно для областей за пределами этих структур (в случае моделей с баром — вне бара). Обращается внимание на то, что изгибная неустойчивость в численных экспериментах развивается и затухает достаточно быстро. Ее основная роль заключается в том, что она определяет минимальное значение отношения  $\sigma_z/\sigma_R \approx 0.3$  (косвенно это минимальная относительная

толщина диска) для дисков реальных галактик, а не степень их динамического разогрева в вертикальном направлении. При этом есть свидетельства того, что существуют галактики, маргинально устойчивые к росту изгибных возмущений с отношением  $\sigma_z/\sigma_R \approx 0.3$ .

В разделе 4.2 приводятся результаты теоретического исследования связи толщины звездных дисков с параметрами темного гало галактики и наблюдаемые проявления этой связи. В §4.2.1 анализируется получаемая на основе теоретических соображений зависимость между минимально возможной для устойчивого звездного диска его относительной толщиной  $z_0/h$  ( $z_0$  и  $h$  — вертикальный и радиальный масштаб распределения вещества в диске, соответственно) и относительной массой сфероидального компонента, включающего темное гало. Оценен коэффициент в этой зависимости и записано соответствующее теоретическое соотношение. Указанное теоретическое соотношение можно использовать для получения по наблюдаемой толщине реальных спиральных галактик оценки снизу на массу темного гало. Зависимость была подтверждена результатами численных  $N$ -body экспериментов, моделирующих динамическую эволюцию тонких дисков в присутствии сфероидальных составляющих с разным распределением плотности и разной массой. Оказалось, что теоретическая зависимость является нижней огибающей для модельных данных. Точки, лежащие на нижней огибающей, соответствуют моделям с компактными балджами или очень массивным гало. Сама же модельная зависимость имеет большой разброс. Относительная толщина диска может быть разной в зависимости от того, как масса сфероидального компонента распределена между балджем и гало и насколько компактен балдж. Неоднозначность связи между толщиной галактики и массой сфероидального компонента с разным распределением плотности в численных экспериментах осложняет оценку массы темного гало по относительной толщине звездного диска  $z_0/h$  для реальных галактик. Для нижней оценки массы темного гало по относительной толщине реальных галактик можно использовать теоретическое соотношение, совпадающее с нижней

огибающей численной зависимости. Однако даже для самых тонких галактик оно дает очень слабое ограничение на массу темного компонента (масса темного гало в пределах четырех экспоненциальных масштабах диска должна быть больше примерно одной массы диска).

В §4.2.2 представлены два больших списка галактик, видимых с ребра. Один — является выборкой на основе обзора 2MASS в трех полосах (MSR10). Это самый большой список видимых с ребра галактик в ИК диапазоне. Другой — представляет собой каталог на основе SDSS — EGIS (Edge-on Galaxies In SDSS) — самый большой каталог таких объектов. Для галактик из MSR10 выборки в ИК диапазоне поглощение пыли значительно меньше, чем в оптике, что дает возможность более надежно определять параметры компонентов галактики. Окончательный вариант сформированной выборки содержит 175 галактик в  $K_s$  фильтре, 169 галактик в фильтре  $H$  и 165 галактик в фильтре  $J$ . Была проведена 2D декомпозиция галактик из выборки в трех полосах  $J$ ,  $H$  и  $K_s$ . Получены и проанализированы статистически основные параметры диска и балджа галактик разных морфологических типов — от ранних до поздних. Упор сделан на изучении параметров диска: видимой центральной поверхностной яркости диска  $\mu_{0,d}$ , радиальном  $h$  и вертикальном  $z_0$  масштабах. Для исследования кинематических и динамических свойств галактик выборки была добавлена информация о максимальной скорости вращения каждой галактики из базы данных LEDA. Количество видимых с ребра галактик, вошедших в каталог EGIS на основе SDSS, составило 5747 объектов, из которых 4768 являются регулярными галактиками без видимых особенностей в структуре, а остальные содержат сильную пылевую полосу). Отдельно создана выборка из 1865 объектов (в это число так же входят галактики с сильной пылевой полосой) с особенностями структуры. В каталоге представлены галактики всех морфологических типов и присутствует большая доля галактик ранних и промежуточных типов. Для всех галактик каталога сделана 1D декомпозиция по фотометрическим разрезам, параллельным большой и малой осям галактики.

Определены параметры диска —  $\mu_{0,d}$ ,  $h$  и  $z_0$ . Центральные области исключались из рассмотрения. Затем модель диска вычиталась из изображения и оценивался вклад балджа в общую светимость, т.е. определялось отношение  $B/T$  или  $B/D$ . SDSS изображенияотягчены влиянием пыли. Чтобы минимизировать это влияние, делалась 3D декомпозиция, включающая простое описание поглощения тонким слоем пыли. Как выяснилось позже, поскольку и в 1D, и в 3D декомпозиции параметры балджа не определялись одновременно с параметрами диска, как это делается в 2D декомпозиции, параметры диска оказались смещенными. Недооценивался радиальный масштаб  $h$ , переоценивалась вертикальная шкала  $z_0$ , как следствие, переоценивался вклад диска. В смещении параметров была систематика: вертикальный масштаб больше всего переоценивался для галактик с большим истинным вкладом балджа. Из-за этой систематики оказалось невозможным использовать параметры диска и, в первую очередь, относительную толщину для поиска различных корреляций. Для этой задачи была выполнена 2D декомпозиция ряда галактик каталога EGIS.

В §4.2.3 изучается ряд корреляций между относительной толщиной дисков и другими структурными параметрами галактик, в частности, относительной массой темного вещества. В результате удается внести ясность в некоторые спорные представления о вертикальной структуре дисков. В работах [23, 24] было обнаружено, что отношение  $h/z_0$  коррелирует с отношением динамической массы к светимости диска, если понимать под динамической массой полную массу, заключенную внутри сферы радиуса, равного четырем радиальным масштабам диска и оцениваемую по скорости вращения. Полная масса включает в себя массу диска  $M_d$ , темного гало  $M_h$  и балджа  $M_b$ . Таким образом отношение динамической массы к светимости диска определяет относительную массу сферического компонента или относительную массу темного гало для галактик без балджа. Найденная корреляция означает, что относительно тонкие диски в галактиках без балджа, как правило, погружены в более массивные темные гало. Указанная корреляция найдена из соображений, включающих условие рав-

новесия диска в вертикальном направлении и его устойчивость относительно возмущений в плоскости диска и изгибных возмущений. Для проверки аналитической корреляции в работе [23] для двух выборок видимых с ребра галактик позднего типа были использованы ширина линии  $\text{H}\alpha$   $W_{50}$  в качестве меры динамической массы и известные структурные параметры дисков в полосах  $R$  и  $K_s$ . Сделан вывод, что диски становятся тоньше с увеличением массовой доли темных гало. Для выборки MSR10, которая содержит очень много галактик с массивными балджами, мы провели такой же анализ. Целью было расширение результатов на весь диапазон морфологических типов галактик и проверка выводов, следующих из наших расчетов, о неоднозначности связи между относительной толщиной дисков и вкладом сферического компонента в полную массу, когда у галактики есть балдж (см. §4.2.1). Было взято отношение  $M_{\text{tot}}/M_{\text{d}}$ , чтобы продемонстрировать тенденцию диска к уплощению с возрастанием относительной массы сферической составляющей (рис. 5). Разброс точек на рис. 5 довольно большой. В §4.1.2 был сделан вывод, что присутствие компактного балджа бывает достаточно, чтобы подавить изгибную неустойчивость, которая ведет к утолщению диска. Обобщение этого результата было сделано в §4.2.1, где на основе большой серии численных экспериментов было показано, что у зависимости отношения  $h/z_0$  от  $(M_{\text{h}} + M_{\text{b}})/M_{\text{d}}$  существует четкий разброс, несмотря на одинаковую массу сферической составляющей по разному распределенной. Все это делает корреляцию между  $h/z_0$  и  $M_{\text{tot}}/M_{\text{d}}$  довольно неоднозначной. Этот результат сильно отличается от того, что представлено в работе [23]. В работе [25] было установлено, что для видимых с ребра

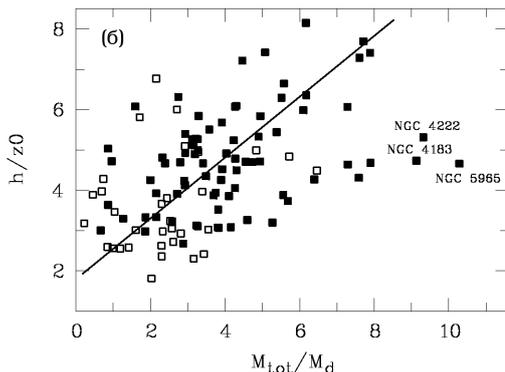


Рис. 5. Отношение  $h/z_0$  как функция  $M_{\text{tot}}/M_{\text{d}}$  для фильтра  $K_s$ . Незакрашенные квадраты — вся выборка, закрашенные квадраты — полная выборка.

галактик существует соотношение, связывающее относительную толщину  $z_0/h$  и центральную поверхностную яркость диска  $S_{0,d}$ , приведенную в положение “плашмя”: чем тоньше галактика, тем меньше центральная поверхностная яркость диска. На основе данных 2D декомпозиции для MSR10 выборки галактик, видимых с ребра, показано, что найденная корреляция является ложной (самокорреляцией) и возникает из-за применения формул редукции, переводящих наблюдаемую центральную поверхностную яркость  $\mu_{0,d}$  в депроецированную  $S_{0,d}$  с использованием отношения  $z_0/h$ . На искусственных выборках продемонстрировано, при каких условиях может возникать такая самокорреляция. В **разделе 4.3** приводятся выводы к четвертой главе.

Результаты Главы 4 опубликованы в статьях [9, 10, 12, 19, 28, 29, 31].

**В Заключении** перечислены основные результаты, вошедшие в диссертационную работу.

## Список публикаций

- [1] Sotnikova N. Y. Simulation of large-scale gas structures formed in the interaction between galaxies. I. Method and preliminary results // *Astrophysics*. 1996. Vol. 39. P. 141–152.
- [2] Reshetnikov V. P., Sotnikova N. Y. Global structure and formation of polar-ring galaxies. // *A&A*. 1997. Vol. 325. P. 933–942.
- [3] Sotnikova N. Y., Reshetnikov V. P. Tidal features as probes of dark matter in galaxies // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 1998. Vol. 62. P. 1754–1758.
- [4] Sotnikova N. Y., Reshetnikov V. P. Star formation in the NGC-4676 system (the Mice) // *Astronomy Letters*. 1998. Vol. 24. P. 73–83.
- [5] Reshetnikov V. P., Sotnikova N. Y. The Polar Stellar Ring and Dark Halo of NGC5907 // *Astronomy Letters*. 2000. Vol. 26. P. 277–284.

- [6] Reshetnikov V. P., Sotnikova N. Y. Tidal tails and galaxy evolution // *Astronomical and Astrophysical Transactions*. 2001. Vol. 20. P. 111–114.
- [7] Evstigneeva E. A., Reshetnikov V. P., Sotnikova N. Y. Numerical modeling of encounters between spherical galaxies // *Stellar Dynamics: From Classic to Modern*, Proc. of the intern. conf. Saint-Petersburg, 2000 / Ed. by L. P. Ossipkov, I. I. Nikiforov. Saint-Petersburg: Sobolev Astronomical Institute, 2001. P. 162–165.
- [8] Evstigneeva E. A., Reshetnikov V. P., Sotnikova N. Y. Effect of the environment on the fundamental plane of elliptical galaxies // *A&A*. 2002. Vol. 381. P. 6–12.
- [9] Sotnikova N. Y., Rodionov S. A. Mechanisms of the Vertical Secular Heating of a Stellar Disk // *Astronomy Letters*. 2003. Vol. 29. P. 321–335.
- [10] Sotnikova N. Y., Rodionov S. A. Bending Instability of Stellar Disks: The Stabilizing Effect of a Compact Bulge // *Astronomy Letters*. 2005. Vol. 31. P. 15–29.
- [11] Rodionov S. A., Sotnikova N. Y. Optimal Choice of the Softening Length and Time Step in N-body Simulations // *Astronomy Reports*. 2005. Vol. 49. P. 470–476.
- [12] Sotnikova N. Y., Rodionov S. A. Estimating the dark halo mass from the relative thickness of stellar disks // *Astronomy Letters*. 2006. Vol. 32. P. 649–660.
- [13] Rodionov S. A., Sotnikova N. Y. An iterative method for the construction of equilibrium N-body models for stellar disks // *Astronomy Reports*. 2006. Vol. 50. P. 983–1000.
- [14] Sotnikova N. Y., Grinin V. P. Hydrodynamic processes in young binaries as a source of cyclic variations in circumstellar extinction // *Astronomy Letters*. 2007. Vol. 33. P. 594–603.
- [15] Sotnikova N. Y., Rodionov S. A. Anisotropic models of dark halos // *Astronomy Letters*. 2008. Vol. 34. P. 664–674.
- [16] Rodionov S. A., Athanassoula E., Sotnikova N. Y. The construction of equilibrium phase models of stellar systems by the iterative method // *Astronomische Nachrichten*. 2008. Vol. 329. P. 896–899.

- [17] Rodionov S. A., Athanassoula E., Sotnikova N. Y. An iterative method for constructing equilibrium phase models of stellar systems // MNRAS. 2009. Vol. 392. P. 904–916.
- [18] Sotnikova N. Y., Rodionov S. A. An iterative method for constructing stellar systems models: how far does it work? // Highlights of Astronomy. 2010. Vol. 15. P. 203–203.
- [19] Mosenkov A. V., Sotnikova N. Y., P. R. V. 2MASS photometry of edge-on spiral galaxies - I. Sample and general results // MNRAS. 2010. Vol. 401. P. 559–576.
- [20] Reshetnikov V. P., Moiseev A. V., Sotnikova N. Y. Malin1: interacting galaxy pair? // MNRAS. 2010. Vol. 406. P. L90–L94.
- [21] Demidova T. V., Sotnikova N. Y., Grinin V. P. Bimodal brightness oscillations in models of young binary systems // Astronomy Letters. 2010. Vol. 36. P. 422–429.
- [22] Demidova T. V., Grinin V. P., Sotnikova N. Y. Brightness oscillations in models of young binary systems with low-mass secondary components // Astronomy Letters. 2010. Vol. 36. P. 498–505.
- [23] Grinin V. P., Demidova T. V., Sotnikova N. Y. Modulation of circumstellar extinction in a young binary system with a low-mass companion in a noncoplanar orbit // Astronomy Letters. 2010. Vol. 36. P. 808–815.
- [24] Silchenko O. K., Chilingarian I. V., Sotnikova N. Y., Afanasiev V. L. Large scale nested stellar discs in NGC 7217 // MNRAS. 2011. Vol. 414. P. 3645–3655.
- [25] Mohamed Y. H., Reshetnikov V. P., Sotnikova N. Y. On the characteristics of tidal structures of interacting galaxies // Astronomy Letters. 2011. Vol. 37. P. 670–678.
- [26] Sotnikova N. Y., Mosenkov A. V., Reshetnikov V. P. Bulges and discs of spiral galaxies: edge-on perspective // Astronomical and Astrophysical Transactions. 2012. Vol. 27. P. 145–156.
- [27] Demidova T. V., Grinin V. P., Sotnikova N. Y. Anisotropic illumination of a circumbinary disk in the presence of a low-mass companion // Astronomy

- Letters. 2013. Vol. 39. P. 26–37.
- [28] Rodionov S. A., Sotnikova N. Y. Bending instability in galactic discs: advocacy of the linear theory // MNRAS. 2013. Vol. 434. P. 2373–2379.
- [29] Bizyaev D. V., Kautsch S. J., Mosenkov A. V. et al. The Catalog of Edge-on Disk Galaxies from SDSS. I. The Catalog and the Structural Parameters of Stellar Disks // ApJ. 2014. Vol. 787. P. 24.
- [30] Sotnikova N. Y., Shapranov V. V. Tidal Stellar Loops and Dark Halo of UGC 7388 // Multi-Spin Galaxies, ASP Conference Series / Ed. by E. Iodice, E. M. Corsini. Vol. 486. 2014. P. 175–178.
- [31] Mosenkov A. V., Sotnikova N. Y., Reshetnikov V. P. Mirages in galaxy scaling relations // MNRAS. 2014. Vol. 441. P. 1066–1085.

## Цитированная литература

- [1] Merritt D. Optimal Smoothing for N-Body Codes // AJ. 1996. Vol. 111. P. 2462–2464.
- [2] Chilingarian I. V., Prugniel P., Sil’chenko O. K., Afanasiev V. L. Kinematics and stellar populations of the dwarf elliptical galaxy IC 3653 // MNRAS. 2007. Vol. 376. P. 1033–1046.
- [3] Le Borgne D., Rocca-Volmerange B., Prugniel P. et al. Evolutionary synthesis of galaxies at high spectral resolution with the code PEGASE-HR. Metallicity and age tracers // A&A. 2004. Vol. 425. P. 881–897.
- [4] Sil’chenko O. K., Afanasiev V. L. Decoupled nuclei and nuclear polar rings in regular spiral galaxies NGC 7217 // A&A. 2000. Vol. 364. P. 479–490.
- [5] Jog C. J., Solomon P. M. Two-fluid gravitational instabilities in a galactic disk // ApJ. 1984. Vol. 276. P. 114–126.
- [6] Efsthathiou G. A model of supernova feedback in galaxy formation // MNRAS. 2000. Vol. 317. P. 697–719.
- [7] Noordermeer E., van der Hulst J. M., Sancisi R. et al. The Westerbork HI

- survey of spiral and irregular galaxies. III. HI observations of early-type disk galaxies // *A&A*. 2005. Vol. 442. P. 137–157.
- [8] Toomre A. On the gravitational stability of a disk of stars // *ApJ*. 1964. Vol. 139. P. 1217–1238.
- [9] Kennicutt R. C., Jr. The star formation law in galactic disks // *ApJ*. 1989. Vol. 344. P. 685–703.
- [10] Osipkov L. P. Spherical systems of gravitating bodies with an ellipsoidal velocity distribution // *Soviet Astronomy Letters*. 1979. Vol. 5. P. 42–44.
- [11] Merritt D. Spherical stellar systems with spheroidal velocity distributions // *AJ*. 1985. Vol. 90. P. 1027–1037.
- [12] Merritt D. Distribution functions for spherical galaxies // *MNRAS*. 1985. Vol. 214. P. 25P–28P.
- [13] Navarro J. F., Frenk C. S., White S. D. M. The Structure of Cold Dark Matter Halos // *ApJ*. 1996. Vol. 462. P. 563–575.
- [14] Navarro J. F., Frenk C. S., White S. D. M. A Universal Density Profile from Hierarchical Clustering // *ApJ*. 1997. Vol. 490. P. 493–508.
- [15] Moore B., Quinn T., Governato F. et al. Cold collapse and the core catastrophe // *MNRAS*. 1999. Vol. 310. P. 1147–1152.
- [16] Shang Z., Zheng Z., Brinks E. et al. Ring Structure and Warp of NGC 5907: Interaction with Dwarf Galaxies // *ApJ*. 1998. Vol. 504. P. L23–L26.
- [17] Toomre A., Toomre J. Galactic Bridges and Tails // *ApJ*. 1972. Vol. 178. P. 623–666.
- [18] Mihos J. C., Bothun G. D., Richstone D. O. Modeling the Spatial Distribution of Star Formation in Interacting Disk Galaxies // *ApJ*. 1993. Vol. 418. P. 82–99.
- [19] Mapelli M., Moore B., Ripamonti E. et al. Are ring galaxies the ancestors of giant low surface brightness galaxies? // *MNRAS*. 2008. Vol. 383. P. 1223–1231.
- [20] Sellwood J. A. Axisymmetric Bending Oscillations of Stellar Disks // *ApJ*. 1996. Vol. 473. P. 733–745.
- [21] Raha N., Sellwood J. A., James R. A., Kahn F. D. A dynamical instability of

- bars in disk galaxies // Nature. 1991. Vol. 352. P. 411–412.
- [22] Sellwood J. A. Relaxation in N-body Simulations of Disk Galaxies // ApJ. 2013. Vol. 769. P. L24.
- [23] Zasov A. V., Bizyaev D. V., Makarov D. I., Tyurina N. V. Relationship between the Thickness of Stellar Disks and the Relative Mass of a DarkGalactic Halo // Astronomy Letters. 2002. Vol. 28. P. 527–535.
- [24] Kregel M., van der Kruit P. C., Freeman K. C. Structure and kinematics of edge-on galaxy discs - V. The dynamics of stellar discs // MNRAS. 2005. Vol. 358. P. 503–520.
- [25] Bizyaev D., Mitronova S. Photometric parameters of edge-on galaxies from 2MASS observations // A&A. 2002. Vol. 389. P. 795–801.