

На правах рукописи



Бутенко Мария Анатольевна

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ДИНАМИКИ ДИСКОВЫХ  
ГАЛАКТИК: ВЕРЕНИЦЫ И МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ  
СПИРАЛЕЙ

01.03.02 — Астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Волгоградский государственный университет» (ВолГУ), на кафедре информационных систем и компьютерного моделирования

Научный руководитель: **Хоперсков Александр Валентинович**  
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Сотникова Наталья Яковлевна**, д.ф.-м.н.,  
профессор кафедры небесной механики, ФГБОУ  
ВО СПбГУ, г. Санкт-Петербург.

**Мельник Анна Маратовна**, д.ф.-м.н.,  
ведущий научный сотрудник отдела изучения  
Галактики и переменных звезд ГАИШ МГУ,  
г. Москва.

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Южный федеральный  
университет», г. Ростов-на-Дону.

Защита состоится 4 декабря 2018 года в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 002.280.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте астрономии Российской академии наук по адресу: 119017, г. Москва, ул. Пятницкая, д. 48.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института астрономии РАН и на сайте <http://www.inasan.ru>

Автореферат разослан “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
Д 002.280.01, к.ф.-м.н.

Н.В. Чупина

## Общая характеристика работы

Диссертация посвящена исследованию некоторых морфологических и динамических особенностей спиральных структур в различных дисковых компонентах галактик. Получены новые характеристики спиральных узоров и изучены новые механизмы формирования спиральных структур, позволяющие лучше понять их физическую природу. Особое внимание уделяется так называемым «вереницам» [1] и спиральным ветвям на далекой периферии галактики за пределами оптического радиуса.

## Актуальность работы

Несмотря на примерно 70-летнюю историю научных исследований, направленных на изучение галактических спиральных структур на различных масштабах в дисковых галактиках, мы все еще далеки от сколько-нибудь полного понимания механизмов формирования и физических свойств этих образований [2, 3, 4]. Наблюдаемая картина обусловлена большим числом разнонаправленных факторов, к числу которых следует отнести многокомпонентность газовой составляющей и её химический состав, неопределенности в оценках темной массы и ее пространственного распределения, эффективность звездообразования и feedback, аккрецию газа и галактический ветер, сложную структуру магнитных полей, эффекты взаимодействия с окружением. В своем обзоре 2016 года один из основателей теории волн плотности Франк Шу обсуждает несколько до конца не решенных проблем [2]:

- Гипотеза о существовании квазистационарного спирального узора.
- Влияние галактических ударных волн на морфологию галактики, в том числе из-за развития газодинамических неустойчивостей. Формирование сложной системы мелкомасштабных особенностей в спиральном узоре (шпурь или отроги, оперения (feathers), ветвления и утолщения ветвей, квазипериодические комплексы вдоль рукавов).
- Необходимость согласования точных аналитических решений с результатами численного моделирования.
- Определение геометрии спиральной структуры в нашей Галактике.
- Выяснение роли резонансных явлений, связанных с наличием коротационного радиуса, Линдбладовских резонансов, ультрагармоник, механизма swing amplification для объяснения данных наблюдений в конкретных галактиках.

Некоторые из этих проблем обсуждаются в данной диссертации. На наличие выпрямленных сегментов спиральных рукавов (используют термины вереницы/rows, straight segments, полигональная структура) первым обратил внимание Б.А. Воронцов-Вельяминов еще в 60-е годы прошлого столетия [5]. Новый интерес к ним инициировали работы А.Д. Чернина с соавторами [6, 7, 8, 9, 10, 11], в которых эти структуры были связаны с неустойчивостью фронта галактической ударной волны (УВ).

Особо отметим данные наблюдений внешних областей галактик за пределами оптического радиуса  $R_{opt}$ , которые позволили обнаружить спиральные структуры по газу и молодым звездам (в частности, по УФ данным GALEX). Проблема выявления механизмов формирования таких внешних спиралей перекликается с отмеченной выше проблемой образования «верениц», поскольку у некоторых галактик по данным GALEX обнаружены также спрямленные сегменты у внешних спиралей. Отметим такие галактики, как NGC 1512, NGC 289, NGC 4151, NGC 4736 и др. Внешний газ за пределами  $R_{opt}$ , по-видимому, гравитационно устойчив, что требует исследования новых механизмов формирования глобальной спиральной структуры, не связанных с самогравитацией на больших масштабах. Таким механизмом может являться неосесимметрия (в общем случае триаксиальность) массивного темного гало. Поскольку имеется целый ряд указаний на отсутствие центральной симметрии у темного гало, то в диссертации изучена такая возможность.

В случае нашей Галактики положение усложняется тем, что мы находимся почти в плоскости диска, и до сих пор обсуждаются важнейшие характеристики звездно-газового диска [3], такие как расстояние до галактического центра, радиальная зависимость скорости вращения газа и звезд [12, 13, 14], плотности компонент и их радиальные профили. Несмотря на значительные усилия по определению пространственной структуры спирального узора в нашей системе [15, 3, 16, 17], имеются определенные разногласия между разными авторами (см. обсуждения в обзоре [2]).

## Цель и задачи диссертационной работы

Основной целью диссертационной работы является изучение наблюдаемых характеристик спиральных галактических структур и механизмов их формирования. Для достижения поставленной цели в диссертации решены следующие задачи:

1. Построены численные модели динамики дисковых компонент в галактиках и проведены серии вычислительных экспериментов с газовыми, звездными и звездно-газовыми моделями галактических дисков.
2. Построен новый каталог галактик с вереницами, расширяющий каталог

А.Д. Чернина и др. (2001). Проведен статистический анализ физических характеристик построенной выборки.

3. Методами численного моделирования показано, что образование верениц возможно в различных численных моделях, как чисто газовых, так и звездных и звездно-газовых. Определены условия формирования «верениц» и их характерные времена жизни.
4. Изучены зависимости свойств спирального узора от параметров модели газового диска в неосесимметричном потенциале гало, основываясь на лагранжевом методе интегрирования уравнений газодинамики Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH).
5. Проведен анализ возможности формирования внешних спиральных структур далеко за пределами оптического радиуса галактики в неосесимметричном потенциале темного гало и изучены характеристики таких спиральных узоров в построенных моделях.
6. Решена задача расчета собственных глобальных мод в неоднородном газовом диске с учетом самогравитации в линейном и нелинейном приближениях.
7. Получены оценки физических параметров Галактики с учетом новых данных наблюдений о плотности и кинематике мазеров.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Каталог галактик с «вереницами» (276 объектов), который с учетом объектов из каталога А.Д. Чернина и др. (2001) содержит все галактики с «вереницами», входящие в NGC и IC. Сравнительный анализ основных характеристик галактик с «вереницами» и всех  $S$ -галактик из NGC/IC не позволил обнаружить существенных различий в этих выборках.
2. Исследование условий образования систем «верениц» в численных газодинамических, звездных и звездно-газовых моделях галактических дисков. Вереницы в спиральном узоре в самосогласованных численных моделях имеют транзиентный характер, и относительное время их жизни сопоставимо с относительной частотой встречаемости галактик с «вереницами» по данным наблюдений.
3. Результаты изучения влияния параметров галактики в численных моделях на морфологию и динамику спиральных структур, формирующихся в газовом диске из-за действия неосесимметричного массивного

темного гало. Морфология газового узора существенно зависит от радиальных распределений плотности в диске и гало, кривой вращения диска, температуры газа и степени его неадиабатичности, параметра неосесимметрии гало.

4. Механизм формирования галактического спирального узора на периферии гравитационно устойчивого газового диска далеко за пределами оптического радиуса, который обусловлен триаксиальным характером распределения темного вещества в массивном гало. Получены зависимости морфологии таких внешних спиралей от параметров модели.
5. Расчеты глобальных собственных мод в радиально неоднородном галактическом диске в линейном и нелинейном приближениях показывают удовлетворительное согласие между линейным анализом для политропной модели и нелинейной моделью на основе полной системы уравнений газодинамики.

### **Научная новизна**

1. Создан новый каталог галактик с «вереницами», состоящий из 276 объектов. При объединении с объектами NGC каталога А.Д. Чернина и др. (2001), новый каталог включает в себя все галактики с полигональными структурами, принадлежащие NGC и IC.
2. Показано, что большинство объектов каталога являются галактиками с баром. Наличие центральной звездной перемычки является благоприятным фактором, влияющим на появление «верениц» в спиральной структуре галактики.
3. Гипотеза, предложенная в работе [10], что среди галактик с «вереницами» большая часть является взаимодействующими объектами, при рассмотрении объединенной выборки галактик с полигональными структурами не подтвердилась.
4. Исследованы механизмы образования «верениц» в численных газодинамических и бесстолкновительных моделях. Впервые показано, что полигональные структуры имеют транзиентный характер в самосогласованных моделях звездно-газовых дисков. Впервые получены оценки времени существования «верениц», согласующиеся с частотой встречаемости галактик с «вереницами».
5. Предложен и исследован новый механизм формирования наблюдаемых внешних спиральных узоров на периферии ряда галактик за пределами

оптического радиуса, обусловленный неосесимметричным характером распределения темного вещества в массивном гало. Анализ проведенных численных экспериментов показал эффективность такого механизма для формирования спиральной структуры в гравитационно устойчивом газе на далекой периферии диска.

6. Получены новые оценки параметров Галактики с учетом современных данных о кинематике мазеров на различных расстояниях от Солнца. Построены динамические модели звездных дисков на границе гравитационной устойчивости, используя метод  $N$ -тел, согласуя дисперсии скоростей в диске с наблюдаемыми значениями. Для таких моделей по результатам декомпозиции кривой вращения получены новые оценки параметров компонент.
7. Впервые показано согласие результатов линейного приближения и нелинейного численного моделирования при исследовании влияния гравитационной неустойчивости на радиальную структуру двухрукавной неустойчивой глобальной моды в неоднородном газовом диске.

### **Научная и практическая значимость**

1. Разработана методика обработки изображений галактик с «вереницами», а также методика обработки данных, полученных в процессе измерений. По единой методике проведен анализ всех объектов с «вереницами», входящих в NGC и IC. Составлен каталог из 276 объектов с полигональными структурами. Данная методика может быть использована в дальнейшем для расширения каталога галактик, содержащих такие особенности спиральной структуры.
2. Результаты проведенного моделирования звездно-газовых дисков указывают на транзиентный характер «верениц». Полученные оценки относительного времени существования этих структур в численных моделях с хорошей точностью совпадают с процентным отношением галактик с «вереницами» среди всех спиральных галактик по данным наблюдений.
3. Создано новое программное обеспечение для изучения эволюции моделей газовых галактических дисков с учетом самогравитации газа на основе SPH-алгоритма. С его использованием изучена генерация спирального узора в газовом диске в потенциале неосесимметричного темного гало.
4. Исследование нового механизма формирования спиральных рукавов на периферии газовых дисков галактик за пределами оптического ради-

уса позволяет объяснить наблюдаемые двухрукавные узоры во внешних областях галактик вне пределов звездного диска, примерами которых являются NGC 1512, NGC 5055, NGC 6744, NGC 6946, NGC 5236, NGC 7793 и др.

5. Полученные оценки физических параметров Галактики с учетом новых данных наблюдений о местоположении и кинематике мазеров могут способствовать лучшему пониманию структуры и динамики Млечного Пути.
6. В рамках концепции неустойчивости глобальных мод удалось воспроизвести радиальную структуру линейных двухрукавных неустойчивых глобальных собственных мод, используя численные нелинейные модели динамики газового диска с учетом самогравитации.

## **Достоверность**

Достоверность результатов и выводов диссертационной работы обусловлена применением строгих математических моделей, хорошо апробированных алгоритмов и сопоставлением результатов с уже полученными ранее, а также совпадением численных и аналитических решений в предельных случаях.

Данные для объектов, вошедших в каталог галактик, были взяты из астрономических баз данных HYPERLEDA и NED. Для анализа галактик с вереницами использовались исходные изображения, полученные в различных спектральных диапазонах. Автор провел численные эксперименты с использованием программ, основанных как на эйлеровом так и на лагранжевом подходах к моделированию сплошной среды, показавшие удовлетворительное согласие.

В разные годы работа поддерживалась грантами Российского фонда фундаментальных исследований (15-02-06204-а, 09-02-97021-р\_поволжье\_а), часть работы выполнена в рамках госзадания Министерства образования и науки РФ (проект № 2.852.2017/4.6).

## **Апробация работы**

Материалы настоящей диссертации докладывались на следующих конференциях и семинарах: XXXIV Всероссийская конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии», Пущино, 18–21 апреля 2017; Всероссийская научная конференция «Современная звёздная астрономия-2014», Южный Федеральный Университет, г. Ростов-на-Дону, 28 мая – 30 мая 2014 г.; Всероссийская астрономическая конференция «Многоликая Вселенная» (ВАК-2013), 23-27 сентября 2013 г., г. Санкт-Петербург; Всероссий-



ская астрофизическая конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (HEA-2011)», Москва, ИКИ РАН (2009 г., 2010 г., 2011 г., 2012 г.); XV Региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области, г. Волгоград, 10–12 ноября 2010 г.; Conference Dynamics and evolution of disc galaxies, Pushchino, Moscow region, Russia, May 31 - June 04, 2010 г.; 39-я международная студенческая научная конференция «Физика Космоса», Екатеринбург, 1–5 февраля 2010 г.; The International Conference «Nonstationary Phenomena and Instabilities on Astrophysics», Volgograd, Russia, 8-12 September, 2009, VolSU; IV и V Всероссийский научный семинар «Физика Солнца и Звезд», Элиста. Россия, 2008 г., 2009 г.; Пятая ежегодная научная конференция студентов и аспирантов базовых кафедр Южного научного центра РАН, Секция «Физика и астрономия», г. Ростов-на-Дону, ЮФУ, 10–17 апреля 2009 г.; «Научная сессия ВолГУ», г. Волгоград (2010 г., 2015 г.).

### **Личный вклад автора**

Соискатель в равной степени с другими соавторами участвовал в постановке задач, разработке методов, их тестировании, проведении расчетов, получении и представлении результатов и выводов.

В частности, лично автором получены следующие результаты:

1. Составлен новый каталог галактик с «вереницами», состоящий из 276 объектов. Для его составления было просмотрено более 30000 изображений галактик. Все выделенные объекты были обработаны и проанализированы по единой разработанной автором методике выделения верениц. Для автоматизации сбора данных из астрономических баз, работы с полученными данными измерений и анализа статистических результатов написано специальное программное обеспечение.
2. Построены звездно-газовые модели динамики галактических дисков для изучения транзиентного характера «верениц». Проведен анализ характеристик полигональных структур в моделях, в частности времени их жизни. Построены статистические распределения основных параметров объектов каталога и частоты встречаемости.
3. Создан пакет программ для моделирования динамики газового диска методом SPH, проведено тестирование численной модели. Проведены серии вычислительных экспериментов для моделирования динамики газового диска в неосесимметричном потенциале темного гало с учетом самогравитации газа для изучения собственных мод в гравитационно неустойчивом галактическом диске.

4. Предложен и исследован механизм генерации спиральной структуры в газе на периферии галактики за пределами оптического радиуса. Соискателем подготовлено и выполнено более 100 численных экспериментов. Проведены визуализация и анализ полученных результатов.
5. Проведено и проанализировано более 20 численных экспериментов, моделирующих звездный диск для уточнения параметров Галактики с учетом современных данных о кинематике мазеров на различных расстояниях от Солнца. Впервые проведена декомпозиция модели Галактики на основные компоненты (балдж, ядро, диск, гало) с учетом новых данных о кривой вращения по наблюдениям мазеров.

Обсуждение полученных результатов проводилось совместно с научным руководителем, А.В. Хоперсковым, а также с остальными соавторами. Доклады на конференциях и публикации были подготовлены самостоятельно или в равных долях с другими соавторами.

## Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка литературы из 304 источников на 33 страницах. Общий объем работы составляет 229 страниц и включает в себя 85 рисунков и 3 таблицы.

**Список публикаций по теме диссертации** включает 23 работы: в журналах из перечня ВАК 7 работ, из них в изданиях, индексируемых WoS/Scopus 5 работ, 9 работ, индексируемых в РИНЦ, а также тезисы и материалы конференций и свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

## Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы, указаны цели работы, изложено краткое содержание диссертации и отмечена научная новизна. Приведены положения, выносимые на защиту, отражена апробация работы.

**Первая глава** посвящена описанию математических моделей динамики газовых, звездных и звездно-газовых дисков, лежащих в основе дальнейшего изучения галактических систем в представленной диссертации. В §1.1 приведены математические модели для описания различных звездных компонент и темного вещества, которые используются при постановке численных экспериментов, обсуждаемых в последующих главах. В §1.2 обсуждаются численные методы моделирования бесстолкновительных звездных дисков с использованием вычисления гравитационных сил методами TreeCode и Particle-

Particle. Особое внимание уделено процедуре построения равновесного состояния звездного диска (п. 1.2.2). В п. 1.2.3. содержится описание разработанного нами метода постобработки результатов расчетов, полученных для бесстолкновительных систем с целью удобства их дальнейшего анализа. Следующий §1.3 посвящен численным алгоритмам для интегрирования уравнений газодинамики, причем обсуждаются как схемы на основе Эйлера, так Лагранжева подходов. Здесь приведено подробное описание SPH-алгоритма, реализованного нами в виде пакета программ. Сравнение результатов с использованием принципиально различных численных методов представляется важным для получения более адекватных выводов. Программные реализации численных методов протестированы на стандартных задачах, для которых имеются либо аналитические решения, либо надежно установленные численные решения. В §1.3 (п. 1.3.4) приведено краткое описание использованных технологий распараллеливания численных алгоритмов.

**Вторая глава** содержит подробное описание нового каталога галактик с вереницами, в который вошли новые объекты по сравнению с каталогом [10] (§§2.1–2.3). Результатом исследования является увеличение числа объектов с вереницам, входящими в NGC/IC, со 130 до 406 галактик. Показано, что нашу выборку нельзя объединять с каталогом [10]. Проведен статистический анализ физических характеристик построенной выборки. Рассмотрены основные характеристики, такие как морфологические типы, абсолютные звездные величины, длины верениц  $L_r$ , отношение  $d_r/L_r$ , угол между вереницами  $\alpha_r$ , отношение  $M_{HI}/L_B$ , максимальная скорость вращения диска  $V_{\text{rot}}^{\text{max}}$ , двуцветная диаграмма.

Число верениц  $N_{\text{row}}$  в галактиках нашей выборки в среднем увеличилось на одну по сравнению с [10], что обусловлено использованием более современных изображений в различных диапазонах, включая данные DSS, SDSS, HST, 2MASS и GALEX, и что позволило, в том числе, рассмотреть полигональные структуры за пределами оптического радиуса.

В §2.3 подробно обсуждается гипотеза, предложенная в работе [10], о преимущественном формировании «верениц» во взаимодействующих системах, т.к. среди галактик с «вереницами» взаимодействующие галактики встречаются почти вдвое чаще. При рассмотрении объединенной выборки, содержащей 480 галактик, предложенная гипотеза не подтвердилась. Объединенная выборка из 480 объектов с «вереницами» содержит всего 128 взаимодействующих галактик (27%). Небольшая доля таких галактик в нашей выборке (13.8%), видимо, связана с тем, что наиболее ярко выраженные взаимодействующие объекты уже вошли в каталог, опубликованный в 2001 г. Наш анализ указывает на то, что наличие бара является благоприятным фактором для возникновения верениц. В работе отдельно выделены галактики с вереницами по изображениям 2MASS, доля которых примерно 6%. Малове-

роятно, что газодинамический механизм способен сформировать вереницу в таких галактиках, имеющих существенно более массивные звездные спиральные рукава. Это указывает, что в разных галактиках могут работать различные механизмы (газодинамический, резонансный, гравитационный) или сразу несколько в одной системе.

В целом, не удалось обнаружить каких-то существенных статистических отличий между объектами с вереницами и остальными галактиками NGC/IC. Этот вывод представляется важным, поскольку согласуется с выводами наших численных экспериментов, указывающими на транзиентный характер полигональных структур.

Для объяснения образования спрямленных сегментов в спиральных рукавах галактик предложено несколько физических механизмов. В §2.4 изучены некоторые особенности формирования верениц в рамках численных газодинамических моделей, описанных в §1.3. Наши результаты моделирования продемонстрировали эффективность газодинамического механизма генерации верениц на основе неустойчивости фронта ударной волны в газовом диске. На основании большого числа проведенных экспериментов были построены распределение по углам между вереницами  $\alpha$  и диаграмма, показывающая соотношение между длиной вереницы и расстоянием до ее края от центра галактики. Сравнение этих распределений с полученными из каталога [10] и нашего каталога показало качественное сходство.

В литературе также рассматривается механизм формирования верениц, основанный на гравитационной неустойчивости и резонансных эффектах в звездном диске [18]. В §2.5 мы рассматриваем модель динамики только звездной компоненты галактики методом  $N$ -тел с варьированием радиальных профилей параметра Тоомре  $Q_T(r)$ . Исследование механизма, основанного на возникновении гравитационной неустойчивости в бесстолкновительной звездной системе, позволило выявить некоторые особенности верениц, генерируемых в звездном диске. Также нами были построены самосогласованные модели звездно-газового диска. Анализ результатов показал, что вереницы в газовой компоненте возникают в среднем в 2–4 раза чаще, чем в звездной, появление верениц в газе и звездах не является одновременным, хотя имеется эффект согласованного их появления. Численные эксперименты не позволяют обнаружить четкую корреляцию, указывающую, что вереницы в газе вызваны вереницами в звездной компоненте, либо наоборот, что причиной верениц в звездном диске являются вереницы в газе.

**Третья глава** посвящена одному из возможных механизмов формирования спиральной структуры в галактическом диске. В §3.1 описаны механизмы формирования спиральных структур. Исследованы некоторые новые особенности динамики газового диска в триаксиальном темном гало, когда в плоскости диска имеем неосесимметричное распределение темной массы.

§3.2 посвящен анализу результатов моделирования газового диска во внешнем неосесимметричном гравитационном потенциале гало. Гидродинамические расчеты производились на основе SPH-метода (см. п. 1.3.1). Проведено сравнение этих результатов с полученными в аналогичных численных экспериментах с использованием TVD подхода (см. п. 1.3.2), которое показало адекватность применения SPH-метода, реализованного нами. Расчеты показывают, что даже слабая неосесимметрия гало может служить эффективным механизмом генерации спиральной волны плотности в газе. Получены зависимости морфологии и амплитуды спиральных узоров от числа Маха, показателя адиабаты, параметров балджа и гало, шкалы газового диска. Определены условия, допускающие возникновение в центральной зоне лидирующих спиралей, переходящих на больших радиусах в отстающий спиральный узор.

По данным наблюдений за последние годы выявлен ряд галактик, у которых обнаружены в УФ диапазоне (прежде всего по данным GALEX) очень протяженные спиральные рукава далеко за пределами оптического радиуса  $R_{opt}$ , внутри которого находится основная масса звезд диска галактики. Наблюдаемый спиральный узор трудно объяснить приливными эффектами, поэтому возникает проблема объяснения такого рода структур за пределами  $R_{opt}$ . §3.3 посвящен описанию гипотезы, рассматривающей неосесимметрию темного гало, как причину формирования спиральных узоров на периферии диска далеко за пределами оптического радиуса, где, по-видимому, газ является гравитационно устойчивым.

Построенные численные модели дают основания для подтверждения нашей гипотезы. Динамическое взаимодействие протяженного галактического газового диска с неосесимметричным темным гало может являться эффективным механизмом генерации внешних спиральных структур. Показано, что вариации параметров вращения галактики и особенностей распределения темной материи влияют на морфологию образующихся спиральных рукавов в наших моделях. Характер распределения темного вещества внутри оптического радиуса не оказывает существенного влияния на морфологию внешней газовой спиральной структуры.

Здесь же изучена динамика газа на периферии галактики с учетом самогравитации для различной массы газа. Только гравитационная неустойчивость не позволяет объяснить очень протяженные и правильные спиральные рукава, как например у NGC 6946, NGC 289, NGC 5055. Более того, чем больше запас гравитационной устойчивости (больше показатель Тоомре), тем более правильным образуется узор. Исследованы различные способы включения неосесимметричности гало  $\varepsilon$ .

В **четвертой главе** нами рассмотрено решение двух задач. В §4.1 построена модель Галактики с учетом данных о кинематике мазеров на различных расстояниях от Солнца [19, 20]. За последние 15 лет данные наблю-

дений о мазерах в нашей Галактике привели к определенному пересмотру скорости вращения холодной дисковой компоненты. Современные наблюдения дают  $V_{\odot} = 240 \div 260$  км/сек, в отличие от принимавшихся долгое время  $V_{\odot} = 220$  км/сек. Величина  $V_{\odot}$  играет определяющую роль при декомпозиции кривой вращения и оценке вклада в массу от различных галактических компонент. К сожалению, такой подход дает неоднозначную декомпозицию без дополнительных допущений. Как правило, используют предположение о модели максимального диска, которое дает только ограничение снизу на массу гало. С целью уточнить характер распределения радиальных профилей массовой плотности были построены динамические модели звездных дисков на основе задачи  $N$ -тел, в которых проведено согласование дисперсии скоростей в диске с наблюдаемыми значениями. Была построена модель звездного диска на границе гравитационной устойчивости. Произведены оценки физических параметров для построенной базовой модели и сравнение их с полученными ранее данными.

Также в §4.2 и §4.3 в рамках развития концепции глобальных собственных мод [21, 22] проведено сравнение результатов линейного анализа динамики собственных мод с результатами нелинейного моделирования.

В линейном приближении построена модель для определения собственных частот гравитационно неустойчивых возмущений в радиально неоднородном газовом диске в рамках концепции глобальных мод. Кроме того, проведены нелинейные газодинамические расчеты для изучения собственных глобальных мод с использованием различных численных алгоритмов. Сравнение результатов линейного анализа устойчивости и нелинейного моделирования собственных мод в газовом диске с учетом самогравитации показало удовлетворительное согласие для радиальной структуры возмущений в случае доминирования двухрукавной моды. Наши численные эксперименты дали для границы гравитационной устойчивости газового диска  $Q_{Tmin} \approx 2$ . При более высоких значениях  $Q$ -параметра рост глобальных мод не наблюдается.

В **Заключении** кратко изложены основные результаты и сделаны выводы исследования по главам.

В **Приложении А** приведена таблица, содержащая характеристики галактик с «вереницами».

## Список публикаций по теме диссертации

1. Butenko M. A., Khoperskov A. V. Galaxies with “rows”: A new catalog // *Astrophysical Bulletin*. — 2017. — Vol. 72. — P. 232–250. (WoS/Scopus)
2. Butenko M., Khoperskov A., Khoperskov S. Galactic spiral pattern beyond the optical size induced by the triaxial dark halo // *Baltic Astronomy*. — 2015. — Vol. 24. — P. 119–125. (WoS)
3. Khoperskov A. V., Eremin M. A., Khoperskov S. A., Butenko M. A., Morozov A. G., Dynamics of gaseous disks in a non-axisymmetric dark halo // *Astronomy Reports*. — 2012. — Vol. 56. — P. 16–28. (WoS/Scopus)
4. Khoperskov S. A., Khoperskov A. V., Eremin M. A., Butenko M. A. Polygonal structures in a gaseous disk: Numerical simulations // *Astronomy Letters*. — 2011. — Vol. 37. — P. 563–575. (WoS/Scopus)
5. Khoperskov A., Bizyaev D., Tiurina N., Butenko M. Numerical modelling of the vertical structure and dark halo parameters in disc galaxies // *Astronomische Nachrichten*. — 2010. — Vol. 331. — P. 731–745. (WoS/Scopus)
6. Хоперсков С. А., Хоперсков А. В., Засов А. В., Бутенко М. А. Параллельный алгоритм для моделирования динамики газа в сильно неоднородных гравитационных полях // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. — 2012. — Т. 16, № 3 (48). — С. 108–117. (ВАК)
7. Храпов С. С., Кузьмин Н. М., Бутенко М. А. Сравнение точности и сходимости для метода SPH-TVD и некоторых эйлеровых схем для решения уравнений газодинамики // *Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика*. — 2016. — № 6 (37). — С. 166–173. (ВАК)
8. Бутенко М. А., Хоперсков А. В. Программный комплекс sphgalaxy для моделирования динамики самогравитирующих газовых систем. — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012618499 от 19.09.2012 г. Заявка № 2012612884 от 16.04.2012 г. — 2012.
9. Шушкевич Т. С., Кузьмин Н. М., Бутенко М. А. Трехмерный параллельный численный газодинамический код на основе смешанного лагранжево-эйлерова подхода // *Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика*. — 2015. — № 4 (29). — С. 24–34.

10. Бутенко М. А. Статистическая обработка изображений спиральных галактик с полигональными структурами. // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика. — 2015. — № 1 (26). — С. 52–62.
11. Васюра А. С., Бутенко М. А., Кузьмин Н. М. Граничные условия для моделирования сжимаемого газа методом SPH // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика. — 2014. — № 4 (23). — С. 53–67.
12. Бутенко М. А., Хоперсков А. В. Динамическое моделирование для оценки массы темного гало галактики по новым данным о кинематике мазеров // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1. Математика. Физика. — 2014. — № 1 (20). — С. 61–69.
13. Бутенко М. А., Хоперсков С. А., Хоперсков А. В. Численное моделирование внешних газовых спиралей в галактиках // Вестник ВолГУ. Серия 1: Математика. Физика. — 2012. — № 1 (16). — С. 49–56.
14. Бутенко М. А., Хоперсков С. А. Полигональные структуры в газовых дисках: зависимость от числа Маха. // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика. — 2011. — № 1 (14). — С. 81–85.
15. Бутенко М. А. Численное моделирование лидирующих спиралей в центральной области газового галактического диска методом SPH // Вестник ВолГУ Серия 9. Исследования молодых ученых. — 2010. — № 8 (2). — С. 129–132.
16. Бутенко М. А., Еремин М. А., Корчагин В. И., Морозов А. Г., Хоперсков С. А. Определение собственных мод для гравитационной неустойчивости в газовом диске // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика. — 2009. — № 12. — С. 70–72.
17. Хоперсков А. В., Еремин М. А., Бутенко М. А., Храпов С. С. Спиральные галактические волны, генерируемые темным гало // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика. — 2007. — № 11. — С. 105–114.
18. Бутенко М. А., Еремин М. А., Хоперсков С. А., Корчагин В. И., Хоперсков А. В. Глобальные спиральные моды, порождаемые гравитационной неустойчивостью в галактическом диске // Региональная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы современной физики и



- математики», 26–29 октября 2009 г. / КалмГУ. — Элиста : Изд-во КалмГУ, 2009. — С. 7–9.
19. Еремин М. А., Хоперсков А. В., Бутенко М. А. Триаксиальность гало и спиральная структура в звездно-газовых дисках // Сборник трудов IV Всероссийского научного семинара «Физика Солнца и Звезд», 22–25 апреля 2008 г. / КалмГУ. — Элиста : Изд-во КалмГУ, 2008. — С. 114–122.
  20. Butenko M. A., Eremin M. A., Khoperskov S. A., Korchagin V. I. The gravitating instability in gaseous disks and global spiral modes in numerical models // Book of Abstract. The International Conference "Nonstationary Phenomena and Instabilities on Astrophysics". Volgograd, Russia, 8-12 September, 2009. — Volgograd : Volgograd State University, 2009. — P. 71–72.
  21. Бутенко М. А. Особенности распределения темного вещества в гало и спиральная структура дисковых галактик // Физика Космоса: Тр. 39-й Международной студенческой научной конференции. Екатеринбург 1–5 февр. 2010 г. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2010. — С. 220.
  22. Хоперсков А. В., Бутенко М. А. Спиральный узор галактик за пределами оптического радиуса: численное моделирование // Физика Космоса: Тр. 39-й Международной студенческой научной конференции. Екатеринбург 1–5 февр. 2010 г. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2010. — С. 234.
  23. Бутенко М. А., Хоперсков А. В. Новые оценки темной массы внутри оптического радиуса Галактики с использованием данных о кинематике мазеров // Тезисы докладов. «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (НЕА-2012)», 23–27 декабря 2012 г. — Москва : ИКИ, 2012. — С. 32.

## Цитируемая литература

1. B. A. Vorontsov-Vel'Yaminov, *Extragalactic astronomy. Textbook for students of astronomy.* (1978).
2. F. H. Shu, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **54**, 667 (2016).
3. J. Bland-Hawthorn and O. Gerhard, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **54**, 529 (2016).
4. А. М. Фридман and А. В. Хоперсков, *Физика галактических дисков.* (ФИЗМАТЛИТ, М., 2011).
5. B. A. Vorontsov-Vel'Yaminov, *Astron. Zh.* **41**, 814 (1964).
6. A. D. Chernin, *Astrophysics* **41**, 399 (1998).
7. A. D. Chernin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **308**, 321 (1999).
8. A. D. Chernin, *Astronomical and Astrophysical Transactions* **18**, 393 (1999).
9. A. D. Chernin, A. V. Zasov, V. P. Arkhipova, and A. S. Kravtsova, *Astronomy Letters* **26**, 285 (2000).
10. A. D. Chernin, A. S. Kravtsova, A. V. Zasov, and V. P. Arkhipova, *Astronomy Reports* **45**, 841 (2001).
11. A. D. Chernin, A. V. Zasov, V. P. Arkhipova, and A. S. Kravtsova, *Astronomical and Astrophysical Transactions* **20**, 139 (2001).
12. A. K. Dambis, L. N. Berdnikov, A. S. Rastorguev, and M. V. Zabolotskikh, in *The General Assembly of Galaxy Halos: Structure, Origin and Evolution*, Edited by A. Bragaglia, M. Arnaboldi, M. Rejkuba, and D. Romano (2016), *IAU Symposium*, vol. 317, pp. 290–291.
13. A. S. Rastorguev, N. D. Utkin, M. V. Zabolotskikh, et al., *Astrophysical Bulletin* **72**, 122 (2017).
14. V. V. Vityazev, A. S. Tsvetkov, V. V. Bobylev, and A. T. Bajkova, *Astrophysics* **60**, 462 (2017).
15. V. I. Korchagin, S. A. Khoperskov, and A. V. Khoperskov, *Baltic Astronomy* **25**, 356 (2016).
16. E. Griv, I.-G. Jiang, and L.-G. Hou, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **468**, 3361 (2017).
17. J. P. Vallée, *The Astronomical Review* **13**, 113 (2017).
18. A. M. Mel'nik and P. Rautiainen, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **434**, 1362 (2013).
19. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **408**, 1788 (2010).
20. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova, *Astronomy Letters* **37**, 526 (2011).
21. C. C. Lin and F. H. Shu, *Proceedings of the National Academy of Science* **55**, 229 (1966).
22. V. Korchagin, N. Kikuchi, S. M. Miyama, et al., *Astrophys. J.* **541**, 565 (2000).