

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
Государственный астрономический институт
имени П.К. Штернберга

На правах рукописи
УДК 524.5-7; 52-17



Хоперсков Сергей Александрович

**ЭВОЛЮЦИЯ ДИСКОВЫХ ГАЛАКТИК:
ИССЛЕДОВАНИЕ ИЕРАРХИИ
СТРУКТУР**

01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2013

Работа выполнена в отделе физики звездных систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института астрономии Российской академии наук.

Научный руководитель: член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук,
профессор,
Шустов Борис Михайлович
директор Института астрономии РАН

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор,
Расторгуев Алексей Сергеевич
зав. отдела Изучения Галактики
и переменных звезд ГАИШ МГУ

доктор физико-математических наук,
Моисеенко Сергей Григорьевич
ведущий научный сотрудник отдела
физики космической плазмы ИКИ РАН

Ведущая организация: Южный федеральный университет

Защита состоится «4» апреля 2013 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д501.001.86 при Государственном астрономическом институте им. П.К.Штернберга (ГАИШ МГУ), расположенном по адресу: Университетский проспект, дом 13, 119991, Москва

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (119991, г. Москва, Ломоносовский проспект, д.27, Фундаментальная библиотека).

Автореферат разослан «4» марта 2013 года

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук



С.О. Алексеев

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Галактики представляют собой сложные, многокомпонентные системы, характеризующиеся разнообразием физических процессов, протекающих в них. На ранних этапах формирования структуры галактик происходит в основном под действием внешних факторов — в вириализованных гало темной материи (ТМ) остывающий и накапливающий угловой момент первичный барионный газ, с началом звездообразования происходит формирование протогалактик и первых галактик. Наблюдения таких объектов на больших красных смещениях $z \sim 5 - 10$ стали блестящим подтверждением современных теоретических представлений, основанных в основном на Λ CDM модели (см., например, [1]). В более близкой Вселенной $z < 0.5$ взаимодействие с окружением проявляется в виде столкновений галактик сопоставимых размеров и выпадении карликовых галактик-спутников на более массивные галактики [2]. Во всех этих процессах важнейшая роль в управлении галактической эволюцией отводится темному веществу. Влияние эволюции темной материи на изменение структуры галактик проявляется, например, в регулировании толщины галактических дисков [3] и образовании различных морфологических особенностей в них — баров и/или спиралей [4, 5]. Существенными факторами секулярной эволюции галактических дисков являются формирование и разрушение бара и спиральной структуры [6], связанная с этим радиальная миграция звезд [7] и перераспределение химического состава межзвездной среды [8]. Различные коллективные процессы в галактических дисках в свою очередь влияют на строение галактик. Перераспределение газа и его концентрация в отдельных областях под действием как глобальной галактической динамики, так и неоднородностей магнитного поля, потока излучения и других факторов межзвездной среды, определяют эффективность звездообразования. При определенных условиях динамические процессы в дисковых компонентах способны влиять на структуру темной материи в пределах оптического радиуса галактики [9].

Принципиальная невозможность проведения натурального эксперимента в физике галактик и наблюдений большинства астрофизических процессов в галактиках в реальном времени неизбежно

приводит к повышению роли результатов численных экспериментов. Данные наблюдений, полученные в рамках многочисленных обзоров, таких как SDSS (Sloan Digital Sky Survey), GALEX (GALaxy Evolution EXplorer), 2MASS (2 Micron All Sky Survey), настолько обширны и детальны, что имеется определенное отставание в развитии численных моделей с точки зрения их разрешения и учета значительного числа сложных физических факторов, необходимых для адекватного описания свойств реальных объектов. Прогресс в теоретическом изучении наблюдаемых структур и эволюции галактик и других астрофизических систем немалой степени связан с развитием компьютерной техники и широким распространением суперкомпьютеров. Показательным является трехкратное относительное увеличение числа астрономических публикаций, основанных на численных газодинамических и N -body расчетах, в период с 1995 по 2012 год (данные SAO/NASA Astrophysics Data System). Благодаря ресурсам вычислительных кластеров не просто сокращается время решения конкретной динамической задачи, а становится возможным учет новых факторов и физических процессов.

Наличие темного вещества в галактиках и характер его пространственного распределения восстанавливаются по косвенным признакам. Самые различные кинематические и морфологические особенности видимого вещества позволяют получать определенные ограничения на те или иные параметры темного вещества в галактиках. Постоянство кривой вращения на больших расстояниях от центра галактики и устойчивость галактических дисков к гравитационным возмущениям позволяют оценивать массу гало темной материи [10]. Кинематика и морфология приливных галактических структур [11] и полярных колец также дают ограничения на форму гало [12]. Несмотря на это однозначной картины, описывающей глобальные свойства ТМ внутри оптического радиуса спиральных галактик, еще нет. Ограниченность наших знаний о свойствах ТМ делает важной задачей является поиск новых проявлений темного вещества в галактиках через особенности в эволюции барионного вещества.

Спиральная структура является важным фактором, определяющим эволюцию галактик. Понимание природы этого феномена позволяет с одной стороны оценить вклад этих структур в наблюдаемую дисперсию скоростей звезд в современную эпоху [13]. С другой стороны дает возможность понять на какой эволюцион-

ной стадии находится сама галактика в целом [14]. Несмотря на более чем полувекую историю исследования феномена галактического спирального узора, до сих пор не предложено универсальной теории, объясняющей все основные наблюдаемые проявления этих образований. Проблема определения времени жизни спирального узора в галактиках является одной из ключевых [15]. Время существования спиралей очевидным образом оценивается в численных экспериментах, однако, прямое сравнение этого параметра с данными наблюдений не представляется возможным. Анализ косвенных наблюдаемых характеристик спирального узора, таких как угол закрутки, скорость вращения и амплитуда волны, тем не менее позволяет делать ограничения на теоретические модели. Наиболее перспективным подходом является воспроизведение структуры конкретных галактик, в том числе и нашей Галактики, в численных экспериментах, основанных на согласовании результатов моделирования с фотометрическими и кинематическими данными наблюдений.

В основе представлений о структуре нашей Галактики и ее спиральном узоре лежит анализ кинематики различных галактических компонент и определение расстояний между ними. Данные по кинематике ассоциаций молодых OB-звезд позволяют определять пространственные масштабы в галактическом диске [16]. Одна из оценок расстояния от Солнца до центра Галактики, по собственным движениям цефеид равна 7.1 кпк [17], при этом разброс в определении этой величины другими методами лежит в диапазоне от 7 до 10 кпк. Измерения тригонометрических параллаксов галактических мазерных источников являются хорошими источниками данных при построении кривой вращения [18]. Морфология нашей Галактики неоднократно пересматривалась и по настоящее время является предметом дискуссий. Различные предположения о количестве спиральных рукавов и их геометрии [19], проблема наличия кольца в центре [20] и другие свойства Галактики нуждаются в наблюдательных подтверждениях. Стоит ожидать, что наши знания о пространственном распределении вещества и кинематике спирального узора нашей Галактики в ближайшее время будут расширены благодаря работе космического телескопа Gaia (ESO), запуск которого намечен на 2013 год.

Цель работы — детальное исследование взаимосвязанных процессов в дисках спиральных галактик на основе многомерных численных экспериментов с применением технологий параллельных вычислений. Достижение поставленной цели предусматривает решение следующих основных **задач**:

1. Разработка и реализация универсальных численных алгоритмов моделирования динамики газовых, звездных и звездно-газовых галактических структур с учетом физико-химических особенностей межзвездной среды.
2. Исследование газодинамических, гравитационных и тепловых неустойчивостей галактической ударной волны в спиральном галактическом потенциале.
3. Исследование и обоснование различных механизмов формирования галактических спиральных структур.
4. Изучение эволюции дисковых галактик с учетом взаимодействия барионного вещества с эволюционирующей темной материей.

Научная новизна работы

Все результаты, выносимые на защиту являются новыми.

Созданы новые универсальные комплексы программ для построения динамических моделей газовых, звездных и звездно-газовых галактических дисков с учетом самогравитации газа, процессов радиационного нагрева и охлаждения, химической кинетики молекулярного водорода.

С использованием трехмерных газодинамических расчетах впервые был определен механизм, ответственный за образование полигональных структур (ПС) в галактиках. Впервые проведено статистическое сравнение параметров полигональных структур (ПС), полученных по результатам численного моделирования, с данными наблюдений для выборки из 200 галактик. Показано, что необходимым требованием для формирования ПС является медленное вращение галактического спирального узора.

Построена новая модель образования и динамики гигантских молекулярных облаков (ГМО) в нашей Галактике, позволившая

провести сравнительный количественный анализ между результатами теоретических расчетов и наблюдаемыми свойствами облачной структуры. Получены доводы, указывающие на отсутствие так называемого «Молекулярного кольца» в диске нашей Галактики на расстоянии 3 – 5 кпк от центра.

Проведено обобщение теории формирования спиральной структуры, основанной на нелинейной стадии развития гравитационно неустойчивых глобальных мод в диске. Вместо политропных моделей газовых дисков рассмотрен неадиабатический газ, а также исследованы модели звездных дисков в бесстолкновительном приближении (N -body) и самосогласованные звездно-газовые модели.

Впервые детально исследована динамика трехмерных газового и звездного дисков в гравитационном потенциале триаксиального темного гало. Спиральная структура в таких моделях существует на временах порядка возраста дисковых галактик и ее формирование не приводит к динамическому разогреву звездного диска. Впервые показан нестационарный характер вращения спиральной структуры в гравитационном поле неосесимметричного гало.

В рамках новой самосогласованной модели образования дисковой галактики в течении 10 млрд лет было показано влияние эволюции барионного вещества на форму гало темной материи, приводящее к сглаживанию профиля плотности гало в центральной области галактики.

Практическая и научная значимость работы

Научная ценность диссертации состоит в создании пакетов программ для моделирования многокомпонентной динамики спиральных галактик. Результаты, изложенные в диссертации, могут иметь применение для постановки наблюдательных задач по исследованию морфологии и кинематики галактик. В частности, сформулирована задача определения параметров неосесимметричного темного гало по вариациям угловой скорости вращения спирального узора на основе спектральных наблюдений.

Критерии формирования полигональных структур и их геометрические параметры позволят получить оценки кинематики спирального узора, а также лучше понять физику галактических ударных волн (ГУВ). Появляется дополнительная возможность получения новых ограничений на сценарии развития как газодинамиче-

ских, так и гравитационных неустойчивостей в окрестности ГУВ.

Исследование пространственного распределения и кинематики ГМО в моделях и наблюдениях позволит выявить ограничения на форму кривой вращения и крупномасштабную морфологию Галактики.

Разработанная методика для моделирования отдельных реальных галактик с заданными физическими параметрами, в рамках звездно-газовых моделей, позволяет дополнить список галактик с модальной природой галактической спиральной структуры.

Проблема центрального кэспа в космологических Λ CDM моделях по всей видимости связана с недостаточным пространственным разрешением и ограниченностью набора физических процессов в моделях. Проведенные расчеты позволяют объяснить сглаживание профиля плотности гало темной материи без привлечения экзотических сценариев (например, специфического спектра возмущений в ранней Вселенной, наличия смешанных ароматов у частиц темной материи и др.).

В разные годы работа поддерживалась грантами Российского фонда фундаментальных исследований (07-02-01204-а, 12-02-00685-а, 11-02-12247-офи-м-2011, 09-02-97021-р_поволжье_а, 10-02-00231), программами Отделения общей физики и астрономии РАН, фондом некоммерческих программ «Династия» и федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Универсальный комплекс программ для моделирования самосогласованной динамики бесстолкновительной системы N -тел, описывающей звездные подсистемы и темное вещество, и газодинамических процессов в галактиках и межзвездной среде с учетом самогравитации, внешних гравитационных полей, химической трансформации вещества, радиационных процессов нагрева и охлаждения газа, звездообразования и взрывов сверхновых звезд.
2. Многомерные газодинамические расчеты формирования полигональных галактических структур, позволившие впервые

доказать газодинамический механизм образования спрямленных участков спиральных галактических рукавов. Было показано, что длинноволновые возмущения фронта галактической ударной волны при развитии гофрировочной неустойчивости образуют полигональные структуры. Ключевым фактором, влияющим на спрямление фронта галактической ударной волны, является медленное вращения спирального узора.

3. Новая модель формирования облачной структуры Млечного Пути с учетом термодинамических свойств газа, химической кинетики молекулярного водорода, самогравитации и реалистичного галактического потенциала. В рамках динамической модели впервые дано объяснение наблюдаемым особенностям диаграммы «галактическая долгота — лучевая скорость» без учета кольцевой структуры на расстоянии 3–5 кпк от центра нашей Галактики.
4. Механизм формирования крупномасштабной спиральной структуры в галактике NGC 5247, основанный на развитии гравитационно неустойчивых глобальных мод в диске. Показана воспроизводимость в численных моделях наблюдаемого спирального узора в пределах неопределенности данных наблюдений о кривой вращения, радиальном профиле звездной плотности и дисперсии скоростей звезд. Расчеты в рамках самосогласованных звездно-газовых моделей позволяют сделать вывод о значительном увеличении времени жизни спирального узора с учетом холодной газовой компоненты.
5. Механизм генерации долгоживущей глобальной спиральной структуры в звездно-газовых галактических дисках за счет взаимодействия с неосесимметричным темным гало. Вывод о нестационарном вращении спиральной волны плотности в поле неосесимметричного массивного гало.
6. Результаты расчетов разрушения центрального каспа плотности темной материи за счет динамического взаимодействия с барионной компонентой дисковой галактики в процессе ее формирования и эволюции.

Основные публикации по теме диссертации

Статьи в рецензируемых изданиях:

1. Khoperskov S.A., Vasiliev E.O., Sobolev A.M., Khoperskov A.V. *The simulation of molecular clouds formation in the Milky Way* // **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.** 2013, v. 428, № 3, p. 2311-2320.
2. Khoperskov S.A., Khoperskov A.V., Khrykin I.S., Korchagin V.I., Casetti-Dinescu D.I., Girard T., van Altena W., Maitra D. *Global gravitationally-organized spiral waves and the structure of NGC 524* // **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.** 2012, v. 427, № 3, p. 1983-1993.
3. Khoperskov A.V., Khoperskov S.A., Zasov A.V., Bizyaev D.V., Khrapov S.S. *Interaction between collisionless galactic discs and nonaxisymmetric dark matter haloes* // **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.** 2013, arXiv:1302.1778
4. Хоперсков С.А., Хоперсков А.В., Еремин М.А., Бутенко М.А. *Полигональные структуры в газовом диске: численные эксперименты* // **Письма в Астроном. Журнал.** 2011, т.37, № 8, с. 614-627.
5. Khoperskov S.A., Eremin M.A., Khoperskov A.V. *Polygonal Structures in the Gaseous Disks* // **Astronomical and Astrophysical Transactions.** 2012, v. 27, № 2, p. 245-250.
6. Хоперсков А.В., Еремин М.А., Хоперсков С.А., Бутенко М.А., Морозов А.Г. *Динамика газового диска в неосесимметричном темном гало* // **Астрономический журнал.** 2012, т. 89, № 1, с. 19-31.
7. Хоперсков С.А., Шустов Б.М., Хоперсков А.В. *Взаимодействие каспа темного вещества с барионной составляющей в дисковых галактиках* // **Астрономический журнал.** 2012, т. 89, № 9, с. 736-744.
8. 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 Вол-**

гоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика. 2009, № 12, с. 70-72.

9. Еремин М.А., Хоперсков А.В., Хоперсков С.А. *Конечно-объемная схема интегрирования уравнений гидродинамики* // **Известия Волгоградского государственного технического университета. Сер.: Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах.** 2010, т. 6, № 8, с. 24-27.
10. Засов А.В., Хоперсков А.В., Тюрина Н.В., Еремин М.А., Хоперсков С.А. *Использование суперкомпьютеров для моделирования внегалактических объектов* // **Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности.** Выпуск 2 / Под редакцией: академика В.А. Садовниченко, академика Г.И. Савина, чл.-корр. РАН Вл.В. Воеводина. — М.: Издательство Московского университета. 2010, с. 93-98
11. Хоперсков А.В., Васильев Е.О., Хоперсков С.А., Соболев А.М., Еремин М.А. *Модель образования молекулярных облаков в нашей Галактике. Роль темного гало.* // **Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика.** 2011, т. 14, № 1, с. 93-98.
12. 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. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика.** 2012, т. 16, № 3, с. 108-114.
13. Бутенко М.А., Хоперсков С.А., Хоперсков А.В. *Численное моделирование внешних газовых спиралей в галактиках* // **Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика.** 2012, т. 15, № 1, с. 49-56.

В сборниках трудов конференций:

14. Хоперсков А.В., Бутенко М.А., Хоперсков С.А. *Сверхбыстрые звезды и свойства темного галактического гало* // **Сборник**

- трудов IV Всероссийского научного семинара «Физика Солнца и звезд». 2008, Элиста, Изд-во КалмГУ. 2008, с. 106-113.
15. Бутенко М.А., Еремин М.А., Хоперсков С.А., Корчагин В.И., Хоперсков А.В. *Глобальные спиральные моды, порождаемые гравитационной неустойчивостью в галактическом диске* // Сборник трудов V Всероссийского научного семинара «Физика Солнца и Звезд». 2009, Элиста, Изд-во КалмГУ. 2010, с. 37-39.
 16. Хоперсков С.А., Еремин М.А., Хоперсков А.В. *Шпурь в дисках спиральных галактик* // Труды конференции «Химическая и динамическая эволюция галактик» (28-30 сентября, 2009, Ростов-на-Дону, ЮФУ) под ред. Бочкарева, Щекинова, Ростов-на-Дону, Изд-во РСЭИ, 2010, с. 60-68.
 17. Еремин М.А., Хоперсков С.А., Хоперсков А.В. *Моделирование полигональных структур* // Труды конференции «Химическая и динамическая эволюция галактик» (28-30 сентября, 2009, Ростов-на-Дону, ЮФУ) под ред. Бочкарева, Щекинова. Ростов-на-Дону, Изд-во РСЭИ, 2010, с. 51-59.
 18. Хоперсков С.А., Еремин М.А., Хоперсков А.В. *Параллельный код для моделирования динамики сверхзвукового газа с самогравитацией* // Сборник статей участников Всероссийского конкурса научных работ студентов и аспирантов «Телематика'2010: телекоммуникации, веб-технологии, суперкомпьютинг». — СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. — с. 159-163.
 19. Хоперсков С.А., Еремин М.А., Хоперсков А.В., Засов А.В., Тюрина Н.В., *Применение высокопроизводительных вычислений для моделирования гидродинамических течений в сильно неоднородных гравитационных полях* // Труды международной научной конференции ПАВТ2011. Челябинск, Издательский центр ЮУрГУ. 2011, с. 334-342.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на международных конференциях:

1. Nonstationary Phenomena and Instabilities in Astrophysics (NPIA), Volgograd, Russia, 8-12 September (2009).
2. Dynamics and Evolution of Disc Galaxies, Pushchino, Russia, 31 May-4 June (2010).
3. Параллельные вычислительные технологии (ПАВТ2011), Москва, 28 марта – 1 апреля (2011).
4. Galaxies origin, dynamics, structure & astrophysical disks, Sochi, Russia, 14-18 May (2012).
5. European week of Astronomy and Space Science, Rome, Italy, 1-6 July (2012).
6. Galactic scale star formation, Heidelberg, Germany, 30 July – 3 August (2012).

Всероссийских конференциях:

1. Химическая и динамическая эволюция галактик, Ростов-на-Дону, 28-30 сентября (2009).
2. Галактические и аккреционные диски, Нижний Архыз, 21-26 сентября (2009).
3. Телематика-2010: телекоммуникации, веб-технологии, суперкомпьютинг, Санкт-Петербург, 21-24 июня (2010).
4. Всероссийская астрономическая конференция (ВАК-2010) «От эпохи Галилея до наших дней», Нижний Архыз, 13-18 сентября (2010).
5. Физика космоса, Коуровская АО (2008, 2010, 2011).
6. Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра, Москва (2010, 2011, 2012).
7. Актуальные проблемы внегалактической астрономии, Пушкино, 17-19 апреля (2012).
8. Наблюдательные проявления эволюции звезд, Нижний Архыз, 15-19 октября (2012).

Выступления на конференциях молодых ученых Института астрономии РАН (2011, 2012) и астрофизических семинарах:

1. Семинар ГАИШ МГУ по звездной астрономии (13.02.2013).
2. Семинар отдела Внегалактической астрономии ГАИШ МГУ (29.04.2010, 30.03.2011).
3. Объединенный семинар Института астрономии РАН (22.04.2010, 29.11.2012).

Работа по реализации параллельных технологий и использованию суперкомпьютеров, описанная в Главе 1, получила Специальный приз от суперкомпьютерной программы «СКИФ-ГРИД» на конкурсе Intel-РОСНАНО (Хоперсков С.А., Засов А.В., Тюрина Н.В. «Применение высокопроизводительных вычислений при моделировании мелкомасштабных структур газовых подсистем спиральных галактик», Москва, 2010 г.).

Личный вклад автора в совместных работах

По теме диссертации опубликовано 19 работ. Из них 8 опубликовано в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором. Соискатель в равной степени с другими соавторами участвовал в постановке задач, имея определяющую роль на этапах разработки методов, их тестирования, проведения расчетов, получения и представления результатов и выводов.

Разработаны численные газодинамические алгоритмы, описанные в диссертации. Адаптирован алгоритм TreeCode для расчетов газодинамических и гибридных N -body / газодинамических моделей. Реализованы параллельные OpenMP и MPI алгоритмы. Подавляющая часть численных экспериментов была проведена диссертантом с использованием суперкомпьютеров НИВЦ МГУ («Чебышев» и «Ломоносов»).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 223 страницы, включая 69 рисунков, 4 таблицы и 4 приложения. Библиография включает 336 наименований на 38 страницах.

Основное содержание работы

Во **Введении** обсуждается актуальность работы, цели и задачи исследования, научная новизна, научная и практическая ценность полученных результатов. Также формулируются основные результаты и положения, выносимые на защиту, и приводится список работ, в которых опубликованы основные результаты диссертации.

Первая глава посвящена описанию базовых идей численных алгоритмов, лежащих в основе численных экспериментов. В параграфе 1.1 обсуждается методика построения численной газодинамической схемы типа Годунова, описывается приближенный метод решения задачи Римана для уравнений газовой динамики. В параграфе 1.2 приведены уравнения Гамильтона, описывающие динамику системы гравитационно взаимодействующих N -тел. Кроме того рассмотрены два наиболее распространенных подхода к решению уравнения Пуассона: с помощью быстрого дискретного преобразования Фурье и метод, основанный на иерархическом алгоритме TreeCode. Обсуждаются особенности метода объединения газодинамических и N -body моделей. В параграфе 1.3 дано описание использованных в работе методов распараллеливания газодинамического алгоритма, рассмотренного выше в параграфе 1.1. Приведены результаты тестирования эффективности численного кода для различных постановок задач на суперкомпьютере «Чебышев» (НИВЦ МГУ). Показано, что наиболее эффективное использование вычислительных мощностей достигается в случае трехмерной декомпозиции расчетной области и максимальном учете факторов в МЗС. При этом эффективность достигает 70% при расчетах на 200 потоках.

Во **второй главе** исследованы динамические процессы в газовой компоненте дисковых галактик, связанные с проявлением спиральной волны плотности и галактической ударной волны (ГУВ). В параграфе 2.1 приведен краткий обзор современных представле-

ний о структуре и наблюдаемых свойствах ГУВ. В п. 2.2.1 собраны многочисленные наблюдаемые свидетельства спрямленных сегментов спиральных рукавов внешних галактик — так называемых полигональных структур (ПС) [21]. К настоящему моменту известно более 200 спиральных галактик, обладающих такой особенностью. Причем полигональные структуры получены как в галактиках типа «grand-design» (например, NGC 5194), так и во взаимодействующих галактиках (NGC 1512), а также в галактиках с флоккулентной спиральной структурой (M 101). В п. 2.2.2 построена газодинамическая модель формирования полигональных структур. Показано, что этот феномен связан с неустойчивостью ударной волны, которая на мелких масштабах проявляется в виде гофрировочной неустойчивости. Определены параметры способствующие развитию ПС. В п. 2.2.3 проведено сравнение наблюдаемых параметров ПС, с полученными в численных экспериментах. В параграфе 2.3 изучены наиболее актуальные, с точки зрения динамической эволюции Галактики, физические характеристики молекулярных облаков. В п. 2.4.1 построена многокомпонентная химико-динамическая модель образования ГМО с учетом внешнего поля Галактики, самогравитации, тепловой структуры газа и химической кинетики молекулярного водорода. В п. 2.4.2 обсуждаются закономерности распределения физических параметров ГМО по результатам численных экспериментов: распределение облаков по массам, соотношение «масса-размер» и дисперсия скоростей газа. В п. 2.4.3 приводится обоснование идеи, об отсутствии материальной кольцевой структуры в диске Галактики на расстоянии 3–5 кпк от центра. Анализ синтетических карт «лучевая скорость — галактическая долгота» для молекулярного газа обнаруживает особенность, часто интерпретируемую как «Молекулярное кольцо», однако кольцевой структуры в диске не наблюдается. В тоже время нейтральный в построенных в работе моделях газ более равномерно заполняет галактических диск.

Третья глава посвящена изучению феномена и механизмов образования галактической спиральной структуры. В параграфе 3.1 описаны современные представления о процессе формирования и устойчивости спиральной структуры в дисковых галактиках за счет внутренних факторов без учета приливных сил. Обсуждаются доводы в пользу модальной природы и длительного, в тече-

ние миллиардов лет, времени существования спирального узора со слабо меняющейся морфологией. В п. 3.1.1 рассмотрена спиральная галактика NGC 5247 и на ее примере изучено формирование спиральных волн за счет гравитационной неустойчивости глобальных спиральных мод. В п. 3.1.2 сравниваются результаты линейного анализа устойчивости гравитирующего диска в гидродинамическом приближении с эволюцией нелинейных газодинамических расчетов. В п. 3.1.3 обсуждаются результаты численных N -body и N -body/газодинамических экспериментов, подтверждающих возможность продолжительного времени жизни спирального узора, формирующегося на нелинейной стадии развития неустойчивой моды. Пункт 3.1.4 посвящен изучению влияния газовой компоненты на время существования крупномасштабного регулярного спирального узора типа «grand design». Численные эксперименты указывают на увеличение времени жизни спиралей в несколько раз в самосогласованном звездно-газовом диске. Дальнейшая часть главы (параграф 3.2) посвящена исследованию динамики дисковых подсистем в гравитационном потенциале массивного неосесимметричного темного гало. Основной упор сделан на изучение механизмов генерации спиральных узоров и физических свойств формирующихся спиральных волн. В п. 3.2.1 проанализированы многочисленные факты, подтверждающие наличие массивного темного гало в галактиках. В п. 3.2.2 подробно рассмотрены различные наблюдательные и теоретические указания на триаксиальный характер распределения темной материи внутри сферы 1 – 3 оптических радиуса галактики. Собраны оценки параметров трехосности, полученные различными методами на основе космологических моделей и наблюдаемых свойств галактических структур (полярные кольца, изгибы газовых и пылевых дисков, их утолщения, приливные потоки, карликовые спутники, гипербыстрые звезды и др.).

Рассмотрена гипотеза о том, что неосесимметричность (триаксиальность) темного гало может быть ответственна за формирование спиральных структур в галактических дисках по крайней мере у части галактик. Пункт 3.2.3 содержит в себя описание моделей звездных и газовых дисков в поле трехосного гало и базовых параметров, определяющих ход эволюции систем. В п. 3.2.4 и п. 3.2.5 приведены результаты расчетов динамики газовых и звездных систем соответственно. Главным результатом является вывод о неиз-

бежном формировании долгоживущего спирального узора в галактических звездных и газовых дисках. Отличительной особенностью возникающего спирального узора является его нестационарный характер, что проявляется, в частности, в нестационарном и нетвердотельном вращении волны плотности. Параметры вращения спиралей испытывают квазипериодические изменения. В п. 3.2.6 обсуждается механизм нестационарности спирального узора в неосесимметричном гравитационном поле темного гало. Описываются перспективы использования этой особенности для измерения параметров формы гало реальных галактик. В п. 3.2.7 изучены эффекты, возникающие при взаимодействии спирального узора с динамическим темным гало. В частности, рассмотрен процесс изменения параметров формы гало в результате динамической эволюции. Показано, что перераспределение энергии между гало и спиральными волнами приводит к сферизации гало в центральной области с сохранением основных особенностей спиралей структуры в диске.

В четвертой главе в рамках численных экспериментов изучены процессы образования дисковой галактики и эффекты взаимодействия видимого вещества (газа и звезд) со скрытой компонентой галактики в результате динамической эволюции галактического диска. В параграфе 4.1 обсуждаются ключевые проблемы теории формирования галактик в рамках современной Λ CDM концепции. Особое внимание здесь уделено проблеме центрального каспа плотности темной материи. В параграфе 4.2 построена модель с учетом основных физических факторов, необходимых для изучения долговременной эволюции дисковой галактики. В параграфе 4.3 рассмотрены различные сценарии эволюции темного вещества под действием барионной компоненты. Детально рассмотрен процесс трансформации профиля темной материи при учете процессов звездообразования и звездной эволюции в центре галактического диска. В качестве главного результата исследования выделим полученный эффект сглаживания профиля плотности темного вещества в модели с учетом звездообразования и звездной эволюции, по сравнению с расчетами, основанными только на моделях N -тел. Таким образом для дисковых галактик именно звездообразование и эволюция звезд приводит к эффективному оттоку вещества (в том числе темного) из центральной области галактического диска, и, как следствие, к сглаживанию каспа плотности ТМ.

В **Заключении** перечислены основные результаты диссертации.

В **Приложении А** приведены основные тесты для численной газодинамической схемы типа TVD MUSCL, реализованной в рамках диссертации и использованной для решения поставленных задач. Помимо стандартной задачи о распаде произвольного скачка давления, большое внимание уделено тестированию адекватности описания процесса распространения газа в вакуум. Продемонстрирована универсальность реализованной схемы и сохранение позитивности при решении задачи о взрыве в вакууме. Кроме того рассмотрена эволюция начального состояния, приводящего к развитию неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. В **Приложении Б** приведена модель гравитационного потенциала Галактики, использованная при химико-динамических расчетах формирования облачной структуры. Описан вклад темного гало, балджа и звездного диска в кривую вращения, а также определены параметры спирального четырех-рукавного потенциала. В **Приложении В** перечислены процессы нагрева и охлаждения в модели газовой компоненты Галактики, необходимые для адекватного моделирования двухфазной среды. В **Приложении Г** описана методика построения равновесного начального состояния для звездного и звездно-газового галактических дисков на основе совместного решения уравнений Джинса и Пуассона.

Цитированная литература

1. Bouwens R. J., Illingworth G. D., Franx M., Ford H. $z \sim 7-10$ Galaxies in the HUDF and GOODS Fields: UV Luminosity Functions // *Astrophys. J.* 2008. Vol. 686. Pp. 230–250.
2. Klypin A., Kravtsov A. V., Valenzuela O., Prada F. Where Are the Missing Galactic Satellites? // *Astrophys. J.* 1999. Vol. 522. Pp. 82–92.
3. 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. Pp. 731–745.

4. Athanassoula E. Bar-Halo Interaction and Bar Growth // [Astrophys. J. Let.](#) 2002. Vol. 569. Pp. L83–L86.
5. Bekki K., Freeman K. C. Extended H I Spiral Structure and the Figure Rotation of Triaxial Dark Halos // [Astrophys. J. Let.](#) 2002. Vol. 574. Pp. L21–L24.
6. Minchev I., Famaey B., Quillen A. C. et al. Evolution of galactic discs: multiple patterns, radial migration, and disc outskirts // [Astron. and Astrophys.](#) 2012. Vol. 548. Pp. 126–149.
7. Roškar R., Debattista V. P., Quinn T. R. et al. Riding the Spiral Waves: Implications of Stellar Migration for the Properties of Galactic Disks // [Astrophys. J. Let.](#) 2008. Vol. 684. Pp. L79–L82.
8. de Avillez M. A., Mac Low M.-M. Mixing Timescales in a Supernova-driven Interstellar Medium // [Astrophys. J.](#) 2002. Vol. 581. Pp. 1047–1060.
9. Abadi M. G., Navarro J. F., Fardal M. et al. Galaxy-induced transformation of dark matter haloes // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2010. Vol. 407. Pp. 435–446.
10. Athanassoula E., Bosma A., Papaioannou S. Halo parameters of spiral galaxies // [Astron. and Astrophys.](#) 1987. Vol. 179. Pp. 23–40.
11. Bournaud F., Duc P.-A., Masset F. The large extent of dark matter haloes probed by the formation of tidal dwarf galaxies // [Astron. and Astrophys.](#) 2003. Vol. 411. Pp. L469–L472.
12. Snaith O. N., Gibson B. K., Brook C. B. et al. The halo shape and evolution of polar disc galaxies // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2012. Vol. 425. Pp. 1967–1979.
13. Minchev I., Quillen A. C. Radial heating of a galactic disc by multiple spiral density waves // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2006. Vol. 368. Pp. 623–636.
14. Sil’chenko O. K., Proshina I. S., Shulga A. P., Kuposov S. E. Ages and abundances in large-scale stellar discs of nearby S0 galaxies // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2012. Vol. 427. Pp. 790–805.

15. Sellwood J. A. The lifetimes of spiral patterns in disc galaxies // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2011. Vol. 410. Pp. 1637–1646.
16. Dambis A. K., Mel’Nik A. M., Rastorguev A. S. Trigonometric Parallaxes and a Kinematically Adjusted Distance Scale for OB Associations // [Astronomy Letters](#). 2001. Vol. 27. Pp. 58–64.
17. Dambis A. K., Mel’Nik A. M., Rastorguev A. S. Rotation curve of the system of classical Cepheids and the distance to the galactic center // [Astronomy Letters](#). 1995. Vol. 21. Pp. 291–307.
18. Bobylev V. V., Bajkova A. T. Galactic parameters from masers with trigonometric parallaxes // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2010. Vol. 408. Pp. 1788–1795.
19. Vallée J. P. The Spiral Arms and Interarm Separation of the Milky Way: An Updated Statistical Study // [Astron. J.](#) 2005. Vol. 130. Pp. 569–575.
20. Dobbs C. L., Burkert A. The myth of the molecular ring // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2012. Vol. 421. Pp. 2940–2946.
21. Chernin A. D., Zasov A. V., Arkhipova V. P., Kravtsova A. S. Vorontsov-Velyaminov Rows: Straight Segments in the Spiral Arms of Galaxies // [Astronomy Letters](#). 2000. Vol. 26. Pp. 285–296.