

На правах рукописи

Марчук Александр Александрович

**ДИНАМИЧЕСКИЙ СТАТУС ГАЗОВЫХ ДИСКОВ
СПИРАЛЬНЫХ ГАЛАКТИК С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ КРИТЕРИЯ
ДВУХЖИДКОСТНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ**

Специальность 01.03.02 —
«Астрофизика и звездная астрономия»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2018

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Сотникова Наталья Яковлевна

Официальные оппоненты: **Сильченко Ольга Касьяновна**,
доктор физико-математических наук,
Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга МГУ имени М.В. Ломоносова,
заведующая отделом физики эмиссионных звезд и галактик ГАИШ МГУ

Хоперсков Александр Валентинович,
доктор физико-математических наук, профессор,
Волгоградский государственный университет,
Институт математики и информационных технологий,
заведующий кафедрой Информационных систем и компьютерного моделирования

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук»

Защита состоится 19 июня 2018 года в 15 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.232.15 на базе Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., д. 28, ауд. 405 (Математико-механический факультет).

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 <https://disser.spbu.ru/files/disser2/disser/fXKV7WzvvqL.pdf>

Автореферат разослан «__» _____ 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. физ.-мат. наук

Юлия Владимировна Миланова

Общая характеристика работы

Галактики являются сложными по структуре системами, в которых происходит множество процессов. Одна из самых протяженных подсистем галактик это газовые диски. При этом физическое состояние газовых дисков (плотность, температура, прозрачность) определяет темп крупномасштабного звездообразования. Указанная связь между состоянием газа и темпом звездообразования лежит в основе большинства моделей эволюции и формирования галактик.

Крупномасштабное звездообразование в галактиках детектируется по большому количеству молодых звезд высокой светимости. Показатели цвета таких галактик более голубые, в них наблюдается большое количество ярких областей ионизованного водорода HII, которые распознаются по излучению в спектральной линии H α . Современный средний темп звездообразования в нашей Галактике оценивается в 3—5 M_{\odot} год $^{-1}$. Эта величина сильно варьируется вдоль хаббловской последовательности: она меньше для галактик ранних типов и возрастает для галактик поздних типов.

Впервые механизм образования новых звезд в однородной газовой среде был объяснен Джинсом в классической работе 1902 года. Согласно схеме Джинса звезды рождаются в газовых облаках, коллапсирующих под действием гравитационной (джинсовской) неустойчивости. Джинсовский механизм запускается возмущениями, амплитуда которых зависит от времени и может для выделенных масс облаков нарастать экспоненциально. Джинсовская неустойчивость работает как в пределах отдельного газового облака, так и в пределах всей галактики.

Непосредственно из наблюдений многими авторами отмечалась связь между темпом крупномасштабного звездообразования и количеством газа в газовом галактическом диске. Очень долгое время темп крупномасштабного звездообразования описывался эмпирическим законом Шмидта, полученным им в 1959 году [1] в форме $\frac{dM_s}{dt} \propto (\Sigma_g)^d$, где M_s — масса звезд, Σ_g — поверхностная плотность газа, $d \approx 2$.

В 1965 году Голдрейх и Линден-Белл в работе [2] исследовали устойчивость галактического газового диска. Ими было найдено, что для простого осесимметричного диска критерий его устойчивости можно сформулировать в форме $Q > 1$, где Q — безразмерный параметр, учитывающий вращение, температуру и плотность газового диска. Этот критерий называется одножидкостным или простым одножидкостным критерием. Кенникатт в работе 1989 года [3] исследовал закон Шмидта для большой выборки галактик. Для тех областей галактик, в которых газа много, он получил показатель степени $d \approx 1.3$. Однако гораздо более важным результатом была продемонстрированная связь между звездообразованием и неустойчивостью газового диска согласно критерию, предложенному в 1965 году. Было показано, что радиус области, где найденный эмпирический закон Шмидта выполняется и где наблюдается значительное звездообразование, совпадает с радиусом области, неустойчивой с точки зрения модифицированного одножидкостного критерия $Q < 1.5$. Кенникатт

дал физическое обоснование такой модификации. Поскольку классический одножидкостный критерий применим только для осесимметричных возмущений, но в диске всегда присутствуют возмущения и других мод (неосесимметричные), диску нужно иметь большой запас прочности, чтобы оставаться устойчивым, то есть эмпирически полученная модификация исправляет одножидкостный критерий за возмущения других мод.

Таким образом, в работе [3] впервые на основе наблюдательных данных был физически обоснован механизм крупномасштабного звездообразования и объяснена связь темпа звездообразования с поверхностной плотностью газа. В последующем полученная пороговая связь между темпом звездообразования и гравитационной неустойчивостью газового диска неоднократно исследовалась и подтверждалась во многих работах [4].

Полученный в работе [3] критерий гравитационной неустойчивости хорошо работает для объяснения наблюдаемого звездообразования в центральных областях и для тех мест в галактике, где имеется большое количество межзвездного газа. Однако для примерно половины исследованных галактик в [4] простой одножидкостный критерий не может служить объяснением наблюдаемого на периферии и во внешних газовых кольцах крупномасштабного звездообразования через механизм гравитационной неустойчивости. Одна из причин этого заключается в том, что газовый диск должен рассматриваться совместно с звездным диском. В статье Джог и Соломона 1984 года [5] было продемонстрировано, как именно присутствие звездного диска может изменять динамическое состояние газового диска, делая его заметно менее устойчивым в некоторых случаях. Обновленный критерий гравитационной неустойчивости называется двухжидкостным, поскольку для описания звездного диска в [5] использовались гидродинамические уравнения. В наиболее корректной форме с использованием бесстолкновительного уравнения Больцмана критерий был рассмотрен в работе Рафикова 2001 года [6] и там же были найдены решения.

Несмотря на большое число работ, посвященных исследованию динамического статуса дисков в галактиках и его связи с звездообразованием, многие существенные детали процесса все еще не ясны. Так, нет согласия относительно исправления гравитационного критерия за неосесимметричные возмущения и относительно предсказательной силы критерия в целом. Причин этому несколько. Основная из них связана с отсутствием необходимых наблюдательных данных, сложностью их получения и замещением их не всегда обоснованными предположениями, а также вытекающим отсюда отсутствием корректной проверки моделей на примере реальных галактик. Данная работа посвящена исследованию и решению этих вопросов.

Актуальность темы. Для корректного анализа гравитационной неустойчивости важное значение имеет информация о дисперсии скоростей звезд в диске галактики, поскольку величина дисперсии скоростей в радиальном направлении определяет запас устойчивости диска относительно возмущений в его плоскости, а в вертикальном — толщину диска и степень его «динамического» разогрева в

вертикальном направлении. К сожалению, прямым измерениям так называемый эллипсоид скоростей доступен только в непосредственной окрестности Солнца. Для внешних галактик его приходится восстанавливать косвенным образом из спектральных данных о звездах. Было предложено несколько методик восстановления через параметризацию профилей дисперсии скоростей [7, 8, 9, 10], с использованием уравнения асимметричного сдвига [11, 12], а также с помощью N -body моделирования и последующего построения маргинально устойчивых моделей дисков, наилучшим образом приближающих спектральные данные [13]. К сожалению, проведенный в этих работах анализ использует большое количество предположений, а иногда и вовсе является некорректным. Поэтому для правильного анализа динамического статуса диска необходимо дополнительное исследование возможности восстановления компонент эллипсоида скоростей в изучаемых галактиках. Данный вопрос обсуждается в Главе 1 диссертации.

Вторым важным моментом является постоянный рост количества и качества наблюдательных данных в больших обзорах неба. Современные интегральные обзоры позволяют исследовать области за пределами центров галактик, в которых обычно много газа и простого одножидкостного гравитационного критерия неустойчивости достаточно для определения динамического статуса диска. К тому же в центральных частях велико влияние балджа, что делает некоторые предположения некорректными. Использование большого количества обзоров позволяет найти объекты, для которых возможно перейти от одномерных азимутально усредненных данных или данных, полученных вдоль одной оси, к анализу полного распределения параметра неустойчивости Q в плоскости галактики. Рассмотрению одного такого случая применительно к галактике NGC 628 посвящена Глава 3 диссертации. Штучно в нескольких работах такие галактики исследовались и ранее, например Большое Магелланово Облако в [14], но результаты и использованные предположения не позволяют сделать на их основе сколько-нибудь однозначные выводы.

В остальных случаях, где не удается найти двумерные данные, для анализа гравитационной неустойчивости приходится использовать наблюдения вдоль одной из осей диска. Доступные для большого числа галактик, такие данные позволяют накопить статистику и используются в подавляющем числе работ. Однако существенным является также форма используемого критерия и сделанные предположения. Так, очень часто применяются приближенные решения, в том числе обладающие плохой точностью, вместо прямого решения дисперсионного уравнения. Во многих работах не учитывается возмущающее влияние звездного диска. Делаются неоднозначные предположения о форме эллипсоида скоростей и толщине диска. Все это значительно влияет на выводы о динамическом статусе дисков галактик, приводя к противоречивым результатам. Более корректному проведению анализа неустойчивости на основе данных вдоль большой оси для 7 спиральных галактик посвящена Глава 2 диссертации.

Исследуемый гравитационный критерий и его модификации, помимо определения динамического статуса газовых дисков в спиральных галактиках,

имеет большое количество других астрофизических приложений. Он может быть использован для анализа карликовых галактик и галактик-спутников без регулярной структуры, для исследования газовых колец [12] и изучения протопланетных дисков [15]. Интересными также представляются возможности изучения с его помощью вопроса о угловом моменте галактики [16], проверка численных N -body моделей галактик и получение недостающих данных на основе наблюдений областей звездообразования.

Данная работа дает возможность расширить и уточнить сложившуюся картину роли влияния гравитационной неустойчивости на динамический статус газовых дисков. Проведенное исследование с возможно большей точностью позволяет проверить влияние звезд на устойчивость относительно далеких областей галактик и прояснить связь темпа крупномасштабного звездообразования и плотности газа в диске, тем самым помогая уточнить фундаментальные модели формирования и эволюции галактик.

Целью диссертационной работы является исследование динамического статуса галактических газовых дисков с точки зрения критерия двухжидкостной (звездно-газовой) гравитационной неустойчивости для ряда конкретных галактик с использованием наиболее полных наблюдательных данных и поиск связи между неустойчивыми областями и областями крупномасштабного звездообразования.

Для достижения поставленной цели в диссертации выполняются следующие задачи:

1. Исследование методов восстановления трех компонент эллипсоида скоростей по спектральным данным, полученным вдоль луча зрения. Выбор и программная реализация наилучшего метода. Анализ ошибок и ограничений метода. Применение выбранного метода к ряду конкретных галактик.
2. Составление выборки галактик, для которых в литературе имеются наиболее полные и протяженные профили данных по звездной фотометрии и декомпозиции на подсистемы, спектральные данные, касающиеся звезд, профили данных по распределению и кинематике атомарного и молекулярного газа, а также данные по распределению областей звездообразования. Поиск объектов со всеми необходимыми данными, представленными на двумерных картах.
3. Применение критерия звездно-газовой гравитационной неустойчивости в наиболее корректной его форме к галактикам из составленной выборки. Поиск связи между неустойчивыми областями в дисках галактик и областями звездообразования, включая объекты, для которых имеются подробные двумерные карты данных.
4. Исследование влияния ошибок наблюдательных данных и неопределенностей, связанных с рядом предположений задачи, на параметры неустойчивости дисков.

5. Анализ полученных результатов и выводы относительно величины поправки за неосесимметричные возмущения в критерии гравитационной неустойчивости.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- 1.1 Предложен *новый* непараметрический метод восстановления эллипсоида скоростей звезд (SVE) в дисковых галактиках, требующий выполнения всего одного из использовавшихся ранее в литературе предположений, а именно отношение дисперсии скоростей звезд в вертикальном направлении к дисперсии скоростей в радиальном направлении $\sigma_z/\sigma_R = \text{const}$ на всем промежутке данных, или на отдельных отрезках.
- 1.2 *Новый* метод восстановления SVE был применен к четырем галактикам раннего типа, для которых ранее это не делалось.
- 1.3 Для галактики NGC 1167 с небольшим углом наклона профили дисперсии скоростей в трех направлениях восстановлены в широком диапазоне расстояний на двух участках и *впервые* на основе анализа наблюдательных данных показано, что во внутренних областях отношение σ_z/σ_R больше, чем во внешних.
- 1.4 Для трех остальных дисковых галактик с большими углами наклона (NGC 338, NGC 3245 и NGC 4150) показано, что самосогласованное решение для всех трех направлений найти принципиально невозможно; зато на примере галактики NGC 338 продемонстрировано, что для таких галактик информация о дисперсии скоростей звезд в радиальном направлении может быть напрямую извлечена из профилей дисперсий скоростей вдоль луча зрения.
- 2.1 Критерий звездно-газовой гравитационной неустойчивости в точной его форме *впервые* применен к наиболее полным наблюдательным данным вдоль большой оси, собранным для 7 спиральных галактик ранних типов. Данные включали в себя извлеченные из кинематики вдоль луча зрения профили дисперсии скоростей в радиальном направлении.
- 2.2 *Впервые* наиболее полно проанализировано влияние ошибок наблюдений и неопределенностей предположений задачи на уровень неустойчивости газового диска галактики.
- 2.3 Показано, что звездно-газовый критерий гравитационной неустойчивости слабо отличается от одножидкостного (газового) критерия в случае, когда газа в диске галактики много и для объяснения звездообразования достаточно простого одножидкостного критерия (случай галактики NGC 338).
- 2.4 Показано, что звездно-газовый критерий позволяет объяснить звездообразование там, где простой критерий дает устойчивый газовый диск. Существенным это оказывается для галактик NGC 1167 и NGC 3898.
- 2.5 Для галактики NGC 1167 с умеренным темпом звездообразования *впервые* показано, что неустойчивость ее газового диска практически

полностью определяется влиянием звездного диска. Эта уникальная галактика с массивным звездным диском является вторым примером подобной галактики в литературе и первым примером, найденным без использования приближенных решений.

- 2.6 Для исследованных 7 галактик получен порог неустойчивости при учете неосесимметричных возмущений в двухжидкостном гравитационном критерии, выражаемый неравенством для безразмерного эффективного параметра Тумре $Q_{\text{eff}} < 1.5 - 2.5$.
- 3.1 Критерий звездно-газовой неустойчивости был применен к галактике NGC 628. Для этой галактики *впервые* вместо использования азимутально усредненных профилей для одной и той же области галактики с заметным звездообразованием исследовались совмещенные по координатам двумерные карты поверхностной плотности газа (THINGS, HERACLES), дисперсий скоростей звезд (VENGA) и газа (THINGS), а также карта поверхностной яркости в ИК диапазоне (S4G). Для каждого пикселя в исследуемой области вычислены величины Q_{eff} .
- 3.2 Положение неустойчивых областей с $Q_{\text{eff}} < 3$ сравнивалось с положением областей звездообразования ($\Sigma_{\text{SFR}} > 0.007 M_{\odot} \text{ год}^{-1} \text{ кпк}^{-2}$). Проведенное сравнение показало очень хорошее согласие между ними. Такой результат на основе всей полноты наблюдательных данных получен *впервые* и имеет важное научное значение, так как заново открывает дискуссию о тесной связи между гравитационной неустойчивостью и звездообразованием.
- 3.3 Учет влияния эффекта толщины газового и звездного дисков в трехкомпонентной версии приближенного критерия гравитационной неустойчивости не изменил полученные выводы.
- 3.4 Показано, что использование простого одножидкостного критерия дает заметно худшее согласие между неустойчивыми областями и областями звездообразования.
- 3.5 Проанализированы азимутально усредненные данные для этой галактики и сделан вывод, что их использование ведет к заключению об устойчивом диске, что не позволяет предсказывать положение областей звездообразования. Вывод сделан *впервые*.
- 3.6 Поскольку в галактиках распределение водорода и областей рождения новых звезд зачастую клочковатое, связь между критерием гравитационной неустойчивости и звездообразованием должна исследоваться с использованием двумерных карт вместо азимутально усредненных данных. Этот вывод сделан *впервые*.

Научная и практическая ценность работы.

Ценность результатов диссертации складывается из нескольких факторов.

Во-первых, были разработаны и программно реализованы методы восстановления компонент эллипсоида скоростей дисковых галактик по спектральным данным, полученным вдоль луча зрения, а также методы анализа динамического

статуса звездных дисков на основе звездно-газового критерия гравитационной неустойчивости применительно как к азимутально усредненным данным, так и к двумерным картам. Эти методы дополняют существующие методы анализа и могут быть использованы в других работах. Их реализация находится в свободном доступе.

Во-вторых, получены новые результаты относительно устройства эллипсоида скоростей в конкретных галактиках. Для галактики NGC 1167 вывод о том, что отношение σ_z/σ_R не постоянно вдоль диска имеет важное значение для теории формирования дисков галактик и построения равновесных звездодинамических моделей дисков.

В-третьих, выводы об уровне гравитационной неустойчивости в дисках галактик важны для понимания механизма регулирования крупномасштабного звездообразования. Для галактики NGC 1167 вывод о том, что именно звездный диск определяет неустойчивость газового диска, может служить ключом для решения задачи о звездообразовании при низких поверхностных плотностях газа.

В-четвертых, на основе анализа двумерных карт для галактики NGC 628 показано, что критерий гравитационной неустойчивости обладает предсказательной силой — он почти точно указывает положение областей текущего звездообразования. Это, с одной стороны, углубляет выводы, имеющиеся в литературе, касательно связи между неустойчивостью и звездообразованием, а, с другой — показывает, как надо изменять методику исследований в этой области.

Новые данные будут востребованы для реконструкции компонент дисперсии скоростей в дисковых галактиках на основе наблюдательных данных. Это, в свою очередь, позволит делать корректные выводы о динамическом статусе дисков галактик. Последнее важно для понимания эволюции дисков, их структуры и механизмов звездообразования.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методы и алгоритмы восстановления эллипсоида скоростей звезд (SVE) в дисковых галактиках по кинематическим данным вдоль луча зрения, а также методы диагностики динамического статуса галактических дисков на основе всей совокупности фотометрических и спектральных данных для газа и звезд; их численная реализация.
2. Метод восстановления SVE применен к четырем галактикам раннего типа. Для галактики NGC 1167 профили дисперсии скоростей в трех направлениях восстановлены в широком диапазоне расстояний на двух участках и *впервые* на основе анализа наблюдательных данных показано, что во внутренних областях отношение σ_z/σ_R больше, чем во внешних.
3. Критерий двухкомпонентной неустойчивости в точной его форме *впервые* применен к наиболее полным наблюдательным данным вдоль большой оси, собранным для 7 галактик раннего типа. Для галактики NGC 1167 *впервые* показано, что неустойчивость ее газового диска практически полностью определяется влиянием звездного диска.

4. Пересмотрен вывод о гравитационной устойчивости диска галактики NGC 628. Критерий двухкомпонентной гравитационной неустойчивости *впервые* применен ко *всем* картам фотометрических и спектральных данных. Показано, что положение гравитационно неустойчивых областей (с $Q_{\text{eff}} < 3$) практически полностью совпадают с областями звездообразования $\Sigma_{\text{SFR}} > 0.007 M_{\odot} \text{ год}^{-1} \text{ кпк}^{-2}$.

Достоверность. Достоверность полученных в диссертации результатов основывается на применении оттестированных, опробованных и хорошо зарекомендовавших себя методик обработки и анализа наблюдательных данных. В части новых методов достоверность результатов подтверждена тщательным исследованием ошибок и неопределенностей, а также анализом устойчивости полученных результатов методом Монте-Карло для многих тысяч реализаций наборов данных, полученных варьированием значений параметров задачи в пределах ошибок наблюдений.

Важными свидетельствами достоверности результатов является их соответствие результатам, полученным другими авторами для пересекающихся объектов; использование непротиворечивых моделей; публикация результатов в одном из престижных международных журналов — Monthly Notices of the Royal Astronomical Society; рецензии на статьи, подписанные Alessandro Romeo, одним из ведущих специалистов в мире по изучаемой тематике; а также апробация результатов на конференциях и семинарах.

Написанное программное обеспечение, используемые данные, приближения и подробное описание процесса получения всех результатов находятся в свободном доступе по адресу <https://github.com/Amarchuk/2FInstability> и могут быть воспроизведены любым желающим.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на семинаре астрономического отделения СПбГУ, на семинаре отдела небесной механики и динамической астрономии ГАО РАН, при защите ВКР в СПбГУ 28 июня 2016, на Всероссийской конференции «Актуальные проблемы внегалактической астрономии», ПРАО АКЦ ФИАН, Пушино, 18-21 апреля, 2017.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 3 печатных работах, 3 из которых изданы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

1. Marchuk A. A., Sotnikova N. Y., Reconstructing the velocity dispersion profiles from the line-of-sight kinematic data in disc galaxies // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2017. Vol. 465, no. 4. P. 4956-4967.
2. Marchuk A. A., Sotnikova N. Y., Two-component gravitational instability in spiral galaxies // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2018. Vol. 475, no. 4. P. 4891-4910.
3. Marchuk A. A., Gravitational instability and star formation in NGC 628 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2018. Vol. 476, no. 3. P. 3591–3599.

Личный вклад. В исследованиях, изложенных в первых двух работах [1,2], автор принимал активное участие в постановке задач, обсуждении, анализе данных, интерпретации полученных результатов и написании статей. Автор самостоятельно решил все методические вопросы; разработал алгоритмы для решения поставленных задач и программно их реализовал; обработал наблюдательные данные, полученные по запросу от держателей данных, и решил все уравнения.

Исследование, изложенное в третьей статье [3], выполнено автором самостоятельно, включая постановку задачи.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и двух приложений. Полный объём диссертации составляет 146 страниц, включая 38 рисунков и 4 таблицы. Список литературы содержит 205 наименований.

Содержание работы

Во **Введении** приводится краткая история темы исследования, описываются основные достигнутые результаты в области исследования связи гравитационной неустойчивости и звездообразования, обосновывается актуальность темы, научная новизна, цели и задачи диссертации, приводятся основные положения, выносимые на защиту, кратко представлено содержание диссертации.

В **Главе 1** описываются методы восстановления эллипсоида скоростей звезд в галактиках и представляется новая методика восстановления. В пункте 1.1 описываются достигнутые ранее результаты и их ограничения. В пункте 1.2 кратко приводятся основные необходимые уравнения. Пункт 1.3 посвящен описанию предлагаемого метода. В пункте 1.4 приводится описание 4 исследуемых галактик. Результаты восстановления для них и для одной контрольной галактики описываются в пункте 1.5. Пункт 1.6 посвящен обсуждению решений на краю допустимого диапазона значений. В пункте 1.7 описываются ограничения на параметры эллипсоида скоростей для галактик с большим углом наклона. В пункте 1.8 показан результат восстановления эллипсоида скоростей для галактики NGC 1167 с неравномерно нагретым диском. В пункте 1.9 перечислены основные выводы главы.

В **Главе 2** исследуются результаты применения двухжидкостного критерия гравитационной неустойчивости к данным вдоль большой оси галактик. В пункте 2.1 приводится описание достигнутых ранее результатов и их допущений. В параграфе 2.2.1 кратко дается описание теории для критерия двухжидкостной гравитационной неустойчивости в гидродинамическом приближении. В параграфе 2.2.2 описывается кинетическое приближение для этого же критерия. Параграф 2.2.3 посвящен теоретическим аспектам отказа от предположения о тонких дисках. В пункте 2.3 описываются источники данных для 7 галактик. Методам извлечения необходимых для анализа величин из данных посвящены

параграфы 2.4.1—2.4.4. Решение дисперсионного уравнения описывается в параграфе 2.4.5. В параграфе 2.5.1 обсуждаются найденные результаты для трех разных случаев. В параграфе 2.5.2 эти результаты сравниваются с трехкомпонентной референсной моделью, в которой все диски толстые. Параграф 2.5.3 посвящен исследованию влияния предположений и данных на величину ошибок. Сравнение полученных результатов с двумя общепринятыми приближенными решениями приводится в параграфе 2.5.4. В последнем параграфе 2.5.5 обсуждается величина поправки критерия за учет неосесимметричных возмущений. В пункте 2.6 перечислены основные выводы главы.

В **Главе 3** обсуждается переход в анализе от одномерных данных вдоль одной оси к исследованию полноценных двумерных карт галактик. В пункте 3.1 приводится краткое описание преимуществ такого перехода и обзор достигнутых результатов в этом направлении. Пункт 3.2 посвящен методу поиска подходящих для такого анализа галактик. Свойства галактики NGC 628 и основные особенности в методике и обработке данных для случая двумерных карт описываются в пункте 3.3. В пункте 3.4 обсуждаются полученные результаты для трех моделей, а параграф 3.4.1 посвящен обсуждению их ошибок. Сравнение с различными эмпирическими законами звездообразования приводится в параграфе 3.4.2. В параграфе 3.4.3 производится анализ влияния азимутального усреднения данных и пересмотр динамического статуса галактики. Последний параграф 3.4.4 посвящен поиску наилучшего согласия между областями, неустойчивыми с точки зрения гравитационного критерия, и очагами звездообразования. В пункте 3.5 перечислены основные выводы главы.

В **Заключении** перечислены все основные выводы исследования гравитационной неустойчивости, полученные в диссертационной работе.

В **Приложении А** приведено краткое описание галактик выборки из Главы 1.

В **Приложении Б** содержится краткое описание галактик выборки из Главы 2.

Список литературы

1. *Schmidt, M.* The Rate of Star Formation. / M. Schmidt // *ApJ*. 1959. Vol. 129. P. 243.
2. *Goldreich, P. I.* Gravitational stability of uniformly rotating disks / P. Goldreich, D. Lynden-Bell // *MNRAS*. 1965. Vol. 130. P. 97.
3. *Kennicutt Jr., R. C.* The star formation law in galactic disks / R. C. Kennicutt Jr. // *ApJ*. 1989. Vol. 344. P. 685—703.
4. *Martin, C. L.* Star Formation Thresholds in Galactic Disks / C. L. Martin, R. C. Kennicutt Jr. // *ApJ*. 2001. Vol. 555. P. 301—321.
5. *Jog, C. J.* Two-fluid gravitational instabilities in a galactic disk / C. J. Jog, P. M. Solomon // *ApJ*. 1984. Vol. 276. P. 114—126.

6. *Rafikov, R. R.* The local axisymmetric instability criterion in a thin, rotating, multicomponent disc / R. R. Rafikov // MNRAS. 2001. Vol. 323. P. 445–452.
7. *Gerssen, J.* The shape of the velocity ellipsoid in NGC 488 / J. Gerssen, K. Kuijken, M. R. Merrifield // MNRAS. 1997. Vol. 288. P. 618–622.
8. *Gerssen, J.* Disc heating in NGC 2985 / J. Gerssen, K. Kuijken, M. R. Merrifield // MNRAS. 2000. Vol. 317. P. 545–549.
9. *Shapiro, K. L.* Observational Constraints on Disk Heating as a Function of Hubble Type / K. L. Shapiro, J. Gerssen, R. P. van der Marel // AJ. 2003. Vol. 126. P. 2707–2716.
10. *Gerssen, J.* Disc heating agents across the Hubble sequence / J. Gerssen, K. Shapiro Griffin // MNRAS. 2012. Vol. 423. P. 2726–2735.
11. *Noordermeer, E.* Exploring disc galaxy dynamics using integral field unit data / E. Noordermeer, M. R. Merrifield, A. Aragón-Salamanca // MNRAS. 2008. Vol. 388. P. 1381–1393.
12. Large-scale nested stellar discs in NGC 7217 / O. K. Sil'chenko [et al.] // MNRAS. 2011. Vol. 414. P. 3645–3655.
13. Early-type disk galaxies: Structure and kinematics / A. V. Zasov [et al.] // Astronomy Reports. 2008. Vol. 52. P. 79–93.
14. Large-Scale Gravitational Instability and Star Formation in the Large Magellanic Cloud / C.-C. Yang [et al.] // ApJ. 2007. Vol. 671. P. 374–379.
15. *Müller, S.* On the Diversity in Mass and Orbital Radius of Giant Planets Formed via Disk Instability / S. Müller, R. Helled, L. Mayer // ApJ. 2018. Feb. Vol. 854. P. 112.
16. *Zasov, A. V.* HI content in galactic disks: The role of gravitational instability / A. V. Zasov, N. A. Zaitseva // Astronomy Letters. 2017. Vol. 43. P. 439–451.

Марчук Александр Александрович

ДИНАМИЧЕСКИЙ СТАТУС ГАЗОВЫХ ДИСКОВ СПИРАЛЬНЫХ ГАЛАКТИК С
ТОЧКИ ЗРЕНИЯ КРИТЕРИЯ ДВУХЖИДКОСТНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____