

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Специальная астрофизическая обсерватория
Российской академии наук

На правах рукописи
УДК 524.7-33; 524.7-8

Антипова Александра Викторовна

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЛАКТИК, ВИДИМЫХ С РЕБРА

Специальность 01.03.02 –
«Астрофизика и звёздная астрономия»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Архыз–2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук

Научный руководитель:

д.ф.-м.н., заведующий лабораторией внегалактической астрофизики и космологии САО РАН **Макаров Дмитрий Игоревич**

Официальные оппоненты:

д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой экспериментальной астрономии физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова **Расторгуев Алексей Сергеевич**

к.ф.-м.н., доцент кафедры астрофизики СПбГУ **Каратаева Гульнара Мирсатовна**

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им.П.Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва

Защита диссертации состоится " _ " октября 2022 года в " _ " часов на заседании диссертационного совета Д002.203.01 при САО РАН по адресу: 369167, КЧР, Зеленчукский район, пос. Нижний Архыз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан " _ " августа 2022 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Д002.203.01, к.ф.-м.н.

 Шолухова О.Н.

Актуальность исследования

К галактикам, видимым с ребра, относят объекты с углом наклона к лучу зрения близким к 90° . Их систематические исследования начались в 1970-х годах, хотя отдельные работы были опубликованы значительно раньше (например, [1, 2]).

Одним из наиболее важных преимуществ ориентированных таким образом галактик является возможность напрямую изучать их вертикальную структуру, однозначно раскладывая их на различные структурные компоненты. Это позволило открыть толстые диски галактик [3], выделить некоторые новые типы балджей, например, ящикообразные/арахисоподобные балджи (B/PS) [4]. По измерениям относительной толщины (отношение вертикальной и радиальной шкал) галактик, видимых с ребра на разных красных смещениях, были обнаружены свидетельства эволюции галактик в радиальном направлении [5], что согласуется с результатами численного моделирования [6, 7]. При анализе изображений видимых с ребра галактик легко выявляются такие детали, как искривление диска [8–10], полярные кольца [11], X-образные или ящикообразные структуры бара [12, 13].

Галактики, видимые с ребра, являются уникальными объектами для исследования, поскольку они устраняют связанную с углом наклона неопределенность, являющуюся одной из основных сложностей при решении целого ряда задач. Такая ориентация галактик позволяет повысить точность соотношения Талли-Фишера (например, [14]), которое часто используется для получения независимых оценок расстояний до галактик различных типов. Выборки видимых с ребра галактик имеют широкое применение при решении космологических задач, в частности их взаимодействия с различными элементами крупномасштабной структуры [15–17]. И это только часть огромного пласта информации, которая может быть получена из анализа кривых лучевых скоростей, светимостей, распределения спинов и вертикальной структуры галактик, видимых с ребра, что чрезвычайно важно для проверки существующих моделей образования и эволюции галактик.

Среди всех галактик, видимых с ребра, стоит отдельно выделить тонкие галактики, составляющие около $16 \pm 3\%$ от всех дисковых галактик [18]. Первое упоминание этого типа галактик встречаются в работах 50-х годов, в которых им было дано название «иглоподобных» [2]. Тонкими принято называть галактики с отношением большой и малой осей $a/b > 7$ в фильтре В [19, 20]. Объекты с еще большими отношениями осей ($a/b > 10$) называются ультратонкими галактиками. Первый комплексный поиск галактик таких типов был проведен Караченцевым И. Д. в 1989 году [21]. Тонкие и ультратонкие галактики являются галактиками поздних морфологических типов. Помимо большого отношения осей они выделяются отсутствием балджей или крайне малым их вкладом в полную светимость галактики $< 10\%$ [22]. Считается, что устойчивость дисков галактик с таким большим отношением осей обеспечивает довольно массивное гало темной материи [23, 24].

Несмотря на огромное количество работ, до сих пор существует множество нерешенных задач. Часть из них связана с проблемами теории формирования и эволюции галактик, другие восходят к общим проблемам космологических моделей. Например, моделирование эволюции галактических дисков в медленно растущем гало темной материи хорошо воспроизводит свойства многих галактик, например таких, как Млечный Путь [25, 26]. Однако, оно сталкивается со сложностями при воспроизведении безбалджевых галактик позднего типа, к которым относятся тонкие и ультратонкие галактики. Проблема усугубляется большим количеством малых слияний за время жизни галактики, которое предсказывается современными теориями формирования галактик, поскольку слияния разогревают диск и вызывают рост его толщины [27–29]. Продолжается дискуссия о размере темного гало тонких и ультратонких галактик: часть авторов указывает на его компактность [30–32], другие утверждают, что гало является протяженным [22, 33]. К проблемам космологических моделей можно отнести до сих пор не увенчавшиеся успехом попытки выявить связь между ориентациями дисков галактик и элементов крупномасштабной структуры с

достаточным уровнем значимости [15–17].

В настоящей работе используются различные подходы к исследованию видимых с ребра галактик, в том числе тонких и ультратонких галактик. В их основе лежит работа с крупными однородными выборками объектов, которые наиболее удобно формировать с использованием баз данных и обширных каталогов. Анализ параметров галактик из таких выборок позволяет строить статистически значимые закономерности, что может стать ключевым в поиске решений многих задач. В работе активно используются преимущества, которые дает ориентация видимых с ребра галактик, в частности, для проверки согласованности наблюдений с предсказаниями теории приливных взаимодействий галактик с крупномасштабной структурой Вселенной. Все это обуславливает актуальность данной диссертационной работы.

Цели и задачи

Целью данной работы является исследование в оптическом диапазоне галактик, видимыми под углами близко к 90° .

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Создать базу данных для изучения галактик, видимых с ребра.
2. Провести анализ данных нового каталога видимых с ребра галактик «The Edge-on Galaxies in the Pan-STARRS survey» (EGIPS).
3. Провести двумерную декомпозицию ультратонких галактик с применением двухкомпонентной модели (диск и балдж) по данным «Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System» (Pan-STARRS1) и провести поиск зависимостей между различными параметрами.
4. Проанализировать связь между ориентацией спинов тонких галактик из каталога «The Revised Flat Galaxy Catalog» (RFGC) и филаментами

крупномасштабной структуры Вселенной.

Научная новизна

Все результаты, полученные в ходе работы, являются новыми. В частности,

1. Создана специализированная база данных галактик, видимых с ребра, включающая функционал для классификации галактик по широкому набору параметров. На ее основе был создан новый каталог видимых с ребра галактик по данным обзора неба Pan-STARRS1 «The Edge-on Galaxies in the Pan-STARRS survey» (EGIPS), содержащий 16 551 объект.
2. Обнаружена корреляция между цветом и толщиной галактик, а также выявлены изменения функции распределения галактик по толщине в зависимости от цвета по данным фотометрии в пяти фильтрах (g, r, i, z, y), проведенной для всех галактик каталога EGIPS.
3. Впервые получены фотометрические параметры 148 ультратонких галактик с отношением осей $a/b > 10$ на основе двумерной декомпозиции, выполненной по изображениям Pan-STARRS1 в пяти фильтрах (g, r, i, z, y) с использованием двухкомпонентной модели, учитывающей вклады диска и балджа.
4. Впервые исследована корреляция положения осей вращения большой выборки тонких галактик, состоящей из 813 объектов каталога RFGC, по отношению к филаментам крупномасштабной структуры Вселенной.

Научная и практическая ценность

Представленная в диссертации база данных галактик «с ребра» предоставляет наиболее полный список галактик, спин (ось вращения) которых ориентирован почти перпендикулярно лучу зрения. Для этих галактик

имеется широкий набор параметров, благодаря которому можно исследовать статистические зависимости. Последнее может представлять интерес для многих областей исследования, что обеспечит востребованность созданной базы. База данных общедоступна и имеет интуитивно понятный интерфейс. На основе базы данных ведутся работы по созданию новых выборок галактик, видимых с ребра, их классификации и анализу их параметров. Большая коллекция новых данных позволяет проводить сравнение с результатами космологического моделирования.

В результате декомпозиции 148 ультратонких галактик получены общие фотометрические характеристики этих галактик (включая светимости), а также параметры их дисков и псевдобалджей. Видимые с ребра галактики являются традиционно сложными объектами для фотометрии и оценки их структурных параметров, которые требуют отдельного подхода с учетом специфики этих объектов, что было реализовано в данной работе. Полученные надежные результаты фотометрии и декомпозиции могут быть использованы для изучения вертикального распределения вещества в дисках галактик, а при анализе этих результатов совместно с кривыми вращения может быть получена информация о распределении светящейся и темной материи в этих галактиках.

Существует множество работ в которых проводились исследования ориентации галактик относительно крупномасштабной структуры Вселенной по наблюдательным данным, однако корреляции либо не видны, либо проявляются на уровне ниже 2σ . Проведенный в данной работе анализ крупных выборок видимых с ребра галактик (ориентация которых в пространстве может быть определена с очень высокой точностью) и филаментов позволил получить более жесткое ограничение 2.4σ , что приближает нас к обнаружению корреляции. Вполне вероятно, увеличение выборки объектов, чему будут способствовать созданная база данных и каталог, приведет к решению задачи и позволит согласовать результаты моделирования с данными наблюдений.

Основные положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. Разработана структура и интерфейс и создана база данных для изучения галактик, видимых с ребра, послужившая основой для нового каталога, включающего 16 551 объектов из обзора неба Pan-STARRS1. Анализ функции полноты показал, что каталог полон на уровне 96% для объектов со шкалой $a_r > 5.5''$, характеризующей размер галактик. Показано, что фотометрия галактик каталога, выполненная по изображениям Pan-STARRS1 с использованием программы SExtractor, обеспечивает надежные результаты в диапазоне видимых звездных величин $13.8^m < r < 17.4^m$ с точностью 0.05^m .
2. Обнаружено, что «красная последовательность» галактик на диаграмме «цвет – абсолютная звездная величина» населена толстыми галактиками с $(a/b)_g < 5$, тогда как в «голубом облаке» преобладают тонкие галактики. Ультратонкие галактики следуют общему распределению объектов в «голубом облаке». Обнаружено, что более тонкие галактики в среднем оказываются более голубыми. Функция распределения галактик по видимому сжатию выстраивается от красных к голубым галактикам, меняя тренд для наиболее голубых объектов. Галактики, видимые с ребра, оказываются систематически краснее, $(g - r) = 0.1^m$, общей популяции галактик, видимых под произвольными углами, что связано с внутренним поглощением в галактиках.
3. Измерены фотометрические параметры балджа и диска для 148 ультратонких галактик с $a/b > 10$ из каталога «The Revised Flat Galaxies Catalogue» (RFGC) по изображениям в пяти фильтрах обзора Pan-STARRS1. Показано, что Sd-галактики имеют более низкую поверхностную яркость и являются систематически более тонкими по сравнению с Sc-галактиками.
4. Выявлено отсутствие значимой корреляции направления оси враще-

ния галактик по отношению к филаментам крупномасштабной структуры Вселенной. Однако, заметна слабая тенденция к выравниванию на уровне 2σ . Наибольшая корреляция, на уровне 2.4σ , наблюдается для наиболее близких и ультратонких галактик ($z < 0.03$, $a/b > 10$).

Апробация результатов работы

Основные результаты работы были представлены на следующих российских и международных конференциях:

1. Международная конференция XXXth General Assembly of the International Astronomical Union (IAU GA), Австрия, Вена, 20-31.08.2018, «Orientation of the spins of thin galaxies», **Antipova A.**, Makarov D.
2. Международная конференция «Diversity of the Local Universe», Россия, Нижний Архыз, 30.09 - 04.10.2019, «Orientation of the spins of the edge-on galaxies relative to the filaments», **Antipova A.**, Makarov D.
3. Международная конференция European Astronomical Society Annual Meeting (EAS-2020), Нидерланды, Лейден, 29.06 - 03.07.2020; «Survey of kinematics of ultra-flat galaxies with Russian 6-meter telescope», **Антипова А.В.**, Мосенков А.В., Макаров Д.И., Решетников В.П.
4. Всероссийская конференция ВАК-2021 «Астрономия в эпоху многоканальных исследований», Россия, Москва, 23 - 28.08.2021, «База данных для изучения галактик, видимых с ребра», **Антипова А.В.**, Макаров Д.И.
5. Всероссийская конференция ВАК-2021 «Астрономия в эпоху многоканальных исследований», Россия, Москва, 23 - 28.08.2021, «Балдж-диск декомпозиция ультратонких галактик», **Антипова А.В.**, Мосенков А.В., Макаров Д.И., Решетников В.П.

6. Всероссийская конференция ВАК-2021 «Астрономия в эпоху многоканальных исследований», Россия, Москва, 23 - 28.08.2021, «Каталог галактик, видимых с ребра, по данным обзора Pan-STARRS1», Савченко С.С., Мосенков А.В., Бизяев Д.В., Решетников В.П., Тихоненко И.С., **Антипова А.В.**, Усачев П.А., Борисов С.Б., Макарова Л.Н., Kautsch S., Марчук А.А., Рубцов Е.В., Скрябина М.Н., Смирнова П.И.
7. Всероссийская конференция ВАК-2021 «Астрономия в эпоху многоканальных исследований», Россия, Москва, 23 - 28.08.2021, «Поиск галактик, видимых с ребра, в обзоре Pan-STARRS1», Савченко С.С., Макаров Д.И., Тихоненко И.С., Мосенков А.В., Решетников В.П., Марчук А.А., Макарова Л.Н., Усачев П.А., Бизяев Д.В., Борисов С.Б., **Антипова А.В.**
8. «Конкурс-конференция работ сотрудников САО - 2022 год», Россия, Нижний Архыз, 8.02.2022, «Галактики, видимые с ребра в обзоре Pan-STARRS (EGIPS) 2022», Макаров Д.И., Макарова Л.Н., **Антипова А.В.**

Публикации по теме диссертации

Материалы диссертации опубликованы в пяти работах. Основные результаты изложены в четырех работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК.

Статьи в рецензируемых научных изданиях:

1. **Antipova A.V.**, Makarov D.I., Bizyaev D.V. «Orientation of the Spins of Flat Galaxies Relative to Filaments of a Large-Scale Structure of the Universe», *Astrophysical Bulletin*, Volume 76, Issue 3, p. 248-254 (2021)
2. **Antipova A.V.**, Mosenkov A.V., Makarov D.I., Reshetnikov V.P. «Decomposition of Images of Ultra-Flat Galaxies», *Astrophysical Bulletin*, Volume 76, Issue 4, p. 358-366 (2021)

3. Makarov D.I., **Antipova A.V.** «Database for Studying Edge-on Galaxies», *Astrophysical Bulletin*, Volume 76, Issue 2, p. 218-227 (2021)
4. Makarov D., Savchenko S., Mosenkov A., Bizyaev D., Reshetnikov V., **Antipova A.**, Tikhonenko I., Usachev P., Borisov S., Makarova L., Kautsch S., Marchuk A., Rubtsov E. «The edge-on Galaxies in the Pan-STARRS survey (EGIPS)», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 511, Issue 2, p. 3063-3075 (2022)

Статьи по материалам конференций:

5. **Antipova A.V.**, Makarov D.I. «A Database for Studying Edge-On Galaxies», 2020, *Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century*, Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, Proceedings of the All-Russian Conference held 21-25 September, 2020 in Nizhny Arkhyz, Russia. Edited by I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, D. O. Kudryavtsev. p. 299-300 (2020)

Личный вклад автора

Все работы по определению ориентации галактик относительно филаментов крупномасштабной структуры Вселенной и анализу корреляций, а также фотометрия и декомпозиция ≈ 150 ультратонких галактик по изображениям Pan-STARRS в пяти фильтрах, анализ полученных данных и поиск зависимостей между параметрами выполнены автором диссертационной работы. Автором проведен статистический анализ данных каталога «The Edge-on Galaxies in the Pan-STARRS survey», построены диаграммы «цвет – абсолютная звездная величина», выявлены зависимости между различными параметрами галактик. Наравне с соавторами принималось участие в проверке и классификации кандидатов при создании вышеупомянутого нового каталога видимых с ребра галактик. Внесен равноценный с соавторами вклад в разработку и создание структуры и интерфейса базы данных «The Edge-on Galaxy Database». Обсуждение результатов и написание статей осуществлялось наравне с соавторами.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и шести приложений. Полный объем диссертации составляет 107 страниц с 27 рисунками и 2 таблицами. Список литературы содержит 166 наименований.

Во Введении представлен обзор литературных данных по исследованию галактик, видимых с ребра, обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, научная новизна, приведена апробация результатов и список публикаций, содержащих основные результаты диссертации.

Первая глава диссертации посвящена описанию созданной в рамках данной работы базы данных галактик, видимых с ребра, «The Edge-on Galaxy Database». База данных работает под управлением объектно-реляционной системы управления PostgreSQL, интерфейс базы данных реализован на скриптовом языке PHP с использованием JavaScript. В разделе 1.1 приводится информация о системе управления базы данных, описывается структура базы и входящие в нее каталоги: «The Revised Flat Galaxy Catalogue (RFGC)» [20], «The Catalog of Edge-on Disk Galaxies from SDSS» (EGIS) [34], «The 2MASS-selected Flat Galaxy Catalog» (2MFGC) [35], «The Edge-on Galaxies in the Pan-STARRS survey» (EGIPS, новый каталог, описание которого представлено в Главе 2 данной диссертации). В разделе 1.2 описывается интерфейс базы данных и его возможности. База данных состоит из 4 веб-страниц. На стартовой странице дана информация о проекте, описаны его цели и задачи. Страницы «Проекты» и «Каталоги» посвящены текущим проектам и коллекции данных. Четвертая страница посвящена участникам проекта. Веб-интерфейс визуализации данных включает две универсальные опции: отображение каталога как целого в виде таблицы и визуализация информационных карт индивидуальных объектов с подробными данными. Описана система, которая позволяет легко и быстро создавать классификационные тесты, связывать их с различными наборами данных, собирать результаты тестирования от пользователей. Кроме

вышеописанного, система позволяет просматривать изображения классифицируемого объекта и его окрестностей из различных обзоров неба, масштабировать изображения для более детального осмотра.

Во второй главе представлены результаты анализа данных, содержащихся в новом каталоге видимых с ребра галактик «The Edge-on Galaxies in the Pan-STARRS survey» (EGIPS). В разделе 2.1 приведены краткое описание каталога и процесса его создания, критерии отбора галактик, методика измерения параметров галактик по данным обзора Pan-STARRS1. Раздел 2.2 содержит информацию о статистических оценках каталога, а также обнаруженных зависимостях между различными параметрами. Для проверки качества фотометрии нового каталога было проведено сравнение его звездных величин с каталогом галактик с ребра EGIS. Анализ показал хорошее согласие результатов фотометрии двух каталогов в области шириной около 3.5^m без существенной систематики. В зависимости от фильтра эта область приходится на немного различающиеся диапазоны видимых звездных величин галактик, например, для фильтра r она соответствует диапазону $13.8^m - 17.4^m$. По линейному участку функции полноты $\log N - \log a_r$ (интегральное распределение галактик по их угловым размерам) показано, что каталог полон на уровне 96% для объектов со шкалой $a_r > 5.5''$. Тест $\langle V/V_m \rangle$ [36] показал, что каталог относительно полон $a_r > 6''$. На основе распределения галактик по их красным смещениям определена эффективная глубина каталога 11 600 км/с, что соответствует примерно 170 Мпк. Галактики каталога EGIPS демонстрируют на диаграмме «цвет – абсолютная звездная величина» четкое разделение на «красную последовательность» и «голубое облако». При сравнении данного распределения с распределением галактик из обзора SDSS, имеющих произвольную ориентацию, было обнаружено, что галактики красной последовательности EGIPS на 0.1^m краснее галактик SDSS, что объясняется большим внутренним поглощением видимых с ребра галактик. При одновременном учете распределения галактик по отношению большой и малой осей (a/b) и положения галактик на диаграмме «цвет – абсолютная звезд-

ная величина» выявлена дихотомия: красная последовательность населена более толстыми галактиками ($a/b < 5$), а голубое облако более тонкими галактиками ($a/b > 5$). Такая особенность в распределении может быть связана с морфологическим типом галактик. Распределение галактик с показателем цвета $1.0 < (g-i)_0 < 1.4$, описываемое экспоненциальным законом $N \propto \exp(-k a/b)$, демонстрирует более быстрое падение количества объектов с ростом отношения a/b , чем галактики с $0.4 < (g-i)_0 < 0.8$ (коэффициент k для более голубых галактик меньше, чем для красных). Анализ зависимости k в более узких интервалах цветов показал уменьшение толщины галактик по мере смещения цвета в голубую сторону до $(g-i)_0 \approx 0.6$, после чего толщина галактик начинает снова расти. Наиболее вероятным объяснением этого роста может являться увеличение доли карликовых галактик, которые систематически толще.

В третьей главе представлены результаты двумерной декомпозиции и фотометрии 148 ультратонких галактик. В разделе 3.1 описана обоснованность и критерии выбора галактик для данного исследования. Галактики были отобраны по склонению $\text{Dec} \geq -25^\circ$ и размеру большой оси $a \leq 4$. Данные критерии были подобраны из соображений удобства спектральных наблюдений с редуктором светосилы SCORPIO-I [37] на 6-м телескопе САО РАН. Дальнейший совместный анализ построенных по данным спектроскопии кривых вращения и результатов декомпозиции позволит найти распределение светящейся и темной материи в галактиках. Раздел 3.2 содержит информацию об этапах обработки, сравнении полученных результатов с другими авторами и поиске зависимостей между различными параметрами, измеренными в ходе данной работы и взятыми из литературы. Декомпозиция и фотометрия проводилась по данным Pan-STARRS в 5 фильтрах (g, r, i, z, y) в пакете программ DECA с применением двухкомпонентной модели, включающей балдж и диск. В ходе работы были получены оценки центральной поверхностной яркости, значения вертикальной и радиальной шкал диска, звездные величины, эффективные радиусы, коэффициенты Серсика для балджа и другие параметры. Для проверки

качества фотометрии было проведено сравнение полученных звездных величин с каталогом EGIS. Показано, что измерения, полученные с помощью DECA, имеют систематически более высокий поток, чем приводится в каталоге EGIS. Разница потоков может объясняться различием применяемых методик фотометрии: в каталоге EGIS приведены звездные величины, полученные в ограниченной апертуре, тогда как при декомпозиции получены модельные оценки полной звездной величины галактик. В разделе 3.3 представлены результаты анализа измеренных параметров и поиска корреляции между ними. Среднее значение поверхностной яркости галактик в фильтре В, пересчитанной в положение «плашмя», составило 24.08 ± 0.05^m , что соответствует галактикам низкой поверхностной яркости. Показано, что исследуемая выборка галактик имеет более низкие поверхностные яркости ($20.86 \pm 0.04^m/\square''$), чем галактики каталога EGIS ($20.47 \pm 0.01^m/\square''$) для одних и тех же отношений шкал. Показано, что исследуемые в работе галактики имеют более голубые цвета $(g-r)_0 = 0.50 \pm 0.01^m$, чем галактики каталога EGIS $(g-r)_0 = 0.62 \pm 0.004^m$ для одного и того же диапазона отношений шкал и поверхностных яркостей. Приведено сравнение отношения шкал и показателей цвета галактик морфологических типов Sc и Sd. Показано, что галактики Sd в среднем на $18 \pm 3\%$ более тонкие и имеют на $0.56 \pm 0.08^m/\square''$ (в пересчете на положение «плашмя») более низкую поверхностную яркость по сравнению галактиками Sc.

В четвертой главе описывается поиск корреляции между пространственной ориентацией осей вращения (спинов) тонких галактик и филаментов крупномасштабной структуры Вселенной. В разделе 4.1 описаны данные, на основе которых проводилось исследование. Выборка филаментов и принадлежащих им видимых с ребра тонких галактик составлена по каталогам [38] и [20] и содержит 813 тонких галактик и 706 филаментов. В разделе 4.2 описана методика поиска зависимости взаимной ориентации галактик и филаментов, которая заключается в определении наиболее часто встречающихся углов наклона между спинами галактик и осями филаментов. Поскольку галактики из выборки ориентированы под углом $\approx 90^\circ$ к

наблюдателю, для определения ориентации их спинов в пространстве достаточно задать углы в картинной плоскости, в качестве которых использовались повернутые на 90° позиционные углы галактик. Направление оси филамента задавала касательная к описывающему филамент сплайну в точке, ближайшей к каждой конкретной галактике. Распределение по углам наклона выявило слабую тенденцию (на уровне 2σ) к выравниванию спинов галактик с осями филаментов. При отборе наиболее тонких (с отношением осей $a/b > 10$ в фильтре B) и близких (с красным смещением $z < 0.03$) галактик, корреляция наблюдается на уровне 2.4σ , что является более жестким ограничением для наблюдаемого эффекта, чем получено другими авторами (например, [39]), однако, по-прежнему остается ниже формального порога обнаружения 3σ . Результаты моделирования говорят о том, что галактики с массами менее $5 \times 10^{12} M_\odot$ должны иметь сонаправленный с осями филаментов спин [40]. По орбитальным движениям спутников тонких галактик было обнаружено [41], что последние в среднем имеют массу $5 \times 10^{11} M_\odot$ (с учетом темного гало), что на порядок меньше вышеуказанной. Таким образом, теория предсказывает сонаправленность осей филаментов и спинов галактик, подобных содержащимся в исследуемой выборке. Выявление более сильной корреляции для наиболее близких галактик может быть связано с тем, что с ростом расстояния сложнее выделять филаменты, а из-за ограниченного пространственного разрешения данных, использованных при создании каталога RFGC [20], труднее обнаружить тонкие галактики.

В Заключении кратко изложены основные результаты диссертационной работы.

Список литературы

- [1] Wyatt S. P. Jr., Brown F. G. Position angles and shapes of galaxies in Cetus // *AJ*. — 1955. — Dec. — Vol. 60. — P. 415.
- [2] Ogorodnikov K. F. Statistical Mechanics of the Simplest Types of Galaxies. // *Soviet Ast.*. — 1957. — Oct. — Vol. 1. — P. 748.
- [3] Burstein D. Structure and origin of S0 galaxies. III. The luminosity distribution perpendicular to the plane of the disks in S0's. // *ApJ*. — 1979. — Dec. — Vol. 234. — P. 829–836.
- [4] Burbidge E. Margaret, Burbidge G. R. Three Unusual so Galaxies. // *ApJ*. — 1959. — Jul. — Vol. 130. — P. 20.
- [5] Reshetnikov V. P., Dettmar R. J., Combes F. On the global structure of distant galactic disks // *A&A*. — 2003. — Mar. — Vol. 399. — P. 879–887. — astro-ph/0212404.
- [6] Disk Evolution since $z \sim 1$ in a CDM Universe / Chris B. Brook, Daisuke Kawata, Hugo Martel et al. // *ApJ*. — 2006. — Mar. — Vol. 639, no. 1. — P. 126–135. — astro-ph/0508403.
- [7] Interpreting the Evolution of the Size-Luminosity Relation for Disk Galaxies from Redshift 1 to the Present / A. M. Brooks, A. R. Solomon, F. Governato et al. // *ApJ*. — 2011. — Feb. — Vol. 728, no. 1. — P. 51. — 1011.0432.
- [8] Sancisi R. Warped HI Disks in Galaxies // *A&A*. — 1976. — Dec. — Vol. 53. — P. 159.
- [9] Reshetnikov Vladimir, Combes Francoise. Statistics of optical WARPS in spiral disks // *A&A*. — 1998. — Sep. — Vol. 337. — P. 9–16. — astro-ph/9806114.
- [10] Galaxies with conspicuous optical warps / Vladimir P. Reshetnikov, Aleksandr V. Mosenkov, Alexei V. Moiseev et al. // *MNRAS*. — 2016. — Oct. — Vol. 461, no. 4. — P. 4233–4245. — 1607.02274.

- [11] Reshetnikov Vladimir P., Mosenkov Aleksandr V. New candidates to polarizing galaxies from the Sloan Digital Sky Survey // MNRAS. — 2019. — Feb. — Vol. 483, no. 2. — P. 1470–1480. — 1811.10222.
- [12] K-band observations of boxy bulges - I. Morphology and surface brightness profiles / M. Bureau, G. Aronica, E. Athanassoula et al. // MNRAS. — 2006. — Aug. — Vol. 370, no. 2. — P. 753–772. — astro-ph/0606056.
- [13] Measuring the X-shaped structures in edge-on galaxies / S. S. Savchenko, N. Ya. Sotnikova, A. V. Mosenkov et al. // MNRAS. — 2017. — Nov. — Vol. 471, no. 3. — P. 3261–3272. — 1707.04700.
- [14] Makarov D. I., Zaitseva N. A., Bizyaev D. V. The Tully-Fisher relation for flat galaxies // MNRAS. — 2018. — Sep. — Vol. 479, no. 3. — P. 3373–3380. — 1806.07384.
- [15] Lee Jounghun, Pen Ue-Li. Detection of Galaxy Spin Alignments in the Point Source Catalog Redshift Survey Shear Field // ApJ. — 2002. — Mar. — Vol. 567, no. 2. — P. L111–L114.
- [16] Tempel Elmo, Libeskind Noam I. Galaxy Spin Alignment in Filaments and Sheets: Observational Evidence // ApJ. — 2013. — Oct. — Vol. 775, no. 2. — P. L42. — 1308.2816.
- [17] Tempel E., Stoica R. S., Saar E. Evidence for spin alignment of spiral and elliptical/S0 galaxies in filaments // MNRAS. — 2013. — Jan. — Vol. 428, no. 2. — P. 1827–1836. — 1207.0068.
- [18] A catalog of edge-on disk galaxies. From galaxies with a bulge to superthin galaxies / S. J. Kautsch, E. K. Grebel, F. D. Barazza, III Gallagher, J. S. // A&A. — 2006. — Jan. — Vol. 445, no. 2. — P. 765–778. — astro-ph/0509294.
- [19] Karachentsev I. D., Karachentseva V. E., Parnovskij S. L. Flat galaxies catalogue. // Astronomische Nachrichten. — 1993. — May. — Vol. 314, no. 3. — P. 97–222.

- [20] The revised Flat Galaxy Catalogue. / I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, Yu. N. Kudrya et al. // Bulletin of the Special Astrophysics Observatory. — 1999. — Jan. — Vol. 47. — P. 5–185. — astro-ph/0305566.
- [21] Karachentsev Igor'. Thin Edge-On Galaxies as a Tool for the Investigation of Large-Scale Streaming Motions in the Universe // AJ. — 1989. — Jun. — Vol. 97. — P. 1566.
- [22] Very thin disc galaxies in the SDSS catalogue of edge-on galaxies / D. V. Bizyaev, S. J. Kautsch, N. Ya. Sotnikova et al. // MNRAS. — 2017. — Mar. — Vol. 465, no. 4. — P. 3784–3792. — 1612.01042.
- [23] Zasov A. V., Makarov D. I., Mikhailova E. A. Thickness of Thin Stellar Disks and the Mass of the Dark Halo // Soviet Astronomy Letters. — 1991. — Apr. — Vol. 17. — P. 374.
- [24] Sotnikova N. Ya., Rodionov S. A. Estimating the dark halo mass from the relative thickness of stellar disks // Astronomy Letters. — 2006. — Oct. — Vol. 32, no. 10. — P. 649–660. — astro-ph/0609163.
- [25] Hernandez X., Cervantes-Sodi B. A dimensional study of disc galaxies // MNRAS. — 2006. — May. — Vol. 368, no. 1. — P. 351–360. — astro-ph/0511727.
- [26] Dutton Aaron A. On the origin of exponential galaxy discs // MNRAS. — 2009. — Jun. — Vol. 396, no. 1. — P. 121–140. — 0810.5164.
- [27] Kormendy John. Secular Evolution in Disk Galaxies // Secular Evolution of Galaxies / Ed. by Jesús Falcón-Barroso, Johan H. Knapen. — 2013. — P. 1.
- [28] Bullock James S., Stewart Kyle R., Purcell Chris W. Mergers and Disk Survival in Λ CDM // The Galaxy Disk in Cosmological Context / Ed. by Johannes Andersen, Nordströara, Birgitta m, Joss Bland-Hawthorn. — Vol. 254. — 2009. — Mar. — P. 85–94. — 0811.0861.

- [29] Purcell Chris W., Kazantzidis Stelios, Bullock James S. The Destruction of Thin Stellar Disks Via Cosmologically Common Satellite Accretion Events // *ApJ*. — 2009. — Apr. — Vol. 694, no. 2. — P. L98–L102. — 0810.2785.
- [30] Banerjee Arunima, Bapat Disha. Mass modelling of superthin galaxies: IC5249, UGC7321 and IC2233 // *MNRAS*. — 2017. — Apr. — Vol. 466, no. 3. — P. 3753–3761. — 1705.02659.
- [31] Mass modelling of a superthin galaxy, FGC 1540 / Sushma Kurapati, Arunima Banerjee, Jayaram N. Chengalur et al. // *MNRAS*. — 2018. — Oct. — Vol. 479, no. 4. — P. 5686–5695. — 1807.02992.
- [32] Spectral Observations of Superthin Galaxies / Dmitry Bizyaev, D. I. Makarov, V. P. Reshetnikov et al. // *ApJ*. — 2021. — Jun. — Vol. 914, no. 2. — P. 104. — 2105.11855.
- [33] Concentration, spin and shape of dark matter haloes: scatter and the dependence on mass and environment / Andrea V. Macciò, Aaron A. Dutton, Frank C. van den Bosch et al. // *MNRAS*. — 2007. — Jun. — Vol. 378, no. 1. — P. 55–71. — astro-ph/0608157.
- [34] The Catalog of Edge-on Disk Galaxies from SDSS. I. The Catalog and the Structural Parameters of Stellar Disks / D. V. Bizyaev, S. J. Kautsch, A. V. Mosenkov et al. // *ApJ*. — 2014. — May. — Vol. 787, no. 1. — P. 24. — 1404.3072.
- [35] The 2MASS-selected Flat Galaxy Catalog / S. N. Mitronova, I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva et al. // *Bulletin of the Special Astrophysics Observatory*. — 2004. — Jan. — Vol. 57. — P. 5–163. — astro-ph/0408257.
- [36] Thuan T. X., Seitzer P. O. An H I survey of Nilson dwarf galaxies. II. Statistical properties. // *ApJ*. — 1979. — Aug. — Vol. 231. — P. 680–687.

- [37] Afanasiev V. L., Moiseev A. V. The SCORPIO Universal Focal Reducer of the 6-m Telescope // *Astronomy Letters*. — 2005. — Mar. — Vol. 31, no. 3. — P. 194–204. — astro-ph/0502095.
- [38] Detecting filamentary pattern in the cosmic web: a catalogue of filaments for the SDSS / E. Tempel, R. S. Stoica, V. J. Martínez et al. // *MNRAS*. — 2014. — Mar. — Vol. 438, no. 4. — P. 3465–3482. — 1308.2533.
- [39] Navarro Julio F., Abadi Mario G., Steinmetz Matthias. Tidal Torques and the Orientation of Nearby Disk Galaxies // *ApJ*. — 2004. — Sep. — Vol. 613, no. 1. — P. L41–L44. — astro-ph/0405429.
- [40] Connecting the cosmic web to the spin of dark haloes: implications for galaxy formation / Sandrine Codis, Christophe Pichon, Julien Devriendt et al. // *MNRAS*. — 2012. — Dec. — Vol. 427, no. 4. — P. 3320–3336. — 1201.5794.
- [41] Karachentsev I. D., Karachentseva V. E., Kudrya Yu. N. Ultra-flat galaxies selected from RFGC catalog. II. Orbital estimates of halo masses // *Astrophysical Bulletin*. — 2016. — Apr. — Vol. 71, no. 2. — P. 129–138. — 1605.03734.

Антипова Александра Викторовна
Исследование галактик, видимых с ребра

Подписано в печать ____ . ____ . ____ . Заказ № _____
Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.
Типография _____