

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**

(01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия)

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель —  
доктор физ.-мат. наук,  
профессор РАН Макаров Д. И.

Нижний Архыз–2022

# Содержание

<b>Введение</b>	<b>4</b>
<b>1 База данных для изучения галактик, видимых с ребра</b>	<b>22</b>
1.1 Структура базы данных . . . . .	22
1.2 Web-интерфейс . . . . .	27
<b>2 Статистика каталога галактик «The Edge-on Galaxies in the Pan-STARRS1 survey» (EGIPS)</b>	<b>33</b>
2.1 Каталог EGIPS . . . . .	33
2.2 Анализ данных . . . . .	38
<b>3 Декомпозиция изображений ультратонких галактик</b>	<b>54</b>
3.1 Выборка объектов . . . . .	54
3.2 Декомпозиция . . . . .	55
3.3 Результаты . . . . .	56
<b>4 Ориентация спинов тонких галактик относительно филаментов крупномасштабной структуры вселенной</b>	<b>65</b>
4.1 Выборка объектов . . . . .	66
4.2 Поиск корреляции между спином галактики и осью филамента .	67
<b>Заключение</b>	<b>76</b>
<b>Список литературы</b>	<b>80</b>
<b>Приложение А. Структура каталога RFGC</b>	<b>98</b>
<b>Приложение В. Структура каталога EGIS</b>	<b>98</b>
<b>Приложение С. Структура каталога 2MFGC</b>	<b>100</b>
<b>Приложение D. Структура таблиц кандидатов из обзора Pan-STARRS</b>	<b>101</b>

Приложение Е. Структура таблиц, используемых в системе классификации 105

Приложение F. Таблица с результатами двумерной декомпозиции 106

## Введение

К галактикам, видимым с ребра, относят объекты с углом наклона к лучу зрения близким к  $90^\circ$ . Их систематические исследования начались в 1970-х годах, хотя отдельные работы были опубликованы значительно раньше (например, [1, 2]). В результате исследований был получен огромный объем информации о вертикальном распределении вещества в различных структурных компонентах (диске, балдже и др.).

Важным открытием стало обнаружение толстых дисков галактик в результате анализа распределения поверхностной яркости видимых с ребра галактик в вертикальном направлении, которое описывается экспоненциальным законом [3]. При этом вдоль большой оси диска градиент светимости относительно мал. Структура толстых дисков оказалась более диффузной по сравнению с тонкими дисками, а населяющие их звезды имеют меньшую металличность и большую дисперсию скоростей. Выявленные закономерности впоследствии помогли обнаружить толстый диск у Млечного Пути [4]. В качестве причины образования толстых дисков указывались множественные слияния с маломассивными, богатыми газом галактиками (малый мерджинг, [5–7]). Однако, при моделировании данный сценарий давал не самое лучшее соответствие с наблюдаемыми свойствами реальных галактик. В работе [8] была предложена идея формирования толстых дисков только на ранних этапах эволюции галактик, когда существовало большое количество богатых газом сгустков с массами меньше  $10^9 M_\odot$ . Такие сгустки в процессе эволюции за счет динамического трения попадали в центр галактик. Численное моделирование подтвердило возможность такого канала формирования толстого диска [9].

Исследования галактик с ребра позволили выделить некоторые новые типы балджей. Помимо своей формы, разные типы балджей отличаются процессами эволюции и образования [10–13]. Галактики с центральными структурами в форме «ящика/арахиса» (B/PS) были обнаружены в 1959 году [14] как любопытное отклонение от нормальных галактик со сферическими балджами. Балджи такого типа считаются толстыми частями баров (например, [15]). Балджи B/PS формируются в ходе вековой эволюции галактики, и этот этап играет важ-

ную роль в формировании структуры галактик в целом. Балджи В/PS являются довольно распространенным типом, их количество оценивают от 20% [16] до 40-45 % [17, 18] среди всех дисковых галактик. Так же было обнаружено, что доля В/PS выше в массивных галактиках S0-Sa, чем в других типах [19]. Такие балджи чаще всего имеют яркие X-образные структуры. Их появление связано с изгибной неустойчивостью бара [20, 21]. Бар изгибается из-за резонанса звездных орбит в вертикальном направлении и становится толще, X-образная структура состоит из набора этих резонансных орбит [22].

Одной из основных проблем при изучении структурных компонентов видимых с ребра галактик является поглощение света пылью. Распределение вещества для таких галактик можно анализировать напрямую, если наблюдения проводятся в диапазонах длин волн, в которых поглощение пылью не столь существенно или нет заметной пылевой полосы [23–25]. Учет влияния пыли является столь сложной задачей, что решать ее можно только путем численного моделирования. Такой анализ требует больших вычислительных ресурсов, так как в модели распределения пыли необходимо учитывать радиальное и вертикальное распределение пыли и звезд, рассеяние излучения звезд на пыли, наличие балджа у галактик и т.д. Учет пыли в распределении поверхностных яркостей галактик, видимых с ребра, с использованием реалистичной модели переноса излучения был выполнен только для небольшого количества объектов [26–29]. При анализе семи галактик в работе [29], видимых с ребра, был сделан вывод, что пылевой диск тоньше (по вертикали), но больше (по радиусу), чем звездный; галактики с углами наклона больше  $60^\circ$  являются оптически толстыми, по крайней мере, в центральных областях, галактики «плашмя» почти полностью прозрачны.

Исследуя видимые с ребра галактики на разных красных смещениях, можно проследить эволюцию их структуры в вертикальном направлении. К сожалению, лишь в небольшом количестве работ были проведены такие исследования. Исследуя ориентированные «с ребра» галактики в глубоких полях Хаббла на северной (HDF-N) и южной (HDF-S) частях небесной сферы, Решетников и соавторы [30] обнаружили увеличение в 1.5 – 2 раза относительной толщи-

ны (отношение вертикальной и радиальной шкал) звездных дисков галактик на красных смещениях  $z \sim 1$  по сравнению с дисками близких галактик. Такой же результат был получен при исследовании галактик в ультраглубоких полях Хаббла (Hubble Ultra Deep Field (hereafter HUDF) [31, 32]. В более поздних работах [33, 34] было показано, что рост относительной толщины звездных дисков массивных спиральных галактик на  $z \sim 1$  объясняется прежде всего эволюцией радиальной шкалы их дисков, которая за последние 7-8 млрд. лет увеличилась примерно в 2 раза. Данный результат согласуется с численным моделированием [35, 36].

Среди всех галактик, видимых с ребра, стоит отдельно выделить тонкие галактики, составляющие около  $16 \pm 3\%$  от всех дисковых галактик [37]. Хотя осознание тонких галактик как особого подтипа дисковых галактик произошло позже, их первые упоминания встречаются в работах 50-х годов, в которых им было дано название «иглоподобных» [2]. Предполагалось, что эти галактики соответствуют эллипсоидам Якоби, описывающим форму баров в галактиках морфологического типа SB. Кроме того, была высказана идея, что иглоподобные галактики являются наиболее нестабильными из галактик. Позже стало очевидно, что эти объекты являются галактиками, представляющими собой видимый с ребра простой диск без явных признаков наличия балджей [38].

Тонкими принято называть галактики с отношением большой и малой осей  $a/b > 7$  в фильтре В [39, 40]. Объекты с еще большими отношениями осей ( $a/b > 10$ ) называются ультратонкими галактиками. 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  $< 0.1$  [41]. Многие ультратонкие галактики имеют существенно более низкие поверхностные яркости, чем наблюдаются у галактик с меньшим отношением большой и малой осей. Это дало основание полагать, что заметная доля ультратонких галактик (хотя и не все) могут являться галактиками низкой поверхностной яркости [41]. К такому типу галактик обычно относят объекты с центральной поверхностной яркостью при ориентации «плашмя»  $\mu_0 > 22.75^m/\square''$  в фильтре В [42]. Стоит отметить,

что поверхностная яркость является важным параметром, так как она отражает поверхностную плотность диска и накладывает ограничение на возможные варианты формирования и эволюции галактики.

Первый комплексный поиск тонких галактик был проведен Караченцевым И. Д. в 1989 году [43]. Как правило, тонкие безбалджевые галактики имеют низкую металличность и более синие показатели цвета в сравнении с другими видимыми с ребра галактиками [44, 45]. Однако, более массивные тонкие галактики имеют более красные цвета [41]. В результате исследования окружения тонких галактик было показано, что они имеют меньше спутников, чем обычные спиральные галактики [46].

Тонкие галактики наблюдаются как в областях с повышенной (скопления и группы галактик), так и с пониженной (войды) плотностью [47, 48]. В скоплениях они встречаются редко, более часто тонкие галактики находят в относительно небольших по числу членов группах, однако, большинство из них являются галактиками поля [49, 50]. При этом, существование тонких галактик в областях с высокой плотностью выглядит необычным. Вызывает вопросы обнаружение таких галактик в группах, поскольку из-за низких относительных скоростей галактик их взаимодействие и слияние, приводящие к росту балджа и диска в вертикальном направлении, протекает более эффективно, чем в скоплениях [51, 52]. Это означает, что либо тонкие безбалджевые галактики попали в группы недавно и еще не успели провзаимодействовать с другими галактиками, либо они должны быть устойчивыми к таким взаимодействиям. Вполне вероятно, что доминирующую роль в формировании этих объектов и поддержании их стабильности играет массивное гало темной материи, в пользу чего свидетельствует найденная корреляция между массой сфероидального темного гало и относительной толщиной диска галактик [53, 54].

### **Актуальность исследования**

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, [55]), 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 [56–58]. Однако, пожалуй одним из наиболее важных преимуществ ориентированных таким образом галактик является возможность напрямую изучать их вертикальную структуру и однозначно разложить их на различные структурные компоненты, такие как тонкие и толстые диски [4, 59–61], балджи [62–64], бары (например, [16]) и звездные гало (например, [65]). Также в галактиках, видимых с ребра, легко выявляются различные структурные детали: искривления диска [66–68], ортогональные структуры, такие как полярные кольца [69], X-образные или ящикообразные структуры бара [11, 70]. 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 в рамках доминирующей ныне парадигмы  $\Lambda$ CDM.

Решение описанных задач предполагает поиск закономерностей, статистическая значимость которых будет определяться точностью и однородностью измерений и величиной используемых выборок галактик. Поэтому чрезвычайно важным является создание обширных каталогов и баз данных, в которых объекты отобраны по единому критерию, а исследователям предоставляется большой набор параметров галактик, определенных по единой методологии. На данный момент наиболее известными каталогами видимых с ребра галактик являются каталог «The 2MASS-selected Flat Galaxy Catalog» (2MFGC, 18 020 объектов, [71]), «The Catalog of Edge-on Disk Galaxies from SDSS» (EGIS, 5 747 галактик [72]), «The Revised Flat Galaxy Catalogue» (RFGC, 4 236 тонких галактик [40]).

Наблюдаемое разнообразие форм галактик определяется историей слияний и их интенсивностью. Одними из основных параметров, определяющих наблю-



даемую форму галактики, является толщина и кривизна диска, размер и форма балджа. На толщину диска влияет дисперсия скоростей звезд в вертикальном направлении [73]. Эти скорости в свою очередь зависят от гравитационной неустойчивости и эффектов взаимодействий. Так, слияния с галактиками меньших масс или близкое прохождение с массивными галактиками разогревает диск в вертикальном направлении и вызывает искривление его внешних частей [74, 75]. Рост балджа также отражает взаимодействия с другими галактиками [76–78]. Анализ формы изофот может дать представление о взаимодействии галактик с окружением. Внешние изофоты галактик, у которых не было недавних множественных малых или одиночных крупных слияний, имеют ромбовидную или дискообразную форму, в то время как овальная и квадратная формы говорят о взаимодействии или недавнем слиянии (например, [79]). Таким образом структурные особенности галактик позволяют сделать вывод об эволюционных механизмах, сформировавших наблюдаемое в них распределение звезд.

Учитывая предсказываемое большое количество малых слияний за время жизни галактики, современные теории формирования галактик испытывают трудности с объяснением существования большого числа массивных безбалджевых галактик с тонкими дисками [80]. Многочисленные слияния должны приводить к разогреву диска [81] и последующему росту балджа [76]. Согласно предсказаниям моделей иерархического скучивания, в ходе космологической эволюции к настоящему моменту должно сохраниться только малая доля простых дисковых галактик.

Считается, что в недавнем прошлом тонких чисто дисковых галактик не было слияний с объектами сопоставимой массы, так называемого большого мерджинга [74, 75]. Это согласуется с известным фактом морфологической сегрегации галактик – дисковые безбалджевые галактики поздних морфологических типов преимущественно располагаются в областях пониженной плотности материи, избегая скоплений галактик. Очевидным объяснением этого эффекта является отсутствие заметного «разогрева» звездных дисков у изолированных галактик со стороны близких соседей. Тем не менее, наблюдения чисто диско-

вых галактик показывают следы взаимодействий и искривления внешних краев [67]. Это делает ультратонкие диски идеальной лабораторией для сравнения предсказаний теории и наблюдений, и изучения механизмов вековой эволюции.

Моделирование эволюции дисков в медленно растущем гало темной материи хорошо воспроизводит свойства многих галактик, например таких, как Млечный путь [82, 83]. Однако, оно сталкивается со сложностями при воспроизведении безбалджевых галактик позднего типа, в том числе тонких галактик. В современном космологическом моделировании получаются галактики с доминирующим балджем. Они оказываются слишком плотными и маленькими, имеющими меньший угловой момент по сравнению с реальными галактиками [84]. Это объясняется тем, что субгало внутри гало темной материи остывает слишком быстро, что приводит к потере углового момента вследствие динамического трения и падения газа в центральные области галактики [85]. Используя реалистичные модели с обратной связью в ряде работ удалось получить хорошо согласующиеся параметры дисковых галактик (например, [86, 87]), хотя проблема полностью не решена [77, 88].

Как уже отмечалось во Введении, устойчивость дисков тонких и ультратонких галактик требует наличия массивного темного гало. Характерный для твердотельного вращения рост скорости с расстоянием до центра, наблюдающийся в кривых вращения тонких галактик [89, 90], может говорить о доминировании гало темной материи на всех масштабах, даже в центральных частях галактики [91, 92]. В то же время, анализ кривых вращения ультратонких галактик указывает на наличие довольно компактного гало темной материи, где псевдоизотермический радиус ядра этого гало меньше двух масштабов радиального диска [93–95]. Скорость вращения большинства ультратонких галактик существенно ниже скорости вращения других дисковых галактик. В ходе моделирования было показано, что скорость вращения звездных дисков пропорциональна отношению масштаба гало к диску [96]. Это означает, что звездный диск вращается медленно, когда гало темной материи маленькое и компактное, а звездный диск тонкий и протяженный. Однако, дискуссия на тему компактности темного гало продолжается: есть как наблюдательные работы,

так и результаты численного моделирования, согласно которым ультратонкие галактики имеют довольно большую длину шкалы темного гало [41, 97].

Широкий спектр описанных выше нерешенных вопросов обуславливает актуальность темы диссертационной работы.

### **Цели и задачи**

Целью данной работы является исследование в оптическом диапазоне галактик, видимыми под углами близко к  $90^\circ$ .

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

## 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 си-

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)» [40], «The Catalog of Edge-on Disk Galaxies from SDSS» (EGIS) [72], «The 2MASS-selected Flat Galaxy Catalog» (2MFGC) [71], «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 раз-

личающиеся 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  $\langle V/V_m \rangle$  [98] 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 звездная 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 кри-



терии были подобраны из соображений удобства спектральных наблюдений с редуктором светосилы SCORPIO-I [99] 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  $24.08 \pm 0.05^m$ , 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 [100] и [40] 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  $90^\circ$  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  $2\sigma$ ) 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  $2.4\sigma$ , что является более жестким ограничением для наблюдаемого эффекта, чем получено другими авторами (например, [101]), однако, по-прежнему остается ниже формального порога обнаружения  $3\sigma$ . Результаты моделирования говорят о том, что галактики с массами менее  $5 \times 10^{12} M_\odot$  должны иметь сонаправленный с осями филаментов спин [102]. По орбитальным движениям спутников тонких галактик было обнаружено [46], 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 раз-

решения данных, использованных при создании каталога RFGC [40], труднее обнаружить тонкие галактики.

**В Заключении** кратко изложены основные результаты диссертационной работы.

### **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., Скрыбина 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  $\approx 150$  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.

# 1 База данных для изучения галактик, видимых с ребра

Базы данных являются хорошим средством объединения информации и ее пополнения. Информация из разных каталогов сложно объединять и сравнивать между собой в силу систематических сдвигов и различных вариаций в способе представления результатов. При этом для получения репрезентативной выборки часто приходится объединять данные из нескольких каталогов. Чтобы избежать систематических ошибок при сопоставлении результатов и для получения статистических закономерностей необходимо, чтобы все данные имели одну и ту же шкалу, калибровку и нульпункт. В базе данных вся информация уже объединена и приведена к единой шкале и нуль-пункту и имеет единое представление и удобный доступ к информации. Базы данных могут являться хорошим средством визуализации данных.

На сегодняшний день имеется большое количество баз данных, наиболее известные из них: NASA Extragalactic Database (NED), HyperLeda [103], SIMBAD и Vizier. Они содержат информацию из различных каталогов и обзоров неба. Однако автоматические методы обработки, которые часто применяются к большим объемам данным, например, к обзорам, несут универсальный характер, что плохо отражается на результатах для специфических объектов, к которым относятся галактики, видимые с ребра. Обработка такого класса объектов стандартными методами часто дает сбои, могут возникать проблемы искусственного расщепления протяженных объектов, наличие сильной пылевой полосы также приводят к сбоям программы и неверным оценкам наблюдательных параметров. Отсюда возникает необходимость в создании специализированных баз данных, которые ориентированы на узкий класс объектов, а содержащихся в них информация проходила тщательный контроль.

## 1.1 Структура базы данных

База данных для изучения галактик, видимых с ребра (The Edge-on Galaxy Database), функционирует на серверах Специальной астрофизической обсерватории РАН: <https://www.sao.ru/edgeon/>. База данных работает под управлением объектно-реляционной системы управления базами данных PostgreSQL. Эта

система с открытым кодом характеризуется надежностью, функциональностью и производительностью. PostgreSQL базируется на языке структурированных запросов SQL. PostgreSQL предоставляет поддержку встроенных процедурных языков программирования PL/pgSQL, PL/Perl, PL/Python и PL/Tcl. Есть возможность загрузки модулей расширения на языке C. В PostgreSQL реализованы программные интерфейсы для большого числа языков программирования, таких как Python, Perl, PHP, ODBC и т.д. Он характеризуется простотой расширения, возможностью создания новых типов данных, индексов, операторов и функций. В PostgreSQL также реализована система наследования таблиц.

В основе базы данных четыре каталога галактик, видимых с ребра: Обновленный каталог тонких галактик («The Revised Flat Galaxy Catalogue», RFGC) [40], Каталог дисковых галактик, видимых с ребра, в SDSS-обзоре («The Catalog of Edge-on Disk Galaxies from SDSS», EGIS) [72], Каталог тонких галактик, выделенных в 2MASS-обзоре («The 2MASS-selected Flat Galaxy Catalog», 2MFGC) [71] и Каталог видимых с ребра галактик в обзоре Pan-STARRS1 («The Edge-on Galaxies in the Pan-STARRS survey», EGIPS). Последний каталог создан при помощи инструментария описываемой базы данных и интегрирован в нее (описание и анализ каталога см. в Главе 2). Выбор данных каталогов основан на том, что все они ориентированы на галактики, видимые с ребра, они проходили тщательный визуальный контроль и имеют большой набор данных и объектов.

Каталог RFGC содержит информацию о 4 236 тонких галактиках с диаметрами  $a > 40''$  и отношением осей  $a/b \geq 7$  на синих фотографических изображениях POSS и ESO/SERC обзоров неба. Кроме того, для преемственности в него были включены 208 объектов из предыдущих версий каталога FGC [39], которые перестали удовлетворять критерию отбора после уточнения их параметров.

В каталоге содержится информация о позиционном угле галактики; синих и красных размерах, измеренных на фотоотпечатках POSS-I; полная видимая В звездная величина, рассчитанная на основе размеров, морфологического типа, класса поверхностной яркости, как это описано в каталоге RFGC [40]; морфологический тип галактики; индекс асимметрии; индекс поверхностной яркости; и количество значимых спутников. Каталог представлен в базе данных в виде

одной таблицы (rfgc см. рис. 1). Подробная структура каталога дана в Приложении А. Структура базы данных, взаимосвязь и структура таблиц представлена на рисунках 1, 3. Для сохранения компактного вида схемы на ней указаны только те поля, которые необходимы для понимания взаимосвязей между таблицами.

Каталог EGIS [72] основан на обзоре SDSS dr7, содержит информацию о 5 747 галактиках с ребра. Каталог имеет обширную и многообразную информацию, поэтому данный каталог в базе данных представлен в виде трех таблиц (см. рис 1):

**egis** — список галактик с их идентификацией и астрометрией;

**egis\_phot1d** — фотометрические параметры галактик, полученные из анализа одномерного профиля галактики. В таблице даны горизонтальная экспоненциальная шкала диска; вертикальная  $\text{sech}^2$ -шкала диска; центральная поверхностная яркость, приведенная к положению галактики плашмя; полная апертурная звездная величина, исправленная за поглощение в нашей Галактике; и доля вклада балджа в полную светимость галактики.

**egis\_phot3d** — параметры диска (центральная поверхностная яркость, вертикальная и горизонтальная шкалы), полученные из моделирования распределения поверхностной яркости на изображении галактики.

Фотометрические параметры были получены по изображениям в трех фильтрах,  $g, r, i$ , из обзора SDSS dr7 [104]. Каталог сопровождается архивом обработанных изображений в соответствующих фильтрах, использовавшихся при фотометрии. Структура каталога описана в Приложении В.

Каталог 2MFGC создан по данным инфракрасного обзора неба 2MASS и содержит данные о 18 020 галактик. Каталог охватывает все небо, входящие в него галактики имеют отношение осей  $a/b \geq 3$ . Информация о фотометрии в фильтрах J, H, Ks получена из каталога протяженных источников обзора 2MASS [105]. В каталоге содержится информация о кроновских звездных величинах в фильтрах J, H, Ks; отношении осей, индексе концентрации. Каталог



представлен одной таблицей (2mfgc, см. рис. 1). Структура каталога дана в Приложении С.

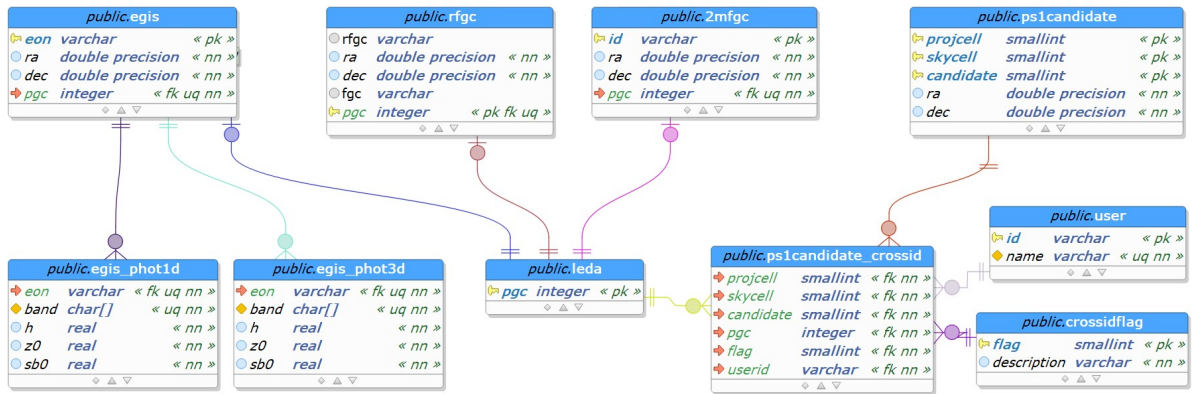


Рисунок 1 — Схема базы данных галактик «с ребра»

В базу данных вошел новый каталог галактик, видимых с ребра EGIPS. Подробно каталог описан во второй главе диссертации, здесь же остановимся на основных моментах. EGIPS покрывает три четверти неба выше  $\text{Dec} = -30^\circ$  и в него входит 16 551 галактик, которые были отобраны по данным Pan-STARRS искусственной нейронной сетью. Каталог содержит однородную информацию об астрометрии, результаты фотометрии в фильтрах g, r, i, z, u, которая проводилась с помощью SExtractor, и классификацию галактик. При составлении каталога активно использовался функционал базы данных, кроме того, она была использована для хранения и систематизации информации. В базе данных был специально разработан интерфейс для просмотра кандидатов в новый каталог с возможностью загружать тесты, которые позволили отсеять неверно идентифицированные объекты и изображения со значительными дефектами, и классифицировать галактики.

Составление нового каталога - сложный, многоэтапный процесс с большим количеством разнообразной информации. Поскольку база данных принимала активное участие с самого начала создания каталога, то его структура получилась очень сложной и разветвленной, каталог состоит из множества таблиц. Принципиальная схема каталога в базе данных проиллюстрирована на рис. 3.

Каталог EGIPS состоит из следующих таблиц:

**ps1candidate** — список кандидатов;

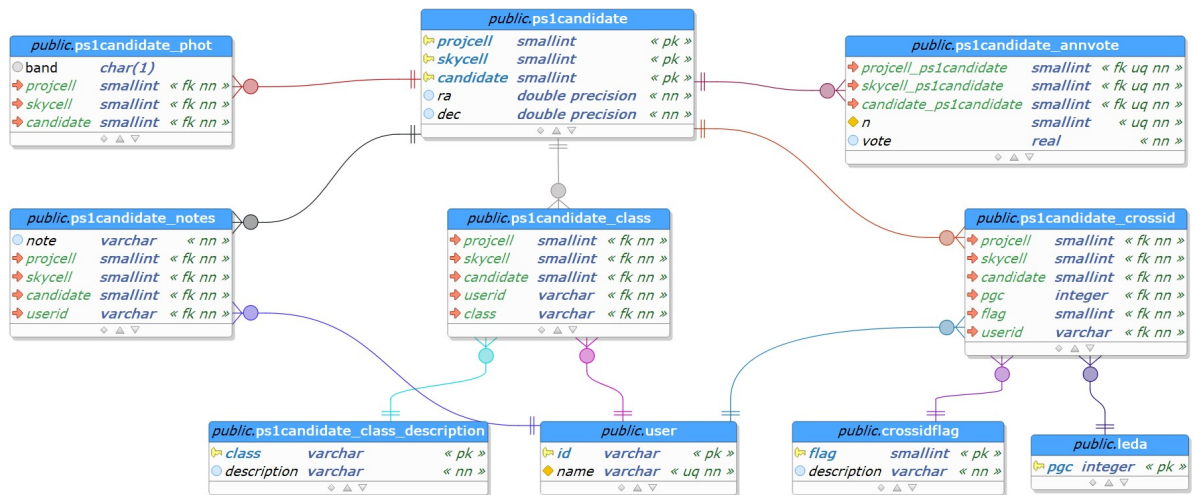


Рисунок 2 — Схема каталога для кандидатов в галактики, видимые с ребра, из Pan-STARRS.

**ps1candidate\_annvote** — классификация, выполненная с использованием ИНС;

**ps1candidate\_class** — результаты визуального просмотра кандидатов;

**ps1candidate\_phot** — автоматическая фотометрия, выполненная программой SExtractor<sup>1</sup>

**ps1candidate\_crossid** — кросс-идентификация с галактиками в базе данных HyperLeda [103];

**ps1candidate\_notes** — различные примечания, сделанные в ходе работы с галактиками.

Для облегчения работы с каталогом кандидатов были разработаны специальные алгоритмы (view), позволяющие объединять в единую структуру информацию из различных таблиц в режиме реального времени.

**ps1candidate\_class\_stats** — рассчитывает статистику по визуальной классификации каждой галактики;

**ps1candidate\_final** — «очищенная» выборка объектов для создания финальной версии каталога.

Структуры каталога приведена в Приложении D.

<sup>1</sup><https://sextractor.readthedocs.io/>

В базе хранятся данные из обзора Pan-STARRS, файлы имеют формат FITS и пригодны для работы с ними. Всего имеются изображения в 5 фильтрах. Также используются изображения в формате JPEG с изображением галактик и выделенными на них областями и контурами для лучшего понимания и визуализации полученных результатов.

Для связи между различными таблицами одного каталога, а так же связи между различными каталогами внутри одной базы данных необходимо, чтобы у каждой галактики был свой уникальный идентификатор. С помощью него можно легко связать воедино информацию из нескольких каталогов для конкретного объекта, а так же визуализировать информацию. Связь между различными базами данных так же может осуществляться через тот же идентификатор. База данных The Edge-on Galaxy Database в качестве идентификатора использует PGC номера из базы данных HyperLeda [103], что обеспечивает связь как между двумя базами данных, так и всех каталогов внутри The Edge-on Galaxy Database. Если галактика отсутствует в HyperLeda, то ей присваивается новый PGC номер и она добавляется в базу данных, что позволяет пополнять HyperLeda новыми объектами, данными и поддерживать базу данных в актуальном состоянии.

## 1.2 Web-интерфейс

База данных The Edge-on Galaxy Database представлена 4 основными страницами. На странице Main представлена информация о проекте, его целях и задачах. Страничка Projects посвящена текущим проектам, даны их описания и стадия готовности. В разделе Catalogs находится доступ к перечисленным выше каталогам. На страничке About указаны краткие сведения об участниках проекта. Каталоги можно просматривать в виде единой таблицы или карточек отдельных объектов с подробными данными и изображениями галактик с отмеченными на них контурами которые, например, показывают апертуры, внутри которых проводились измерения потока (см. рис. 3).

Поиск объектов в базе данных производится по координатам объекта. Web-интерфейс написан на скриптовом языке PHP с использованием JavaScript.



The Catalog of the Edge-on Galaxies In Pan-STARRS1 survey (EGIPS)

egips="EGIPS J121104.6+502904"

[Examples](#)

The request returns a single object.

EGIPS J121104.6+502904 J121104.62+502905.0 NGC4157

SExtractor photometry

Band	A	B	Ell	B/A	PA
g	56.056 ± 0.018	7.065 ± 0.002	0.874	0.126	62.00
r	54.743 ± 0.012	7.151 ± 0.002	0.869	0.131	62.06
i	52.163 ± 0.009	7.294 ± 0.001	0.860	0.140	61.92
z	48.364 ± 0.009	6.962 ± 0.001	0.856	0.144	61.87
y	44.299 ± 0.013	6.383 ± 0.002	0.856	0.144	61.74

Band	kKron	magAuto	kPetro	magPetro	Gini	M <sub>20</sub>	C	A	S
g	4.19	12.324 ± 0.000	5.94	12.210 ± 0.000	0.881	-1.095	3.620	0.255	0.089
r	3.54	11.444 ± 0.000	5.94	11.383 ± 0.000	0.636	-1.936	3.702	0.267	0.083
i	3.50	10.920 ± 0.000	5.94	10.881 ± 0.000	0.637	-1.782	3.726	0.210	0.065
z	3.69	10.546 ± 0.000	5.94	10.480 ± 0.000	0.636	-1.689	3.743	0.152	0.066
y	3.81	10.234 ± 0.000	5.94	10.177 ± 0.000	0.630	-1.897	3.680	0.124	0.088

Visual inspections  
 Edge-on 0  
 Nearly Edge-on 2  
 Not Edge-on 1

NGC4157 pgc = 38795

Celestial position  
 J121104.33+502905.9 2MASXJ12110436+5029048 2MFGC09591 CGCG269-038  
 G138.47146+65.40800 EGISJ121104.1+502907 EONJ182.770+50.485 FGCI380  
 SG065.30078+65.28703 IRAS12085+5045 LGG258:[G93]025 MCG+09-20-106

Рисунок 3 — Часть информационной карты для галактики из каталога EGIPS. Эллипсами указана область, в которой измерялся поток.

Для классификации объектов и отсева ложных срабатываний искусственной нейронной сети, например, на группы звезд, которые выстраиваются в цепочки и воспринимаются как протяженный объект, потребовалось просмотреть большое количество изображений и составить ряд тестов для дальнейшей их классификации. Первоначально использовался сервис Zooniverse<sup>1</sup>, который является продолжением проекта Galaxy Zoo. Для работы с Zooniverse необходимо специальным образом подготовить изображения, загрузить их на сервер. Проведение всех этих процедур приводило к большим затратам времени и труда, поэтому для последующего анализа был разработан свой собственный интерфейс на базе The Edge-on Galaxy Database. Разработанная система опроса похожа на проект Zooniverse. Основным отличием и преимуществом является использование программы Aladin Lite<sup>1</sup>, которая открывает возможность при классификации полагаться не только на изображение галактики, но и просматривать окрестности по различным обзорам в различных фильтрах, масштабировать изображение, перемещаться по окрестностям для учета возможного влияния соседних объектов. Вопросы можно объединить в группы для одновременной работы с ними, существует возможность выбора как одного ответа, так и нескольких. Результа-

<sup>1</sup><https://www.zooniverse.org/>

<sup>1</sup><https://aladin.u-strasbg.fr/>

ты теста передаются в базу данных, где записываются в таблицу `quiz_result` с указанием конкретного проекта, пользователя, выполнившего классификацию, и времени. Объекты для тестирования выбираются произвольным образом из списка объектов, еще не прошедших через тестирования данным пользователем, и не превысивших количества тестирований разными пользователями на один объект для данной программы. На рисунке 4 приведен пример тестирования.

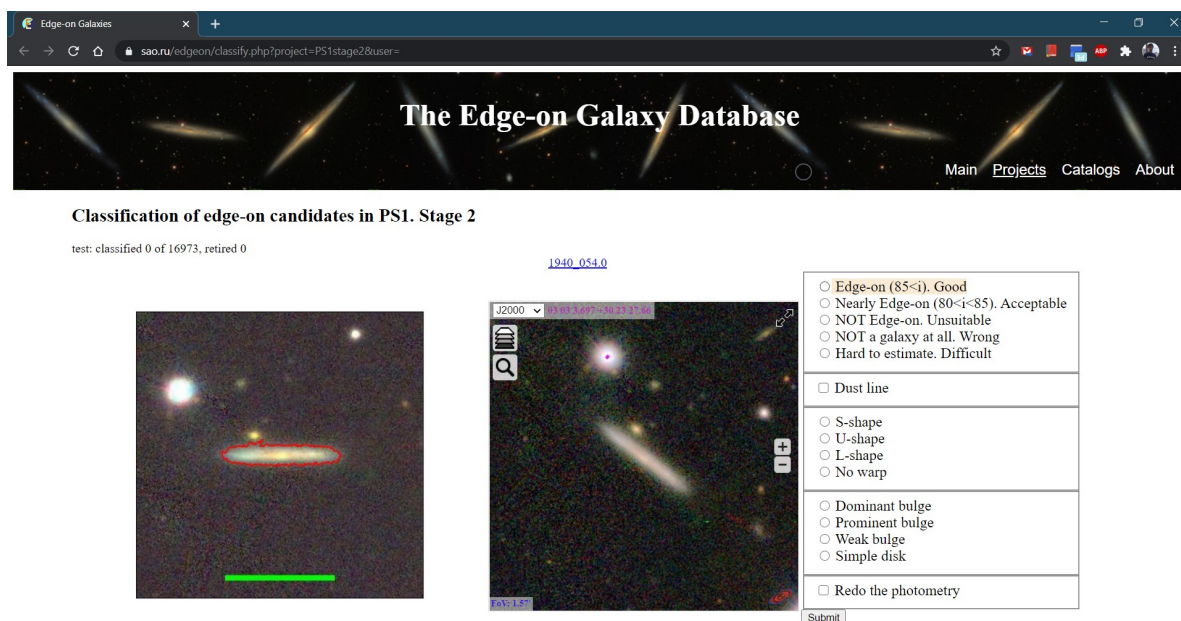


Рисунок 4 — Пример страницы сервиса визуальной классификации галактик. Каждому пользователю дается информация о том, для скольких объектов из списка он выполнил классификацию и для какого количества объектов набрана достаточная статистика (*retired*). Дается ссылка на страницу самого объекта (`1940_054.0`). Приводится изображение галактики с контуром выделения (картинка слева) и соответствующий кусок карты неба, визуализированный с помощью программы *Aladin Lite* (картинка справа). Справа расположен раздел классификации, позволяющий группировать вопросы по темам.

Разработанная система позволяет создавать опросы различной сложности, собирать и хранить ответы от зарегистрированных пользователей. Создать свой опрос по определенной выборке объектов и предоставить доступ к участникам проекта можно через администратора системы. С этой целью были созданы следующие таблицы:

**user** — список участников для персонификации результатов теста;

**project** — содержит описание конкретного проекта, связывает его с таблицами в базе данных и задает предельное количество классификаций на объект;

**quiz\_questions** — список вопросов для теста;

**quiz\_result** — коллекция классификаций, выполненная различными участниками в различных проектах;

**quiz\_result\_info** — представление (view), объединяющее информацию по классификации и облегчающее анализ информации.

Для отождествления галактик из каталога EGIPS с галактиками из базы данных HyperLeda реализован алгоритм, аналогичный принятому в HyperLeda [103]. Вокруг отождествляемого объекта проводится два круга радиусами  $R_1 < R_2$ . Если внутри этих кругов находится только одна галактика из базы данных HyperLeda и эта галактика располагается в пределах первого круга, то отождествление объекта производится автоматически, галактике из каталога EGIPS присваивается PGC номер галактики HyperLeda. Если по данным HyperLeda внутри этих двух кругов нет ни единого объекта, то галактика помечается как новая. В других случаях требуется ручное отождествление, которое проводится с помощью специально созданного интерфейса (см. рис. 5), в котором пользователь может выбрать какому объекту из списка известных галактик HyperLeda соответствует отождествляемый объект. Список известных галактик HyperLeda для данного участка неба представляется в виде таблицы, в которой содержатся параметры галактик, например такие, как тип галактики, видимое отношение осей галактик, позиционный угол, звездные величины и др. Список параметров поможет определить наилучшее соответствие. Для удобства список галактик отсортирован по мере удаления от отождествляемого объекта. Для визуализации отождествляемой галактики и окрестностей используется Aladin Lite. Отождествляемый объект на изображении отмечается красным крестиком, уже известные галактики помечены голубым кружком, галактики описываются эллипсами, которые характеризуют ее размер.

Пользователь может отождествить объект, либо пометить его как новую галактику, либо отложить для дальнейшего более подробного рассмотрения. Соответствующий выбор заносится в базу данных с информацией о пользователе и времени отождествления.



Object [1374\\_018.0](#) : 206.419980385 0.8118947685825

Reset	Submit	Skip...	New object										
Sep ["]	PGC	Name	O	T	Type	D25 ["]	A/B	PA [d]	B [mag]	V [mag]	I [mag]	cz [km/s]	Link
<input checked="" type="radio"/>	0.32	1176109	PGC1176109	G	1.1	S7	27.1	3.21	88.19	17.357	15.551	26418	<a href="#">Leda</a>
<input type="radio"/>	21.15	3300680	PGC3300680	G			27.3	4.76	148.06	18.853	18.025	9473	<a href="#">Leda</a>

Рисунок 5 — Пример страницы сервиса для визуальной идентификации объектов. Дается ссылка на страницу объекта (1374\_018.0) и его координаты в градусной мере. С помощью программы Aladin Lite показываются окрестности объекта на небе.

## Выводы

В главе представлено описание структуры и интерфейса базы данных галактик, видимых с ребра The Edge-on Galaxy Database, которая находится по адресу (<https://www.sao.ru/edgeon/>) и функционирует на сервере Специальной астрофизической обсерватории РАН. База данных работает под управлением PostgreSQL, а web-интерфейс написан на PHP с использованием JavaScript. Основу базы данных составили 4 каталога галактик, видимых с ребра: RFGC [40], который включает информацию о 4 236 тонких галактиках; EGIS [72], содержащий 5 747 галактик; каталог 2MFGC [71] – содержит 18 020 галактики; новый каталог галактик EGIPS, включающий 16 551 галактик.

Был разработан и интегрирован в базу данных специализированный интерфейс для просмотра и классификации галактик, который активно применялся при составлении каталога EGIPS. Интерфейс позволяет просматривать изображения исследуемых галактик и их окрестностей из разных обзоров неба в разных фильтрах. Создана возможность формировать тесты различной сложности, включающие сразу несколько вопросов и выбор нескольких ответов, а также поле для комментариев. Результаты опросов обрабатываются и хранятся базой данных. Из-за сложности работы с новым каталогом, а также поэтапным его составлением, структура каталога EGIPS в базе данных имеет сложный

разветвленный вид и состоит из нескольких таблиц, в которых хранятся как информация о кандидатах, так и отобранные в EGIPS галактики, информация о классификациях, комментарии к галактикам и их фотометрические параметры.

Для связи между различными таблицами внутри базы данных каждой галактике был присвоен свой уникальный идентификатор. В качестве идентификатора база данных использует PGC номера из базы данных HyperLeda. В том случае, если в HyperLeda отсутствует галактика из The Edge-on Galaxy Database, то создается новое PGC имя и информация о данной галактике так же попадает в базу данных HyperLeda, что позволяет пополнять ее новыми объектами.

Отождествление галактик происходит в полуавтоматическом режиме. Если в пределах некоего расстояния имеется только одна известная галактика из базы данных HyperLeda, то происходит автоматическое отождествление объекта, а если в пределах этого диапазона находится большее количество галактик, то будет произведено ручное отождествление.

Каталоги в базе данных The Edge-on Galaxy Database представлены как в виде единой таблицы, так и в виде информационных карточек для отдельных галактик с подробной информацией и изображениями галактик.

Всего база данных состоит из 4 страниц. На главной странице дана информация о проекте, станицы Project, Catalogs, About содержит информация о текущих проектах, каталогах и сведения об участниках проекта.



## 2 Статистика каталога галактик «The Edge-on Galaxies in the Pan-STARRS1 survey» (EGIPS)

Лишь немногие каталоги основаны на однородной выборке галактик, видимых с ребра, и предоставляют их физические свойства. Классический каталог «The Flat Galaxies Catalogue» [39] и его обновленная версия, «The Revised Flat Galaxy Catalogue» (RFGC) [40], содержат 4 236 тонких спиральных галактик с большой полуосью  $a \geq 40''$  и отношением большой малой полуоси  $a/b \geq 7$  в фильтре В, обнаруженных путем систематического визуального изучения всех фотопластин обзора неба Palomar Observatory Sky Survey (POSS-I) и обзора неба ESO/SERC в синем и красном цветах. Галактики, видимые с ребра в Sloan Digital Sky Survey Data Release 1 (SDSS, [106]) и 6 [107], были каталогизированы и автоматически классифицированы по различным морфологическим типам Хаббла [37] и [108] соответственно. Наконец, каталог «Catalog of Edge-on Disk Galaxies from SDSS» (EGIS) [72], содержит 5 747 действительно видимых с ребра галактик, визуально проверенных после автоматического отбора из SDSS DR7 [104]. Между тем, каталоги являются важным инструментом для поиска закономерностей, формулировки статистически значимых выводов.

### 2.1 Каталог EGIPS

Каталог «The Edge-on Galaxies in the Pan-STARRS survey» (EGIPS) был нацелен на отбор галактик, видимых с ребра. Отбор галактик в каталог проводился по данным, полученным с телескопа Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System (Pan-STARRS, [109]). Обзор Pan-STARRS проводился в пяти широкополосных фильтрах (g, r, i, z, y) с помощью 1.8 - метрового телескопа обсерватории Халеакала (Гавайи, США), оснащенного 1.4-гигапиксельной камерой. Обзор охватывает все северное и часть южного полушария до  $\text{Dec} = -30^\circ$  с качеством изображений звезд, меняющимся в пределах от  $1.0''$  до  $1.3''$  в зависимости от фильтра [110]. Предел по звездным величинам составляет 23.3, 23.2, 23.1, 22.3, 21.3 для фильтров g, r, i, z, y соответственно. Доступ к архивам изображений и каталогам объектов [111] предоставляется Научным институтом космического телескопа (STScI). Область покрытия Pan-STARRS

разбита на 2 000 фрагментов, каждый из которых разбит на 10 ячеек с размером  $0.4^\circ \times 0.4^\circ$ . Масштаб изображения составляет 0.25 секунды на пиксель. Каждой ячейке присвоено уникальное имя в формате `skycell.nnnn.0ху`, где `nnnn` номер фрагмента небесной сферы, `0ху` – номер ячейки в данном фрагменте. Номера фрагментов находятся в диапазоне от 635 до 2 643, координаты `x` и `y` ячейки меняются в диапазоне от 0 до 9.

Окончательный набор критериев отбора галактик в создаваемый каталог был выработан не сразу, его разработка проходила в два этапа. В первом варианте отбор галактик осуществлялся с применением собственных алгоритмов Pan-STARRS [110] и с использованием каталога RFGC [40] в качестве эталонной выборки объектов. Однако, поскольку алгоритмы Pan-STARRS носят универсальный характер, то такие специфичные объекты как галактики, видимые с ребра, этими алгоритмами распознаются крайне плохо: галактики не определяются вовсе или дробятся на части, неверно определяется их размер и эллиптичность. При отборе по описанной схеме потери галактик с ребра составляли около 20%. Для уменьшения потерь критерии отбора были ослаблены, что привело к катастрофическому увеличению числа ложных кандидатов в выборке, приблизительно 1 к 500.

Второй вариант отбора галактик реализовывался с использованием искусственной нейронной сети (ИНС), а именно ее особого подтипа - convolutional neural network (CNN, [112, 113], учитывающего пространственные отношения между пикселями изображения. Обычно CNN используется для обеспечения эффективного распознавания образов при анализе изображений.

Для обучения нейронной сети была использована выборка, состоящая из 5 747 галактик, видимых с ребра из каталога EGIS, 80% галактик каталога были использованы в качестве обучающей выборки, а 20% в качестве тестовых объектов. Также была создана отдельная выборка для распознавания галактик, не расположенных с ребра, которая состоит из 54 000 галактик, взятых из базы данных HyperLeda. Из выборки исключались объекты с видимым отношением большой оси к малой больше 4, так как галактики с большим отношением осей могут быть сильно наклонены; галактики, которые имеют диаметр меньше

0.1', так как они слишком маленькие и чрезмерно сглаженные; а также были исключены чрезвычайно протяженные галактики больше 0.5', с которыми сложно работать из-за особенностей автоматического вычитания неба в обзоре Pan-STARRS. Чтобы убедиться, что среди этой выбоки нет галактик, видимых с ребра, на нее были наложены ограничения по результатам тестов из Galaxy Zoo [114]. Были отобраны галактики, которые имеют следующие параметры: P\_EDGE (галактика, видимая с ребра) меньше 0.1 или если параметры P\_EL (эллиптическая галактика), P\_CW (спиральная галактика, закрученная по часовой стрелке) или P\_ACW (спиральная галактика, закрученная против часовой стрелки) имели значение больше 0.1. В выборку, которая демонстрирует примеры того, что не может являться галактиками, видимыми с ребра, также вошли звезды и пустые фоновые поля. К сожалению, выборка получилась недостаточно большой для обучения CNN. Для решения этой проблемы к объектам выборки применялись следующие процедуры: добавление шума, вертикальное и горизонтальное отображение, поворот под случайным углом, увеличение/уменьшение изображений на случайный коэффициент (до 25%). Эти шаги позволили увеличить обучающую выборку до 300 000 объектов. После 50 периодов обучения CNN достигла точности классификации выше 99%: количество верно классифицированных объектов, деленное на общее количество верно и неверно классифицированных объектов оказалось равным 0.993; количество верно классифицированных объектов, деленное на полное количество объектов, классифицированных как галактики с ребра (полнота) равно 0.991. Для оценки надежности метода было проклассифицировано 3 027 галактик RFGC, которые не были включены в обучающую выборку. Только 20 из них были неправильно классифицированы, что дает уровень ошибок менее 1 процента. Было обучено пять моделей CNN, чтобы улучшить качество классификации. Обнаружение объектов проводилось с помощью функции detect\_source библиотеки photutils [115] в python по изображениям Pan-STARRS в g, r, i диапазонах. В качестве порога обнаружения было задано условие, что объект должен иметь длину не менее 48 пикселей, где 15 группирующихся вместе пикселей должны иметь светимость выше 4 стандартных отклонений уровня фона. Раз-

мер 48 пикселей ( $= 12''$ ) был выбран для надежного измерения толщины даже для очень тонких галактик, учитывая пространственное качество изображения  $1.19''$  в полосе  $g$ . Изображение каждого объекта извлекается из ячеек, которые принадлежат данным фрагментам Pan-STARRS во всех 3-х диапазонах и масштабируется до размера  $48 \times 48$  пикселей. Сложенный трехмерный массив изображений в фильтрах  $g$ ,  $r$  и  $i$  загружается в нейронную сеть. Объект считается хорошим кандидатом галактики с ребра, если большинство моделей CNN (по крайней мере, три из пяти) проголосовали положительно. Описанным выше способом было обработано все  $\sim 200\,000$  ячеек из архива Pan-STARRS, в результате было отобрано 26 719 кандидатов галактик с ребра. Чтобы оценить долю галактик, обнаруживаемых в полях Pan-STARRS1 описанным выше методом, также было проведено моделирование методом Монте-Карло. Было синтезировано 1 500 полей со случайно расположенным изображением искусственной галактики в каждом из них, а затем выполнен полный цикл поиска галактик с ребра, включая обнаружение объектов и их классификацию нейронной сетью. При создании искусственных галактик, менялась центральная поверхностная яркость и экспоненциальный масштаб (шкала) изображения галактики. Вероятность обнаружения галактики вычисляется как доля полей, на которых объект был обнаружен и правильно классифицирован как видимая с ребра галактика. Было обнаружено, что для галактик со шкалой  $> 5''$  вероятность детектирования и верной классификации близка к 100%. Часть объектов, отобранных CNN, все же не являются галактиками, видимыми с ребра. Как правило, неправильно классифицированные объекты являются дефектами на изображениях, артефактами от ярких звезд и галактиками с углом наклона, значительно отличающимся от  $90^\circ$ . Для того, чтобы исключить все объекты не являющимися галактиками, видимыми с ребра, был проведен визуальный осмотр кандидатов участниками проекта по созданию каталога. В ходе проверки также были оценены углы наклона галактик. В ходе осмотра кандидатов было исключено 3 992 объектов. Визуальная оценка угла наклона галактик имеет разброс, и чтобы быть включенным в каталог, кандидат должен быть отмечен как галактика, видимая с ребра, по крайней мере одним участником программы. В

итоге каталог был сформирован из 16 551 галактик.

Фотометрия была выполнена в программе SExtractor [116] для всех 22 727 кандидатов, оставшихся после исключения ошибочно классифицированных объектов, не являющихся галактиками. К сожалению, невозможно подобрать параметры так, чтобы SExtractor проводил фотометрию одинаково хорошо во всех фильтрах для всех галактик. Для настройки фотометрии в SExtractor есть два параметра, `deblend_nthresh` и `deblend_mincount`, которые контролируют процесс выделения объектов на изображении. Параметр `deblend_nthresh` определяет количество уровней потока для нахождения локальных минимумов для разделения объектов на изображении. Параметр `deblend_mincount` устанавливает долю потока в локальном максимуме, чтобы считать его отдельным объектом. Большинство галактик были выделены SExtractor достаточно хорошо, однако в некоторых случаях рассматриваемый объект может оказаться разбитым на части. Другой причиной ошибочной фотометрии может быть наложение других объектов, как правило ярких звезд. Как правило, разные проблемы проявляются по-разному в различных фильтрах. Это позволяет более или менее легко находить проблемные объекты, сравнивая результаты фотометрии в разных фильтрах. Оказалось, что координаты и позиционные углы чрезвычайно чувствительны к наличию проблем при идентификации объектов, таких как наложение звезд и других галактик. Если в одном из фильтров позиционный угол отклонялся от медианного значения во всех фильтрах более чем на  $2.5^\circ$  или если координаты центра объекта отличались от медианного положения более чем на заданную долю соответствующей большой оси  $a$  ( $a$  именно на,  $> 0.3a_r$ ,  $> 0.4a_i$  and  $> 0.6a_g$ ), то данная галактика отправлялась на визуальный осмотр для исправления проблем выделения объектов. Всего было просмотрено 5 500 таких объектов и произведен подбор параметров `deblend_mincount` и `deblend_nthresh` для наилучшего описания галактики во всех фильтрах. В большинстве случаев удавалось найти оптимальные значения параметров во всех фильтрах. В противном случае проблемный фильтр помечался как ненадежный. После ручного подбора параметров, была проведена переобработка SExtractor фотометрии для соответствующих галактик.

Из фотометрии в пяти фильтрах Pan-STARRS с помощью Sextractor были получены следующие свойства галактик: астрометрия (координаты барицентра яркости объекта), основные геометрические параметры (размер большой и малой полуосей эллипса, описывающего объект и позиционный угол), оценки полного потока в апертуре Крона [117] и Петросяна [118].

Из-за особенностей обработки изображений в Pan-STARRS ставилась под сомнение возможность получения качественной автоматической фотометрии достаточно протяженных объектов. Процедура вычитания фона, принятая в Pan-STARRS, переоценивает яркость фона вблизи ярких и очень протяженных объектов, что ведет к искусственному понижению яркости вокруг ярких галактик и искажает фотометрию. Также процедуры обработки изображений Pan-STARRS производят заметную «рябь», которая хорошо видна на изображениях. Кроме того, объекты переднего и заднего фона также могут значительно исказить фотометрию. Автоматические методы не всегда способны учесть эти случаи должным образом. Более того, сильно вытянутые галактики традиционно являются сложными объектами для автоматической обработки.

## 2.2 Анализ данных

Для проверки качества полученной фотометрии было проведено сравнение звездных величин из каталога EGIPS и каталога EGIS [72]. Для всех галактик в каталоге EGIS была выполнена апертурная фотометрия в трех фильтрах  $g$ ,  $r$ ,  $i$  по изображениям обзора SDSS DR7. Поток измерялся внутри эллиптической апертуры, соответствующей изофоте галактики с отношением сигнал-шум  $S/N = 2$  на пиксель. Опубликованная EGIS фотометрия была скорректирована за поглощение в нашей Галактике на основе карт поглощения [119], поэтому для аккуратного сравнения мы провели декоррекцию этих значений, добавив соответствующие поправки к звездным величинам EGIS. На рисунке. 6 проиллюстрировано отличие петросяновской фотометрии из каталога EGIPS и апертурной EGIS фотометрии,  $\Delta = r_{\text{our}} - r_{\text{EGIS}}$ , в зависимости от оценок звездной величины в EGIS.

Несмотря на известные проблемы с фотометрией протяженных объектов в

band	range EGIS	%	median	$\sigma$	slope
g	14.8 - 18.0	91	-0.032	0.067	$+0.0106 \pm 0.0018$
r	13.8 - 17.4	93	+0.0022	0.048	$+0.0037 \pm 0.0012$
i	13.2 - 17.2	96	+0.025	0.044	$-0.0016 \pm 0.0010$

Таблица 1 — Сравнение звездных величин галактик из каталогов EGIS и EGIPS в разных диапазонах. Фотометрия каталога EGIPS проводилась в фотометрической системе Pan-STARRS, а данные EGIS обрабатывались в системе SDSS.

Pan-STARRS и совершенно разные подходы к оценке полной звездной величины, было обнаружено чрезвычайно хорошее согласие звездных величин двух каталогов, особенно в фильтрах r и i. Результаты сравнения собраны в Таблице 1.

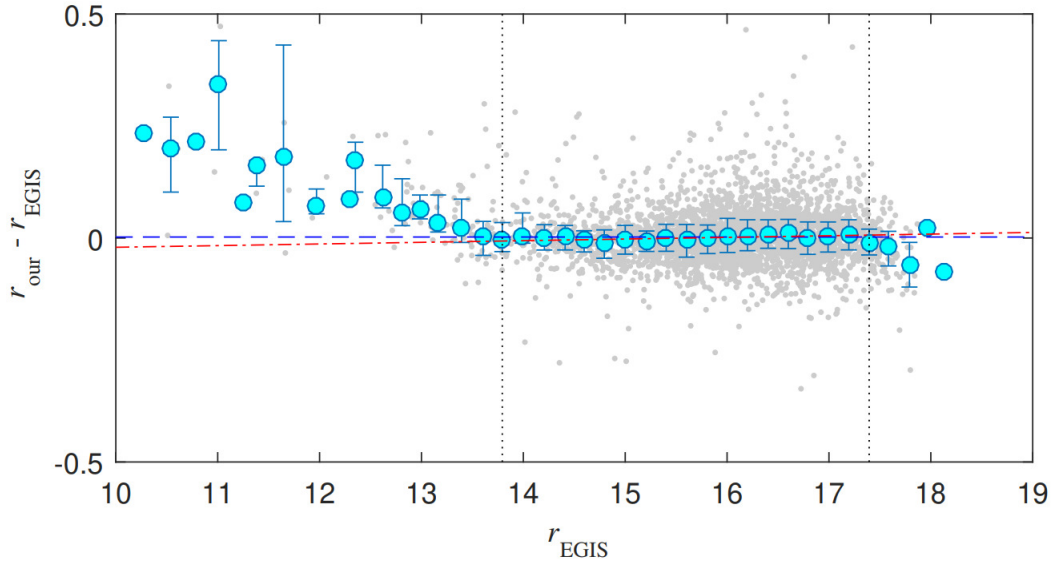


Рисунок 6 — Серыми точками показана разница между звездными величинами из каталогов EGIPS и EGIS в полосе r. Большими голубыми точками показаны локальные медианные значения по данным в диапазоне  $0.2^m$ . Черные пунктирные вертикальные линии указывают диапазон, где звездные величин из двух каталогов хорошо согласуются между собой. Синей пунктирной линией показано среднее значение, а красная штрихпунктирная линия представляет собой линейную аппроксимацию в пределах вертикальных пунктирных линий.

Первая колонка содержит информацию о фильтре; вторая — область наилучшего соответствия между результатами фотометрии EGIPS и EGIS; третья — доля галактик EGIPS, попадающих в область согласия; четвертая и пятая — медиана разницы звездных величин и разброс значений; шестая — наклон линии робастной регрессии с указанием ее ошибки для данных внутри области согласия. Абсолютное значение сдвига между звездными величинами не очень

актуально, так как на нее влияет разница в методологиях и фотометрических системах, однако этот сдвиг весьма незначителен. Важно, что разброс данных крайне мал, менее  $0.05^m$  в фильтрах  $r$  и  $i$ . Наблюдается значимый тренд только в случае фильтра  $g$ . В фильтре  $r$ , наклон значим на уровне  $3\sigma$ , но имеет очень малое значение. Согласие результатов фотометрии в  $i$  фильтре чрезвычайно хорошее: наклон незначим, а разброс минимален. Таким образом, во всех 3-х рассматриваемых фильтрах имеется область согласия шириной около  $3.5^m$  без существенной систематики, где можно полагаться на автоматическую фотометрию каталога EGIPS. Вне области согласия обнаруживаются ожидаемые тренды. Из-за специфики вычитания фона в обзоре Pan-STARRS полный поток от ярких галактик систематически недооценивается. В области слабых галактик, вблизи фотометрического предела, статистика подвержена сдвигу Малмквиста [120].

В добавок к фотометрии Sextractor были оценены морфологические параметры галактик с использованием пакета statmorph [121]: Gini коэффициент [122] относительного распределения яркости в галактиках; второй момент распределения 20% ярчайших областей в галактике,  $M_{20}$  [122]; индексы концентрации, асимметрии и сглаженности (CAS) распределения света в галактике [123]. Для расчета статистик мы использовали те же карты выделения галактик, что и при проведении фотометрии.

Для оценки полноты каталога использовались два простых метода. Первый из них основан на анализе интегрального распределения числа галактик по их наблюдаемым угловым размерам,  $\log N$ - $\log a$ , также известного как функция полноты по угловым размерам галактик (например, [40]). Интегральное распределение для всех галактик каталога EGIPS показано на рисунке 7 черным цветом. Остальные две кривые на рисунке соответствуют распределению двух подвыборок галактик, одна из которых обладает показателем цвета  $(g-i)_0 > 0.95^m$ , а другая меньше этого значения. В качестве оценки размера галактики использовалась шкала, характеризующая размер большой оси диска  $a_r$  в фильтре  $r$ . Линейная часть распределения для всей выборки галактик описывается соотношением  $\log N \propto (-2.82 \pm 0.02) \log a_r$ , для «красных» и «голубых»



наклон распределения равен  $-2.92 \pm 0.02$  и  $-2.67 \pm 0.02$  соответственно. Интерпретация линейного участка функции полноты состоит в следующем: каталог считается полным до некоторого предельно малого значения углового размера галактик, при котором начинаются значимые отклонения от линейного тренда. Эта методика определения полноты использовалась рядом авторов [39, 124], в том числе Караченцевым И. Д. при анализе каталога RFGC [40]. Путем сравнения наблюдаемого распределения галактик с аппроксимирующей линейный участок прямой (которая принималась за «истинное» распределение) было обнаружено, что каталог полон на уровне 96% в диапазоне  $a_r > 5.5''$ .

Второй метод оценки полноты носит название « $V/V_m$ -теста» и был первоначально разработан Туаном и Зейцером в 1979 году [98]. Принцип расчета заключается в следующем. Для каждой галактики каталога вычисляется отношение объемов сфер  $V/V_m$ . Радиус первой сферы равен расстоянию до галактики, вычисляемому по ее наблюдаемому угловому размеру, в данном случае  $a_r$ . Радиус второй сферы равен максимально возможному расстоянию до галактики, при котором после отбора она еще может оставаться членом каталога. Этот радиус соответствует предельному значению углового размера объектов каталога  $(a_r)_L$ . Тогда, отношение объемов сфер будет определяться соотношением  $V/V_m = ((a_r)_L/a_r)^3$ . Авторы показали, что сравнение усредненного по всем галактикам отношения  $\langle V/V_m \rangle$  со значением  $\langle V/V_m \rangle$  для равномерно распределенных галактик (которое, как легко можно понять, равно 0.5) является хорошим критерием полноты каталогов. Этот тест в применении к галактикам EGIPS показывает, что каталог по сути полон,  $\langle V/V_m \rangle$  равно 0.461, 0.472 и 0.476 для объектов с  $a_r > 6''$  соответственно в фильтрах g, r и i.

На рисунке 8 показано распределение по небу галактик из каталога EGIPS в экваториальной системе координат. Обзор Pan-STARRS охватывает все небо севернее  $\text{Dec} > -30^\circ$ , ограничение покрытия неба хорошо заметно на карте распределения галактик, также хорошо видна область сильного галактического поглощения, показанная серым цветом, где количество галактик падает почти до нуля. Как видно, распределение галактик каталога на небе почти случайно. Плоскость Местного сверхскопления практически не видна. Область Местного

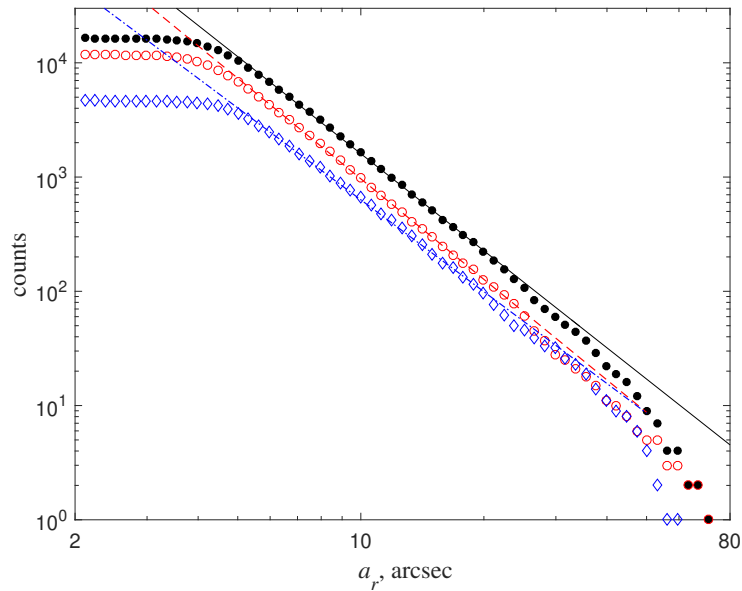


Рисунок 7 — Функция полноты  $\log N\text{-}\log a_r$  для галактик каталога EGIPS. Черными точками показано распределение для всей выборки. Красные открытые кружки соответствуют галактикам  $(g - i)_0 > 0.95$ , а синие ромбы иллюстрируют поведение галактик с  $(g - i)_0 < 0.95$ .

войда хорошо заполнена галактиками, что может говорить о том, что глубина каталога значительно больше размера Местного войда 35-70 Мпк. [125].

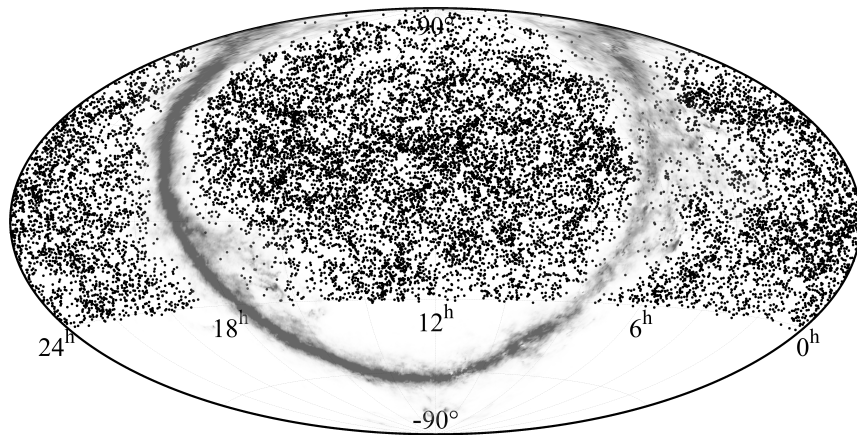


Рисунок 8 — Распределение галактик из каталога EGIPS по небу в экваториальной системе координат. Серым цветом показано распределение пыли в нашей Галактике.

На рисунке 9 показана полнота каталога по красным смещениям - синие кружки, и по внутренней кинематике - пурпурные кружки. Данные по красному смещению имеют практически 100% полноты для галактик с размером большой оси в фильтре  $r$   $a_r = 14''$  и для наиболее ярких галактик с петросяновскими звездными величинами в фильтре  $r$  меньше  $r_{Petro} = 14.6^m$ . Полнота

постепенно уменьшается с уменьшением размера галактики и достигает уровня 50% для галактик с  $a_r = 3.3''$  и  $r_{Petro} = 17.3^m$ . Намного меньше информации для данных галактик можно найти по внутренней кинематики. Всего для 2800 галактик имеется информация по ширине радиолинии 21 см и по оптическим кривым вращения, что составляет всего 17% выборки. Полнота по внутренней кинематике близка к 100% только для наиболее протяженных объектов  $a_r > 15.5''$  (верхняя панель) и быстро падает для галактик  $a_r = 10.5''$ , где полнота оказывается меньше 50%. Спектроскопические наблюдения кривых вращения галактик ранних типов является существенно более сложной задачей, чем измерение ширины линии водорода в богатых газом галактиках, и как следствие, гораздо больше данных о максимуме скорости вращения известно для галактик поздних типов. Это объясняет относительно малый процент кривых вращения доступных даже для ярчайших галактик (средняя панель) и постепенный рост полноты данных к самым тонким галактикам (нижняя панель). Полнота в каждой точке считалась путем деления общего количества галактик с красными смещениями или внутренней кинематикой на полное количество галактик каталога EGIPS в данной точке.

По данным HyperLeda, 10 485 галактик из каталога EGIPS уже имеют измерения красного смещения. С учетом этих данных эффективная глубина каталога характеризуется медианной скоростью 11 600 км/с в системе отсчета реликтового излучения, что примерно соответствует 165 – 170 Мпк. Согласно рисунку 10, распределение красного смещения показывает сильную нехватку галактик выше  $cz_{CMB} \sim 10\,000$  км/с.

Галактики каталога EGIPS показывают бимодальное распределение на диаграмме «цвет–абсолютная звездная величина» (далее по тексту «цвет–величина»). В 2004 году впервые были описаны отдельные области диаграммы: «красная последовательность», «голубое облако» и «зеленая долина» [126]. «Красная последовательность» населена галактиками раннего типа, а «синее облако» образовано галактиками позднего типа. Между ними находится переходная область, так называемая «зеленая долина», которая интерпретируется как зона быстрой эволюции галактик от позднего типа к раннему. Диаграмма

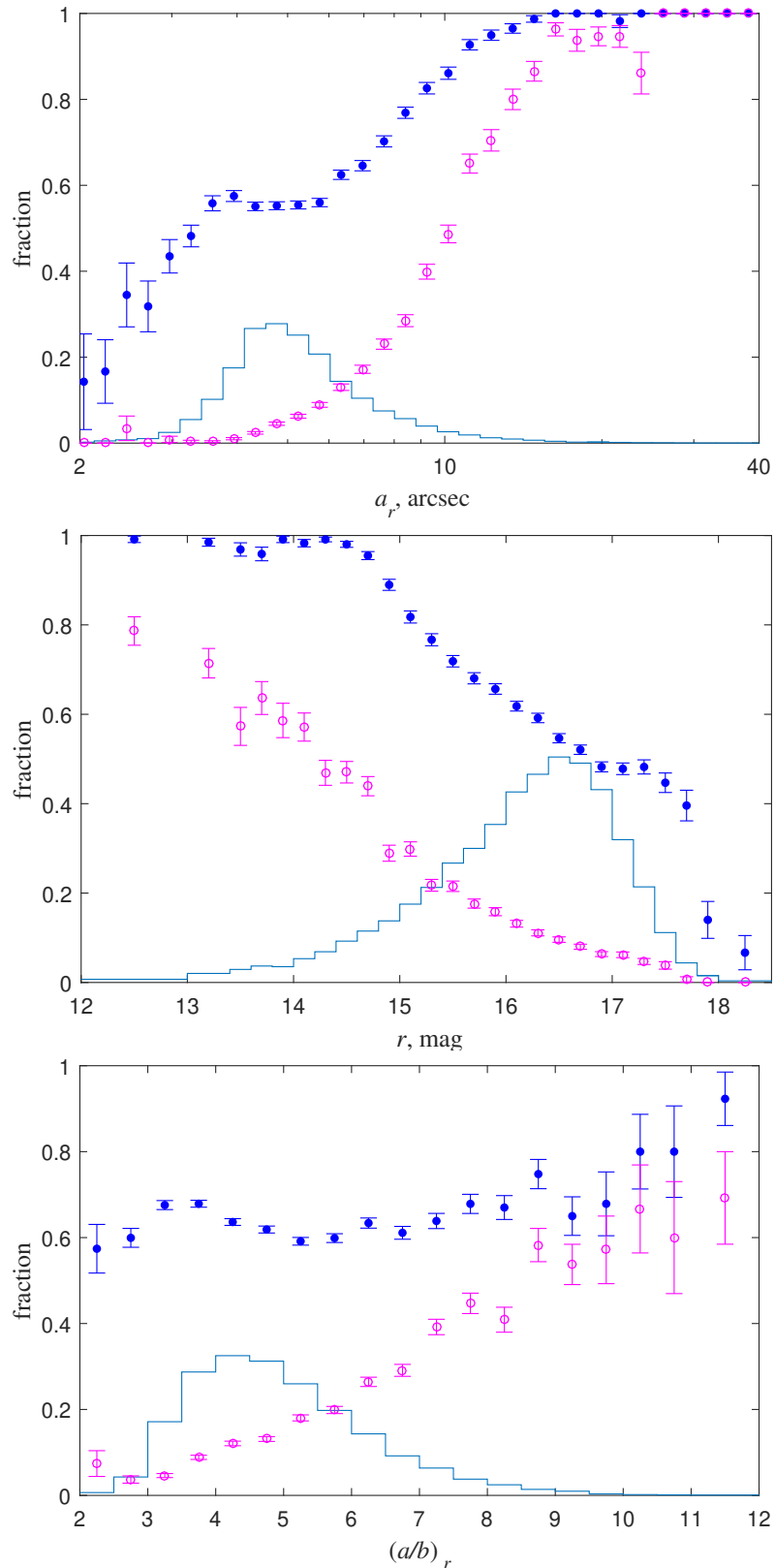


Рисунок 9 — Доля галактик, видимых с ребра, с известными красными смещениями и внутренней кинематикой. На каждой панели показана полнота в зависимости от красного смещения (синие точки) и внутренней кинематики (пурпурные кружки), распределения построены для фильтра  $r$ . Верхняя панель - полнота как функция большой полуоси. Средняя панель - полнота как функция звездных величин Петросяна. Нижняя панель - полнота как функция отношения осей. Распределение галактик показано гистограммой.

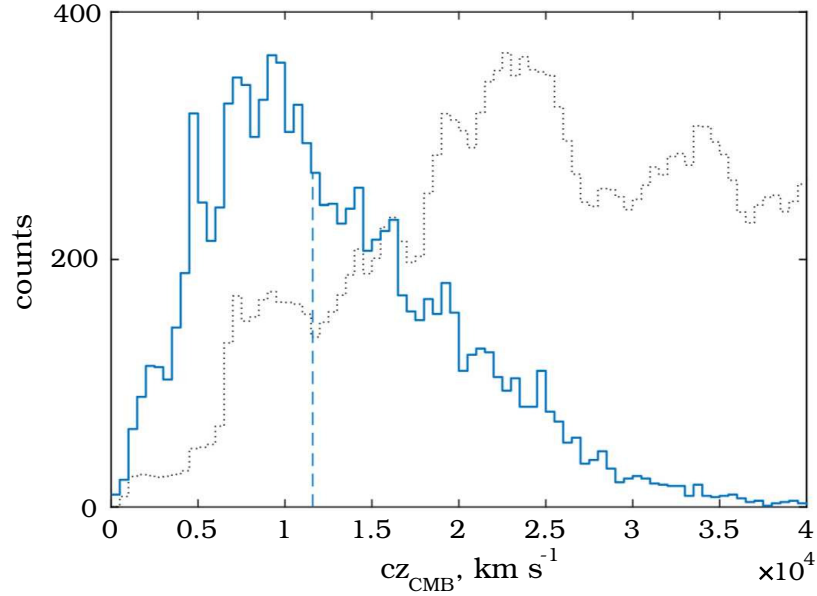


Рисунок 10 — Распределение красных смещений галактик из каталога EGIPS. Среднее значение  $11\,600\text{ км/с}$  показано вертикальной пунктирной линией. Для сравнения пунктирная линия показывает распределение галактик SDSS, отмасштабированное по оси ординат.

«цвет – величина» для галактик, видимых с ребра, показана на рис. 11.

Коричневым цветом показано распределение плотности галактик EGIPS. Для сравнения мы наложили общее распределение галактик с известными красными смещениями, взятое из SDSS DR12 [127]. Выборка была разделена на ближнюю  $cz_{CMB} < 10\,000\text{ км/с}$  (график слева) и более далекую  $10\,000 < cz_{CMB} < 30\,000\text{ км/с}$  (график справа) подвыборки. Наиболее близкие галактики с  $cz_{CMB} < 2\,000\text{ км/с}$  были исключены из рассмотрения, чтобы минимизировать влияние местного пекулярного поля скоростей и избежать возможных проблем применения автоматической фотометрии к очень протяженным объектам. Звездные величины были скорректированы за поглощение в нашей Галактике [128], но не за внутреннее поглощение. Звездные величины SDSS были преобразованы в фотометрическую систему Pan-STARRS ([129] таблица 6). На рис. 11 показано, что в каталоге преобладают галактики красной последовательности с цветом  $(g-i)_0 \geq 1.0$ , которые, вероятно, являются линзовидными галактиками. Отчасти это можно объяснить эффектом отбора. В отличие от спиральных галактик S0-галактики не имеют ярко выраженных особенностей, позволяющих надежно идентифицировать их ориентацию с ребра. В результате это делает критерий их отбора более мягким, чем для галактик поздних типов.

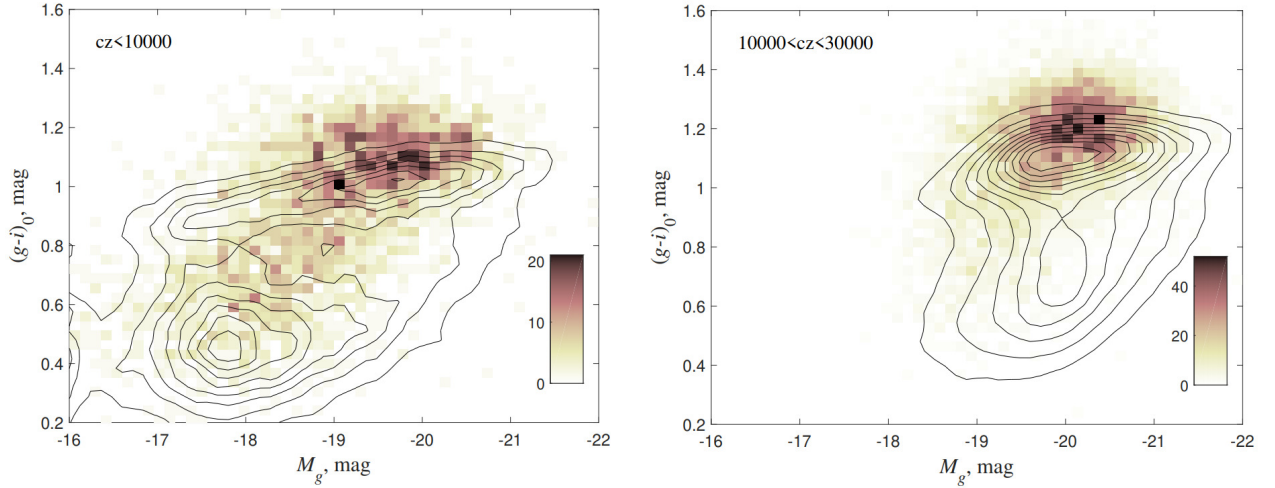


Рисунок 11 — Диаграмма «цвет–величина» галактики. Распределение плотности галактик EGIPS показано коричневым цветом. Сплошные изолинии иллюстрируют распределение общей выборки близких галактик, взятой из обзора SDSS и преобразованной в фотометрическую систему Pan-STARRS. Все звездные величины были скорректированы с учетом поглощения в нашей Галактике.

Несмотря на хорошее соответствие между EGIPS и общей выборкой близких галактик,  $cz_{CMB} < 10\,000$ , наблюдается заметное смещение цвета галактик красной последовательности (график слева 11). Галактики «с ребра» на  $(g-i)_0 \simeq 0.1$  величины краснее, чем типичная галактика, ориентированная произвольным образом. Это можно частично объяснить внутренним поглощением в галактиках, видимых с ребра. Согласно работе [130], разница в цвете между ориентацией «плашмя» и «с ребра» составляет  $(g-i)_0 = 0.28^m$  для «чистого диска» и  $(g-i)_0 = 0.20^m$  для «очень больших» галактик. Принимая во внимание случайную ориентацию галактик SDSS и типичное внутреннее отношение осей  $q \sim 0.22$  [131], мы можем оценить ожидаемый сдвиг цвета между общей выборкой и галактиками, видимыми с ребра, равным  $(g-i)_0 = 0.24^m$  и  $0.16^m$  величины для чистых дисковых галактик и галактик с преобладанием балджа соответственно. Однако следует отметить, что разница в цвете между галактиками каталога EGIPS и галактиками SDSS дает меньшее покраснение для галактик «красной последовательности», чем это ожидалось. Существует приблизительное соответствие между галактиками EGIPS и SDSS для галактик «голубого облака». Как видно из рис. 10, распределения красных смещений галактик SDSS и EGIPS существенно различаются за пределами  $cz \sim 11\,000$  км/с. Число галактик из EGIPS с известным красным смещением резко падает, в то время как число га-

лактик из обзора SDSS с известными красными смещениями продолжает расти до 23 000 км/с. В результате в подвыборке далеких  $cz_{CMD} > 10\,000$  км/с галактик SDSS преобладают объекты высокой светимости, что объясняет разницу между цветовыми распределениями галактик EGIPS и SDSS. Этот эффект особенно заметен для голубых галактик.

Распределение по соотношению осей галактик, видимых с ребра, демонстрирует четкую дихотомию на диаграмме «цвет – величина», показанной на рис. 12. Красная последовательность населена толстыми  $(a/b)_g < 5$  галактиками. В голубом облаке преобладают тонкие галактики. Это разделение, вероятно, отражает морфологические различия между этими двумя группами галактик.

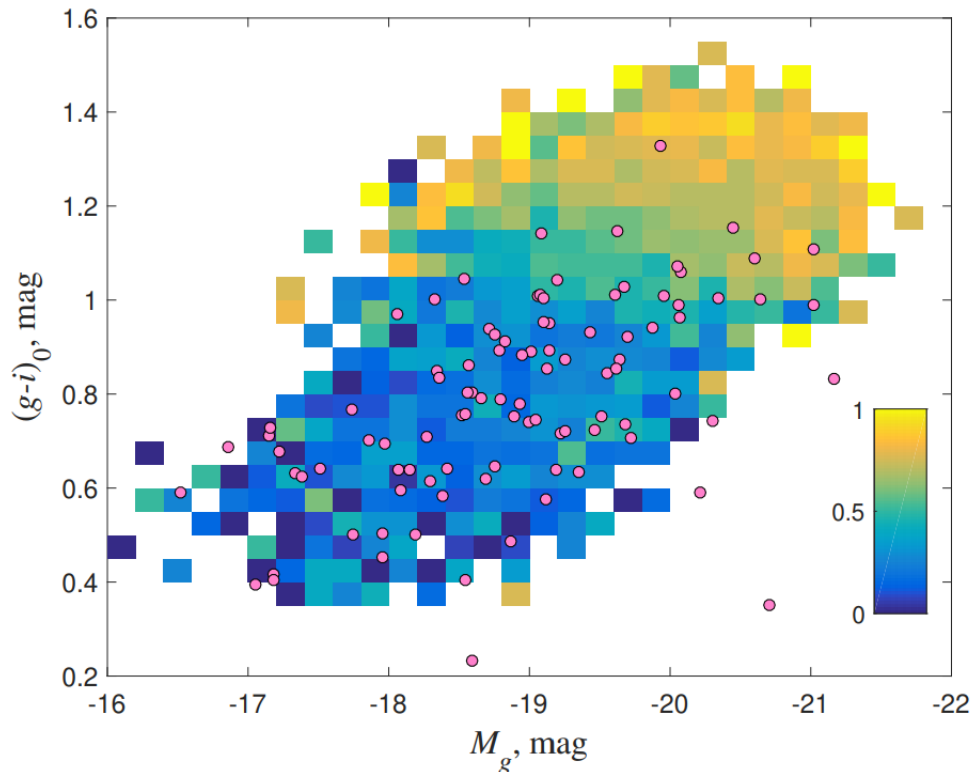


Рисунок 12 — Диаграмма «цвет – величина» галактик  $(a/b)_g < 5$ . Отношение осей показано цветовым градиентом в соответствии с легендой. Показаны только бины с более чем 3 галактиками. Розовые точки представляют собой распределение ультратонких галактик,  $(a/b)_g > 10$ .

Несмотря на достаточно большой разброс показателей цвета, наблюдается зависимость показателя цвета галактик  $(g-i)_0$  от толщины галактики  $(a/b)_r$  (см. рис. 13). Толстые галактики образуют облако с типичным показателем цвета  $(g-i)_0 \sim 1.2^m$ , которое имеет систематически более красный цвет, чем распределение тонких галактик. Цвет максимума распределения почти постоянен для

галактик с отношением осей в диапазоне от 3 до 5. О таком поведении галактик сообщалось ранее [72, 108]. Галактики с  $(a/b)_r > 5$  оказываются в среднем более голубыми по мере увеличения отношения осей. «Кометный» хвост распределения показывает аналогичные тренды  $(g-i)_0 \propto (-0.055 \pm 0.004)(a/b)_r$  и  $\propto (-0.066 \pm 0.005)(a/b)_r$  для скользящего медианного и среднего значения соответственно.

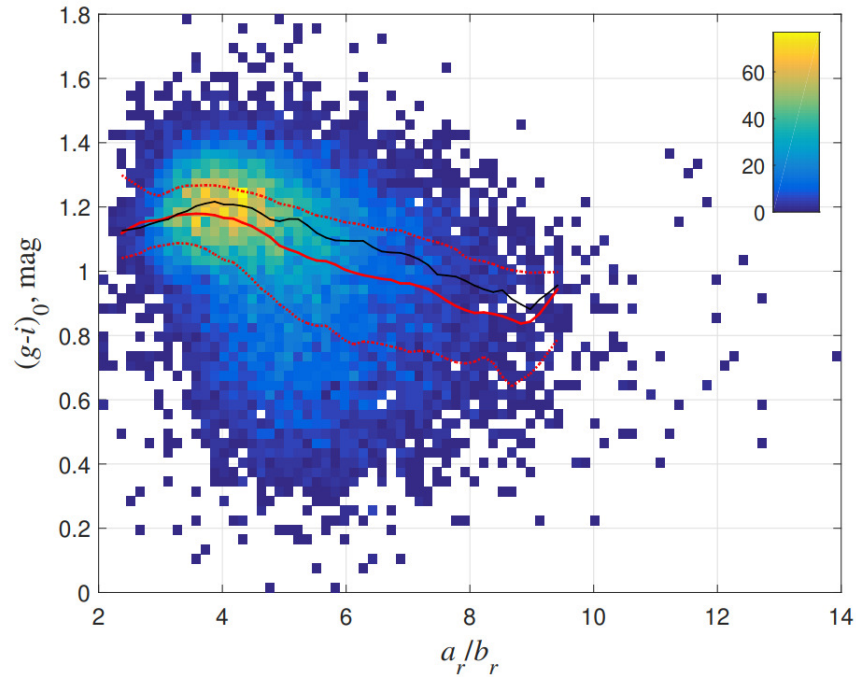


Рисунок 13 — Зависимость цвета  $(g-i)_0$  от отношения осей  $(a/b)_r$  для галактик из каталога EGIPS. Цвета галактик скорректированы за поглощение в нашей Галактике. Цветом показано количество галактик в данной ячейке. Скользящее медианное значение показано красной, мода - сплошной черной, а 25- и 75-процентные квантили Ч красными пунктирными линиями.

Цвет отражает изменения в звездном населении и недавнюю историю звездообразования дисковых галактик. Очевидно, что самые тонкие галактики в среднем имеют более молодое звездное население. Зависимость толщины галактики от морфологии обсуждается давно. Хайдманн и др. (1972) [38] обнаружили, что отношения осей  $a/b$  плавно возрастают от эллиптических к галактикам Sd-типа с резким падением  $a/b$  для неправильных галактик. Основываясь на скромной выборке галактик, видимых с ребра, де Грис (1998) [132] обнаружил, что галактики систематически становятся тоньше при переходе от S0 к Sc, в то время как Sd толще, чем галактики Sc. Однако на основе двумерной декомпози-



ции репрезентативной выборки галактик, видимых с ребра, зависимость между морфологическим типом галактики и толщиной диска не была найдена [133]. Не нашли они и зависимости между отношением балджа к полной светимости (одной из количественных характеристик по классификации Хаббла) и толщиной диска. Корреляция между цветом галактики и толщиной диска также оказалась незначительной. Кроме того, Бизяев с соавт. ([72], см. рис. 7) не обнаружили существенной зависимости между толщиной диска и общим цветом галактики  $(g-r)_0$ . Ультратонкие галактики  $(a/b)_g > 10$ , обозначенные розовыми точками на рис. 12, избегают красной последовательности. Их распределение не отличается от распределения других спиральных галактик, демонстрируя те же цвета и абсолютные величины. Хорошая согласованность распределения ультратонких галактик с остальными спиральными галактиками, видимыми с ребра, может быть связана с одинаковым влиянием пыли как в нормальных, так и в ультратонких галактиках. Однако, авторы ряда работ указывают на низкое содержание пыли в тонких и ультратонких галактиках (например, [134]), которое, в свою очередь, должно иметь связь с медленно протекающими процессами звездообразования в ультратонких галактиках [135]. Оценки темпов звездообразования составляют 0.006–0.02  $M_\odot/\text{год}$  [45, 135]. С другой стороны, столь низкие темпы звездообразования ответственны за малое количество молодых голубых звезд, влияющих на цвет галактик. Таким образом, более предпочтительным объяснением одинаковых распределений по цвету и абсолютной величине ультратонких и остальных спиральных галактик может являться компенсация малых эффектов покраснения из-за низкого содержания пыли малым вкладом молодых голубых звезд.

Минимально возможная толщина звездного диска напрямую связана с его динамической устойчивостью и регулируется массой гало темной материи [53, 54]. Звездный диск на пределе устойчивости должен подчиняться соотношению  $z_0/h \sim M_d/M_t$  [92] между вертикальным и радиальным отношением шкал диска  $z_0/h$ , и относительным вкладом диска в полную массу галактики  $M_d/M_t$ . Отсюда следует, что чем больше относительная масса гало темной материи, тем меньше может быть относительная толщина диска. Чтобы найти наимень-

шую возможную истинную, исправленную за наклон, относительную толщину, Кудря с соавт. [136] предложили восстанавливать распределение плотности истинного соотношения осей галактик по функции распределения наблюдаемых отношений, решая интегральное уравнение. Они определили максимальное истинное отношение осей  $a/b$  как такое, при котором распределение плотности выборки равно 1 для данного отношения осей ([136], уравнение 6). Наблюдаемое распределение отношения осей  $a/b > 7$  тонких галактик EGIPS является почти экспоненциальным,  $\log N \propto (-0.88 \pm 0.03)(a/b)_g$ , с небольшим превышением для самых тонких галактик (аналогично тому, как показано на рисунке 14). Методом, предложенным в работе [136], было оценено максимальное истинное отношение осей галактик в каталоге EGIPS, оно получилось равным  $(a/b)_g = 19.9$ . С учетом соотношений между параметрами, характеризующими размер галактики в каталогах EGIPS и RFGC, максимальное сжатие равно  $a/b = 25.7$  в системе размеров большой полуоси RFGC. Это значение фактически совпадает с максимальным соотношением истинных осей 25.8, полученным [136] для выборки галактик RFGC.

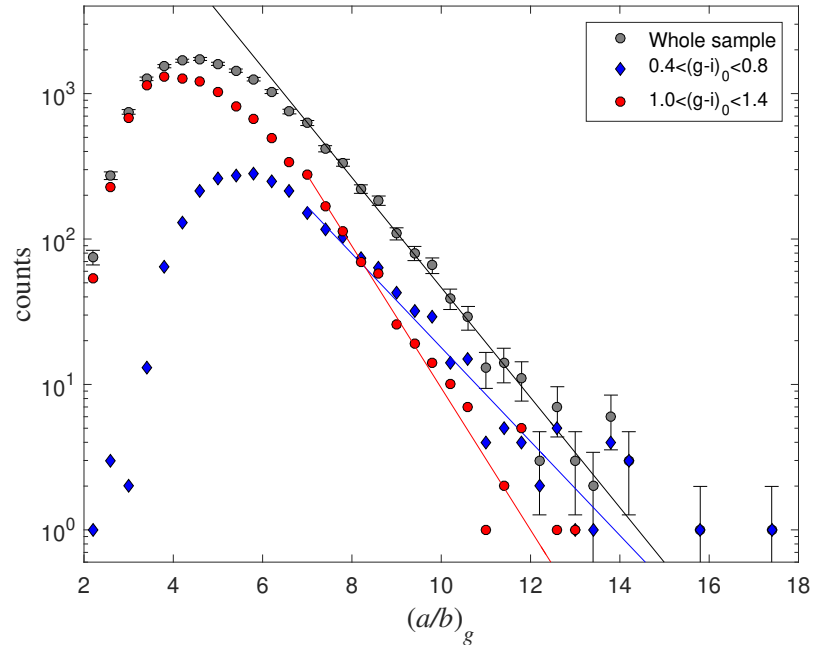


Рисунок 14 — Распределение галактик EGIPS по отношению осей в фильтре  $g$ . Серыми кружками показано распределение галактик каталога EGIPS. Красные кружки - подвыборка галактик с  $1.0 < (g - i)_0 < 1.4$ , синие ромбы - галактики с  $0.4 < (g - i)_0 < 0.8$ .

На рисунке 14 показано, что функции отношения осей галактик с показателем цвета, смещенного в более красную область  $1.0 \leq (g - i)_0 \leq 1.4$  и в более

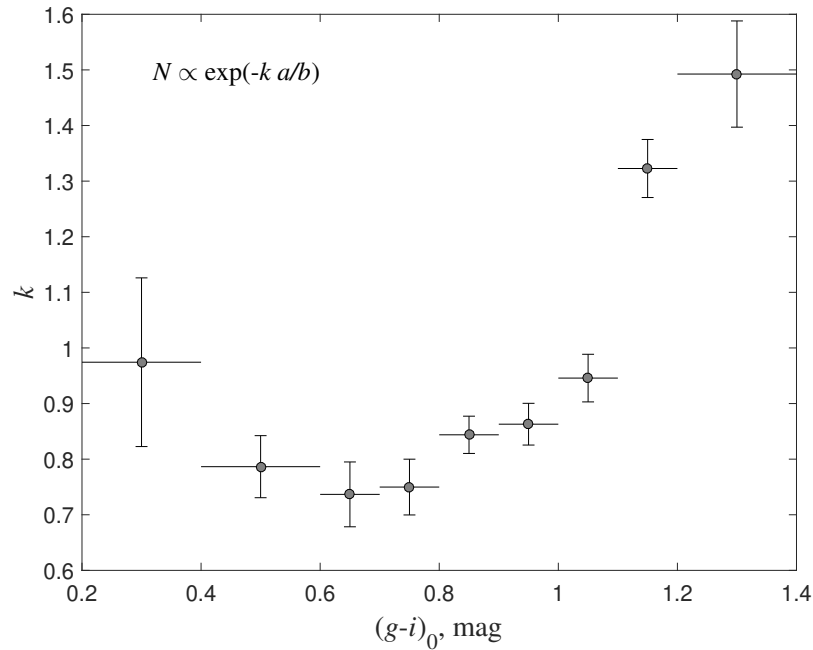


Рисунок 15 — Зависимость скорости экспоненциального спада функции распределения отношений осей от цвета. Каждое значение рассчитывается для цветового диапазона, обозначенного горизонтальными линиями.

голубую  $0.4 \leq (g-i)_0 \leq 0.8$ , различны. Количество «красных» галактик падает с увеличением  $a/b$  гораздо быстрее, чем «голубых» галактик. Это связано с тем, что галактики раннего типа систематически толще, чем галактики позднего типа. Эффект более отчетливо можно проследить на рисунке 15, где показана зависимость скорости экспоненциального спада  $k$  от цвета галактики. Скорости экспоненциального спада определяются через экспоненциальную функцию  $N \propto \exp(-k a/b)$ , которой аппроксимируется распределения отношения осей в фильтре  $g$  для тонких галактик ( $a/b > 7$ ). Распределения строятся в узких диапазонах показателей цвета, которые на рисунке 15 показаны сплошной горизонтальной линией. При переходе от «красных» к «синим» галактикам коэффициент  $k$  уменьшается. На рисунке заметно резкое изменение распределения для показателя цвета  $(g-i)_0 \approx 1.1^m$ . В диапазоне показателей цвета  $0.6^m - 1.13^m$  значение  $k$  плавно уменьшается. Такое поведение распределения может быть объяснено тем, что самые молодые звездные популяции образуют самые тонкие подсистемы в дисках галактик. Аналогичная тенденция была обнаружена при анализе 4455 тонких галактик [136], где распределение скорости экспоненциального спада постепенно становится более пологим при переходе от галактик Sb к галактикам Sd. Однако, для выборки галактик из каталога EGIPS рас-

пределение самых голубых галактик  $(g-i) \leq 0.6^m$  меняет направление тренда и начинает расти. Такое поведение ожидается для карликовых галактик, которые систематически толще [137].

## Выводы

В данной главе представлено краткое описание отбора галактик в каталог «Edge-on Galaxies in the Pan-STARRS survey» (EGIPS) и статистика данного каталога. Каталог EGIPS был создан с использованием общедоступных данных DR2 обзора Pan-STARRS. Галактики отбирались искусственной нейронной сетью CNN, обученной на выборке из 300 000 объектов. Всего нейронной сетью было отобрано 26 719 кандидатов. В кандидаты так же попали объекты, не являющиеся галактиками, после их отсева осталось 22 727 кандидатов. После визуального просмотра кандидатов в галактики, видимые с ребра, участниками проекта в каталог вошли 16 551 галактики.

Для всех 22 727 кандидатов была проведена фотометрия по данным Pan-STARRS во всех 5 фильтрах (g, r, i, z, y) с помощью SExtractor. Для проверки качества фотометрии было проведено сравнение звездных величин из каталога EGIPS и каталога EGIS [72]. Фотометрия имеет хорошее согласие, хотя при измерении звездных величин двух этих каталогов были использованы разные методологии и фотометрические системы. Так систематический сдвиг между фотометрией в каталоге EGIS и EGIPS для фильтров g, r, i соответственно равен: -0.032, 0.0022, 0.025. А наклон разности звездных величин двух каталогов в фильтрах g, r, i, соответственно равен:  $0.0106 \pm 0.0018$ ,  $0.0037 \pm 0.0012$ ,  $-0.0016 \pm 0.0010$ . Фотометрия надежна для объектов в диапазоне звездных величин  $13.8^m$  -  $17.4^m$  в фильтре r.

Измерения красного смещения имеются для 10 485 галактик из каталога EGIPS, согласно этим данным эффективная глубина каталога характеризуется медианной скоростью 11 600 км/с.

Галактики каталога EGIPS демонстрируют бимодальное распределение на диаграмме «цвет – величина». При сравнении диаграммы «цвет – величина» галактик каталога EGIPS и диаграммы, построенной по данным обзора SDSS с

предварительным переводом звездных величин из системы SDSS в фотометрическую систему Pan-STARRS, было найдено, что в каталоге EGIPS преобладают галактики «красной последовательности», которые, вероятно, являются линзовидными галактиками. Так же наблюдается смещение по показателю цвета галактик «красной последовательности», галактики каталога EGIPS на  $(g-i)_0 \simeq 0.1^m$  краснее. Подобный эффект может быть объяснен большим внутренним поглощением галактик с ребра. Так как все галактики каталога EGIPS имеют угол наклона  $\sim 90^\circ$  вдоль луча зрения, а галактики из обзора SDSS имеют произвольную ориентацию, то этот эффект должен быть хорошо заметен. Имеется существенное различие распределения красных смещений галактик из обзора SDSS и EGIPS, количество галактик EGIPS на уровне  $cz \sim 11\,000$  км/с резко падает, а число галактик из обзора SDSS продолжает расти до  $cz \sim 23\,000$  км/с. На диаграмме «цвет–величина» для галактик каталога EGIPS показано четкое разделение в зависимости от отношения осей. «Красная последовательность» населена толстыми галактиками с  $(a/b)_g < 5$ , в «голубом облаке» преобладают тонкие галактики. Такое разделение может быть связано с морфологическими отличиями галактик. Найдена зависимость показателя цвета галактики  $(g-i)_0$  от толщины галактики  $(a/b)_r$ . Галактики с  $(a/b)_r < 3$  имеют показатель цвета в среднем равный  $(g-i)_0 \sim 1.2^m$ . Цвет максимума распределения почти постоянен для галактик с отношением осей в диапазоне от 3 до 5. А галактики с  $(a/b)_r > 5$  оказываются в среднем более голубыми. Распределение ультратонких галактик  $(a/b)_g > 10$  по показателю цвета и абсолютным звездным величинам не отличается от распределения других спиральных галактик, что указывает на одинаковое влияние пыли в этих галактиках.

### 3 Декомпозиция изображений ультратонких галактик

Несмотря на то, что галактики, видимые с ребра, активно изучались различными группами исследователей, только сравнительно небольшая доля объектов из каталога RFGC имеет фотометрию хорошего качества, хотя совместно с данными о кинематике надежная фотометрия галактик могла бы являться прекрасной базой для исследования распределения светящейся и темной материи в этих галактиках. Комплексное изучение наиболее тонких галактик с использованием данных о кинематике, многоцветной фотометрии, звездообразовании и данных о наличии газа, позволит получить структурные и эволюционные параметры дисков галактик, что чрезвычайно важно для понимания механизмов, ответственных за формирование и эволюцию галактик.

#### 3.1 Выборка объектов

Выборка была сформирована на основе каталога тонких галактик RFGC [40] и содержит около 180 галактик. Часть из них были исключены из рассмотрения из-за низкого отношения сигнал-шум данных, проецирования ярких звезд на тело галактики, значительных артефактов, оставшихся после автоматического вычитания фона неба алгоритмом Pan-STARRS. В результате декомпозиция выполнялась для 148 галактик. Галактики были отобраны по склонению  $\text{Dec} \geq -25^\circ$  и размеру большой оси  $a \leq 4'$ . Исследуемые галактики не имеют известных кривых вращения. Данные критерии были подобраны из соображений удобства спектроскопических наблюдений с редуктором светосилы SCORPIO на 6-м телескопе САО РАН, так как длина щели спектрографа составляет  $6'$ . В дальнейшем планируется провести совместный анализ параметров описанных выше галактик, полученных из кривых вращения, и результатов декомпозиции. Для декомпозиции галактик были отобраны данные, полученные в ходе обзора неба Pan-STARRS (DR2) [109] в фильтрах  $g, r, i, z, y$ . Выбор этого обзора основан на том, что Pan-STARRS доступно  $3/4$  всего неба, что значительно увеличивает вероятность наличия данных для всей нашей выборки. Второй релиз предоставляет доступ к суммарным изображениям, полученным в ходе обзора  $3\pi$  площади неба. Изображения проходят первичную обработку с помощью

процедуры image processing pipeline (IPP), описанной в статье [138], а затем объединяются в стеки [139].

### 3.2 Декомпозиция

Один из способов анализа распределения света, полученного в астрономических наблюдениях, заключается в его моделировании с помощью аналитических функций. При данном подходе осуществляется подгонка параметров, характеризующих источник света. Исторически первым подобный анализ проводился на одномерных профилях поверхностной яркости. Однако, на данный момент успешно применяется анализ двумерных изображений. Преимущество двумерного анализа заключается в том, что можно точно смоделировать сразу множество объектов, находящихся на одном изображении, используя сложные двумерные и трехмерные функции распределения яркости для галактик со сложными изофотами. При декомпозиции берется в расчет функция рассеяния точки (PSF), учитывающая влияние оптической системы и дрожание атмосферы.

Декомпозиция двумерных изображений ультратонких галактик проводилась с помощью программного пакета DECA [140]<sup>2</sup>. Пакет DECA написан на интерпретируемом языке программирования Python и объединяет возможности нескольких распространенных пакетов для обработки астрономических данных, таких как IRAF, SExtractor, а также программный код GALFIT<sup>1</sup>. Поскольку для галактик, расположенных под большим углом к наблюдателю, сложно определить наличие спиральных ветвей, бара и других структур, декомпозиция проводилась на два компонента, балдж и диск, с определением параметров этих компонентов.

Перед проведением декомпозиции необходимо выполнить предобработку изображений. Первым шагом является маскирование фоновых объектов (звезд, других галактик, артефактов первичной редукции изображений и пр.). Для выделения объектов на изображении используется SExtractor. Получение надежных значений параметров декомпозиции требует правильного учета фона

---

<sup>2</sup><http://lacerta.astro.spbu.ru/?q=node/96>

<sup>1</sup><https://users.obs.carnegiescience.edu/peng/work/galfit/galfit.html>

неба, который определяется с помощью специальных алгоритмов. По ярким изолированным звездам строится PSF-профиль, с которым сворачивается модель галактики для ее подгонки к реальному наблюдаемому изображению.

Разделение изображения галактики на несколько фотометрических компонентов осуществляется программой *Galfit*. Для аппроксимации профиля галактик используется двухкомпонентная модель, включающая дисковую компоненту и балдж. Далее под балджем будет подразумеваться любой центральный компонент, который может оказаться в том числе и баром. Диск описывается законом  $sech^2$  вдоль вертикальной шкалы и модифицированной функции Бесселя в радиальном направлении, балдж описывается законом Серсика [140]. В *Galfit* для нахождения оптимального решения подгонка моделей реализуется алгоритмом Левенберга - Марквардта. Данный метод наиболее эффективен для поиска большого количества параметров, однако, из-за возможности попадания решения в локальный минимум при декомпозиции необходимо указывать начальные приближения. Начальные параметры балджа и диска находятся при помощи одномерной декомпозиции: используя фотометрический разрез галактики, проведенный вдоль большой и малой осей. На рис. 16 приведено прямое изображение галактики RFGC2714, фотометрический разрез вдоль ее большой оси, аппроксимирующие модели и разность прямого изображения и модели.

### 3.3 Результаты

Параметры, полученные в ходе декомпозиции, представлены в таблице 2 Приложения F. Число галактик, для которых была проведена декомпозиция, варьируется в зависимости от фильтра (g: 138, r: 148, i: 145, z: 147, u: 126 ). Это связано с тем, что изображения галактик в разных фильтрах имеют разное отношение сигнала к шуму, а так же на некоторых кадрах могут находиться дефекты, которые не позволяют провести качественную декомпозицию. Полная таблица доступна по адресу <https://www.sao.ru/edgeon/projects/UltraThin160/decomposition.html>

Для пересекающихся выборок мы приводим сравнение параметров, полученных в ходе декомпозиции, с данными из Catalog of Edge-on Disk Galaxies from



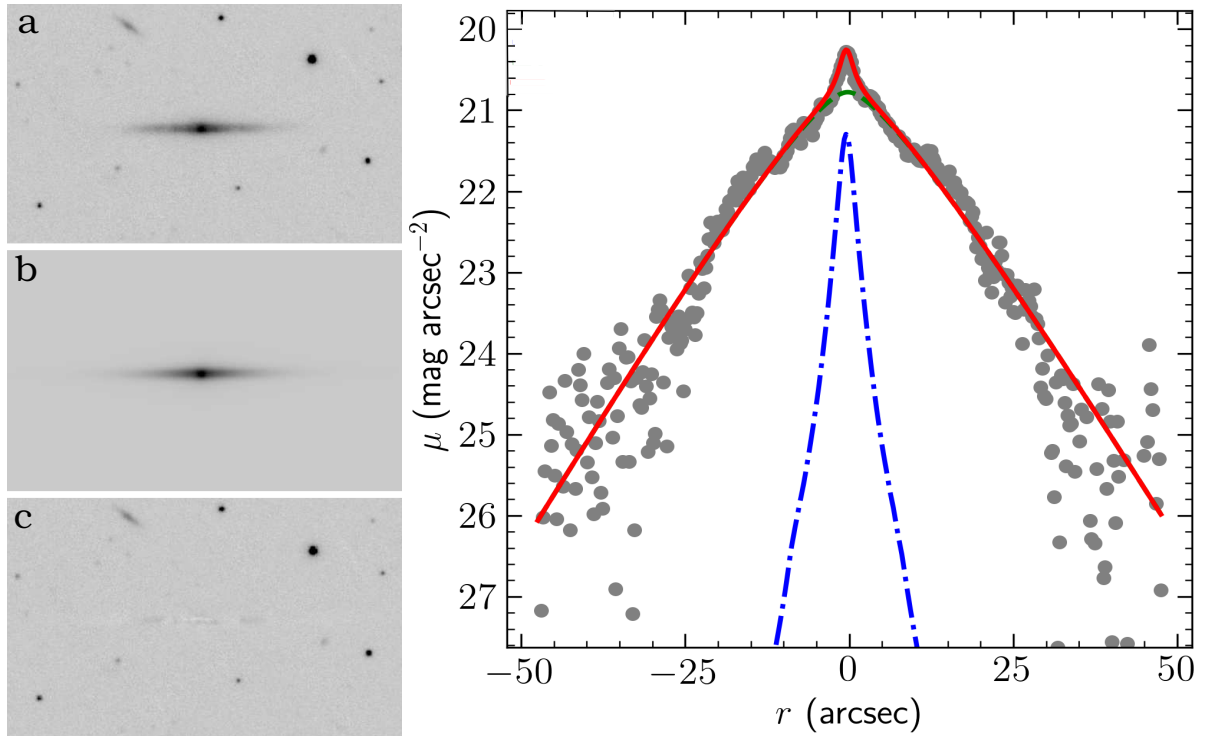


Рисунок 16 — Декомпозиция галактики RFGC2714 в фильтре  $i$ . На трех левых вкладках представлены: (a) - прямое изображение галактики, (b) - суммарная модель диска и балджа, (c) - разностное изображение, полученное вычитанием суммарной модели из изображения галактики. На правой панели показан фотометрический разрез галактики вдоль большой оси и аппроксимирующие его модели. Серыми точками показаны наблюдательные данные; синей пунктирной линией с точкой показан балдж, описываемый законом Серсика; зеленой линией, которая почти полностью лежит под красной, показан экспоненциальный диск; красной сплошной линией - суммарная модель.

SDSS (EGIS) [72], который содержит 5 747 галактик, видимых с ребра. Выборки пересекаются по 23 галактикам в  $r$  и  $g$  фильтрах, по 19 в  $i$  фильтре. Сравнение производилось по интегральным звездным величинам, поскольку они наименее подвержены влиянию методики измерений, используемой разными авторами. С учетом поглощения в нашей Галактике из работы [141] для фильтра  $g$  разность величин с каталогом EGIS составила  $-0.25 \pm 0.03^m$ . Разность для фильтров  $r$  и  $i$  соответственно равна  $-0.18 \pm 0.02^m$ ,  $-0.11 \pm 0.03^m$ . Таким образом, измерения, полученные с помощью пакета DECA, показывают статистически более высокий поток, чем приводится в каталоге EGIS. Здесь и далее ошибка рассчитывалась как ошибка среднего. Разница увеличивается для более слабых галактик (рис. 17). Такой эффект может быть связан с разницей применяемых подходов. В каталоге EGIS звездные величины галактик определяются в конечных аппетитах, что приводит к недооценке их блеска. Программный пакет

DECA для определения звездных величин галактик использует аналитическую модель, что позволяет получать оценки в бесконечной апертуре.

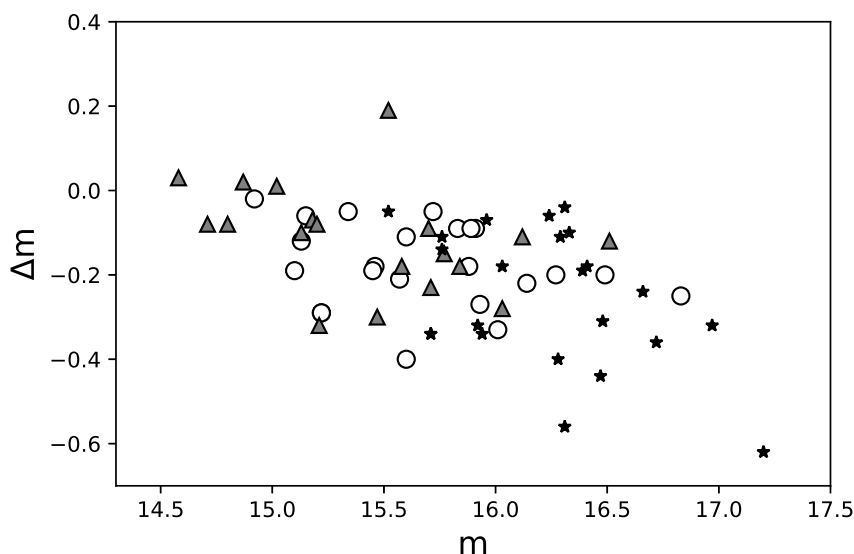


Рисунок 17 — Разность звездных величин, полученных в нашей работе, и из каталога EGIS. Незаполненными кружками показаны измерения в фильтре r, серыми треугольниками - в фильтре i, черными звездочками - в фильтр в фильтре g.

В каталоге RFGC галактики классифицируют как тонкие и ультратонкие по отношению их видимых осей ( $a/b$ ), которые соответствуют размеру галактики для определенной изофоты. В других работах (например, [41]) тонкие галактики отбирают по отношению шкал  $h/z_0$ , которые характеризуют характерный масштаб изменения яркости. Мы строим зависимость отношения шкал от отношения видимых осей для нашей выборки галактик (рис. 18). Отношение осей было взято из каталога RFGC. Была найдена очень слабая корреляция с коэффициентом Пирсона 0.07 между описанными выше величинами. Из нее следует, что галактика, отобранная по одному из критериев как тонкая, может не соответствовать данному классу по второму критерию.

Неоднократно подчеркивалось, что ультратонкие галактики являются галактиками низкой поверхностной яркости [41, 108, 142], для которых  $\mu_B > 22.75^m/\square''$  [42]. Было получено значение  $\mu_B$  галактик в положении плашмя в фильтре B, используя соотношение из работы [143] и цвет (g-r) [144]. Распределение галактик по величине поверхностной яркости представлено на рис. 19. Среднее арифметическое значение составляет  $24.08 \pm 0.05^m/\square''$ , медианное зна-

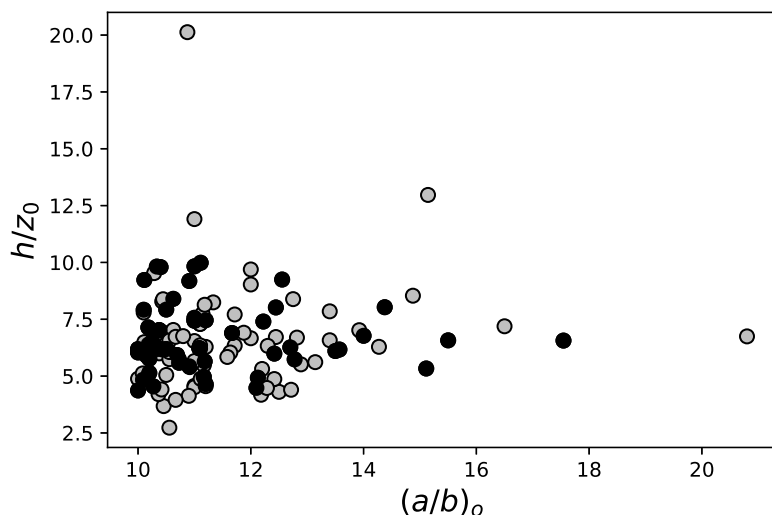


Рисунок 18 — Зависимость отношения шкал ( $h/z_0$ ) от отношения видимых осей  $(a/b)_o$ . Отношение шкал получено в ходе данной работы в фильтре g. Отношение видимых осей взято из каталога RFGC в фильтре V. Серые кружки - галактики без центрального компонента. Черные кружки - галактик с центральным компонентом.

чение  $24.05^m/\square''$ .

Вывод о низкой поверхностной яркости ультратонких галактик основан на соотношении «поверхностная яркость - отношение шкал», где поверхностные яркости пересчитаны в положение плашмя. В статье [145] было показано, что сильная корреляция между поверхностной яркостью и относительной толщиной галактики вызвана не физическими закономерностями, а эффектом самокорреляции, поскольку при пересчете поверхностной яркости используется величина отношения шкал.

Была построена зависимость центральной поверхностной яркости галактик от отношения шкал (рис. 20). При построении использовались данные из каталога EGIS (серые точки) и данные, полученные в ходе работы (серые кружки – галактики без центрального компонента, черные кружки – галактики с центральным компонентом). В данном случае поверхностная яркость не приводилась к положению плашмя. В соответствии с результатами [145], значимой корреляции найдено не было (коэффициент Пирсона = -0.25), однако галактики из данной работы имеют более низкие поверхностные яркости, чем галактики из каталога EGIS для одних и тех же отношений шкал.

Было проведено сравнение величин поверхностной яркости между галакти-

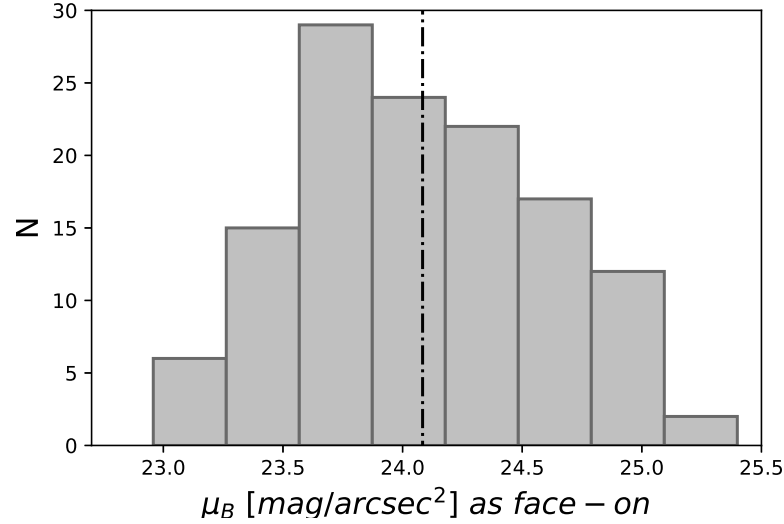


Рисунок 19 — Распределение галактик данной работы по поверхностной яркости в фильтре В в положении «плашмя».

ками из каталога EGIS и исследуемой выборкой галактик. Галактики из каталога были отобраны по отношению осей, соответствующему максимальному и минимальному отношению осей для галактик исследуемой выборки, то есть в диапазоне от 0.08 до 0.28 (точка с пунктиром на рис. 20). Для распределения поверхностной яркости в фильтре r галактик из каталога EGIS и галактик исследуемой выборки (138 галактик) тест Колмогорова-Смирнова дает значение  $p\text{-value} = 6.7 \times 10^{-16}$ . При этом, средние величины поверхностной яркости для них близки по значению. Средняя поверхностная яркость галактик исследуемой выборки  $20.86 \pm 0.04^m/\square''$ , медиана  $20.88^m/\square''$ . Выборка сформированная из каталога EGIS дает среднее значение  $20.47 \pm 0.01^m/\square''$ , медианное значение  $20.49^m/\square''$ . Таким образом, галактики, исследуемые в данной работе, в среднем имеют чуть более низкую поверхностную яркость в сравнении с галактиками из EGIS, что отражает рис. 20. Различие в распределении и среднем значении поверхностной яркости может быть связано с критериями отбора галактик.

Галактики, сконцентрированные в одной и той же области диаграммы поверхностная яркость - отношение шкал ( $z_0/h$  в диапазоне от 0.08 до 0.28,  $\mu_r$  от  $19.92^m/\square''$  до  $22.05^m/\square''$ , белый пунктир рис. 20), из каталога EGIS и нашей выборки показывают различное распределение по цвету (g-r),  $p\text{-value} = 3.8 \times 10^{-11}$ . Опять же, как и в случае величин поверхностной яркости, средние

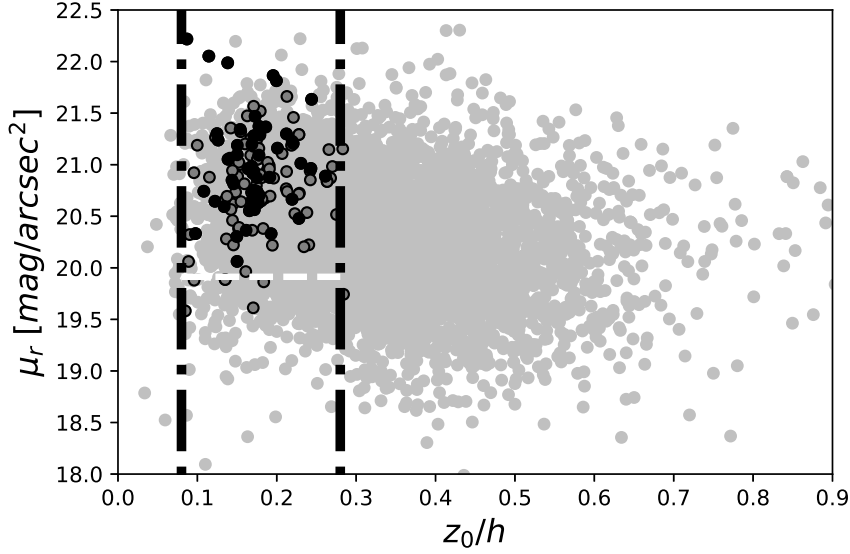


Рисунок 20 — Зависимость поверхностной яркости от отношения шкал в фильтре  $g$ . Поверхностная яркость не пересчитывалась в положение плашмя. Серые точки — данные, взятые из каталога EGIS; серые кружки — галактики исследуемой выборки без центрального компонента, черные кружки — галактики исследуемой выборки с центральным компонентом.

значения показателя цвета ( $g-r$ ) для исследуемой выборки и галактик из каталога EGIS оказались близки друг к другу:  $0.50 \pm 0.01^m$  и  $0.62 \pm 0.004^m$  соответственно. Галактики, исследуемые в данной работе имеют медианное значение  $0.51^m$ , выборка из каталога EGIS  $0.63^m$ . Чуть более голубой цвет галактик исследуемой выборки может быть связан с более молодым звездным населением галактик или с меньшим влиянием пыли.

Морфологический тип галактик, видимых с ребра, определяется из отношения яркости балджа к яркости диска. Было проведено сравнение распределения поверхностных яркостей для галактик Sc и Sd типов. Тест Колмогорова-Смирнова для распределения по поверхностной яркости дает  $p-value = 1.4 \times 10^{-9}$ . Среднее арифметическое значение поверхностной яркости Sc галактик  $22.11 \pm 0.04^m/\square''$ , Sd галактик —  $22.47 \pm 0.04^m/\square''$ , медианные значения соответственно равны:  $22.12^m/\square''$ ,  $22.47^m/\square''$ . При пересчете поверхностных яркостей из положения «с ребра» в положение «плашмя» среднее значение поверхностной яркости Sc галактик стало равным  $23.71 \pm 0.05^m/\square''$  (медианное  $23.68^m/\square''$ ), среднее значение Sd галактик равно  $24.27 \pm 0.06^m/\square''$  (медианное  $24.25^m/\square''$ ). Поверхностная яркость галактик является отражением поверхностной плотности, поэтому можно предположить, что галактики Sd морфоло-

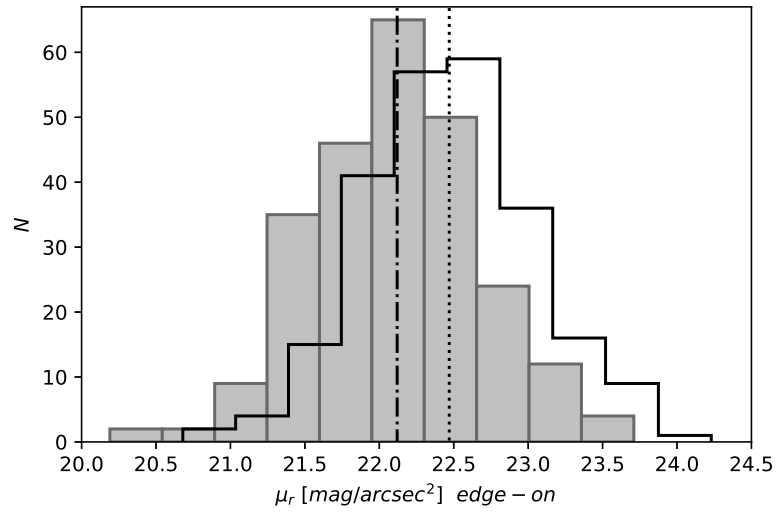


Рисунок 21 — Распределение галактик по поверхностной яркости в фильтре  $r$ . Гистограмма, заполненная серым цветом - распределение для галактик Sc морфологического типа, гистограмма без заполнения цветом - галактики Sd морфологического типа. Штрихпунктирная линия - медианное значение поверхностной яркости Sc галактик, пунктирная линия - Sd галактик.

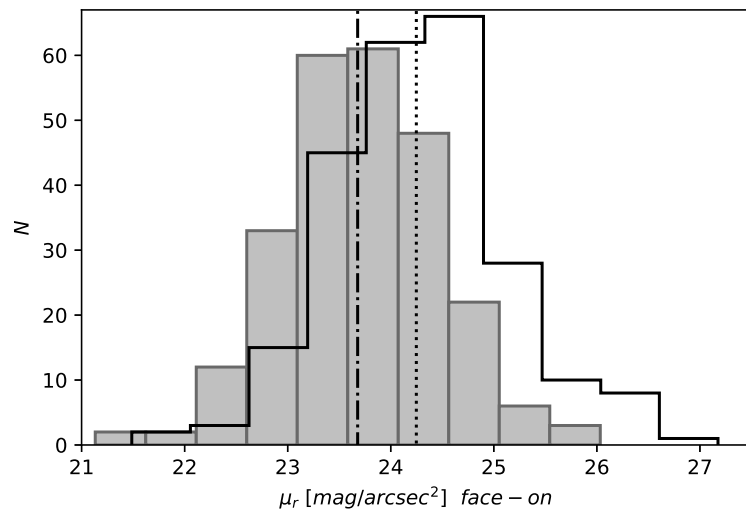


Рисунок 22 — Распределение галактик по поверхностной яркости в фильтре  $r$ , пересчитанное в положение «плашмя». Гистограмма, заполненная серым цветом - распределение для галактик Sc морфологического типа, гистограмма без заполнения цветом - галактики Sd морфологического типа. Штрихпунктирная линия - медианное значение поверхностной яркости Sc галактик, пунктирная линия - Sd галактик.

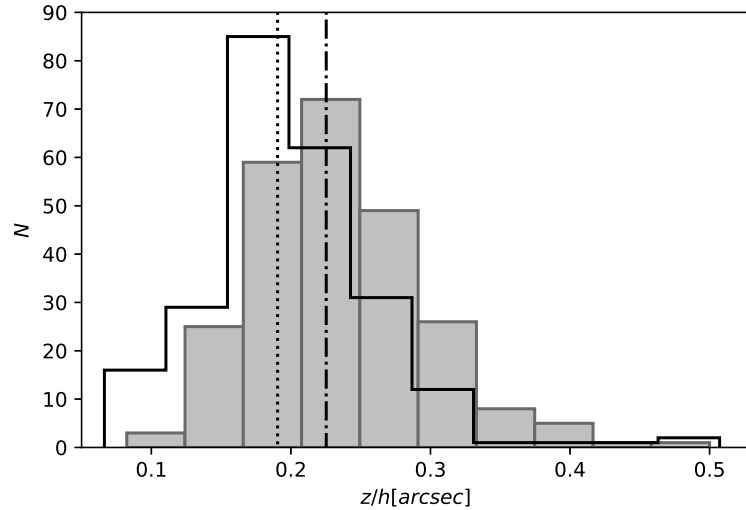


Рисунок 23 — Распределение галактик по отношению вертикальной шкалы к радиальной в фильтре  $g$ . Гистограмма, заполненная серым цветом - распределение для галактик Sc морфологического типа, гистограмма без заполнения цветом - галактики Sd морфологического типа. Штрихпунктирная линия - медианное значение отношения вертикальной шкалы к радиальной Sc галактик, пунктирная линия - Sd галактик.

гических типов являются более диффузными по сравнению с Sc галактиками. Распределение поверхностной яркости для галактик Sc показано серым и Sd - гистограмма без заполнения цветом показана на рисунке 21, распределение пересчитанных в положение «плашмя» поверхностной яркостей показано на рисунке 22. Пунктирной линией показано медианное значение поверхностной яркости Sd галактик, Sc – штрихпунктирной линией. Различие выборок проявляется ( $p - value = 1.2 \times 10^{-9}$ ) и при сравнении распределений по отношению шкал, которые были взяты из каталога EGIS. Среднее арифметическое значение отношения шкал Sc галактик  $0.236 \pm 0.004$ , Sd галактик –  $0.200 \pm 0.004$ , медианные значения соответственно равны: 0.225, 0.190. Распределение галактик двух морфологических типов (Sc, Sd) показано на рисунке 23, обозначения аналогичные рисункам 21, 22. Галактики более поздних типов оказываются в среднем тоньше. Морфологический тип был взят из каталога RFGC, а значения поверхностной яркости – из каталога EGIS для фильтра  $g$ .

## Выводы

В данной главе представлены результаты декомпозиции и фотометрии  $\approx 150$  ультратонких галактик по данным Pan-STARRS в фильтрах  $g$ ,  $r$ ,  $i$ ,  $z$ ,  $y$  в программном пакете DECA. Декомпозиция проводилась на два компонента: диск и балдж. Для проверки надежности полученных фотометрических данных было проведено сравнение с фотометрией из каталога EGIS. Звездные величины, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, оказываются меньше, чем в каталоге EGIS: для фильтра  $g$  разность величин с каталогом EGIS составила  $-0.25 \pm 0.03^m$ . Разность для фильтров  $r$  и  $i$  соответственно равна  $-0.18 \pm 0.02^m$ ,  $-0.11 \pm 0.03^m$ . Полученный результат может быть связан с тем, что фотометрия для каталога EGIS проводилась в конечных апертурах, тогда как в диссертационной работе были использованы аналитические модели, что позволяет получать оценки в бесконечной апертуре. Исследуемые галактики имеют среднюю поверхностную яркость  $20.86 \pm 0.01^m/\square''$  в фильтре  $r$ , средняя поверхностная яркость галактик каталога EGIS, которые имеют такой же диапазон отношения шкал, что и исследуемые галактики, равна  $20.47 \pm 0.01^m/\square''$ . Различие поверхностных яркостей двух выборок может быть связано с критериями отбора галактик в каталоги. При сравнении распределения галактик на зависимости их поверхностной яркости от отношения шкал для галактик, исследуемых в данной работе, и галактик каталога EGIS было найдено, что исследуемые галактики имеют средние значения показателя цвета  $(g-r)_0$  соответственно равными:  $0.50 \pm 0.01^m$ ,  $0.62 \pm 0.004^m$ . Более голубые цвета исследуемых галактик могут быть связаны с более молодым звездным населением или меньшим влиянием пыли. Медианное значение поверхностной яркости 150 исследуемых галактик равно  $24.05^m/\square''$  в фильтре  $B$  при пересчете в положение «плашмя», что соответствует галактикам низкой поверхностной яркости. В работе было показано, что между поверхностной яркостью и толщиной галактики не наблюдается корреляции (коэффициент Пирсона =  $-0.25$ ), что подтверждает результаты [145]. Было посчитано, что среднее арифметическое значение отношения шкал для Sc галактик равно  $0.236 \pm 0.004$ , а отношение шкал Sd галактик в среднем равно  $0.200 \pm 0.004$ .



## 4 Ориентация спинов тонких галактик относительно филаментов крупномасштабной структуры вселенной

Крупномасштабная структура Вселенной состоит из филаментов, скоплений, стен и войдов, при этом большая часть галактик содержится в филаментах, которые соединяют скопления и располагаются между войдами. Угловой момент галактики формируется под воздействием приливных сил со стороны элементов крупномасштабной структуры Вселенной [146–149], следовательно, между пространственной ориентацией этих структур и осей вращения (спинами) галактик должна наблюдаться связь [150].

N-body моделирование даёт согласованную картину выравнивания спинов гало темной материи и галактик относительно крупномасштабной структуры Вселенной. Например, спин массивного гало должен иметь перпендикулярную ориентацию относительно филамента, которому оно принадлежит, в то время как спин маломассивного гало должен ориентироваться параллельно филаменту [102, 151–153]. Картина ориентации спинов галактик относительно элементов крупномасштабной структуры Вселенной более сложная. Моделирование предсказывает, что в целом должно наблюдаться выравнивание спинов галактик и гало темной материи, хотя могут наблюдаться отклонения, которые зависят от массы гало, плотности окружения и ряда других факторов [154, 155].

Однако, результаты, полученные по наблюдательным данным, выглядят противоречиво. В работе Ли и соавторов [56] было показано, что оси вращения галактик имеют тенденцию к перпендикулярному выравниванию относительно филаментов. В более поздних работах [57, 58] обнаружено, что галактики ранних типов ориентированы перпендикулярно, в то время как спины галактик позднего типа преимущественно ориентированы параллельно филаментам. В то же время, в работе [156] сообщается об обнаружении перпендикулярного выравнивания для спиральных галактик. Как правило, выявленные тенденции имеют крайне низкую значимость.

Замытие корреляции и связанное с ним различие наблюдательных результатов может быть связано с тем, что в ряде работ не учитываются свойства

галактик, входящих в исследуемую выборку, – их масса, светимость, наличие спутников, морфологический тип, красное смещение и другие. Также оказывают значительное влияние на результат способ выделения филаментов, часто довольно малый размер выборки, космологические эффекты. Кроме того, одной из основных трудностей для оценки ориентации спина является измерение угла наклона галактик, что мешает надежному обнаружению корреляции. Один из способов решить проблему неопределенности направления спина – использовать галактики, видимые под очень большими углами к наблюдателю, практически с ребра. В данном случае направление спина будет определено с высокой точностью. Например, при исследовании ориентации спинов 30 видимых с ребра галактик относительно сверхгалактической плоскости нашли эффект выравнивания на уровне значимости 92%.

#### 4.1 Выборка объектов

Для формирования выборки галактик использовался каталог RFGC [40] (описание в Главе 1). Отбор галактик для каталога происходил таким образом, что все его объекты занимают узкий диапазон морфологических типов Sc – Sd (поздние морфологические типы). Эти галактики имеют более равномерное распределение по небу, чем галактики ранних типов, что также является преимуществом для данной работы. Согласно работе [40], спин галактик из каталога может быть определен с точностью лучше  $5^\circ$ . Кроме того, каталог RFGC содержит 817 ультратонких галактик с  $a/b > 10$ . Ожидается, что такие диски не смогут «выжить» в случае большого количества слияний во время иерархической кластеризации, и, следовательно, они более чувствительны к влиянию среды.

Каталог филаментов Темпеля и соавторов [100] составлен по данным обзора Sloan Digital Sky Survey (SDSS) DR8 и содержит информацию о 15 421 филаментах, построенных по 499 340 галактикам, которые находятся в диапазоне красных смещений  $0.009 < z < 0.155$  в системе космического микроволнового фона (СМВ). Каталог представляет из себя набор таблиц, содержащих номер филамента, сопутствующие координаты составляющих филамент точек, номера и координаты принадлежащих данному филаменту галактик, расстояние

до галактики, номер и координаты ближайшей к галактике точки филамента, расстояние от филамента до галактики, петросьяновские звездные величины галактик в фильтрах  $u$ ,  $g$ ,  $r$ ,  $i$ ,  $z$ .

Для каждого филамента мы отождествили принадлежащие ему галактики из каталога RFGC, используя координаты галактик. При этом учитывались случаи, когда в обзоре SDSS измерялась скорость не для центра, а для внешней части галактики. Таким образом, в состав выборки вошли 813 тонких галактик, принадлежащих 706 филаментам.

Для надежности последующих расчетов представленные в каталоге [100] расстояния до галактик сверялись с данными базы HyperLeda<sup>2</sup> [103]. На данный момент эта база данных содержит скорости для 3058 RFGC-галактик. Наибольший вклад, 1689 измерений красных смещений для наших галактик, был получен в рамках проекта по измерению профилей линии нейтрального водорода HI в Extragalactic Distance Database [157]. В массовых оптических обзорах красных смещений SDSS [127] и 6dF [158] было получено 1157 и 880 скоростей, соответственно. Слепой обзор ALFALFA [159] внегалактических источников HI на радиотелескопе Аресибо добавил измерения еще для 733 тонких галактик.

## 4.2 Поиск корреляции между спином галактики и осью филамента

Для выполнения поставленной задачи требуется определение угла между спином галактики и осью филамента. Спин галактики определялся как повернутый на  $90^\circ$  позиционный угол, приведенный в каталоге RFGC. Направление оси филамента в каждой точке пространства можно задать касательной к нему. Каждый филамент был построен по сопутствующим координатам и аппроксимирован сплайном. Для каждой галактики в каталоге Темпеля указана ближайшая точка филамента, в которой строилась касательная к нему.

Координаты каталога филаментов приводятся в системе координат SDSS  $(\eta, \lambda)$ <sup>1</sup>, где  $(\eta, \lambda) = (0, 90)$  соответствует  $(RA, Dec) = (275, 0)$  и  $(\eta, \lambda) = (57.5, 0)$  соответствует  $(RA, Dec) = (0, 90)$ . Для удобства работы с каталогом координаты были переведены в декартову систему координат  $(x, y, z)$  через экваториальную

<sup>2</sup><http://leda.univ-lyon1.fr/>

<sup>1</sup><https://www.sdss.org/dr14/algorithms/surveycoords/>

$(RA, Dec)$  с использованием расстояний до филаментов  $D$ :

$$RA = \arctan \left( \frac{\sin(\lambda)}{\cos(\lambda)\cos(\eta + 32.5)} \right) + 185.0$$

$$Dec = \arcsin(\cos(\lambda)\sin(\eta + 32.5))$$

$$x = D\cos(Dec)\cos(RA)$$

$$y = D\cos(Dec)\sin(RA)$$

$$z = D\sin(Dec)$$

На рис. 24 показаны проекции филамента N°. 227 в декартовой системе координат, а также изображения RFGC-галактик, принадлежащих данному филаменту.

Угол между спином галактики и касательной к филаменту в ближайшей к галактике точке находится через скалярное произведение векторов:

$$\alpha = \arccos \left( \frac{\mathbf{f}\mathbf{s}}{|\mathbf{f}||\mathbf{s}|} \right)$$

где  $\mathbf{f}$  - вектор касательной к филаменту,  $\mathbf{s}$  - вектор спина. С помощью позиционного угла можно определить положение спина, но не его направление (знак), поэтому поиск сигнала выравнивания будет проводиться в диапазоне углов от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ .

Из распределения углов между спином галактики и касательной к филаменту было найдено слабое указание на то, что спины тонких галактик стремятся быть сонаправленными с осью филаментов. Уровень значимости данной зависимости соответствует  $2\sigma$ . На рис. 25 показано распределение плотности вероятности ориентации спинов тонких галактик относительно филаментов, которым они принадлежат. Наклон аппроксимирующей прямой равен  $(-2.4 \pm 2.4) \times 10^{-5}$ , ошибка указана для 95% уровня достоверности. Стоит отме-

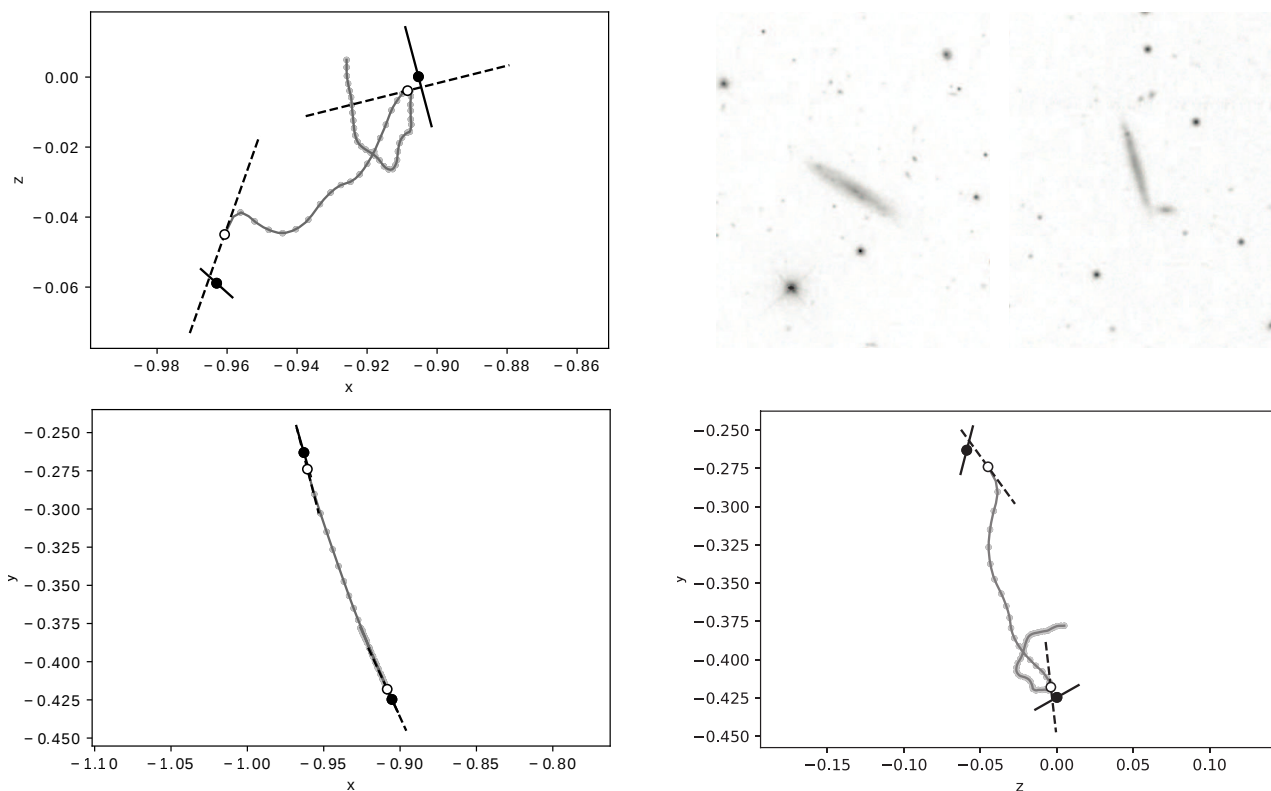


Рисунок 24 — Показаны изображения галактик RFGC2625 и RFGC2437 и проекции соответствующего филамента N°. 227 в декартовой системе координат. На изображениях галактик север находится сверху, восток — слева. Светло-серые точки являются точками филамента из каталога [100]; серая сплошная линия — сплайн-интерполяция точек филамента; черные круги — галактики RFGC2625, RFGC2437; открытые круги — самые близкие к галактикам точки филамента, взятые из каталога филаментов; черная сплошная линия — спин галактики, пунктирная черная линия — касательная к филаменту в его ближайшей к галактике точке.

титель, что наклон зависимости обеспечивается несколько большей плотностью вероятности найти галактики с хорошо выровненными направлениями спина и филамента ( $\alpha < 20^\circ$ ). Плотность вероятности в каждой точке на рисунке рис. 25 рассчитывается как количество галактик в данном интервале углов деленное на общее количество галактик в выборке и на ширину интервала.

Результаты других авторов указывают, что положение спина галактик относительно элементов крупномасштабной структуры Вселенной может зависеть от свойств галактик. Следовательно, включение в выборку галактик с разными свойствами приведет к замыванию корреляции. Для устранения подобных зависимостей из полной выборки галактик были сформированы выборки меньших размеров в узких интервалах абсолютной звездной величины галактик,

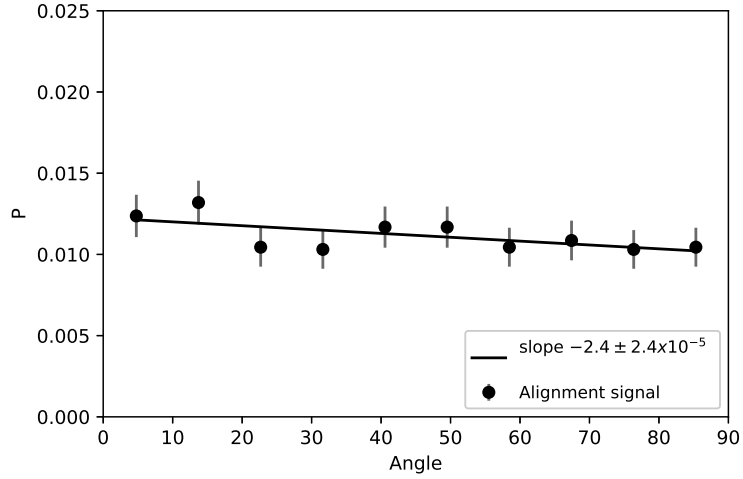


Рисунок 25 — Распределение плотности вероятности взаимной ориентации спинов галактик и филаментов в трехмерном пространстве. Распределение основано на выборке из 813 галактик, видимых практически с ребра, из каталога RFGC [40] и 706 филаментов из каталога [100].

красного смещения, видимого отношения осей и расстояния от галактик до оси филамента. Расстояния до галактик исследуемой выборки определены по красным смещениям из каталога HyperLeda. Корреляция между спинами галактик и направлением осей филаментов в каждой новой выборке определялась описанным выше методом: были построены распределение плотности вероятности взаимной ориентации спинов галактик и филаментов в трехмерном пространстве, затем получившиеся распределения аппроксимировались линейной функцией (см. рис. 26).

Наилучший результат дает отбор галактик со звездными величинами  $M_r < -18^m$  (панель (a)), красным смещением  $z < 0.03$  (панель (b)), отношением осей  $a/b > 10$  в голубом фильтре (панель (c)), расстоянием от оси филамента  $D > 0.2$  Мпк (панель (d)). Для описанных выборок мы получаем углы наклона аппроксимирующих прямых соответственно равными:  $(-3.2 \pm 3.4) \times 10^{-5}$ ;  $(-4.2 \pm 4.1) \times 10^{-5}$ ;  $(-7.1 \pm 7.0) \times 10^{-5}$ ;  $(-1.5 \pm 3.1) \times 10^{-5}$ . Все ошибки указаны для 95% уровня достоверности. Выборки так же анализировались с помощью теста Колмогорова-Смирнова. Сравнивались между собой два распределения, которые разделялись по одному из параметров галактик, и одна выборка содержала все галактики больше некоего граничного значения по данному параметру, а другая - меньше. Если применить тест Колмогорова - Смирнова к

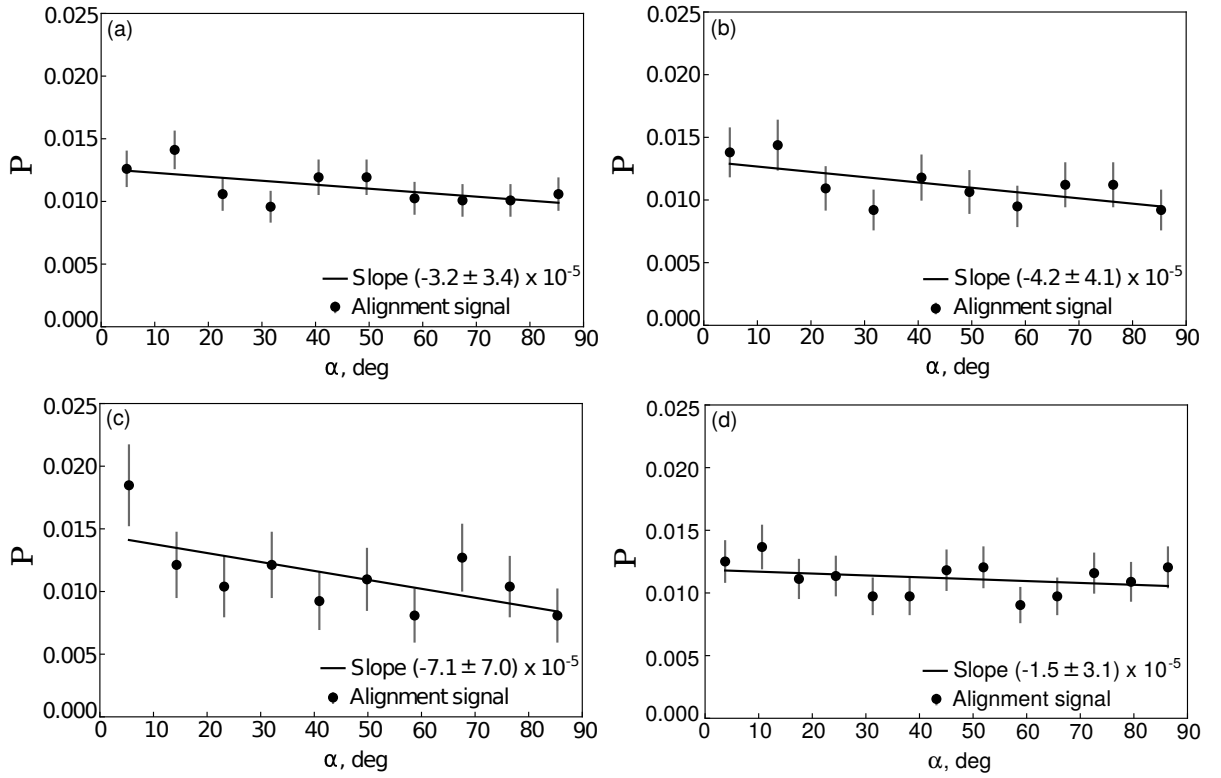


Рисунок 26 — Распределение плотности вероятности взаимной ориентации спинов галактик и филаментов в трехмерном пространстве. Выборка тонких галактик и филаментов та же, что и для распределения, показанного на рис. 25, но ограниченная по параметрам: (a)  $M_r < -18^m$  (содержит 665 галактик), (b) красное смещение  $z < 0.03$  (389 галактик), (c) отношение осей  $a/b > 10$  в голубом фильтре (195 галактик), (d) расстояние от оси филамента  $D > 0.2$  Мпк (627 галактик).

выборке галактик, у которых  $M_r < -18^m$ , и к выборке с большими звездными величинами, то мы получаем значение статистики, равное 0.1, что соответствует оценке  $p\text{-value} = 0.2$ . Для галактик, отобранных по  $z$  и  $a/b$ , тест Колмогорова-Смирнова дает соответствующие величины: 0.06 ( $p\text{-value} = 0.5$ ), 0.08 ( $p\text{-value} = 0.3$ ). Нулевая гипотеза отвергается, если  $p\text{-value}$  меньше 0.01. Таким образом, согласно тесту Колмогорова-Смирнова, сравниваемые выборки имеют одинаковое распределение и найденные нами эффекты корреляции не являются статистически значимыми.

Полная выборка была ограничена по красному смещению ( $z < 0.03$ ) и по отношению осей ( $a/b > 10$ ), так как отбор по этим параметрам давал наиболее сильный эффект. Применение критерия Стьюдента показало, что отклонение первого бина по отношению к остальным бинам составляет  $2.4 \sigma$  (см. рис. 27 черные кружки).

Было проведено сравнение выборок галактик с наилучшей корреляцией

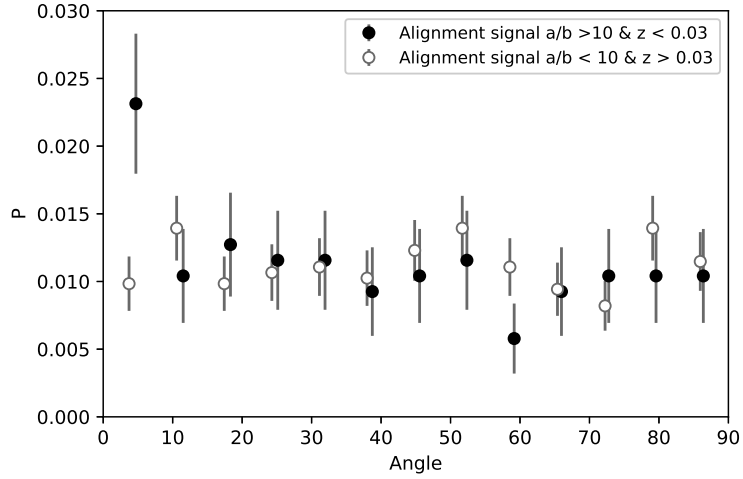


Рисунок 27 — Распределение плотности вероятности взаимной ориентации спинов галактик и филаментов в трехмерном пространстве. Выборка тонких галактик и филаментов та же, что и для распределения, показанного на рис. 25, но ограниченная по красному смещению и по отношению осей. Для черных кружков  $z < 0.03 \ \& \ a/b > 10$  (127 галактик); белые кружки соответствуют  $z > 0.03 \ \& \ a/b < 10$  (356 галактик).

( $a/b > 10, z < 0.03$ ) и с обратной селекцией ( $a/b < 10, z > 0.03$ ) (см. рис. 27). Из теста Колмогорова-Смирнова мы получаем значение КС-статистики = 0.1, что соответствует значению  $p\text{-value} = 0.2$ . Тест Колмогорова-Смирнова дает значение КС-статистики = 0.3,  $p\text{-value} = 0.1$  для тех же выборок, но ограниченных 8 градусами между спином галактики и осью филамента.

По результатам численного моделирования было показано, что массивные галактики находятся в центральных частях филаментов в среднем на расстоянии  $0.7h^{-1}$  Мпк от их оси, где происходит большое количество слияний вдоль направления потока. Галактики малых масс чаще располагаются в областях пониженной плотности и удалены от оси филамента в среднем на расстоянии  $2h^{-1}$  Мпк [102].

В работе [57] было найдено указание, что спины спиральных галактик сонаправлены с осью филаментов и корреляция значительно сильнее для ярких спиральных галактик ( $M_r < -20.5^m$ ), которые находятся дальше от оси филамента в диапазоне  $0.2 - 0.5h^{-1}$  Мпк. Отбор по этим параметрам для тонких галактик не дает улучшение сигнала выравнивания, отсутствие значимого влияния после ограничения выборки может быть объяснен малой статистикой галактик в выборке. В диапазоне  $0.2 - 0.5h^{-1}$  Мпк от оси филамента находятся 124 галактики и 12 галактик ярче  $M_r < -20.5^m$ . Соответственно, с увеличением



расстояния выборка еще больше редет: так на расстоянии больше  $0.5h^{-1}$  Мпк есть всего 48 галактик, из них только шесть ярче  $M_r < -20.5^m$ .

Наиболее сильные эффекты корреляции были найдены при отборе галактик по красному смещению и отношению их осей. Тонкие галактики чаще всего встречаются в более разреженной среде и они имеют небольшое количество спутников. Тем не менее была проведена оценка орбитальных масс для 30 ультратонких галактик [46]. Их характерная полная масса составляет около  $5 \times 10^{11} M_{\odot}$ , отношение полной массы к звездной приблизительно равно 30. В другой работе также были измерены массы для безбалджевых галактик поздних морфологических типов (Sc - Scd - Sd) по орбитальным движениям их спутников [160]. По 43 карликовым спутникам было получено отношение орбитальной массы к светимости в K-полосе, равное  $20 \pm 3$ . В этой же работе для галактик E, S0, Sa типов было получено отношение полной массы к светимости, равное  $88 \pm 30$ . Результаты изменения орбитальных масс говорят о том, что ультратонкие галактики имеют сравнительно небольшие массы, сопоставимые с массами таких галактик, как M 31, M 81.

Из результатов моделирования следует, что спин галактик может менять свое направление. Маломассивные галактики образовались в филаментах с высокой завихренностью, поэтому эти галактики имеют спин, параллельный филаменту (см., например, [161–164]). Галактики больших масс образуются в более поздних слияниях, которые происходят вдоль оси филаментов (см., например, [163, 165]), следовательно, эти галактики имеют спин, перпендикулярный оси филаментов. Переход ориентации спина происходит при массе около  $(5 \pm 1) \times 10^{12} M_{\odot}$  при нулевом красном смещении [102], что на порядок больше характерной массы ультратонких галактик, полученной в работе [46].

Нахождение более сильных эффектов корреляции для галактик на меньших красных смещениях может объясняться с методологической точки зрения: на больших красных смещениях труднее обнаружить ультратонкие галактики, так как наблюдается визуальный эффект размытия из-за ограниченного разрешения фотоэмульсии [166], а также сложнее идентифицировать филамент.

## Выводы

В главе представлены результаты определения ориентации спинов тонких галактик относительно осей филаментов крупномасштабной структуры Вселенной. Было проведено отождествление галактик каталога RFGC с галактиками из каталога [100], в результате чего была получена выборка из 813 тонких галактик и 706 филаментов, к которым принадлежат данные галактики. Каждый филамент описывался сплайном, а спины галактик были определены из их позиционных углов. Угол между осью филамента и спином галактики определялся через скалярное произведение векторов. Распределение плотности вероятности взаимной ориентации спинов галактик и осей филаментов в трехмерном пространстве имеет слабое указание на то, что спины галактик стремятся выровняться с осью филамента, к которому они принадлежат. Данный эффект наблюдается на уровне  $2\sigma$ . Аппроксимация распределения плотности прямой дает угол наклона  $(-2.4 \pm 2.4 \times 10^{-5})$ , ошибка указана для 95% уровня достоверности. При этом наклон формируется галактиками, которые имеют наклон спина относительно оси филамента менее  $20^\circ$ .

При отборе галактик по звездным величинам  $M_r < -18^m$ , красным смещениям  $z < 0.03$ , отношениям осей  $a/b > 10$  в фильтре B, расстояниям от оси филамента  $D > 0.2$  Мпк их распределения плотности вероятности аппроксимируются прямой с углами наклона соответственно равными:  $(-3.2 \pm 3.4) \times 10^{-5}$ ;  $(-4.2 \pm 4.1) \times 10^{-5}$ ;  $(-7.1 \pm 7.0) \times 10^{-5}$ ;  $(-1.5 \pm 3.1) \times 10^{-5}$ . С помощью теста Колмогорова-Смирнова было проведено сравнение распределений, где первое распределение включает все галактики, у которых значения одного из указанных выше параметров больше указанного для него значения, а второе включает галактики, у которых этот параметр имеет значение ниже. При сравнении распределений, отобранных по  $M_r$ ,  $z$ ,  $a/b$ , тест Колмогорова-Смирнова дает следующие значения p-value: 0.2, 0.5, 0.3, из чего следует, что сравниваемые выборки имеют одинаковое распределение и галактики в них не имеют выделенного направления спина относительно оси филамента.

Наиболее сильные корреляции проявляются у выборок, ограниченных по  $z < 0.03$  и  $a/b > 10$ . При одновременном использовании этих ограничений замет-

но повышается плотность вероятности найти галактики, у которых угол между спином и осью филамента составляет не более  $8^\circ$ , эффект проявляется на уровне  $2.4\sigma$ . Чаще всего в работах по наблюдательным данным корреляции находят на уровне не более  $2\sigma$ . Из результатов моделирования следует, что спин галактик может менять свое направление. Маломассивные галактики имеют сонаправленный с осью филаментов спин, а массивные галактики, которые образовались в результате слияний, имеют перпендикулярно направленный спин. Изменение направления спина происходит при массах  $(5 \pm 1) \times 10^{12} M_\odot$  [102]. Согласно работам [46, 160], тонкие галактики в среднем могут иметь массу  $5 \times 10^{11} M_\odot$ , из чего следует, что ультратонкие галактики должны иметь сонаправленный с осью филамента спин. Выделение наиболее сильной корреляции для наиболее близких галактик может говорить о том, что с ростом расстояния сложнее выделять филаменты, а из-за ограниченного разрешения труднее выделять тонкие галактики, и можно неверно оценить их угол наклона.

## Заключение

В заключении кратко сформулируем основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

- Была разработана структура и web-интерфейс и создана база данных галактик, видимых с ребра, The Edge-on Galaxy Database. Основу базы данных составили 4 каталога: «The Revised Flat Galaxy Catalogue» (RFGC) [40], «The Catalog of Edge-on Disk Galaxies from SDSS» (EGIS) [72], «The 2MASS-selected Flat Galaxy Catalog» (2MFGC) [71] и «The Edge-on Galaxies in the Pan-STARRS survey» (EGIPS), описываемый в данной работе. Каталоги имеют как табличное представление, так и индивидуальные информационные карточки объектов. На основе базы данных была создана система, которая позволяет легко и быстро создавать классификационные тесты, связывать их с различными наборами данных, собирать результаты тестирования от пользователей. Кроме того, система позволяет просматривать изображения классифицируемого объекта и его окрестностей из различных обзоров неба, масштабировать изображения для более детального осмотра.
- Представлены результаты анализа данных, содержащихся в новом каталоге видимых с ребра галактик «The Edge-on Galaxies in the Pan-STARRS survey» (EGIPS). Оценено качество фотометрии нового каталога путем сравнения его звездных величин с каталогом галактик с ребра EGIS. Значение разности звездных величин между двумя каталогами в фильтрах  $g$ ,  $r$ ,  $i$  соответственно равен:  $-0.032$ ,  $0.0022$ ,  $0.025$ . Разности звездных величин двух каталогов в фильтрах  $g$ ,  $r$ ,  $i$  аппроксимировались линейными функциями, наклоны которых имеют следующие значения:  $+0.0106 \pm 0.0018$ ,  $+0.0037 \pm 0.0012$ ,  $-0.0016 \pm 0.0010$ . Фотометрия надежна для объектов в диапазоне звездных величин  $13.8 - 17.4$  в фильтре  $r$ . 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  $\langle V/V_m \rangle$  [98] показал, что каталог относительно полон при  $a_r > 6''$ . Посчитана эффективная глубина каталога, которая характе-

ризуется медианной скоростью 11 600 км/с. Галактики каталога EGIPS демонстрируют на диаграмме «цвет – величина» четкое разделение на «красную последовательность» и «голубое облако». Обнаружено, что галактики «красной последовательности» каталога EGIPS на  $(g-i)_0 \simeq 0.1^m$  краснее галактик обзора SDSS, имеющих произвольную ориентацию, что объясняется большим внутренним поглощением видимых с ребра галактик. Найдена зависимость показателя цвета галактики  $(g-i)_0$  от ее толщины  $(a/b)_r$ . Галактики с  $(a/b)_r < 3$  имеют показатель цвета в среднем равный  $(g-i)_0 \sim 1.2^m$ . Цвет максимума распределения почти постоянен для галактик с отношением осей в диапазоне от 3 до 5. А галактики с  $(a/b)_r > 5$  оказываются в среднем более голубыми. Распределение ультратонких галактик  $(a/b)_g > 10$  по показателю цвета и абсолютным звездным величинам не отличается от распределения других спиральных 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.

- Проведена фотометрия и декомпозиция  $\sim 148$  ультратонких галактик в программном пакете DECA по данным Pan-STARRS в фильтрах  $g, r, i, z, u$ . Представленные в данной работе измерения показывают статистически более высокий поток, чем приводится в каталоге EGIS, для фильтра  $g$  разность величин с каталогом EGIS составила  $-0.25^m \pm 0.03$ . Разность для фильтров  $r$  и  $i$  соответственно равна  $-0.18 \pm 0.02^m, -0.11 \pm 0.03^m$ . 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. При пересчете в положение плашмя поверхностных яркостей исследуемых галактик было найдено, что медианное значение поверхностных яркостей равно  $24.05^m/\square''$  и соответствует галактикам с низкой поверхностной яркостью. В работе было показано, что между поверхностной яркостью и толщиной галактики не наблюдается корреляции (коэффициент Пирсона равен  $-0.25$ ). Было найдено, что среднее арифметическое значение отношения шкал для Sc галактик равно  $0.236 \pm 0.004$ , а отношение шкал Sd галактик в среднем равно  $0.200 \pm 0.004$ . 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.

- По результатам исследования ориентации спинов ультратонких галактик относительно осей филаментов крупномасштабной структуры Вселенной было найдено слабое указание на то, что спины галактик предпочитают быть сонаправленными с осями филаментов, данный эффект был найден на уровне  $2\sigma$ . Аппроксимация распределения плотности прямой дает угол наклона  $(-2.4 \pm 2.4 \times 10^{-5})$ , ошибка указана для 95% уровня достоверности. При отборе галактик по звездным величинам  $M_r < -18^m$ , красным смещениям  $z < 0.03$ , отношениям осей  $a/b > 10$  в фильтре B, расстояниям от оси филамента  $D > 0.2$  Мпк их распределения плотности вероятности аппроксимируются прямой с углами наклона соответственно равными:  $(-3.2 \pm 3.4) \times 10^{-5}$ ;  $(-4.2 \pm 4.1) \times 10^{-5}$ ;  $(-7.1 \pm 7.0) \times 10^{-5}$ ;  $(-1.5 \pm 3.1) \times 10^{-5}$ . Наиболее сильные корреляции проявляются у выборок ограниченных  $z < 0.03$  и  $a/b > 10$ . При одновременном использовании этих ограничений заметно повышается плотность вероятности обнаружить галактики, у которых угол между спином и осью филамента составляет не более  $8^\circ$ , эффект проявляется на уровне  $2.4\sigma$ . Результаты моделирования говорят о том, что галактики с массами менее  $5 \times 10^{12} M_\odot$  должны иметь сонаправленный с осями филаментов спин [102]. По орбитальным движениям спутников

тонких галактик было обнаружено [46], 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 [40], труднее обнаружить тонкие галактики.

## 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] Gilmore G., Reid N. New light on faint stars - III. Galactic structure towards the South Pole and the Galactic thick disc. // MNRAS. — 1983. — Mar. — Vol. 202. — P. 1025–1047.
- [5] Observational Evidence from SDSS for a Merger Origin of the Milky Way's Thick Disk / Marion Dierickx, Rainer Klement, Hans-Walter Rix, Chao Liu // ApJ. — 2010. — Dec. — Vol. 725, no. 2. — P. L186–L190. — 1009.1616.
- [6] A spectroscopic survey of thick disc stars outside the solar neighbourhood / G. Kordopatis, A. Recio-Blanco, P. de Laverny et al. // A&A. — 2011. — Nov. — Vol. 535. — P. A107. — 1110.5221.
- [7] In the thick of it: metal-poor disc stars in RAVE / G. Kordopatis, G. Gilmore, R. F. G. Wyse et al. // MNRAS. — 2013. — Dec. — Vol. 436, no. 4. — P. 3231–3246. — 1310.1919.
- [8] Noguchi Masafumi. Barred Galaxies: Intrinsic or Extrinsic? // ApJ. — 1996. — Oct. — Vol. 469. — P. 605.
- [9] Bournaud Frédéric, Elmegreen Bruce G., Martig Marie. The Thick Disks of Spiral Galaxies as Relics from Gas-rich, Turbulent, Clumpy Disks at High Redshift // ApJ. — 2009. — Dec. — Vol. 707, no. 1. — P. L1–L5. — 0910.3677.
- [10] Kormendy John, Kennicutt Robert C. Jr. Secular Evolution and the Formation of Pseudobulges in Disk Galaxies // ARA&A. — 2004. — Sep. — Vol. 42, no. 1. — P. 603–683. — astro-ph/0407343.



- [11] 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.
- [12] Fisher David B., Drory Niv. The Structure of Classical Bulges and Pseudobulges: the Link Between Pseudobulges and SÉRSIC Index // AJ. — 2008. — Aug. — Vol. 136, no. 2. — P. 773–839. — 0805.4206.
- [13] Fisher David B., Drory Niv. Bulges of Nearby Galaxies with Spitzer: Scaling Relations in Pseudobulges and Classical Bulges // ApJ. — 2010. — Jun. — Vol. 716, no. 2. — P. 942–969. — 1004.5393.
- [14] Burbidge E. Margaret, Burbidge G. R. Three Unusual so Galaxies. // ApJ. — 1959. — Jul. — Vol. 130. — P. 20.
- [15] B/PS bulges in DESI Legacy edge-on galaxies - I. Sample building / Alexander A. Marchuk, Anton A. Smirnov, Natalia Y. Sotnikova et al. // MNRAS. — 2022. — May. — Vol. 512, no. 1. — P. 1371–1390. — 2203.01154.
- [16] Yoshino Akira, Yamauchi Chisato. Box/peanut and bar structures in edge-on and face-on nearby galaxies in the Sloan Digital Sky Survey - I. Catalogue // MNRAS. — 2015. — Feb. — Vol. 446, no. 4. — P. 3749–3767.
- [17] Lütticke R., Dettmar R. J., Pohlen M. Box- and peanut-shaped bulges. I. Statistics // A&AS. — 2000. — Sep. — Vol. 145. — P. 405–414. — astro-ph/0006359.
- [18] Laurikainen Eija, Salo Heikki. Observed Properties of Boxy/Peanut/Barlens Bulges // Galactic Bulges / Ed. by Eija Laurikainen, Reynier Peletier, Dimitri Gadotti. — Vol. 418 of Astrophysics and Space Science Library. — 2016. — Jan. — P. 77. — 1505.00590.
- [19] Erwin Peter, Debattista Victor P. The frequency and stellar-mass dependence of boxy/peanut-shaped bulges in barred galaxies // MNRAS. — 2017. — Jun. — Vol. 468, no. 2. — P. 2058–2080. — 1703.01602.

- [20] Pfenniger D., Friedli D. Structure and dynamics of 3D N-body barred galaxies. // *A&A*. — 1991. — Dec. — Vol. 252. — P. 75–93.
- [21] Athanassoula E., Misiriotis A. Morphology, photometry and kinematics of N-body bars - I. Three models with different halo central concentrations // *MNRAS*. — 2002. — Feb. — Vol. 330, no. 1. — P. 35–52. — astro-ph/0111449.
- [22] Box and peanut shapes generated by stellar bars. / F. Combes, F. Debbasch, D. Friedli, D. Pfenniger // *A&A*. — 1990. — Jul. — Vol. 233. — P. 82.
- [23] van der Kruit P. C., Searle L. Surface photometry of edge-on spiral galaxies. // *A&A*. — 1982. — Jun. — Vol. 110. — P. 61–78.
- [24] Three-dimensional modelling of edge-on disk galaxies / M. Pohlen, R. J. Dettmar, R. Lütticke, U. Schwarzkopf // *A&AS*. — 2000. — Jun. — Vol. 144. — P. 405–428. — astro-ph/0004044.
- [25] Near infrared observations of the truncation of stellar disks / E. Florido, E. Battaner, A. Guijarro et al. // *A&A*. — 2001. — Oct. — Vol. 378. — P. 82–96. — astro-ph/0109295.
- [26] Kylafis Nikolaos D., Bahcall John N. Dust Distribution in Spiral Galaxies // *ApJ*. — 1987. — Jun. — Vol. 317. — P. 637.
- [27] The distribution of stars and dust in spiral galaxies: the edge-on spiral UGC 2048. / E. M. Xilouris, N. D. Kylafis, J. Papamastorakis et al. // *A&A*. — 1997. — Sep. — Vol. 325. — P. 135–143.
- [28] Optical and NIR modelling of NGC 891 / E. M. Xilouris, P. B. Alton, J. I. Davies et al. // *A&A*. — 1998. — Mar. — Vol. 331. — P. 894–900.
- [29] Are spiral galaxies optically thin or thick? / E. M. Xilouris, Y. I. Byun, N. D. Kylafis et al. // *A&A*. — 1999. — Apr. — Vol. 344. — P. 868–878. — astro-ph/9901158.
- [30] 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.

- [31] Galaxy Morphologies in the Hubble Ultra Deep Field: Dominance of Linear Structures at the Detection Limit / Debra Meloy Elmegreen, Bruce G. Elmegreen, Douglas S. Rubin, Meredith A. Schaffer // *ApJ*. — 2005. — Sep. — Vol. 631, no. 1. — P. 85–100. — astro-ph/0508216.
- [32] Elmegreen Bruce G., Elmegreen Debra Meloy. Observations of Thick Disks in the Hubble Space Telescope Ultra Deep Field // *ApJ*. — 2006. — Oct. — Vol. 650, no. 2. — P. 644–660. — astro-ph/0607540.
- [33] The Assembly History of Disk Galaxies. I. The Tully-Fisher Relation to  $z \sim 1.3$  from Deep Exposures with DEIMOS / Sarah H. Miller, Kevin Bundy, Mark Sullivan et al. // *ApJ*. — 2011. — Nov. — Vol. 741, no. 2. — P. 115. — 1102.3911.
- [34] Reshetnikov V. P., Usachev P. A., Savchenko S. S. Edge-on Galaxies in the Hubble Ultra Deep Field // *Astronomy Letters*. — 2019. — Sep. — Vol. 45, no. 9. — P. 565–575. — 1910.08017.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Heidmann Jean, Heidmann Nicole, de Vaucouleurs Gerard. Inclination and absorption effects on the apparent diameters, optical luminosities and neutral hydrogen radiation of galaxies—I. Optical and 21-cm line data // *MmRAS*. — 1972. — Jan. — Vol. 75. — P. 85.
- [39] Karachentsev I. D., Karachentseva V. E., Parnovskij S. L. Flat galaxies catalogue. // *Astronomische Nachrichten*. — 1993. — May. — Vol. 314, no. 3. — P. 97–222.

- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] Stacy S. The number, luminosity and mass density of spiral galaxies as a function of surface brightness // MNRAS. — 1996. — May. — Vol. 280, no. 2. — P. 337–354. — astro-ph/9511010.
- [43] 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.
- [44] Matthews Lynn D., Gallagher John S. III. B and V CCD Photometry of Southern, Extreme Late-Type Spiral Galaxies // AJ. — 1997. — Nov. — Vol. 114. — P. 1899. — astro-ph/9709145.
- [45] Matthews Lynn D., Uson Juan M. H I Imaging Observations of Superthin Galaxies. II. IC 2233 and the Blue Compact Dwarf NGC 2537 // AJ. — 2008. — Jan. — Vol. 135, no. 1. — P. 291–318. — 0709.4249.
- [46] 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.
- [47] Kautsch S. J., Grebel E. K., Gallagher J. S. Iii. The influence of environment on the morphological evolution of disk-dominated galaxies. // Astronomische Nachrichten. — 2005. — Aug. — Vol. 326. — P. 496–497.
- [48] Kautsch S. J., Gallagher J. S., Grebel E. K. Disk galaxies and their environment // Astronomische Nachrichten. — 2009. — Dec. — Vol. 330. — P. 1056.

- [49] Kudrya Yu. N., Karachentseva V. E., Karachentsev I. D. Apparent magnitudes and Tully-Fisher's diagram for FGC galaxies // *Astronomy Letters*. — 1997. — Sep. — Vol. 23, no. 5. — P. 633–637.
- [50] Karachentsev I. D., Karachentseva V. E., Kudrya Yu. N. Properties of flat galaxies from the FGC catalog // *Astronomy Letters*. — 1999. — Jan. — Vol. 25, no. 1. — P. 1–6.
- [51] Barnes J. The dynamical state of groups of galaxies. // *MNRAS*. — 1985. — Aug. — Vol. 215. — P. 517–536.
- [52] The Late Stellar Assembly of Massive Cluster Galaxies via Major Merging / Kim-Vy H. Tran, John Moustakas, Anthony H. Gonzalez et al. // *ApJ*. — 2008. — Aug. — Vol. 683, no. 1. — P. L17. — 0806.4387.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] 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.

- [58] 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.
- [59] The Milky Way Tomography with SDSS. I. Stellar Number Density Distribution / Mario Jurić, Željko Ivezić, Alyson Brooks et al. // ApJ. — 2008. — Feb. — Vol. 673, no. 2. — P. 864–914. — astro-ph/0510520.
- [60] The Unusual Vertical Mass Distribution of NGC 4013 Seen through the Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies (S<sup>4</sup>G) / Sébastien Comerón, Bruce G. Elmegreen, Johan H. Knapen et al. // ApJ. — 2011. — Sep. — Vol. 738, no. 2. — P. L17. — 1107.0529.
- [61] Comerón S., Salo H., Knapen J. H. The reports of thick discs’ deaths are greatly exaggerated. Thick discs are NOT artefacts caused by diffuse scattered light // A&A. — 2018. — Feb. — Vol. 610. — P. A5. — 1709.00457.
- [62] Kormendy John, Barentine John C. Detection of a Pseudobulge Hidden Inside the “Box-shaped Bulge” of NGC 4565 // ApJ. — 2010. — Jun. — Vol. 715, no. 2. — P. L176–L179. — 1005.1647.
- [63] Gadotti Dimitri A., Sánchez-Janssen Rubén. Surprises in image decomposition of edge-on galaxies: does Sombrero have a (classical) bulge? // MNRAS. — 2012. — Jun. — Vol. 423, no. 1. — P. 877–888. — 1101.2900.
- [64] Sotnikova N. Ya., Reshetnikov V. P., Mosenkov A. V. Bulges and discs of spiral galaxies: edge-on perspective // Astronomical and Astrophysical Transactions. — 2012. — Jan. — Vol. 27, no. 2. — P. 325–334.
- [65] Tikhonov N. A., Galazutdinova O. A. Stellar Disks and Halos of Edge-on Spiral Galaxies: NGC 891, NGC 4144, and NGC 4244 // Astrophysics. — 2005. — Apr. — Vol. 48, no. 2. — P. 221–236. — astro-ph/0503235.
- [66] Sancisi R. Warped HI Disks in Galaxies // A&A. — 1976. — Dec. — Vol. 53. — P. 159.

- [67] Reshetnikov Vladimir, Combes Francoise. Statistics of optical WARPS in spiral disks // *A&A*. — 1998. — Sep. — Vol. 337. — P. 9–16. — astro-ph/9806114.
- [68] 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.
- [69] 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.
- [70] 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.
- [71] 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.
- [72] 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.
- [73] Wainscoat R. J., Freeman K. C., Hyland A. R. The Optical and Near-Infrared Distribution of Light in the Edge-on Galaxy IC 2531 // *ApJ*. — 1989. — Feb. — Vol. 337. — P. 163.
- [74] Bullock James S., Stewart Kyle R., Purcell Chris W. Mergers and Disk Survival in  $\Lambda$ 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.
- [75] 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.

- [76] Naab Thorsten, Burkert Andreas. Statistical Properties of Collisionless Equal- and Unequal-Mass Merger Remnants of Disk Galaxies // *ApJ*. — 2003. — Nov. — Vol. 597, no. 2. — P. 893–906. — astro-ph/0110179.
- [77] How galaxies lose their angular momentum / Elena D’Onghia, Andreas Burkert, Giuseppe Murante, Sadegh Khochfar // *MNRAS*. — 2006. — Nov. — Vol. 372, no. 4. — P. 1525–1530. — astro-ph/0602005.
- [78] Khochfar S. Merger History of Galaxies and Disk+Bulge Formation // *Galaxy Evolution: Emerging Insights and Future Challenges* / Ed. by S. Jogee, I. Marinova, L. Hao, G. A. Blanc. — Vol. 419 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. — 2009. — Dec. — P. 197. — 0903.0734.
- [79] The haloes and environments of nearby galaxies (HERON) - II. The outer structure of edge-on galaxies / Aleksandr Mosenkov, R. Michael Rich, Andreas Koch et al. // *MNRAS*. — 2020. — May. — Vol. 494, no. 2. — P. 1751–1770. — 2003.03392.
- [80] Kormendy John. Secular Evolution in Disk Galaxies // *Secular Evolution of Galaxies* / Ed. by Jesús Falcón-Barroso, Johan H. Knapen. — 2013. — P. 1.
- [81] Cold Dark Matter Substructure and Galactic Disks. I. Morphological Signatures of Hierarchical Satellite Accretion / Stelios Kazantzidis, James S. Bullock, Andrew R. Zentner et al. // *ApJ*. — 2008. — Nov. — Vol. 688, no. 1. — P. 254–276. — 0708.1949.
- [82] Hernandez X., Cervantes-Sodi B. A dimensional study of disc galaxies // *MNRAS*. — 2006. — May. — Vol. 368, no. 1. — P. 351–360. — astro-ph/0511727.
- [83] Dutton Aaron A. On the origin of exponential galaxy discs // *MNRAS*. — 2009. — Jun. — Vol. 396, no. 1. — P. 121–140. — 0810.5164.
- [84] Navarro Julio F., Steinmetz Matthias. Dark Halo and Disk Galaxy Scaling Laws in Hierarchical Universes // *ApJ*. — 2000. — Aug. — Vol. 538, no. 2. — P. 477–488. — astro-ph/0001003.



- [85] D’Onghia Elena, Burkert Andreas. Bulgeless Galaxies and Their Angular Momentum Problem // *ApJ*. — 2004. — Sep. — Vol. 612, no. 1. — P. L13–L16. — astro-ph/0402504.
- [86] Bulgeless dwarf galaxies and dark matter cores from supernova-driven outflows / F. Governato, C. Brook, L. Mayer et al. // *Nature*. — 2010. — Jan. — Vol. 463, no. 7278. — P. 203–206. — 0911.2237.
- [87] Hierarchical formation of bulgeless galaxies: why outflows have low angular momentum / C. B. Brook, F. Governato, R. Roškar et al. // *MNRAS*. — 2011. — Aug. — Vol. 415, no. 2. — P. 1051–1060. — 1010.1004.
- [88] Okamoto Takashi. The origin of pseudo-bulges in cosmological simulations of galaxy formation // *MNRAS*. — 2013. — Jan. — Vol. 428, no. 1. — P. 718–728. — 1203.5372.
- [89] Makarov D. I., Burenkov A. N., Tyurina N. V. Rotation Curves for 135 Edge-on Galaxies // *Astronomy Letters*. — 2001. — Apr. — Vol. 27. — P. 213–216.
- [90] Kinematics and dynamics of the “superthin” edge-on disk galaxy IC 5249 / P. C. van der Kruit, J. Jiménez-Vicente, M. Kregel, K. C. Freeman // *A&A*. — 2001. — Nov. — Vol. 379. — P. 374–383. — astro-ph/0109477.
- [91] Karachentsev I. D., Xu Z. Optical Rotation Curves of Thin Spiral Galaxies // *Soviet Astronomy Letters*. — 1991. — Mar. — Vol. 17. — P. 135.
- [92] Relationship between the Thickness of Stellar Disks and the Relative Mass of a DarkGalactic Halo / A. V. Zasov, D. V. Bizyaev, D. I. Makarov, N. V. Tyurina // *Astronomy Letters*. — 2002. — Aug. — Vol. 28. — P. 527–535. — astro-ph/0208124.
- [93] 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.

- [94] 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.
- [95] 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.
- [96] Di Paolo Chiara, Salucci Paolo, Erkurt Adnan. The universal rotation curve of low surface brightness galaxies - IV. The interrelation between dark and luminous matter // MNRAS. — 2019. — Dec. — Vol. 490, no. 4. — P. 5451–5477. — 1805.07165.
- [97] 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.
- [98] 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.
- [99] 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.
- [100] 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.
- [101] 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.
- [102] 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.

- [103] HyperLEDA. III. The catalogue of extragalactic distances / Dmitry Makarov, Philippe Prugniel, Nataliya Terekhova et al. // *A&A*. — 2014. — Oct. — Vol. 570. — P. A13. — 1408.3476.
- [104] The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey / Kevork N. Abazajian, Jennifer K. Adelman-McCarthy, Marcel A. Agüeros et al. // *ApJS*. — 2009. — Jun. — Vol. 182, no. 2. — P. 543–558. — 0812.0649.
- [105] 2MASS Extended Source Catalog: Overview and Algorithms / T. H. Jarrett, T. Chester, R. Cutri et al. // *AJ*. — 2000. — May. — Vol. 119, no. 5. — P. 2498–2531. — astro-ph/0004318.
- [106] The First Data Release of the Sloan Digital Sky Survey / Kevork Abazajian, Jennifer K. Adelman-McCarthy, Marcel A. Agüeros et al. // *AJ*. — 2003. — Oct. — Vol. 126, no. 4. — P. 2081–2086. — astro-ph/0305492.
- [107] The Sixth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey / Jennifer K. Adelman-McCarthy, Marcel A. Agüeros, Sahar S. Allam et al. // *ApJS*. — 2008. — Apr. — Vol. 175, no. 2. — P. 297–313. — 0707.3413.
- [108] Kautsch Stefan J. The Edge-On Perspective of Bulgeless, Simple Disk Galaxies // *PASP*. — 2009. — Dec. — Vol. 121, no. 886. — P. 1297. — 1001.4542.
- [109] The Pan-STARRS1 Surveys / K. C. Chambers, E. A. Magnier, N. Metcalfe et al. // arXiv e-prints. — 2016. — Dec. — P. arXiv:1612.05560. — 1612.05560.
- [110] Pan-STARRS Pixel Analysis: Source Detection and Characterization / Eugene A. Magnier, W. E. Sweeney, K. C. Chambers et al. // *ApJS*. — 2020. — Nov. — Vol. 251, no. 1. — P. 5. — 1612.05244.
- [111] The Pan-STARRS1 Database and Data Products / H. A. Flewelling, E. A. Magnier, K. C. Chambers et al. // *ApJS*. — 2020. — Nov. — Vol. 251, no. 1. — P. 7. — 1612.05243.
- [112] Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition / Y. LeCun, B. Boser, J. S. Denker et al. // *Neural Computation*. — 1989. — Vol. 1, no. 4. — P. 541–551. — <https://doi.org/10.1162/neco.1989.1.4.541>.

- [113] Handwritten Digit Recognition with a Back-Propagation Network / Yann LeCun, Bernhard E. Boser, John S. Denker et al. // *Advances in Neural Information Processing Systems 2* / Ed. by D. S. Touretzky. — Morgan-Kaufmann, 1990. — P. 396–404.
- [114] Galaxy Zoo: morphologies derived from visual inspection of galaxies from the Sloan Digital Sky Survey / Chris J. Lintott, Kevin Schawinski, Anže Slosar et al. // *MNRAS*. — 2008. — Sep. — Vol. 389, no. 3. — P. 1179–1189. — 0804.4483.
- [115] Bradley Larry, Sipőcz Brigitta, Robitaille Thomas et al. *astropy/photutils*: 1.0.0. — Zenodo. — 2020. — Sep.
- [116] Bertin E., Arnouts S. SExtractor: Software for source extraction. // *A&AS*. — 1996. — Jun. — Vol. 117. — P. 393–404.
- [117] Kron R. G. Photometry of a complete sample of faint galaxies. // *ApJS*. — 1980. — Jun. — Vol. 43. — P. 305–325.
- [118] Petrosian V. Surface Brightness and Evolution of Galaxies // *ApJ*. — 1976. — Dec. — Vol. 210. — P. L53.
- [119] Schlegel Eric M., Petre Robert, Loewenstein Michael. ROSAT Observations of X-Ray-faint S0 Galaxies: NGC 1380 // *AJ*. — 1998. — Feb. — Vol. 115, no. 2. — P. 525–534.
- [120] Malmquist K. G. On some relations in stellar statistics // *Meddelanden fran Lunds Astronomiska Observatorium Serie I*. — 1922. — Mar. — Vol. 100. — P. 1–52.
- [121] The optical morphologies of galaxies in the IllustrisTNG simulation: a comparison to Pan-STARRS observations / Vicente Rodriguez-Gomez, Gregory F. Snyder, Jennifer M. Lotz et al. // *MNRAS*. — 2019. — Mar. — Vol. 483, no. 3. — P. 4140–4159. — 1809.08239.
- [122] Lotz Jennifer M., Primack Joel, Madau Piero. A New Nonparametric Approach to Galaxy Morphological Classification // *AJ*. — 2004. — Jul. — Vol. 128, no. 1. — P. 163–182. — astro-ph/0311352.

- [123] Conselice Christopher J. The Relationship between Stellar Light Distributions of Galaxies and Their Formation Histories // *ApJS*. — 2003. — Jul. — Vol. 147, no. 1. — P. 1–28. — astro-ph/0303065.
- [124] Observational data for the kinematics of the local universe. I. Radial velocity measurements. / L. Bottinelli, N. Durand, P. Fouque et al. // *A&AS*. — 1992. — Apr. — Vol. 93. — P. 173–188.
- [125] Our Peculiar Motion Away from the Local Void / R. Brent Tully, Edward J. Shaya, Igor D. Karachentsev et al. // *ApJ*. — 2008. — Mar. — Vol. 676, no. 1. — P. 184–205. — 0705.4139.
- [126] Nearly 5000 Distant Early-Type Galaxies in COMBO-17: A Red Sequence and Its Evolution since  $z \sim 1$  / Eric F. Bell, Christian Wolf, Klaus Meisenheimer et al. // *ApJ*. — 2004. — Jun. — Vol. 608, no. 2. — P. 752–767. — astro-ph/0303394.
- [127] The Eleventh and Twelfth Data Releases of the Sloan Digital Sky Survey: Final Data from SDSS-III / Shadab Alam, Franco D. Albareti, Carlos Allende Prieto et al. // *ApJS*. — 2015. — Jul. — Vol. 219, no. 1. — P. 12. — 1501.00963.
- [128] Schlafly Edward F., Finkbeiner Douglas P. Measuring Reddening with Sloan Digital Sky Survey Stellar Spectra and Recalibrating SFD // *ApJ*. — 2011. — Aug. — Vol. 737, no. 2. — P. 103. — 1012.4804.
- [129] The Pan-STARRS1 Photometric System / J. L. Tonry, C. W. Stubbs, K. R. Lykke et al. // *ApJ*. — 2012. — May. — Vol. 750, no. 2. — P. 99. — 1203.0297.
- [130] Galaxy Zoo: dust in spiral galaxies / Karen L. Masters, Robert Nichol, Steven Bamford et al. // *MNRAS*. — 2010. — May. — Vol. 404, no. 2. — P. 792–810. — 1001.1744.
- [131] Unterborn Cayman T., Ryden Barbara S. Inclination-Dependent Extinction Effects in Disk Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey // *ApJ*. — 2008. — Nov. — Vol. 687, no. 2. — P. 976–985. — 0801.2400.

- [132] de Grijs R. The global structure of galactic discs // MNRAS. — 1998. — Sep. — Vol. 299, no. 2. — P. 595–610. — astro-ph/9804337.
- [133] Does the stellar disc flattening depend on the galaxy type? / A. V. Mosenkov, N. Ya. Sotnikova, V. P. Reshetnikov et al. // MNRAS. — 2015. — Aug. — Vol. 451, no. 3. — P. 2376–2389. — 1505.03383.
- [134] Stevens J. A., Amure M., Gear W. K. Dust in spiral galaxies: global properties // MNRAS. — 2005. — Feb. — Vol. 357, no. 1. — P. 361–380. — astro-ph/0411721.
- [135] Matthews L. D., Wood Kenneth. High-Latitude H I in the Low Surface Brightness Galaxy UGC 7321 // ApJ. — 2003. — Aug. — Vol. 593, no. 2. — P. 721–732. — astro-ph/0305402.
- [136] The apparent and true peak flattenings of flat galaxies / Yu. N. Kudrya, I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, S. L. Parnovskii // Astronomy Letters. — 1994. — Jan. — Vol. 20, no. 1. — P. 8–11.
- [137] The intrinsic shapes of dwarf irregular galaxies. / S. Roychowdhury, J. N. Chengalur, I. D. Karachentsev, E. I. Kaisina // MNRAS. — 2013. — Nov. — Vol. 436. — P. L104–L108. — 1308.6200.
- [138] Search for transient optical counterparts to high-energy IceCube neutrinos with Pan-STARRS1 / Pan-Starrs Collaboration, E. Kankare, M. Huber et al. // A&A. — 2019. — Jun. — Vol. 626. — P. A117. — 1901.11080.
- [139] Magnier E. The Pan-STARRS PS1 Image Processing Pipeline // The Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. — 2006. — Jan. — P. E50.
- [140] Mosenkov A. V. Mass decomposition of galaxies using DECA software package // Astrophysical Bulletin. — 2014. — Jan. — Vol. 69, no. 1. — P. 99–112.
- [141] Schlafly E. F., Finkbeiner D. P. Measuring Reddening with Sloan Digital Sky Survey Stellar Spectra and Recalibrating SFD // ApJ. — 2011. — Aug. — Vol. 737. — P. 103. — 1012.4804.

- [142] Matthews L. D., Gallagher J. S. III, van Driel W. The Extraordinary “Superthin” Spiral Galaxy UGC 7321. I. Disk Color Gradients and Global Properties from Multiwavelength Observations // *AJ*. — 1999. — Dec. — Vol. 118, no. 6. — P. 2751–2766. — astro-ph/9909142.
- [143] Freeman K. C. On the Disks of Spiral and S0 Galaxies // *ApJ*. — 1970. — Jun. — Vol. 160. — P. 811.
- [144] Kostov A., Bonev T. Transformation of Pan-STARRS1 gri to Stetson BVRI magnitudes. Photometry of small bodies observations. // *Bulgarian Astronomical Journal*. — 2018. — Feb. — Vol. 28. — P. 3. — 1706.06147.
- [145] Mosenkov A. V., Sotnikova N. Ya., Reshetnikov V. P. Mirages in galaxy scaling relations // *MNRAS*. — 2014. — Jun. — Vol. 441, no. 2. — P. 1066–1085. — 1403.7555.
- [146] Efstathiou G., Jones B. J. T. The rotation of galaxies: numerical investigations of the tidal torque theory. // *MNRAS*. — 1979. — Jan. — Vol. 186. — P. 133–144.
- [147] Peebles P. J. E. Origin of the Angular Momentum of Galaxies // *ApJ*. — 1969. — Feb. — Vol. 155. — P. 393.
- [148] Porciani Cristiano, Dekel Avishai, Hoffman Yehuda. Testing tidal-torque theory - I. Spin amplitude and direction // *MNRAS*. — 2002. — May. — Vol. 332, no. 2. — P. 325–338. — astro-ph/0105123.
- [149] White S. D. M. Angular momentum growth in protogalaxies // *ApJ*. — 1984. — Nov. — Vol. 286. — P. 38–41.
- [150] Schäfer Björn Malte. Galactic Angular Momenta and Angular Momentum Correlations in the Cosmological Large-Scale Structure // *International Journal of Modern Physics D*. — 2009. — Jan. — Vol. 18, no. 2. — P. 173–222. — 0808.0203.
- [151] Spin Alignment of Dark Matter Halos in Filaments and Walls / Miguel A. Aragón-Calvo, Rien van de Weygaert, Bernard J. T. Jones, J. M. van der Hulst // *ApJ*. — 2007. — Jan. — Vol. 655, no. 1. — P. L5–L8. — astro-ph/0610249.

- [152] Aragon Calvo Miguel Angel. Local Ensemble N-body Simulations: Generating Multiple Local Paths of Galaxy Formation // American Astronomical Society Meeting Abstracts #221. — Vol. 221 of American Astronomical Society Meeting Abstracts. — 2013. — Jan. — P. 132.04.
- [153] Trowland Holly E., Lewis Geraint F., Bland-Hawthorn Joss. The Cosmic History of the Spin of Dark Matter Halos within the Large-scale Structure // ApJ. — 2013. — Jan. — Vol. 762, no. 2. — P. 72. — 1201.6108.
- [154] Hahn Oliver, Teyssier Romain, Carollo C. Marcella. The large-scale orientations of disc galaxies // MNRAS. — 2010. — Jun. — Vol. 405, no. 1. — P. 274–290. — 1002.1964.
- [155] The Angular Momentum of Gas in Protogalaxies. I. Implications for the Formation of Disk Galaxies / Frank C. van den Bosch, Tom Abel, Rupert A. C. Croft et al. // ApJ. — 2002. — Sep. — Vol. 576, no. 1. — P. 21–35. — astro-ph/0201095.
- [156] Spin Alignments of Spiral Galaxies within the Large-scale Structure from SDSS DR7 / Youcai Zhang, Xiaohu Yang, Huiyuan Wang et al. // ApJ. — 2015. — Jan. — Vol. 798, no. 1. — P. 17. — 1409.7150.
- [157] The Extragalactic Distance Database: All Digital H I Profile Catalog / Hélène M. Courtois, R. Brent Tully, J. Richard Fisher et al. // AJ. — 2009. — Dec. — Vol. 138, no. 6. — P. 1938–1956. — 0902.3670.
- [158] The 6dF Galaxy Survey: final redshift release (DR3) and southern large-scale structures / D. Heath Jones, Mike A. Read, Will Saunders et al. // MNRAS. — 2009. — Oct. — Vol. 399, no. 2. — P. 683–698. — 0903.5451.
- [159] The Arecibo Legacy Fast ALFA Survey: The ALFALFA Extragalactic H I Source Catalog / Martha P. Haynes, Riccardo Giovanelli, Brian R. Kent et al. // ApJ. — 2018. — Jul. — Vol. 861, no. 1. — P. 49. — 1805.11499.
- [160] Karachentsev I. D., Karachentseva V. E. ‘Scraggy’ dark haloes around bulgeless spiral // MNRAS. — 2019. — Jul. — Vol. 486, no. 3. — P. 3697–3701. — 1904.13155.



- [161] Properties of dark matter haloes in clusters, filaments, sheets and voids / Oliver Hahn, Cristiano Porciani, C. Marcella Carollo, Avishai Dekel // MNRAS. — 2007. — Feb. — Vol. 375, no. 2. — P. 489–499. — astro-ph/0610280.
- [162] Swirling around filaments: are large-scale structure vortices spinning up dark haloes? / C. Laigle, C. Pichon, S. Codis et al. // MNRAS. — 2015. — Jan. — Vol. 446, no. 3. — P. 2744–2759. — 1310.3801.
- [163] The velocity shear tensor: tracer of halo alignment / Noam I. Libeskind, Yehuda Hoffman, Jaime Forero-Romero et al. // MNRAS. — 2013. — Jan. — Vol. 428, no. 3. — P. 2489–2499. — 1210.4559.
- [164] The Spin and Orientation of Dark Matter Halos Within Cosmic Filaments / Youcai Zhang, Xiaohu Yang, Andreas Faltenbacher et al. // ApJ. — 2009. — Nov. — Vol. 706, no. 1. — P. 747–761. — 0906.1654.
- [165] The 3D skeleton: tracing the filamentary structure of the Universe / T. Sousbie, C. Pichon, S. Colombi et al. // MNRAS. — 2008. — Feb. — Vol. 383, no. 4. — P. 1655–1670. — 0707.3123.
- [166] Ultra-flat galaxies selected from RFGC catalog. I. The sample properties / V. E. Karachentseva, Yu. N. Kudrya, I. D. Karachentsev et al. // Astrophysical Bulletin. — 2016. — Jan. — Vol. 71, no. 1. — P. 1–13. — 1602.05368.

## Приложение А. Структура каталога RFGC

Каталог представлен в виде таблицы, следующей структуре RFGC каталога, описанной в оригинальной работе [40].

**rfgc** — идентификатор галактики из каталога RFGC [40] в диапазоне от RFGC0001 до RFGC4236.

**fgc** — имя галактики из каталога FGC [39] [FGC0001–FGC2573]. Южное расширение каталога имеет обозначение [FGCE0001–FGCE1882].

**ra, dec** — прямое восхождение и склонение галактики в градусах на эпоху J2000.0. Координаты были уточнены по базе данных HyperLeda [103].

**pa** — позиционный угол большой оси галактики в градусах, измеряемый от севера к востоку.

**aO, bO** — голубые диаметры большой и малой оси галактики в угловых минутах в системе размеров POSS-I.

**aE, bE** — красные диаметры большой и малой оси галактики в угловых минутах в системе размеров POSS-I.

**type** — морфологический тип галактики согласно классификации Хаббла.

**As** — индекс асимметрии (0 — симметричная галактика, 2 — выраженная асимметрия).

**sb** — индекс средней поверхностной яркости (1 — высокая, 4 — очень низкая).

**Btot** — видимая полная В-звездная величина, рассчитанная на основе размеров, морфологического типа, класса поверхностной яркости, как это описано в каталоге RFGC [40].

**nsat** — количество значимых спутников (см. описание в оригинальном каталоге RFGC [40]).

**notes** — содержит примечания по галактикам.

**pgc** — PGC-номер галактики из базы данных HyperLeda [103].

## Приложение В. Структура каталога EGIS

Каталог сформирован на основе последних версий таблиц<sup>2</sup> 4 и 6 из работы Бизяева и др. [72]. Оригинальные таблицы содержат фотометрию галактик, выполненную двумя различными способами. Они были преобразованы в три таблицы базы данных с целью устранения избыточности.

### **egis**

Данная таблица содержит список “истинных” галактик с ребра [72].

**eon** — уникальный идентификатор галактики из оригинальной статьи.

**ra, dec** — прямое восхождение и склонение галактики в градусах на эпоху J2000.0.

**altname** — имя галактики в других каталогах.

**type** — морфологический тип галактики: [Sa, Sb, Sc, Sd, Ir].

**rv** — гелиоцентрическая радиальная скорость в км/с по данным HyperLeda, как приведено в оригинальном каталоге [72].

### **egis\_phot1d**

Таблица фотометрии из одномерного анализа профилей яркости галактик, видимых с ребра.

**eon** — уникальный идентификатор, связанный с таблицей **egis**.

**band** — SDSS фильтр (*gri*).

**pa** — позиционный угол галактики.

**h, e\_h** — радиальная экспоненциальная шкала диска галактики в угловых секундах и ее ошибка.

**z0, e\_z0** — вертикальная  $\text{sech}^2$  шкала диска галактики в угловых секундах и ее ошибка.

---

<sup>2</sup><http://users.apo.nmsu.edu/~dmbiz/EGIS/>

**sb0**, **e\_sb0** — центральная поверхностная яркость галактики, приведенная к положению плашмя и ее ошибка.

**grad\_z0** — градиент вертикальной шкалы диска,  $z_0$ , нормализованный на отношение шкал  $= \frac{dz_0}{dr} \frac{h}{z_0}$ .

**mag** — полная апертурная звездная величина внутри ограничивающего эллипса, скорректированная за поглощение в нашей Галактике согласно [119].

**B/T** — отношение яркости балджа к полной светимости галактики.

**fits** — указатель на FITS-файл в локальном архиве.

**ima** — указатель изображения галактики в данном фильтре для визуализации с помощью Web-интерфейса.

### **egis\_phot3d**

Таблица фотометрии из анализа распределения яркости галактик на SDSS-изображении в фильтре  $r$  (3-D Analysis).

**eon** — уникальный идентификатор, связанный с таблицей **egis**.

**band** — SDSS фильтр. Должен быть всегда равным ( $r$ ).

**h** — радиальная экспоненциальная шкала диска галактики в угловых секундах.

**z0** — вертикальная  $\text{sech}^2$  шкала диска галактики в угловых секундах.

**sb0** — центральная поверхностная яркость галактики, приведенная к положению плашмя.

## **Приложение С. Структура каталога 2MFGC**

**id** — 2MFGC обозначение галактики [2MFGC00001–2MFGC18020].

**pgc** — PGC-номер галактики из базы данных HyperLeda [103].

**ra, dec** — прямое восхождение и склонение галактики в градусах на эпоху J2000.0.

**r** — эллиптический кроновский радиус в 2MASS фильтре  $K_s$ . Эта апертура использовалась для фотометрии во всех трех 2MASS фильтрах.

**Jmag** — кроновская звездная величина в  $J$ -фильтре обзора 2MASS.

**Hmag** — кроновская звездная величина в  $H$ -фильтре обзора 2MASS.

**Ksmag** — кроновская звездная величина в  $K_s$ -фильтре обзора 2MASS.

**b/a** — отношение осей галактики в комбинированном  $J + H + K_s$  изображении.

**b/a1** — отношение осей, усредненное по индивидуальным изображениям в  $J$ ,  $H$  и  $K_s$ -фильтрах.

**pa** — позиционный угол в комбинированном изображении, измеряющийся от севера N к востоку E.

**CI** — индекс концентрации в фильтре  $J$  (отношение радиусов в которых сосредоточено  $3/4$  и  $1/4$  света галактики).

## Приложение D. Структура таблиц кандидатов из обзора Pan-STARRS

### ps1candidate

Таблица содержит информацию о кандидатах в галактики, видимые с ребра, найденные в обзоре Pan-STARRS. Она содержит идентификатор объекта; его координаты; фотометрические параметры, полученные при первичном выделении; и указатели на файлы в локальном архиве.

**projcell, subcell, candidate** — эта комбинация из трех цифр используется в качестве уникального идентификатора объектов и определяется спецификой организации архива изображений в обзоре Pan-STARRS<sup>1</sup>. Пара чисел,

---

<sup>1</sup><https://outerspace.stsci.edu/display/PANSTARRS/PS1+Sky+tessellation+patterns>

`projcell` и `subcell` указывает номер проекции на небе и номер ячейки в данном разбиении, соответственно. Номер кандидата, `candidate`, найденного на данном изображении нашим алгоритмом поиска галактик, видимых с ребра.

**ra, dec** — прямое восхождение и склонение кандидата в градусах на эпоху J2000.0.

**sma\_r** — большая полуось, соответствующая характерной ширине гауссианы, вписанной двумерное в распределение света от галактики на изображении в r-фильтре.

**ell\_r** — эллиптичность,  $1 - b/a$ , соответствующей гауссианы.

**pa\_r** — соответствующий позиционный угол на изображении.

**mag\_r** — оценка полной видимой звездной величины объекта.

**fits\_g, fits\_r, fits\_i** — указатели FITS-файлов в локальном архиве изображений для каждого из трех фильтров.

**image, contour** — цветное изображение и изображение с нанесенным контуром выделения кандидата, соответственно, для удобства просмотра кандидатов.

### **ps1candidate\_annvote**

Данная таблица содержит информацию о классификации кандидатов, полученную в пяти разных моделях искусственной нейронной сети, обученных для классификации галактик, видимых с ребра.

**projcell, subcell, candidate** — уникальный идентификатор объекта, связанный с таблицей `ps1candidate`.

**n** — номер модели, использованной для классификации кандидата.

**vote** — индекс соответствия галактикам с ребра, полученный в рамках соответствующей модели. 0 — не соответствует, 1 — классифицирована как галактика с ребра.

## ps1candidate\_class

Данная таблица содержит информацию о визуальной классификации кандидатов участниками проекта. Процесс классификации разбивался на несколько этапов, поэтому один и тот же объект, мог быть классифицирован одним и тем же человеком несколько раз.

**projcell, subcell, candidate** — уникальный идентификатор объекта, связанный с таблицей ps1candidate.

**userid** — идентификатор пользователя, выполнившего классификацию.

**date** — время классификации.

**workflow** — указатель этапа, в ходе которого была проведена идентификация.

**class** — собственно классификация, выполненная данным пользователем, в ходе текущего этапа. Возможные значения следующие: good — галактика видима практически с ребра; acceptable — галактика видна под большим углом к лучу зрения; unsuitable — объект не является галактикой с ребра; wrong — кандидат не является галактикой (дефект изображения либо комбинации звезд).

**use** — флаг, true или false, использования данной классификации в статистике.

## ps1candidate\_phot

В таблице собрана фотометрия галактик, выполненная программой SExtractor<sup>1</sup>, по изображениям из обзора Pan-STARRS в пяти фильтрах.

**projcell, subcell, candidate** — уникальный идентификатор объекта, связанный с таблицей ps1candidate.

**band** — Pan-STARRS1 фильтр (g, r, i, z, y).

**ra, dec** — прямое восхождение и склонение кандидата в градусах на эпоху J2000.0.

---

<sup>1</sup><https://sextractor.readthedocs.io/>

**xima, yima** — координаты барицентра объекта на изображении (параметры X\_IMAGE, Y\_IMAGE в SExtractor).

**aima, bima, paima** — большая и малая полуось, и позиционный угол эллипса, описывающего данный объект на изображении (параметры A\_IMAGE, B\_IMAGE, THETA\_IMAGE в SExtractor).

**a, e\_a** — большая полуось объекта на небе и ее ошибка в угловых секундах (параметры A\_IMAGE, ERRA\_IMAGE).

**b, e\_b** — малая полуось объекта на небе и ее ошибка в угловых секундах (параметры B\_IMAGE, ERRB\_IMAGE).

**pa** — позиционный угол объекта, отсчитывающийся от направления на север к востоку (параметр THETA\_J2000).

**ell** — эллиптичность объекта,  $1 - b/a$ , (параметр ELLIPTICITY).

**radkron** — псевдо-радиус Крона (параметр KRON\_RADIUS).

**fluxauto, e\_fluxauto** — поток после вычитания фона, и его ошибка внутри кроновского эллипса (параметр FLUX\_AUTO, FLUXERR\_AUTO).

**magauto, e\_magauto** — звездная величина и ее ошибка внутри кроновского эллипса (параметр MAG\_AUTO, MAGERR\_AUTO).

**radpetro** — псевдо-радиус Петросяна (параметр PETRO\_RADIUS).

**fluxpetro, e\_fluxpetro** — поток после вычитания фона, и его ошибка внутри петросяновского эллипса (параметр FLUX\_PETRO, FLUXERR\_PETRO).

**magpetro, e\_magpetro** — звездная величина и ее ошибка внутри петросяновского эллипса (параметр MAG\_PETRO, MAGERR\_PETRO).

**badpixfraction** — доля плохих пикселей внутри петросяновского эллипса, описывающего галактику.

**quality** — качество фотометрии, полученное на основе статистики отклонений параметров эллипса от медианных значений.



**fits** — указатель имени файла в локальном архиве.

### **ps1candidate\_crossid**

Таблица кросс-идентификации кандидатов с галактиками из базы данных HyperLeda<sup>1</sup> [103].

**projcell, subcell, candidate** — уникальный идентификатор объекта, связанный с таблицей ps1candidate.

**ra, dec** — прямое восхождение и склонение кандидата в градусах на эпоху J2000.0.

**pgc** — PGC-номер галактики из базы данных HyperLeda [103].

**flag** — код типа идентификации.

**userid** — пользователь, выполнивший отождествление.

**ctime** — время внесения идентификации в базу данных.

### **ps1candidate\_notes**

Различные примечания, сделанные в ходе работы с кандидатами.

**projcell, subcell, candidate** — уникальный идентификатор объекта, связанный с таблицей ps1candidate.

**userid** — пользователь, сделавший примечание.

**ctime** — время внесения примечания.

**note** — собственно примечание.

---

<sup>1</sup><http://leda.univ-lyon1.fr/>

## Приложение Е. Структура таблиц, используемых в системе классификации

### **user**

**id** — уникальный login пользователя;

**name** — полное имя пользователя;

### **project**

**project** — уникальный идентификатор проекта;

**description** — краткое описание;

**tbl** — имя таблицы с объектами для классификации;

### **project\_questions**

**id** — уникальный номер вопроса;

**project** — указатель на идентификатор проекта в таблице **project**;

**class** — обозначение класса;

**description** — краткое описание класса;

**bunch** — номер группы вопросов ;

**input** — определяет способ классификации: **radio** — выбор одного значения из набора либо **checkbox** — наличие или отсутствие данного признака.

## Приложение F. Таблица с результатами двумерной декомпозиции

<i>name</i>	<i>RA(J2000)</i> <i>deg</i>	<i>Dec(J2000)</i> <i>deg</i>	<i>filtr</i>	$\mu_d$	$z_0$ [arcs]	$h$ [arcs]	...	$m_b$ <i>mag</i>	$r_e$ [arcs]	$n$	$q$	$frac_b$	$m_{tot}$ <i>mag</i>	$\chi^2$
RFGC0006	0.510833	80.641944	r	21.86	2.80	14.33	...	19.12	3.41	0.5	0.15	-	19.87	1.19
RFGC0006	0.510833	80.641944	g	22.30	2.50	14.71	...	19.93	2.65	0.58	0.08	0.04	15.75	1.22
RFGC0006	0.510833	80.641944	i	21.61	3.01	14.08	...	18.75	3.51	0.58	0.18	-	19.61	1.19
RFGC0006	0.510833	80.641944	z	21.49	2.91	13.92	...	18.34	4.02	0.42	0.18	-	19.49	1.20
RFGC0006	0.510833	80.641944	y	21.36	2.69	15.98	...	17.97	3.92	0.71	0.2	0.08	14.98	1.21
RFGC0016	1.093750	51.675000	r	20.47	1.54	10.08	...	17.44	4.6	1.12	0.1	0.14	14.81	1.39
RFGC0016	1.093750	51.675000	g	21.51	1.55	10.77	...	18.45	4.59	0.93	0.11	0.14	15.56	1.23
RFGC0016	1.093750	51.675000	i	19.73	1.43	9.16	...	17.09	4.05	1.08	0.14	0.12	14.41	1.43
RFGC0016	1.093750	51.675000	z	19.24	1.34	8.61	...	16.86	3.56	1.02	0.14	0.11	14.16	1.34
RFGC0016	1.093750	51.675000	y	19.21	1.60	9.26	...	16.57	3.33	1.11	0.14	0.11	13.91	1.20
RFGC0046	2.694583	0.892222	y	18.76	0.46	5.49	...	-	-	-	-	-	15.73	1.36
RFGC0046	2.694583	0.892222	z	18.86	0.38	5.50	...	-	-	-	-	-	16.00	1.34
RFGC0046	2.694583	0.892222	r	20.06	0.57	6.36	...	-	-	-	-	-	16.58	1.54
RFGC0046	2.694583	0.892222	i	19.72	0.62	6.04	...	-	-	-	-	-	16.23	1.45
RFGC0058	3.421250	5.978056	r	20.46	1.30	8.50	...	17.78	3.42	0.63	0.2	0.14	15.63	1.28
RFGC0058	3.421250	5.978056	g	21.08	1.18	9.67	...	18.53	3.46	0.54	0.18	0.13	16.21	1.26
RFGC0058	3.421250	5.978056	i	20.45	1.41	9.39	...	17.06	4.74	1.39	0.23	0.21	15.35	1.29
RFGC0058	3.421250	5.978056	z	19.64	1.04	8.77	...	16.85	2.94	0.91	0.3	0.19	14.99	1.26
RFGC0058	3.421250	5.978056	y	19.39	1.26	7.33	...	17.01	2.06	1.14	0.6	0.13	14.80	1.23
RFGC0106	6.998333	-15.222778	g	23.11	1.20	7.39	...	20.09	1.53	1.01	0.33	0.22	18.40	1.23
RFGC0106	6.998333	-15.222778	r	22.22	0.77	8.91	...	18.84	1.23	1.64	0.38	0.34	17.62	1.22
RFGC0132	9.056250	-18.868611	y	18.97	1.08	4.97	...	17.04	0.89	0.76	0.49	0.15	14.96	1.24
RFGC0132	9.056250	-18.868611	i	19.44	1.16	4.88	...	18.5	0.0	0.55	0.5	0.06	15.47	1.48
RFGC0132	9.056250	-18.868611	z	19.27	1.18	5.12	...	17.59	0.79	0.84	0.38	0.11	15.17	1.26
RFGC0207	13.378333	28.276944	r	19.79	1.21	5.58	...	-	-	-	-	-	15.62	1.49
RFGC0207	13.378333	28.276944	g	21.34	1.51	11.18	...	17.93	3.56	2.0	0.19	0.18	15.92	1.22
RFGC0207	13.378333	28.276944	i	19.18	1.08	4.67	...	-	-	-	-	-	15.35	1.51
RFGC0207	13.378333	28.276944	z	18.80	1.03	4.53	...	-	-	-	-	-	15.08	1.32
RFGC0207	13.378333	28.276944	y	18.33	0.95	4.36	...	-	-	-	-	-	14.74	1.22

Таблица 2 — Таблица с результатами декомпозиции.  $RA(J2000)$ ,  $Dec(J2000)$  - координаты центра галактики (в градусах);  $\mu_d$  - центральная поверхностная яркость диска с ребра в  $[mag/\square'']$ ;  $z_0$ ,  $h$  - вертикальная и радиальная шкалы диска;  $m_b$  - видимая звездная величина центральной структуры;  $r_e$  - эффективный радиус центральной структуры;  $n$  - коэффициент Серсика;  $q$  - отношение b/a;  $frac_b$  - доля светимости балджа в полной светимости галактики;  $m_{tot}$  - интегральная звездная величина галактики;  $\chi^2$  - приведенный хи-квадрат. Величины были исправлены за поглощение в нашей Галактике [128]. Положение центра балджа и диска, а также доля последнего в полной светимости галактики не приводятся для экономии места.