

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ СПЕЦИАЛЬНАЯ
АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Антипова Александра Викторовна

Исследование галактик, видимых с ребра

Научно-квалификационная работа
(диссертация)

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
Макаров Д. И.

Нижний Архыз - 2022

Актуальность темы

- ♦ Единственные внегалактические объекты, вертикальную структуру которых можно изучать напрямую.
- ♦ Структурные особенности галактик позволяют делать вывод об эволюционных механизмах.
- ♦ Плохо изучены механизмы образования и эволюции безбалджевых галактик позднего типа.
- ♦ Галактики видимые с ребра лишены неопределенности связанной с углом наклона, что упрощает их использование в ряде задач.

Цели и задачи работы

- ♦ Разработать и создать базу данных для изучения галактик, видимых с ребра.
- ♦ Провести анализ нового каталога галактик, видимых с ребра, The Edge-on Galaxies in the Pan-STARRS1 survey (EGIPS).
- ♦ Найти зависимость между ориентацией спинов тонких галактик из каталога RFGC (Revised Flat Galaxy Catalog) и филаментами крупномасштабной структуры Вселенной, взятых из каталога Tempel et al. (2014).
- ♦ Провести декомпозицию ультратонких галактик на два компонента (балдж и диск) по данным Pan-STARRS (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System) и провести поиск зависимостей между различными параметрами.

Структура диссертации

Введение

Глава 1. Ориентация спинов тонких галактик относительно
филаментов крупномасштабной структуры Вселенной

Глава 2. Декомпозиция изображений ультратонких галактик

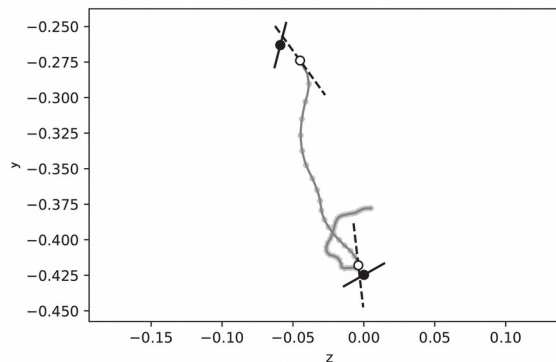
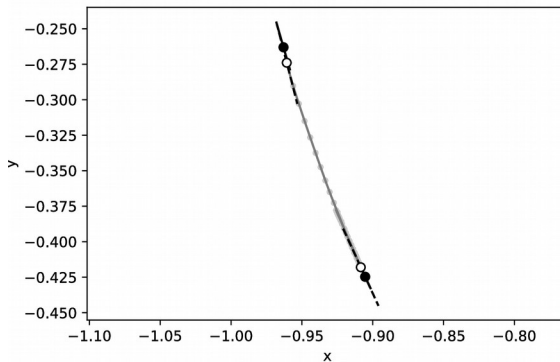
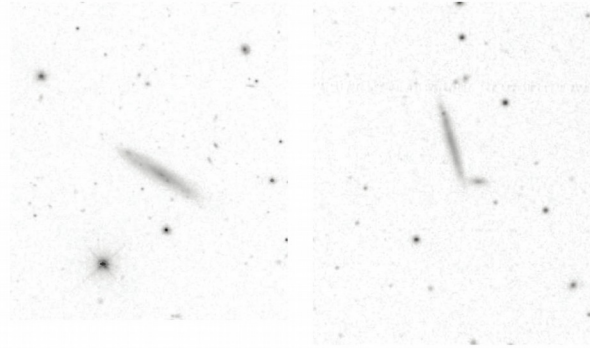
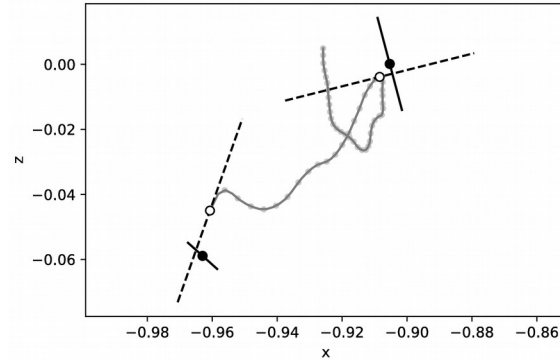
Глава 3. Статистика каталога галактик The Edge-on Galaxies
in the Pan-STARRS survey (EGIPS)

Глава 4. База данных для изучения галактик с ребра

Заключение

Литература

Глава 1. Поиск корреляции между спином галактики и осью филамента



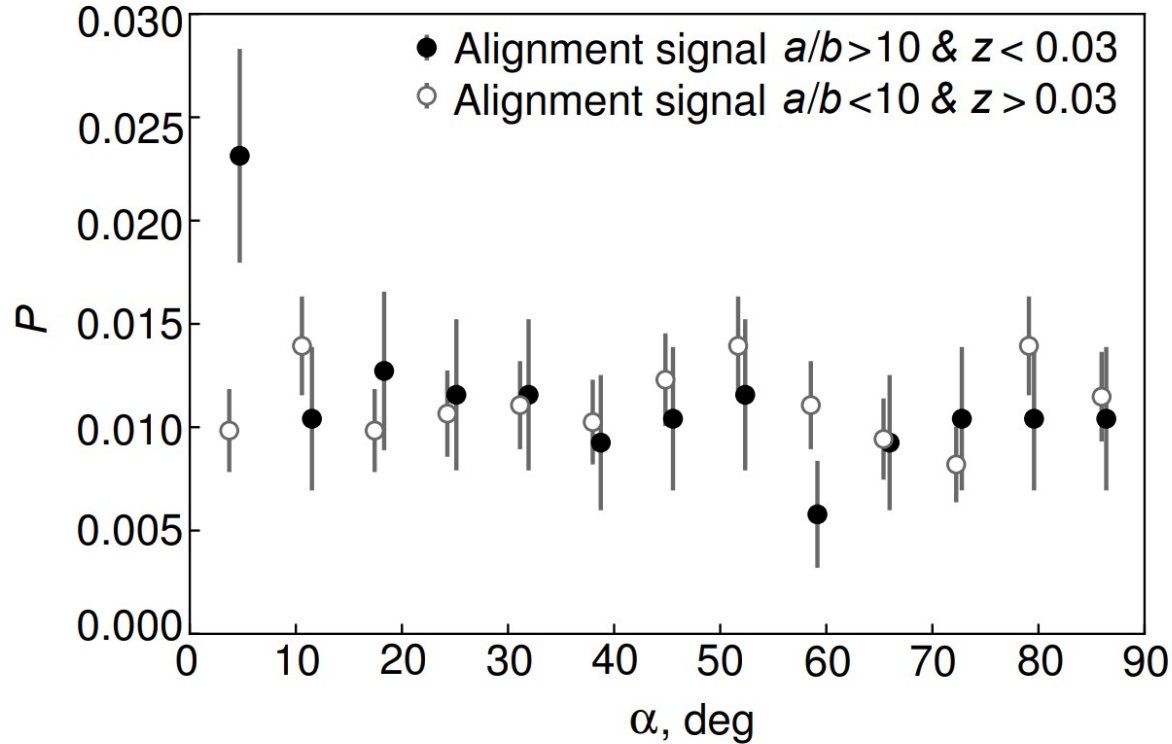
Изображения галактик (RFGC 2625, RFGC 2437), их проекции и проекции соответствующего филамента (N 227) в декартовой системе координат. На изображениях галактик север находится сверху, восток - слева. Светло-серые точки являются точками филамента из каталога [56]; серая сплошная линия - сплайн-интерполяция точек филамента; черные круги - галактики RFGC 2625, RFGC 2437; белые круги - самые близкие к галактикам точки филамента, взятые из каталога филаментов; черная сплошная линия — спин галактики, штриховая черная линия - касательная к филаменту в ближайшей к галактике точке филамента.

Revised Flat Galaxy Catalog (RFGC), содержит 4236 тонких галактики ($a/b > 7$ в фильтре B).

The catalogue of filaments for the SDSS, построен по данным обзора Sloan Digital Sky Survey (SDSS) dr8 и содержит информацию о 15421 филаментах, построенных по 499340 галактикам, которые находятся в диапазоне красных смещений $0.009 < z < 0.155$ в системе космического микроволнового фона (CMB).

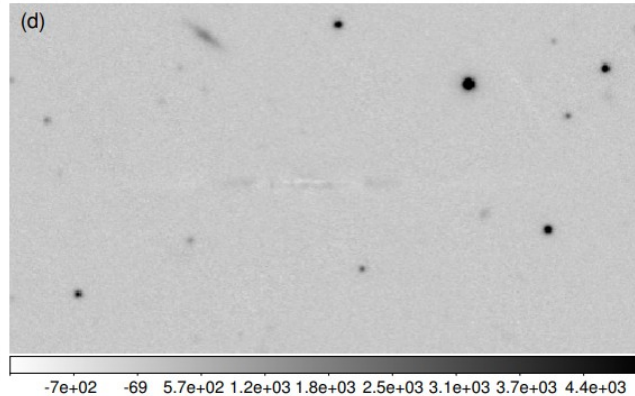
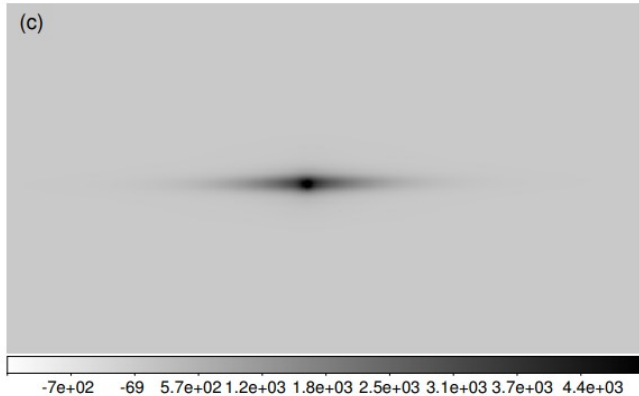
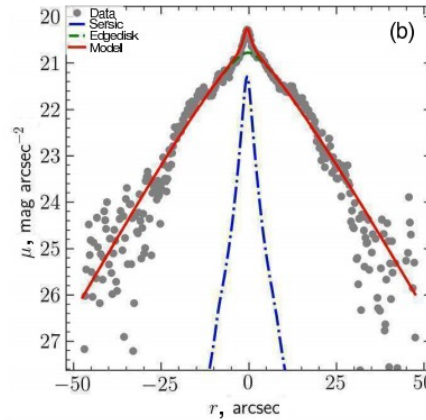
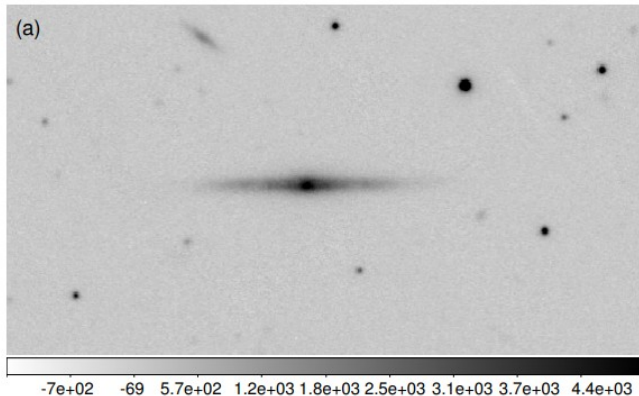
Выборка состоит из 813 тонких галактик и 706 филаментов к которым принадлежат данные галактики.

Глава 1. Поиск корреляции между спином галактики и осью филамента



Распределение плотности вероятности взаимной ориентации спинов галактик и филаментов в трехмерном пространстве. Выборка плоских галактик и филаментов 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).

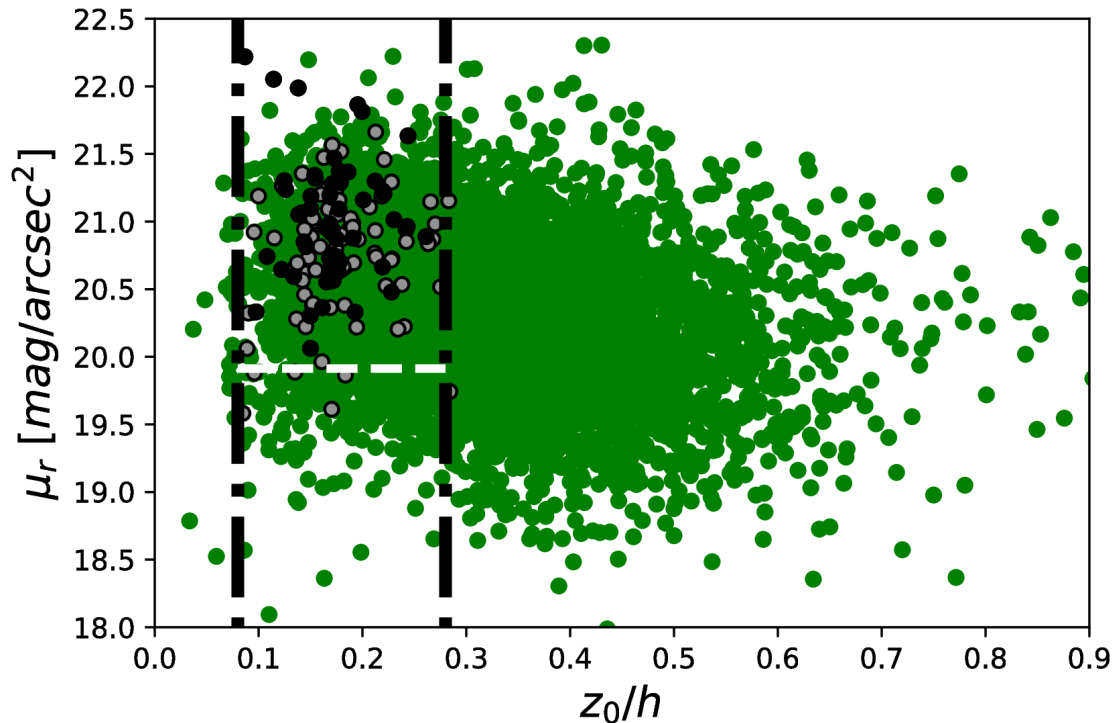
Глава 2. Декомпозиция изображений ультратонких галактик



Декомпозиция галактики RFGC 2714 в фильтре i. (a) прямое изображение галактики. (b) фотометрический разрез галактики вдоль большой оси в фильтре и аппроксимирующие его модели. Зеленой пунктирной линией показан экспоненциальный диск, синей штрихпунктирной линией — балдж, описываемый законом Серсика. Красная сплошная линия — суммарная модель. (c) суммарная модель диска и балджа. (d) разностное изображение, полученное вычитанием суммарной модели из изображения галактики.

Фотометрия и декомпозиция проводилась в программном пакете DECA

Глава 2. Декомпозиция изображений ультратонких галактик



Зависимость поверхностной яркости от отношения шкал в фильтре r . Поверхностная яркость не пересчитывалась в положение «плашмя». Зеленые кружки — данные, взятые из каталога EGIS, серые кружки — галактики нашей выборки без центрального компонента, черные кружки — галактики нашей выборки с центральным компонентом.

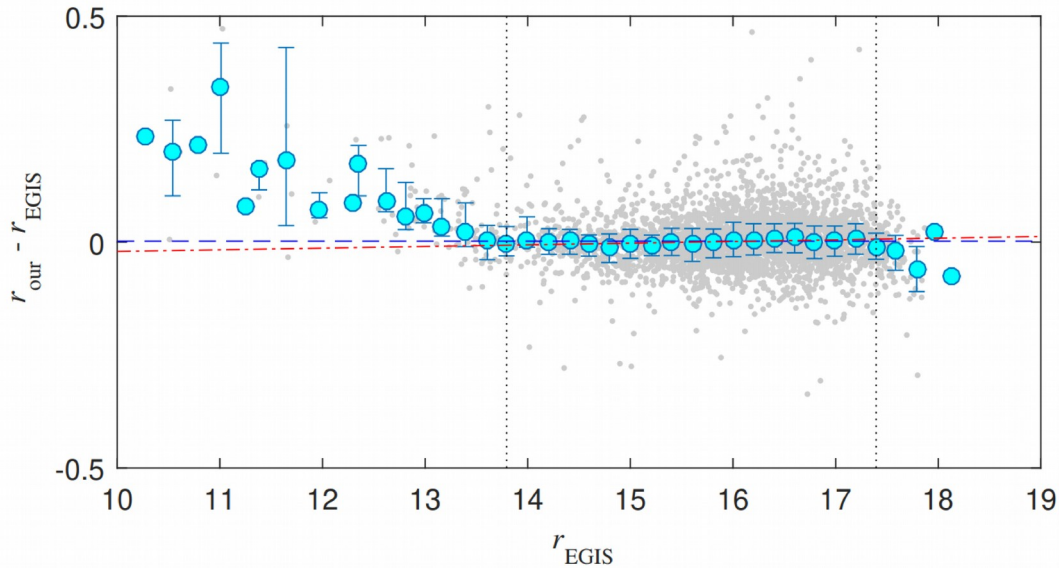
Среднее арифметическое значение отношения шкал Sc галактик 0.236 ± 0.004 , Sd галактик -0.200 ± 0.004 .

Средняя поверхностная яркость галактик ($0.08 < z_0/h < 0.28$) RFGC $20.86 \pm 0.04 \text{ mag arcsec}^{-2}$, EGIS $20.47 \pm 0.01 \text{ mag arcsec}^{-2}$.

Catalog of Edge-on Disk Galaxies from SDSS (EGIS), разработанный по данным SDSS и содержащий 5747 галактик.

Коэффициент Пирсона = -0.25.

Глава 3. Статистика каталога галактик The Edge-on Galaxies in the Pan-STARRS1 survey (EGIPS)

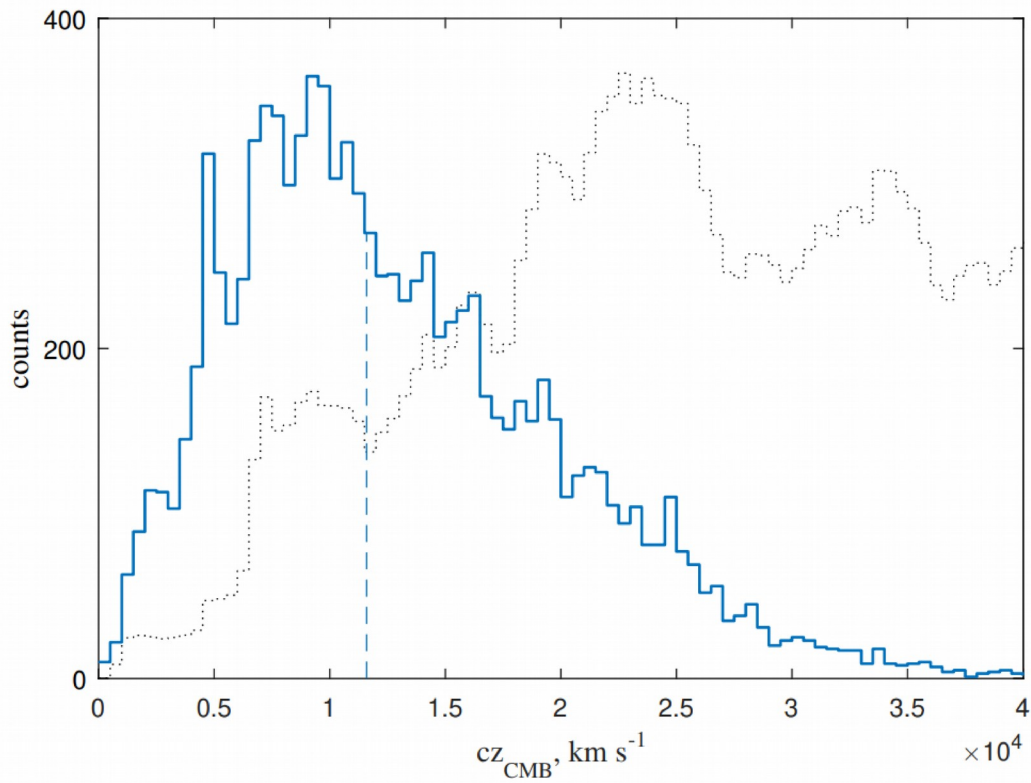


band	range EGIS	%	median	σ	slope
g	14.8 - 18.0	91	-0.032	0.067	$+0.0106 \pm 0.0018$
r	13.8 - 17.4	93	+0.0022	0.048	$+0.0037 \pm 0.0012$
i	13.2 - 17.2	96	+0.025	0.044	-0.0016 ± 0.0010

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

Серыми точками показана разница между звездными величинами из каталога EGIPS и EGIS в полосе r . Большими голубыми точками показаны локальные медианные значения по данным в диапазоне 0.2 звездной величины. 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 вертикальной пунктирных линий.

Глава 3. Статистика каталога галактик The Edge-on Galaxies in the Pan-STARRS1 survey (EGIPS)



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

Глава 3. Статистика каталога галактик The Edge-on Galaxies in the Pan-STARRS1 survey (EGIPS)

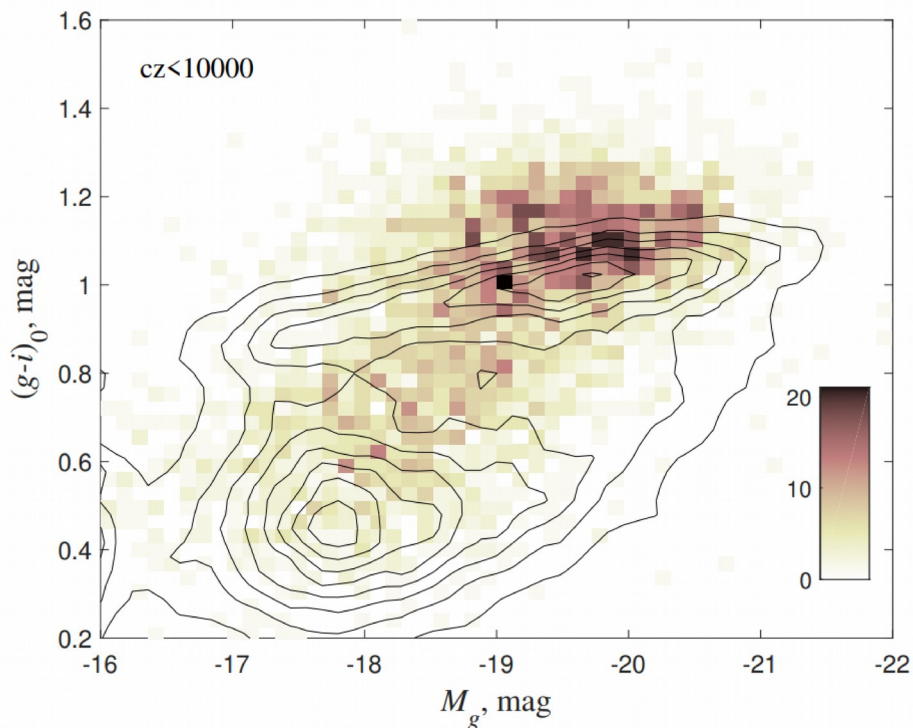


Диаграмма цвет-величина галактики. Распределение плотности галактик EGIPS показано коричневым цветом. Сплошные изолинии иллюстрируют распределение общей выборки близких галактик, взятой из обзора SDSS и преобразованной в фотометрическую систему Pan-STARRS. Все звездные величины были скорректированы с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

Согласно Masters et al. 2014 разница в цвете между ориентацией «пламя» и «с ребра» составляет $(g - i) = 0.28 \text{ mag}$ для «чистого диска» и $(g - i) = 0.20 \text{ mag}$ для «очень больших» галактик.

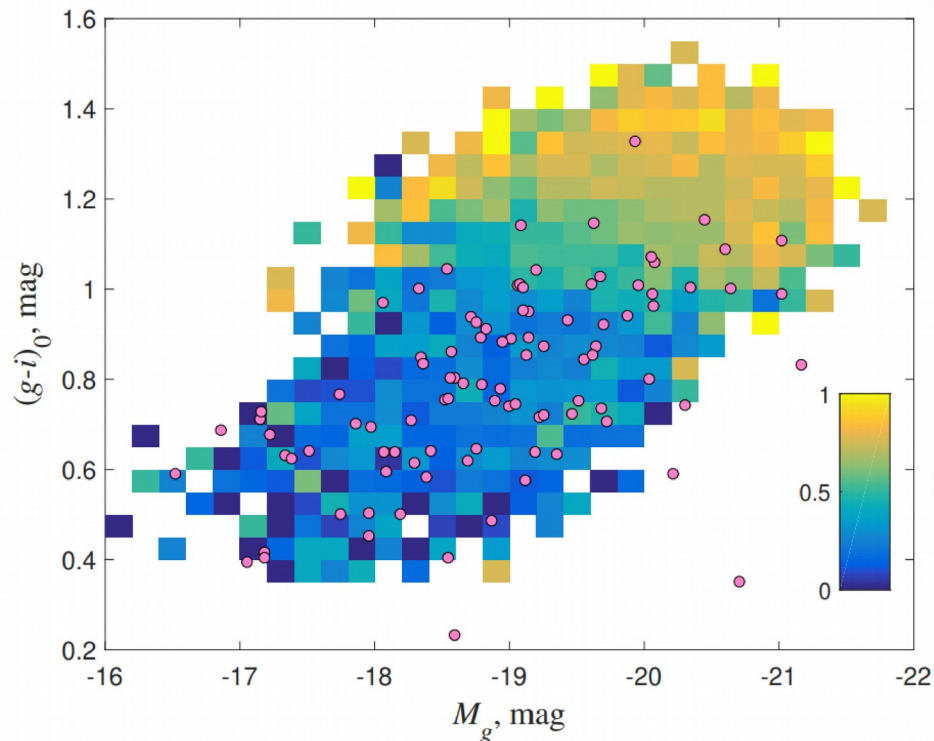
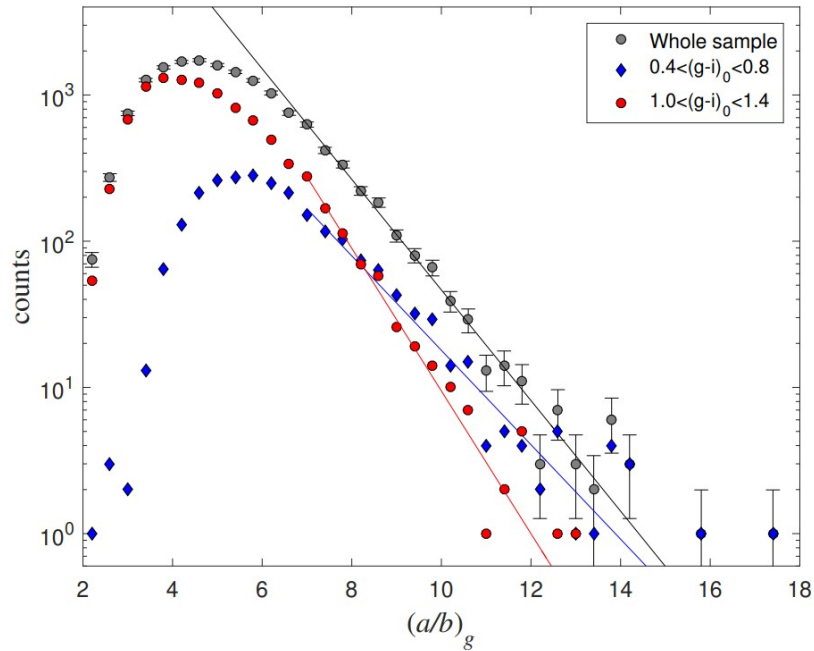
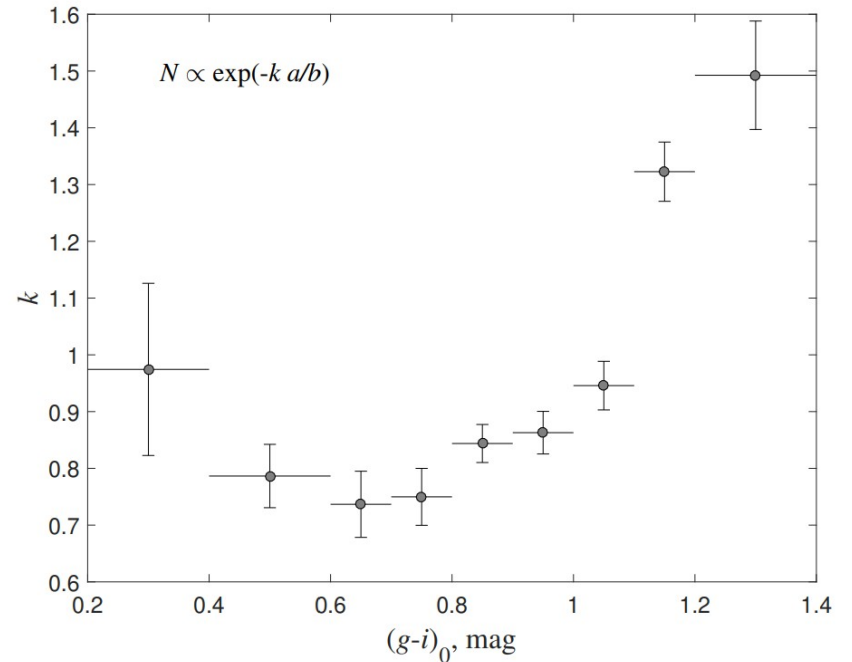


Диаграмма цвет-звездная величина галактик (a/b) $g < 5$. Отношение осей показано цветовым градиентом в соответствии с легендой. Показаны только бины с более чем 3 галактиками. Розовые точки представляют собой распределение сверхтонких галактик, $(a/b) g > 10$.

Глава 3. Статистика каталога галактик The Edge-on Galaxies in the Pan-STARRS1 survey (EGIPS)



Распределение галактик EGIPS по соотношению осей в полосе g. Подвыборки сформированы по показателю цвета $(g - i)$, и показаны разными символами и цветами.



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

Глава 4. База данных для изучения галактик с ребра



The Catalog of Edge-on Disk Galaxies from SDSS (EGIS)

[HH MM SS[.SS]] [+]-[DD MM SS[.S]] [R=D[,D]]

[Examples](#)

Notice: Undefined index: cone in /var/www/html/edgeon/_search_form.php on line 66

The catalog of true edge-on disk galaxies (Bizyaev et al., 2014) is automatically selected from the Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey (SDSS). It contains 5747 genuine edge-on galaxies after visual inspection of the g, r, i images of 14983 candidates. The initial sample were obtained with a criterion: $\text{pet} > 0.7 \text{ mag}$, $g > 20$ & $150 \text{ g} > 37.8$ & $150 \text{ g} / 150 \text{ g} > 3$ & $-0.5 < \text{dered}_g - \text{dered}_r < 2$ & $-0.5 < \text{dered}_r - \text{dered}_i < 2$. The visual inspection allows to split the initial sample on: true edge-on galaxies (4768), non-edge-ons (8350) and objects with a complex structure (1865). Since the initial automatic selection of the galaxy candidates did not include a significant number of the largest edge-on galaxies, the final version of EGIS catalog incorporates edge-on candidates by supplying objects from RFGC, RC3, EFIGI, and Galaxy Zoo that were found in the SDSS footprints.

Warning: include(catalogs/EGIS/_description_): failed to open stream: No such file or directory in /var/www/html/edgeon/catalogs.php on line 20

Warning: include(): Failed opening 'catalogs/EGIS/_description_' for inclusion (include_path='.:/usr/share/pear:/usr/share/php') in /var/www/html/edgeon/catalogs.php on line 20

Warning: pg_num_rows() expects parameter 1 to be resource, null given in /var/www/html/edgeon/catalogs/EGIS/_list_.php on line 26



Disk galaxies seen at high angles to the line of sight, the so-called edge-on galaxies, are the only extragalactic objects where it is possible to study the vertical distribution of its three-dimensional distribution of matter in galaxies. The vertical structure of galactic disks and the vertical velocity dispersion are determined by the gravitational potential, the thinner the disk. The thickness of a self-gravitating collisionless disk is determined by the dynamic heating caused by warping instabilities. In addition, interaction with massive galactic halo stabilizes the stellar disk and leads to the existence of very flat systems. The thickness of the disk reflects the relative contribution of the dark matter halo.

Very thin disk galaxies are an ideal laboratory for studying the formation and evolution of galactic disks. Many authors note (Karachentsev 1989, Kautsch 2009, Shao et al. 2015, Bizyaev et al. 2017) that bulgeless galaxies are located outside the high density regions. An obvious explanation is the lack of tidal perturbations of isolated disks from close neighbors. Kormendy in a book "Secular Evolution in Disk Galaxies" stresses that the significant number of massive galaxies without bulges represents a big problem for modern theories of galaxy formation, since numerous minor merger events lead to the growth of galaxy bulges. Stellar disks with extremely low velocity dispersion make an even bigger problem (Bizyaev et al. 2017). Sachdeva et al. (2015) compared the properties of disk galaxies at redshift $z \sim 0.9$ from the GOODS survey observed with HST with similar galaxies from the SDSS survey. They found that the stellar mass of galaxies increased more than twice over the last 8 billion years. A significant increase in the mass and size of galaxies shows that the accretion of external matter is the dominant mode of growth for galaxies. The evolution of galaxy size is faster in denser regions, and classical bulges are formed mostly due to minor merging. At the same time, the existence of superthin stellar disks points to alternative ways of galaxy formation in the least dense regions of the Universe. The role of the cosmological evolution in the galaxy formation and evolution is an understudied problem in modern astrophysics.

Late-type galaxies without bulges consisting of a simple disk are ubiquitous in the local Universe. It is believed that they have not experienced recent major mergers. At the same time, signs of interactions are visible in the pure disk galaxies. For example, many disks have warps (Reshetnikov & Combes 1998). Multiple minor mergers are typical for nearby low-mass galaxies (Boutanaud et al. 2002). The disturbances should heat thin disks (Kazantsev et al. 2008) and lead to the growth of bulges (Naab & Burkert 2003). The hierarchical clustering predicts that only a small number of simple disks should survive the evolution in the Universe. Internal secular evolution also plays an important role in transformations of galaxy disks. For example, the bar instability leads to a redistribution of matter in the disk and to the formation of a pseudobulge (Kormendy & Kennicutt 2004). This makes thin and ultra-thin disks an ideal laboratory for the comparison between the theory and observations, and for studying mechanisms of secular evolution.

In framework of the study of edge-on galaxies, this database combines photometric and spectral observations of edge-on galaxies, as well as literature data. The data on kinematics, multicolor photometry, star formation, and gas content allow us to obtain the structural and evolutionary parameters of the disks of galaxies.



Notice: Undefined index: cat in /var/www/html/edgeon/catalogs.php on line 43

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

The catalog contains 16551 nearby edge-on galaxies over 3/4 of the sky ($\delta \geq -30^\circ$) in the Pan-STARRS DR2. The candidates for the EGIPS catalogue were found by an Artificial Neural Network. The visual inspection allowed us to reject image artifacts and to estimate the proximity of the galaxies to the edge-on orientation.

The Revised Flat Galaxy Catalogue (RFGC)

Created in 1999, the catalog (Karachentsev et al., 1999) contains 4236 thin edge-on spiral galaxies with a blue diameter greater than $a = 40$ arcsec and a blue major-to-minor axis ratio $a/b \geq 7$ over the whole sky. Additionally, for the sake of continuity, the catalog includes 208 objects from the previous versions, which ceased to meet the selection criterion after the specification of their parameters. RFGC is a revised and combined version of The Flat Galaxy Catalogue (FGC, Karachentsev et al., 1994) and its southern extension (FGCE). The FGC objects ($N=2573$) were found during systematic visual inspection of all O-prints of the Palomar Observatory Sky Survey ($-20^\circ \leq \delta \leq +90^\circ$), while FGCE objects ($N=1882$) were selected on the J-films of the ESO/SERC sky survey. The 291 galaxies from FGC and FGCE were excluded from the final version of RFGC due to the violation of the $a/b \geq 7$ criterion.

The Catalog of Edge-on Disk Galaxies from SDSS (EGIS)

The catalog of true edge-on disk galaxies (Bizyaev et al., 2014) is automatically selected from the Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey (SDSS). It contains 5747 genuine edge-on galaxies after visual inspection of the g, r, i images of 14983 candidates. The initial sample were obtained with a criterion: $\text{pet} > 0.7 \text{ mag}$, $g > 20$ & $150 \text{ g} > 37.8$ & $150 \text{ g} / 150 \text{ g} > 3$ & $-0.5 < \text{dered}_g - \text{dered}_r < 2$ & $-0.5 < \text{dered}_r - \text{dered}_i < 2$. The visual inspection allows to split the initial sample on: true edge-on galaxies (4768), non-edge-ons (8350) and objects with a complex structure (1865). Since the initial automatic selection of the galaxy candidates did not include a significant number of the largest edge-on galaxies, the final version of EGIS catalog incorporates edge-on candidates by supplying objects from RFGC, RC3, EFIGI, and Galaxy Zoo that were found in the SDSS footprints.

The 2MASS-selected Flat Galaxy Catalog

The all-sky catalog (Mitronova et al., 2004) of 18020 disc-like galaxies is selected from the Extended Source Catalog of the Two Micron All-Sky Survey (XSC 2MASS) using a criterion on the 2MASS axial ratio $a/b \geq 3$.

База данных работает под управлением объектно-реляционной системы управления базами данных PostgreSQL. Основу составляют каталоги:

- Revised Flat Galaxy Catalogue (RFGC), который основан на Паломарском обзоре неба и включает информацию о 4236 тонких галактиках;
- Catalog of Edge-on Disk Galaxies from SDSS (EGIS), разработанный по данным SDSS и содержащий 5747 галактик;
- 2MASS-selected Flat Galaxy Catalog (2MFGC) составленный по инфракрасному обзору неба 2MASS, содержит 18 020 галактики;
- The Edge-on Galaxies in the Pan-STARRS survey (EGIPS) разработанный по данным Pan-STARRS и включающий 16 551 галактики.

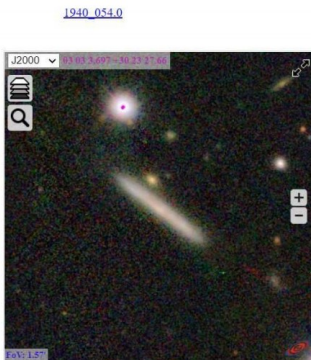
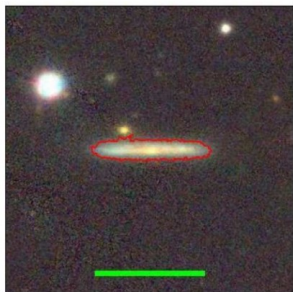
Глава 4. База данных для изучения галактик с ребра

The Edge-on Galaxy Database

Main [Projects](#) [Catalogs](#) [About](#)

Classification of edge-on candidates in PS1. Stage 2

test: classified 0 of 16973, retired 0



- Edge-on ($85 < i$). Good
- Nearly Edge-on ($80 < i < 85$). Acceptable
- NOT Edge-on. Unsuitable
- NOT a galaxy at all. Wrong
- Hard to estimate. Difficult

Dust line

- S-shape
- U-shape
- L-shape
- No warp

- Dominant bulge
- Prominent bulge
- Weak bulge
- Simple disk

Redo the photometry

Submit

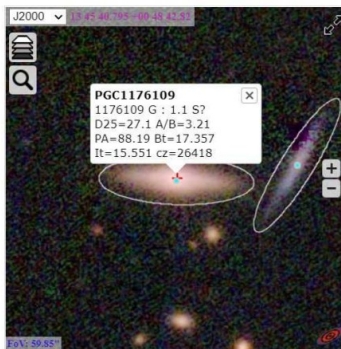
Пример страницы сервиса для визуальной идентификации объектов. Дается ссылка на страницу объекта (1374_018.0) и его координаты в градусной мере. С помощью программы Aladin Lite показываются окрестности объекта на небе.

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.

The Edge-on Galaxy Database

Main [Projects](#) [Catalogs](#) [About](#)

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
0.32	1176109	PGC1176109	G	1.1	S?	27.1	3.21 88.19	17.357	15.551	26418		Leda
0.21.15	3300680	PGC3300680	G			27.3	4.76 148.06	18.853		18.025	9473	Leda

Основные положения, выносимые на защиту

- Разработаны структура и интерфейс базы данных для изучения галактик, видимых с ребра. На ее основе подготовлен каталог галактик, видимых с ребра, в обзоре Pan-STARRS; выполнена визуальная классификация; отождествление объектов с другими каталогами и базами данных. Показано, что каталог полон на уровне 96% для галактик с характерной шкалой $a_r > 5.5$ arcsec. Обнаружено, что SExtractor фотометрия галактик каталога, выполненная по изображениям обзора Pan-STARRS, обеспечивает надежные результаты в диапазоне $13.8 < r < 17.4$ с точностью 0.048 mag. Медианное красное смещение каталога равно $cz = 11600$ km/s в системе отсчета микроволнового фона.
- Обнаружено, что "красная последовательность" населена толстыми галактиками с $(a/b)_g < 5$. В "голубом облаке" преобладают тонкие галактики. Супертонкие галактики следует общему распределению объектов в "голубом облаке". Галактики, видимые с ребра, оказываются систематически краснее, $(g-r)=0.1$ mag, общей популяции галактик, видимых под произвольными углами. Данный эффект связан со внутренним поглощением в галактиках. Обнаружено, что более тонкие галактики в среднем оказываются более голубыми. Скорость падения функции распределения галактик по видимому сжатию уменьшается от красных галактик к синим, но для наиболее голубых объектов начинает расти.
- Измерены фотометрические параметры балджа и диска для 150 сверхтонких галактик с $a/b > 10$ из каталога RFGC по анализу изображений из обзора Pan-STARRS. Значимой корреляции между поверхностной яркостью галактик и отношением вертикальной и радиальной шкал обнаружено не было. Показано, что Sd-галактики имеют более низкую поверхностную яркость и в среднем являются более тонкими, по сравнению с Sc-галактиками.
- Выявлено отсутствие значимой корреляции направления оси вращения галактик по отношению к филаментам крупномасштабной структуры Вселенной. Заметна только слабая тенденция на уровне 2σ . Наибольший эффект, на уровне 2.4σ , наблюдаются для наиболее близких и сверхтонких галактик ($z < 0.03$, $a/b > 10$).

Научная новизна

- Создана база данных для изучения галактик, видимых с ребра, объединяющая сведения из трех опубликованных каталогов (Revised Flat Galaxy Catalogue, Catalog of Edge-on Disk Galaxies from SDSS, 2MASS-selected Flat Galaxy Catalog) и одного нового (The Edge-on Galaxies in the Pan-STARRS1 survey).
- Проведен статистический анализ данных нового каталога галактик, видимых с ребра. Показано, что имеется связь между показателем цвета и отношением осей, показано, что распределение сверхтонких галактики по показателю цвета не отличается от прочих галактик.
- Получены более жесткие ограничения ($2.4\text{-}\sigma$) на соосность спинов галактик и осей филаментов чем достигнуто в предыдущих работах.
- Проведена фотометрия и декомпозиция с использованием однокомпонентной и двухкомпонентной моделей (учитывающих только дисковую составляющую, либо одновременно вклады диска и псевдобалджа) для ~ 150 сверхтонких галактик ($a/b > 10$).

Апробация работы

Результаты докладывались на следующих российских и международных конференциях:

- ♦ «International astronomical union General Assembly — 2018», Австрия, Вена, 20-31.08.2018
- ♦ «European Week of Astronomy and Space Science — 2019», Франция, Лион, 23-27.06.2019.
- ♦ «Diversity of the Local Universe», Россия, Нижний Архыз, 30.09 - 04.10.2019;
- ♦ «European Astronomical Society Annual Meeting — 2020», Нидерланды, Лейден, 29.06 — 03.07.2020;
- ♦ «Всероссийская астрономическая конференция — 2021, Астрономия в эпоху многоканальных исследований», Россия, Москва, 23 - 28.08.2021

Список публикаций

- ♦ Antipova A.V., Mosenkov A.V., Makarov D.I., Reshetnikov V.P. «Decomposition of Images of Ultra-Flat Galaxies», *Astrophysical Bulletin*, 2021, 76, 4, 358-366
- ♦ 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*, 2021, 76, 3, 248-254
- ♦ Makarov D.I., Antipova A.V. «Database for Studying Edge-on Galaxies» , *Astrophysical Bulletin*, 2021, 76, 2, 218-227
- ♦ 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)», 2022, *mnras*, 511, 2

Личный вклад автора

Определена ориентации спинов ультратонких галактик относительно осей филаментов крупномасштабной структуры Вселенной.

Проведена фотометрия и декомпозиция ~ 150 ультратонких галактик в 5 фильтрах (g, r, i, z, y) по данным Pan-STARRS, проведен анализ полученных данных.

Выполнен статистический анализ для каталога «The Edge-on Galaxies in the Pan-STARRS survey», построены диаграммы «цвет-величина», выявлены зависимости между различными параметрами галактик, выполнен их анализ.

Внесен равноценный с соавторами вклад в разработку и создания структуры и интерфейса базы данных "The Edge-on Galaxy Database".

Обсуждение результатов и написание статей осуществлялось наравне с соавторами.

Спасибо за внимание