

Санкт–Петербургский государственный университет

Скрябина Мария Николаевна

Выпускная квалификационная работа

*Видимые с ребра галактики в глубокой полосе SDSS
Stripe82*

Уровень образования: специалитет

Специальность: 03.05.01 «Астрономия»

Специалитет СМ.5012.2016 «Астрономия»

Профиль: «Наблюдательная астрофизика»

Научный руководитель:

к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник

Савченко С.С.

Кафедра астрофизики

Рецензент:

к.ф.-м.н., старший научный сотрудник

Мосенков А. В.

ГАО РАН

Санкт-Петербург

2022 г.

SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY

Skriabina Mariia

Graduation Thesis

Edge-on galaxies in the deep SDSS Stripe82

The educational level: Specialty

The educational program: 03.05.01 «Astronomy»

Specialization: «Observational astrophysics»

Scientific supervisor:

Savchenko Sergey

Reviewer:

Mosenkov Alexandr

Saint-Petersburg

2022

Содержание

Введение	3
Глава 1. Основные этапы работы	4
Глава 2. Выборка	6
Глава 3. Полнота выборки	7
Глава 4. Данные и их обработка	7
Глава 5. Классификация структур низкой поверхностной яркости	10
Глава 6. Статистика проклассифицированных структур	17
Глава 7. Фотометрическая декомпозиция	19
Глава 8. Результаты декомпозиции	24
Глава 9. Заключение	36

Введение

За последние десятилетия огромную роль в изучении Вселенной стали играть исследования, основанные на глубоких и очень глубоких изображениях космических объектов. Связано это с техническим прогрессом и появлением телескопов, способных различить структуры, поверхностная яркость которых достигает 30 mag/arcsec^2 . Возникновение такого большого количества наблюдательных данных создает огромный простор для новых исследований объектов, которые ранее были нам недоступны для наблюдений.

В частности, одна наиболее интересная для изучения область неба, это полоса Sloan Digital Sky Survey (SDSS) Stripe 82 – полоса шириной 2.5 градуса вдоль небесного экватора с координатами $-50^\circ < \text{R.A.} < 60^\circ$, $-1.25^\circ < \text{Dec} < 1.25^\circ$ и с общей площадью 275 квадратных градусов во всех пяти фильтрах SDSS. Преимущества данной полосы заключаются в ее расположении: в первую очередь, полоса Stripe 82 доступна для большинства наземных телескопов, что позволяет производить вспомогательные спектроскопические и фотометрические наблюдения. Во-вторых, эта полоса охватывает области от очень низкого, до высокого галактического поглощения, что может быть полезно для анализа рассеяния излучения пыли нашей Галактики. Конкретно для нашего исследования полоса Stripe 82 имеет преимущества в том, что в течение нескольких десятков лет в данной области были получены изображения неба порядка 80 раз во всех пяти SDSS фильтрах $ugriz$, в результате чего, мы имеем дело с кадрами, глубина которых отличается на 2 mag/arcsec^2 и более (для сравнения стандартные кадры SDSS достигают глубины $26.5 \text{ mag/arcsec}^2$ в фильтре r , тогда как средний предел по глубине изображений, загруженных из базы данных Stripe 82 в том же диапазоне, составляет $28.6 \text{ mag/arcsec}^2$).¹

Глубина изображений в SDSS полосе Stripe 82 позволяет нам исследовать структуры низкой поверхностной галактик. Имея две выборки галактик с наблюдаемыми и отсутствующими приливными структурами мы можем сравнить средние толщины звездных дисков для обеих выборок (например, в работе [14] отношение радиального и вертикального масштабов h_r/z_0 примерно

¹<http://research.iac.es/proyecto/stripe82/>

в 1.5-2 раза больше для галактик с приливными структурами, что можно объяснить большими дисперсиями скоростей звезд в вертикальном направлении у галактик, подверженных слиянию с другими объектами). Данная зависимость еще не является хорошо исследованной, поэтому в нашей работы мы попробуем пролить чуть больше света на вышеописанный вопрос.

Проектов, в рамках которых были обработаны изображения SDSS полосы Stripe 82 достаточно много. Один из них – IAC Stripe 82 Legacy Project². Основная цель проекта IAC Stripe 82 Legacy заключается в сохранении структур низкой поверхностной яркости во всех пространственных масштабах и масштабах интенсивности, используя неагрессивный метод вычитания фона неба. В нашей работе мы используем данные из IAC Stripe 82 Legacy Project, чтобы создать каталог галактик с ребра (далее ES82 – Edge-on galaxies in sdss Stripe 82) в полосе Stripe 82, с возможностью последующего исследования глубоких изображений этих объектов, выявления структур низкой поверхностной яркости (LSB – Low Surface Brightness), таких как полярные кольца, арки, хвосты и т.д., свидетельствующие о возможном взаимодействии галактик с их окружением, анализа параметров вертикальной и радиальной структуры звездных дисков спиральных галактик на основе данных о поверхностной фотометрии галактик, что может дать ответы на многие вопросы, связанные с образованием и эволюцией этих объектов.

Глава 1. Основные этапы работы

В процессе работы были выделены следующие этапы ее выполнения:

1. Отбор потенциальных галактик видимых с ребра, используя каталог объектов, полученный при помощи SExtractor в работе Fliri J., Trujillo I [7]. в рамках проекта IAC Stripe 82 Legacy Project, а также каталогов EGIS [3] и Galaxy Zoo [8] (критерии отбора: угловой размер галактики, диаметр 25 изофоты, не менее 30 arcsec, сжатие галактики $\frac{b}{a}$ менее 0.3).
2. Проведение визуального отбора и усовершенствование выборки.

²<http://research.iac.es/proyecto/stripe82/>

3. Обработка изображений галактик в фильтрах g , r , i , $rdeep$ (разворот, обрезка).
4. Создание цветных RGB изображений.
5. Совершенствование выборки на основании полученных RGB изображений.
6. Переопределение размеров галактик для более точной обрезки изображений (выполнено при помощи SAOImageDS9).
7. Создание масок (для изображений в фильтрах $rdeep$, r)³, которые будут использоваться для создания суммарных изображений и фотометрической декомпозиции.
8. Создание суммарных изображений.
9. Отбор галактик, обладающих структурами низкой поверхностной яркости (хвосты, арки, мосты, полярные кольца, диффузные оболочки и др.) на основании контрастных, цветных RGB изображений, изображений из обзора Legacy[5], HSC-SSP (Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program)[1].
10. Классификация объектов по различным структурам низкой поверхностной яркости.
11. Приведение статистики проклассифицированных структур.
12. Выполнение одномерной фотометрической декомпозиции с целью определения нулевого приближения модельных параметров галактик и использования их в последующем этапе – двумерной фотометрической декомпозиции.
13. Выполнение двумерной фотометрической декомпозиции.
14. Анализ ее результатов.

³Изображения-маски имеют размер как у изображения с исследуемой галактикой, но на нем помечены лишние объекты, которые попали на изображение. В процессе создания суммарных изображений или фотометрической декомпозиции не должны участвовать пиксели, которые заведомо фоном неба не являются, их следует замаскировать.

Глава 2. Выборка

После первичного отбора галактик с ребра выборка включала 1167 объектов из каталога Fliri J., Trujillo I. [7], полученного в рамках проекта IAC Stripe 82 Legacy Project при помощи Sourse Extractor (сокращенно: Sextractor), а также каталогов EGIS[2] и Galaxy Zoo [8]. Работа программы Sextractor сводится к тому, что на подаваемом на вход изображении в фитс-формате (fits) находятся объекты и вычисляются некоторые их параметры, такие как размер, видимая звездная величина, эллиптичность, позиционный угол и пр. Для отбора объектов в каталог использовались следующие параметры Sextractor: A_IMAGE , B_IMAGE – большая и малая полуоси галактики, $KRON_RADIUS$ – радиус Крона. Критерии для отбора галактик в каталог:

- Угловой размер галактики (радиус 25 изофоты r_{25} – радиус изофоты на котором угловая поверхностная яркость галактики достигает $25mag/arcsec^2$) не менее 15 arcsec. Данный параметр нам изначально не известен, но с помощью базы данных LEDA⁴ мы можем узнать размер r_{25} для некоторых галактик из выборки и найти коэффициенты взаимосвязи радиуса Крона $KRON_RADIUS$, известного параметра и r_{25} , тем самым усовершенствовав выборку объектов.
- Сжатие галактики (B_IMAGE/A_IMAGE) менее 0.3

После были скачаны jpg изображения для полученного списка галактик и проведен визуальный отбор, в результате которого были удалены из выборки галактики, явно не относящиеся к галактикам, видимым с ребра: галактики, находящиеся под углом наклона менее 80-85 градусов (те, у которых видна плоскость диска, возможные спирали. В случае галактики, видимой точно с ребра, ветви не должны быть видны, в то время как даже при небольшом наклоне они могут стать видимыми), другие объекты. Также проведенный визуальный анализ цветных RGB изображений позволил сузить список изучаемых объектов до 831 (важно отметить, что в данной выборке не все галактики являются галактиками с ребра, часть объектов, не смотря на угол наклона <

⁴<http://leda.univ-lyon1.fr/>

85°, оставлены по причине наличия интересных структурных особенностей). Каталог, который включает только галактики с ребра состоит из 710 объектов.

В процессе работы были вручную переопределены размеры и позиционные углы у 40% галактик, так как их изначальные значения были далеки от реальности. Визуальный анализ цветных и контрастных изображений позволил сделать выводы о небольшом количестве галактик в полосе Stripe 82, обладающих структурами низкой поверхностной яркости (подробнее в разделе "Статистика проклассифицированных структур").

Глава 3. Полнота выборки

С целью оценить полноту каталога нами был выполнен V/V_m тест, описанный в работе [16]. Мы расчитали для каждой галактики объем сферы V с радиусом, равным расстоянию до объекта D, выражаясь следующим образом: $D = d/\theta$, где d – линейный диаметр галактики, θ – угловой. Также был посчитан объем сферы V_m , радиус которой, это максимальное расстояние D_m , на котором должна находиться галактика и всё еще принадлежать нашей выборке объектов. С учетом того, что $D_m = d/\theta_L$, данное расстояние будет соответствовать объекту выборки с наименьшим угловым размером, в нашем случае $\theta_L = 6.38 \text{ arcsec}$ (за значение углового размера мы берем значение большой полуоси галактики SMA). Отношение объемов $V/V_m = (\theta_L/\theta)^3$. Среднее значение отношения этих объемов, которое мы будем обозначать как $\langle V/V_m \rangle$ должно равняться 0.5 для объектов равномерно распределенных в Евклидовом пространстве в случае, если выборка полная.

Вычисляя это значение для каталога объектов, последовательно исключая объекты с маленькими угловыми размерами мы приходим к тому, что для $SMA > 18 \text{ arcsec}$ (55% выборки) наша выборка, по существу, полна: в фильтре $r \langle V/V_m \rangle = 0.489$.

Глава 4. Данные и их обработка

Работа производилась со "sky rectified" изображениями (с уже вычтенным фоном неба), полученными в рамках IAC Stripe 82 Legacy Project. Использу-

зуемые фильтры: gri (этап с созданием цветных RGB изображений, фотометрическая декомпозиция), rdeep (этапы с созданием масок, суммарных изображений). В процессе выполнения работы были написаны python-скрипты для маскирования, отбора, классификации галактик, скачивания данных, склейки полей. Для обработки изображений (центрирование на объект, разворот галактики, обрезка изображения, создание rgb изображений, создание суммарных изображений) был использован полуавтоматический пакет для обработки и анализа изображений IMage ANalysis (IMAN)⁵ и дополнительные python-скрипты.

С учетом того, что использовались sky rectified изображения, вычет фона неба не производился. Порядок действий по обработке изображений, проводимый в процессе данной работы выглядит следующим образом:

1. *Загрузка данных.* Из IAC Stripe 82 Legacy Project были загружены поля в фильтрах r,g,b,rdeep, файлы с psf изображением⁶, weight-изображения⁷
2. *Первичная обрезка изображения* в фильтрах g,r,i,rdeep с центрирование на объект. Зная координаты центра галактики мы можем вырезать из скачанного поля квадрат, достаточно большой, чтобы не потерять в процессе дальнейшей обработки структуры низкой поверхностной яркости и части галактики (квадрат со стороной ≈ 10 размеров большой полуоси галактики). Данный этап позволяет быстрее выполнить последующие этапы обработки, например, разворот изображение вокруг центра галактики.
3. *Разворот галактики*, чтобы та располагалась горизонтально на изображении. На данном этапе используем известные нам значения позиционных углов. В процессе выполнения работы было обнаружено, что примерно для 40 % выборки изначальные значения РА, определенные при

⁵https://bitbucket.org/mosenkov/iman_new/src/master/

⁶psf (point spread function) – изображения, описывающие картину, получаемую системой формирования изображения при наблюдении точечного источника или точечного объекта.

⁷weight - изображения, это така называемые карты весов. Имеют тот же размер, что и соответствующее ему изображение с исследуемой галактикой. Только если в обычном fits-изображении с галактикой каждому пикслю соответствует его значение интенсивности, то в случае weight-файла, каждому пикслю соответствует его "вес". Этот "вес" вычисляется как $w_i = 1/\sigma_i^2$. i

промощи SExtractor, являются неточными. Поэтому для данной категории объектов углы были переопределены методом вписывания эллипса, описывающего внешние изофоты галактики, в программе SAOImage DS9 [9]. Новые значения позиционных углов были внесены в таблицу и использованы при повторном развороте изображений и анализе параметров объектов выборки.

4. *Конечная обрезка изображений.* Размер полученного поля составляет 6 размеров больших полуосей галактик.
5. *Загрузка соседних полей* в случае, когда галактика находится на границе полей. Склейка осуществлялась при помощи программы SWarp. После осуществлялся повтор предыдущих шагов (обрезка, разворот). Все этапы с центрированием, обрезкой и разворотом производились также с weight-файлами, чтобы в результате каждому пикслю на изображении с галактикой соответствовал его вес в weight-файле.
6. *Создание масок.* Для данного этапа была создана программа, написанная на языке программирования python. Основной пакет, используемый в скрипте, это пакет photutils. Он позволяет выделить на изображении некоторые сегменты, отличающиеся друг от друга по яркости. Каждому сегменту на сегментационной карте соответствует определенный индекс. В случае, когда сторонний источник находится очень близко к галактике или даже проецируется на нее (то есть перекрывает ее тело), мы можем использовать "деблендинг то есть разделение сегментов на еще меньшие сегменты, чтобы выделить из них относящиеся к галактике, и не относящиеся к ней. Удаляя из сегментационной карты все сегменты, относящиеся к исследуемому объекту, и оставляя сегменты, покрывающие сторонние источники, мы ликвидируем вклад излучения других объектов из анализа. Пример сегментационной карты, изображения, с наложенной маской приведен на рисунке 1.

7. Создание суммарных⁸ изображений, цветных RGB⁹ изображений.
8. *Обрезка и разворот*, выполненные для последующей фотометрической декомпозиции. На этом этапе важно, чтобы тело галактики занимало большую часть изображения, что ускоряет сам процесс декомпозиции и минимизирует возможность соседних объектов влиять на результат. Поэтому итоговый размер прямоугольного изображения составляет 3 соответствующих полуосей галактики для каждой из сторон.

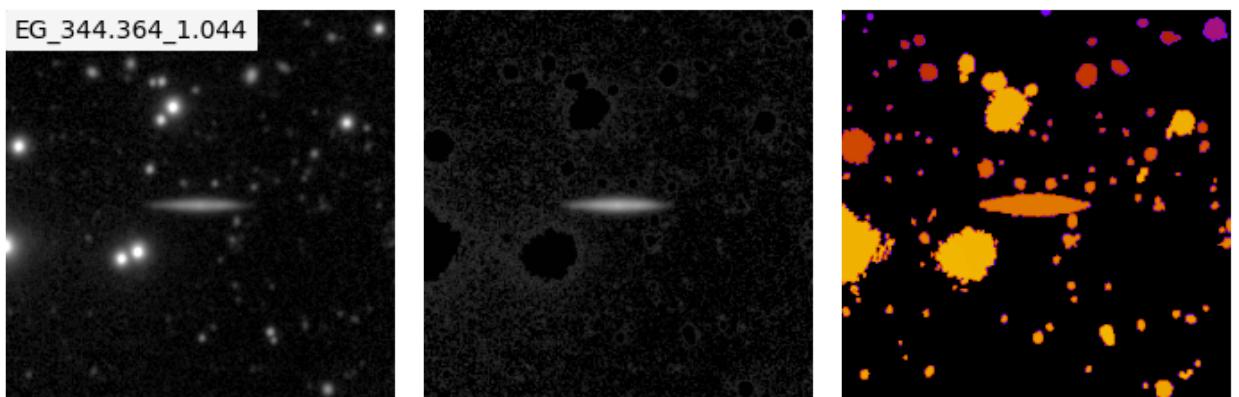


Рис. 1: Левая панель – пример изображения галактики из выборки, центральная панель – изображение той же галактики с наложенной маской, правая панель – сегментационная карта для этой же галактики.

Глава 5. Классификация структур низкой поверхностной яркости

В процессе визуального анализа суммарных и цветных RGB изображений было отобрано 43 галактики, имеющие приливные структуры низкой поверхностной яркости. Для более точного определения структур также использовались изображения из обзоров DESI Legacy Imaging Survey[5], Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program[1]. Наблюдаемые структуры:

1. Приливные хвосты – протяженные структуры, состоящие из звезд и

⁸Суммарное изображение представляет собой сумму изображений в фильтрах r,g,b. Оно является более глубоким и контрастным, позволяющим более чётко видеть структуры низкой поверхностной яркости.

⁹Принцип создания RGB изображения основывается на принципе, в соответствии с которым каждому значению цвета пикселя (например, g-r или r-i) соответствует уникальный цвет на RGB изображении.

газа, часто образующиеся в результате крупных слияний галактик. (Рис. 2)

2. Диффузные оболочки. Под ними подразумеваем слабые протяженные гало вокруг дисков галактик, состоящие из старых звезд. Оболочки также могут являться признаком малых слияний в прошлом.(Рис. 3)
3. Мосты – еще один подвид протяженных вытянутых структур, состоящих из звезд и газа, по сути, представляющие собой перетекание вещества от одного объекта к другому. (Рис. 4)
4. Арки – структуры вокруг галактики, имеющие аркообразную форму.(Рис. 5)
5. Остатки спутников, деформированные в процессе малого слияния. (Рис. 7)

Приливные структуры не ограничиваются списком перечисленных выше. Даные LSB структуры являются наиболее часто встречающимися в рамках нашего исследования (подробнее ознакомиться с темой галактик с приливными структурами можно, например в работе [15]). Параметры галактик, обладающих приливными структурами, приведены в таблице 1.

Таблица 1: Параметры галактик из каталога ES82 обладающих приливными структурами низкой поверхностной яркости: прямое восхождение, склонение, позиционный угол, размер большой полуоси, размер малой полуоси, тип структур в соответствии с классификацией классификации структур, приведенной в одноименной главе (1 - приливные хвосты, 2 - диффузные оболочки, 3 - мосты, 4 - арки, 5 - полярные кольца, 6 - остатки спутников)

N	RA (°)	DEC (°)	PA (°)	SMA (arcsec)	SMB (arcsec)	structures
1	350.832	-0.5	-5.63	13	4	3
2	17.898	0.462	88.29	26.5	6.6	3
3	20.523	0.085	-47.09	44.6	6.1	3
4	21.171	0.081	-50.58	24.1	5.9	3
5	38.657	-0.98	-36.15	43.5	10.5	4
6	2.265	-0.583	-32.2	10	5.3	1

7	2.351	0.538	173.5	12.1	2.5	4
8	4.682	-0.751	-5.1	16.8	7.9	2
9	7.35	0.316	22.6	32	8.1	6
10	13.728	0.434	77.9	13.8	3.6	6
11	14.094	-0.345	4.7	17.5	8.2	2, 4
12	14.463	-0.418	82.4	10	5.2	2
13	15.846	-0.469	-75.9	11.2	5.5	2
14	17.089	0.044	-24.8	10.5	4.5	1
15	19.434	0.254	-64.7	22.3	12.1	2
16	20.13	0.786	-28.7	10.9	4.3	6
17	21.171	0.081	40.4	19.1	3.1	3
18	23.504	-0.537	-73.8	10.3	4.5	4
19	24.765	0.437	-20.7	21.8	7.3	2, 6
20	28.031	-0.126	13.6	8.5	6.2	2
21	29.743	-0.49	-38.9	13.1	4.3	5
22	30.191	-0.908	57.3	27.3	8.7	3
23	31.972	-0.028	-66.6	8.1	4.1	1
24	32.794	-0.517	-52.2	18.2	4.4	1
25	37.653	-0.824	-78.6	10.1	5.4	2
26	37.936	-0.945	-48.6	19.2	9.9	2
27	46.894	-1.049	-21.9	22.8	10.4	2
28	47.102	-0.559	14	34	6.3	6
29	52.605	0.274	-80.4	20.9	10.1	3
30	314.206	-0.238	-5.2	15.8	4.5	1
31	315.137	0.294	16.4	30.3	8.3	4
32	316.508	-0.504	36.9	8.4	3.1	4
33	323.964	-0.278	15.43	11.9	5.7	6
34	325.543	-0.288	50.31	8.2	6.7	2
35	326.58	-0.208	29.5	6.5	6	5
36	336.825	-0.682	-6.3	12.9	4.4	6
37	337.223	0.771	-27.3	16.2	9.1	2
38	340.706	-0.607	-41.6	9.7	5.9	2
39	343.094	1.093	99.9	78.5	46.1	2

40	344.174	0.162	9.2	18.9	5.4	2, 3
41	350.214	-1.011	-31.5	15.2	7.4	1
42	353.011	1.223	13.5	16.7	6.1	6
43	353.902	-0.976	103.3	15.1	4.9	4

Помимо приливных структур, были выделены еще некоторые структурные особенности галактик – 86 объектов, см таблицу 2(подробнее про структурные особенности галактик можно найти, например, в [18], [11]):

1. Толстые коробкоподобные балджи (Рис. 9)
2. Полярные балджи (Рис. 9)
3. Кособокость (lopsidedness – смещение центральной части галактики) (Рис. 10)
4. Изгибы звездного диска (Рис. 8)
5. Полярные кольца – структуры, состоящие из звезд и газа, в большинстве случаев ориентированные перпендикулярно к плоскости звездного диска галактики. (Рис. 6)

Таблица 2: Параметры галактик из каталога ES82 обладающих структурными особенностями: прямое восхождение, склонение, позиционный угол, размер большой полуоси, размер малой полуоси, типы структур в соответствии с классификацией, приведенной в одноименной главе (1 - коробкоподобные балджи, 2 - полярные балджи, 3 - кособокость, 4 - изгиб звездного диска, 5 - спирали).

N	RA (°)	DEC (°)	PA (°)	SMA (arcsec)	SMB (arcsec)	structures
1	331.378	0.077	25.59	34.1	7.4	1,4
2	346.594	-0.822	30.26	18.3	2.9	4
3	347.324	0.064	-55.3	35.1	8.9	2, 4
4	349.019	-0.123	7.99	24	5.9	4
5	350.832	-0.5	-5.63	13	4	4
6	10.652	0.831	-88.01	7.9	2.3	1
7	17.898	0.462	88.29	26.5	6.6	4

8	18.239	-0.345	-73.6	55.4	11.9	4
9	21.171	0.081	-50.58	24.1	5.9	4
10	25.149	0.259	45.96	20.7	5.9	3
11	32.777	-0.655	17.38	24.4	4.8	3, 4
12	37.911	-1.083	84.17	24	6.6	4
13	0.418	1.092	18.6	35.9	9.5	1
14	0.836	-0.527	-8	10	6.1	1
15	1.135	0.909	0.4	12.8	5.1	2
16	1.87	0.902	24	17.9	6.2	3
17	3.013	-1.007	-72.8	12.1	6	2
18	4.917	0.867	-51	18.7	6.1	2
19	5.541	-0.937	70.1	16.8	8.2	1
20	5.583	0.009	172.1	33.9	7.1	4
21	5.724	-0.997	-53	14.8	7.9	1, 3, 4
22	5.982	-1.146	-79.4	12.8	6.7	1
23	6.036	0.379	61.3	15.7	4.3	3
24	7.421	0.563	-71.5	15.3	3.7	4
25	7.628	-0.781	70.6	26.8	7	5
26	8.41	-0.812	-75.7	14.2	5.2	2
27	10.574	0.371	63.16	24.2	7.7	4
28	13.396	0.596	-43.9	16.5	7.3	4
29	13.728	0.434	77.9	13.8	3.6	4
30	14.082	-0.126	165.9	25.5	6.4	4
31	14.789	0.198	26.8	10.4	4.3	1
32	16.599	-0.17	43.1	12.1	8.5	2, 4
33	17.693	0.793	9.7	13.3	4.8	4
34	18.239	-0.345	18.6	38.4	9	4
35	19.468	0.781	3.7	21.9	7.6	4, 5
36	20.482	0.066	-64.1	22.4	5.9	2
37	20.532	0.811	17.3	12	6.1	2
38	21.159	-0.063	-36	37.9	11.8	2
39	22.535	0.565	-5.7	8.9	4.3	2
40	22.977	0.492	15.5	24.5	5.7	4

41	23.504	-0.537	-73.8	10.3	4.5	2
42	23.639	-0.43	40.4	15.8	7.2	2, 4
43	23.752	-0.451	14.7	24.1	7.8	4
44	24.493	-0.889	-67	18.8	5.2	2
45	27.115	0.394	2	10.4	5.8	2, 4
46	27.561	0.062	21.6	12	4.2	4
47	29.228	-1.115	63.1	27.7	13.4	1
48	29.237	1.168	54.4	18.8	4.9	4
49	29.471	-1.167	12.4	11.1	6.5	2
50	30.181	1.019	15.7	19.2	5.2	2, 4
51	30.569	-0.533	64.4	28.3	5.1	4
52	31.245	-0.264	89	22.3	4.7	4
53	31.595	0.907	-9.8	12.9	5.7	2
54	32.676	-0.638	17.4	23.2	8.2	2
55	32.722	-0.921	2.44	25.3	4.2	2, 4
56	33.789	-0.704	-26	24.3	5	2
57	39.177	-0.017	70.1	26.7	7	4
58	41.525	0.564	41.7	22.1	6.6	4
59	42.143	-0.993	-1.5	44.2	14.2	1, 4
60	49.642	-0.362	25.6	22	5.1	4
61	56.608	-0.599	-14.7	25.3	6.8	4
62	313.353	0.652	17.69	53.8	11.4	4
63	314.393	0.341	-84.1	43.6	9.5	4
64	315.137	0.294	16.4	30.3	8.3	4, 5
65	326.305	-0.186	-84.68	17.5	4.6	4
66	319.276	-0.627	76	17.8	4.5	3
67	320.078	-1.093	81.5	18.6	5.1	3
68	328.247	0.567	37.4	16.7	6	3
69	333.752	0.804	51.5	25.7	6.1	3
70	336.167	-0.897	-23.1	14	8.3	2, 4
71	336.384	0.039	-5.7	12.4	5.1	4, 5
72	339.008	-0.56	68.3	18.8	6.3	4
73	341.096	-0.114	-0.1	17.1	4.7	4

74	343.78	-0.891	4.3	12	6.5	2
75	346.764	0.35	-1.6	20.7	5.2	4
76	347.624	0.273	84.5	11	4.5	4
77	348.063	-0.064	-35.5	14	3.9	1
78	350.532	0.402	40.7	12.8	7.4	2
79	351.14	-0.731	-30.2	15.9	10.1	4
80	352.972	-0.827	108	41.7	11.2	4
81	353.011	1.223	13.5	16.7	6.1	3
82	354.641	0.281	-8.9	10.9	5.8	2
83	355.229	-1.074	33.7	17.1	6.1	2, 4
84	355.724	0.705	30	10.4	4.6	2
85	359.526	-0.987	-2.4	14.2	6.2	2

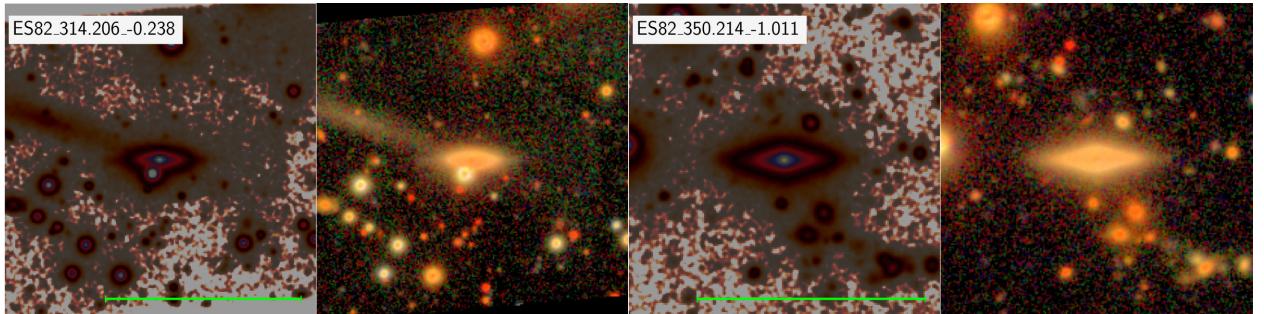


Рис. 2: Примеры галактик с хвостами. Левая панель – суммарное изображение галактики, правая панель – цветное RGB изображение.

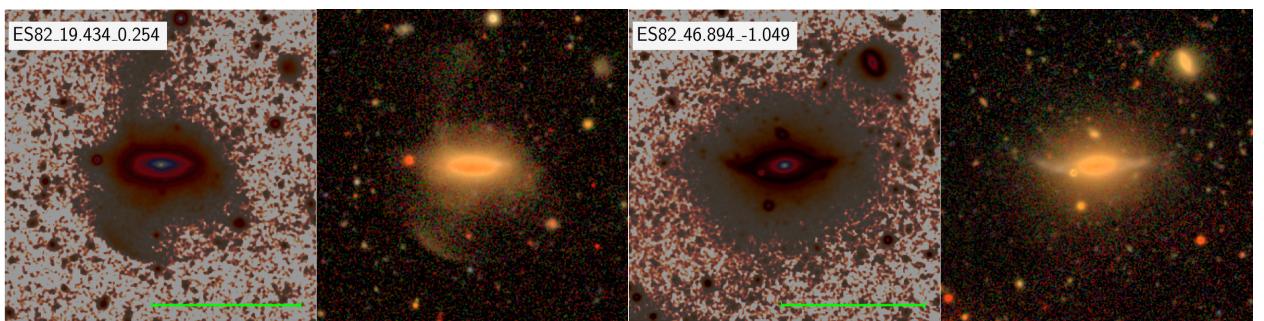


Рис. 3: Примеры галактик с оболочками. Левая панель – суммарное изображение галактики, правая панель – цветное RGB изображение.

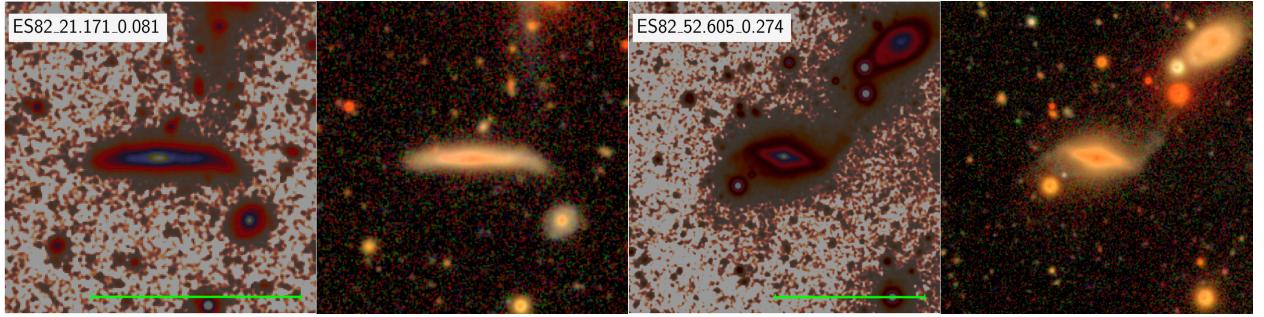


Рис. 4: Примеры галактик с мостами. Левая панель – суммарное изображение галактики, правая панель – цветное RGB изображение.

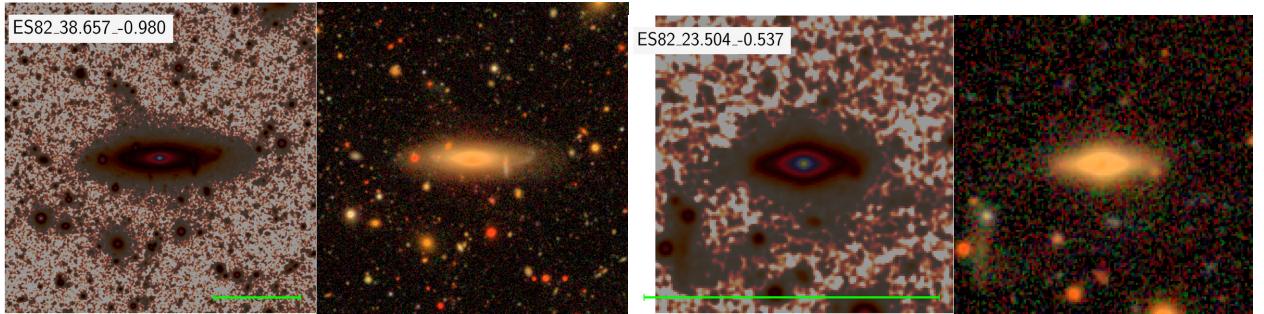


Рис. 5: Примеры галактик с арками. Левая панель – суммарное изображение галактики, правая панель – цветное RGB изображение.

Глава 6. Статистика проклассифицированных структур

Один из важных результатов данной работы, это статистика по распределению различных приливных структур, а также структурных особенностей галактик выборки.

Суммарно, приливные структуры низкой поверхностной яркости наблюдаются у 43 объектов. Количество галактик с различными приливными LSB структурами:

1. Хвосты – 6
2. Мосты – 8
3. Арки – 7
4. Полярные кольца – 2
5. Остатки спутников – 9
6. Оболочки – 15

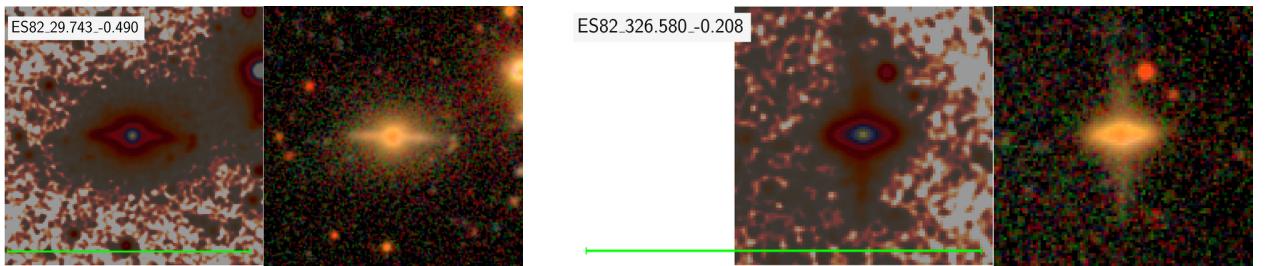


Рис. 6: Примеры галактик с полярными кольцами. Левая панель – суммарное изображение галактики, правая панель – цветное RGB изображение.

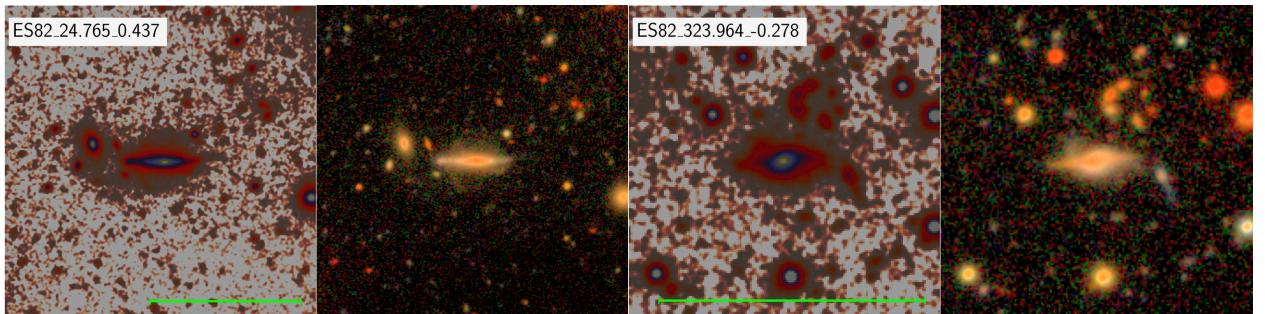


Рис. 7: Примеры галактик с остатками спутников. Левая панель – суммарное изображение галактики, правая панель – цветное RGB изображение.

Также собрана статистика по наблюдаемым структурам низкой поверхностной яркости, не являющихся прилипивыми. Всего галактик, обладающих подобными структурами – 86. Подробнее по каждой структуре:

1. Балджи (толстые коробкоподобные балджи, уплощенные балджеподобные структуры, полярные балджи) – 36
2. Изгибы диска – 58
3. Кособокость – 10
4. Другие (структурные особенности по типу спиралей) – 5

Основной результат данного раздела заключается в том, что несмотря на большую выборку галактик и глубину изображений, относительное количество объектов, обладающих прилипными структурами, меньше ожидаемого. Взаимодействующие галактики, это распространенное явление во Вселенной, что мы можем наблюдать даже на примере нашей галактики Млечный Путь.

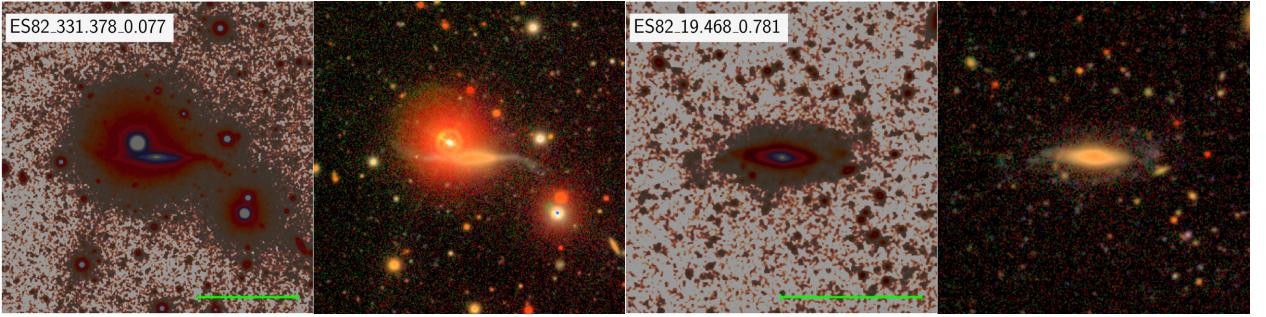


Рис. 8: Примеры галактик с изгибами диска. Левая панель – суммарное изображение галактики, правая панель – цветное RGB изображение.

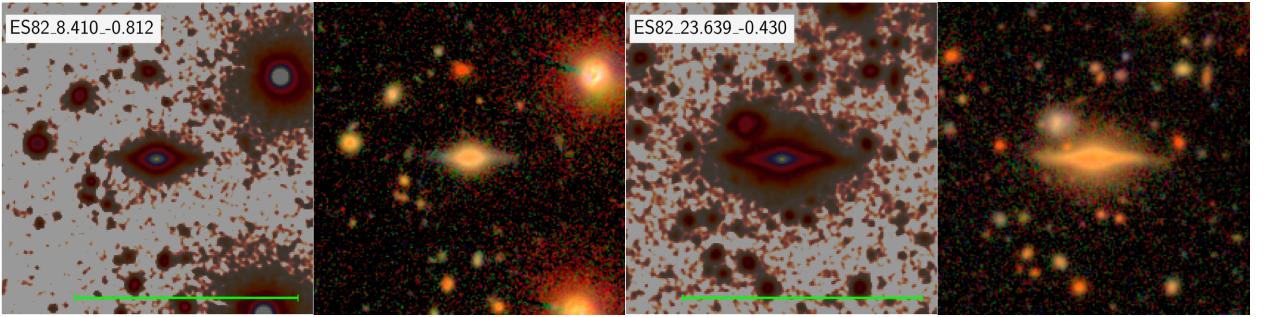


Рис. 9: Примеры галактик с балджем. Левая панель – суммарное изображение галактики, правая панель – цветное RGB изображение.

Глава 7. Фотометрическая декомпозиция

На данном этапе производится детальный анализ изображений видимых с ребра галактик в полосе Stripe 82, с целью оценки вертикальных и радиальных масштабов их звездных дисков.

Для описания распределения яркости вдоль направления малой оси галактики, видимой с ребра, обычно применяется модель самогравитирующего изотермического слоя [20], для которого 1:

$$I(z) = I_0 \operatorname{sech}^2(z/z_0) \quad (1)$$

где z_0 – вертикальный масштаб, то есть масштаб распределения яркости вдоль перпендикулярного к плоскости диска направления (вдоль координаты z). В рамках этой модели вертикальный масштаб связан с вертикальной дисперсией скоростей звезд и их объемной и поверхностной плотностью. Вблизи от плоскости галактики ($z/z_0 \ll 1$): $\operatorname{sech}^2(z/z_0) = \exp(-z^2/z_0^2)$. Вдали от плоскости ($z/z_0 \gg 1$): $\operatorname{sech}^2(z/z_0) = 4\exp(-2z/z_0^2)$. Можно ввести еще одну

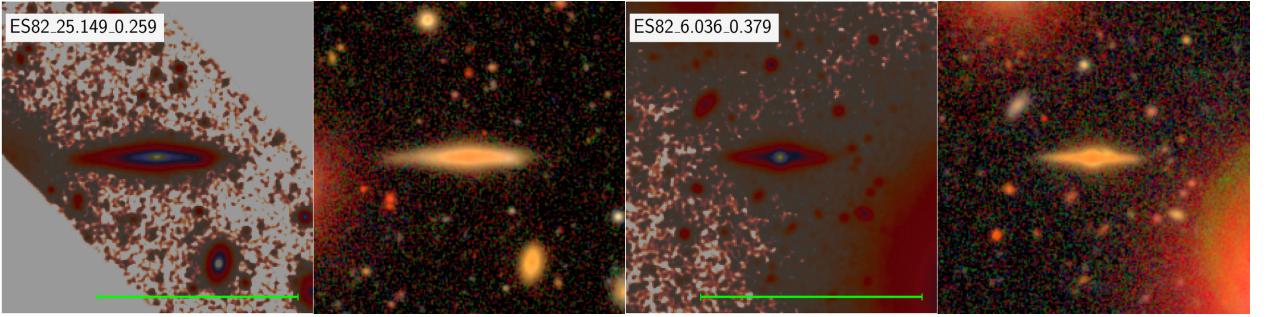


Рис. 10: Примеры галактик с кособокими звездными дисками. Левая панель – суммарное изображение галактики, правая панель – цветное RGB изображение.

формулу 2 экспоненциального закона, совпадающую с 1 в случаях $z/z_0 \ll 1$ и $z/z_0 \gg 1$:

$$I(z) = \exp(-|z|/h_z), \quad (2)$$

где h_z – экспоненциальный масштаб распределения яркости вдоль перпендикулярного к диску направления (вдоль координаты z). Формулы 1 и 2 связаны через соотношение $z_0 = 2h_z$. Наблюдения показывают, что для некоторых галактик формула 2 вполне адекватно описывает наблюдаемое распределение яркости.

В свою очередь, распределение яркости в радиальном направлении в диске спиральной галактики, видимой плашмя, может быть хорошо описано экспоненциальным законом с радиальным масштабом h_r [4] [13]:

$$I(r) = I_0 \exp(-r/h_r)$$

Таким образом, h_z и h_r – вертикальный и радиальный экспоненциальные масштабы диска. Они могут быть использованы для описания глобальной фотометрической структуры галактик. В данном разделе получение и анализ этих параметров является основной задачей.

Мы можем совместить формулы распределения поверхностной яркости в радиальном и вертикальном направлениях. Модель диска спиральной галактики в этом случае будет выражаться следующей формулой:

$$I(r, z) = I_0 e^{-r/h} \operatorname{sech}^2 z/z_0 \quad (3)$$

Здесь радиальный масштаб обозначается как h , а вертикальный – как z_0 . Такие

обозначения будут применены и для следующих формул данного раздела. В работе van der Kruit P.C., Searle L. [20] вычислена поверхностная яркость с законом распределения 3 для спиральной галактики, наблюданной с ребра:

$$\mu(r, z) = \mu(0, 0)(r/h)K_1(r/h)\operatorname{sech}^2(z/z_0)$$

где K_1 – модифицированная функция Бесселя первого порядка. Центральная поверхностная яркость выражается следующим образом:

$$\mu(0, 0) = 2hL_0,$$

где L_0 – центральная поверхностная яркость. Позднее в работе того же автора [19] было предложено использовать более общий закон для описания распределения плотности светящегося вещества в галактике вдоль координаты z :

$$\rho(z) = 2^{-2/n}\rho_0 \operatorname{sech}^{2/n}(nz/(2z_0)) \quad (n > 0), \quad (4)$$

в котором степень $2/n$ регулирует форму распределения. при $n = 1$ формула 4 переходит в модель изотермического слоя (формула 1), при $n = \infty$ в экспоненциальный закон (формула 2). Отсюда, согласно [19], получается следующая формула распределения поверхностной яркости для видимой с ребра галактики:

$$I(r, z) = \mu(0, 0)(r/h)K_1(r/h)\operatorname{sech}^{2/n}(nz/(2z_0)) \quad (5)$$

Важно отметить, что в процессе выполнения фотометрической декомпозиции был зафиксирован параметр n , он был принят равным значению $n = 100$. Тогда, согласно формуле 5, $\operatorname{sech}^{2/n}(nz/(2z_0)) \approx \exp(z/z_0)$. То есть распределение яркости всех галактик вдоль вертикального направления было аппроксимировано простым экспоненциальным законом.

Для получения начального приближения вертикального и радиального масштабов диска была выполнена одномерная фотометрическая декомпозиция компонент диска и балджа. Для этого были модифицированы python

скрипты, подготовленные научным руководителем, Савченко С.С. ¹⁰. Используя результаты одномерной декомпозиции в качестве входных параметров была осуществлена двумерная декомпозиция. Порядок выполнения фотометрической декомпозиции был следующий:

1. Изначально была составлена "золотая" выборка галактик, наблюдаемых точно с ребра. Это определялось, например, по расположению пылевой полосы. Также критериями отбора галактик являлось наличие регулярной структуры без особенностей, отсутствие ярких источников в близкой окрестности галактики (чтобы само тело галактики не сильно перекрывалось другими источниками и не было ярких звёзд поблизости). Полученная выборка включает 73 объекта.
2. Перед выполнением одномерной декомпозиции были заранее подготовлены обрезанные изображения галактик (со стороной изображения 3 размера большой полуоси по горизонтали, и малой оси по вертикали), соразмерные файлы масок, файлы весов, файлы psf, помогающие учитывать влияние оптической системы и атмосферной турбулентности.
3. Для выполнения декомпозиции достаточно указать номер галактики в выборке в качестве ключа при запуске скрипта. В процессе работы программы для каждой галактики было построено 2 модели: первая – простая модель, использующая функцию 5 (соответствующая функция в Imfit – EdgeOnDisk) и описывающая галактику как объект, расположенный точно с ребра. Во второй модели добавляется компонента балджа, аппроксимируемая функцией Серсика:

$$I(a) = I_e \exp \left\{ -b_n \left[\left(\frac{a^{1/n}}{r_e} - 1 \right) \right] \right\},$$

где I_e – поверхностная яркость на эффективном радиусе r_e , n – индекс Серсика, значение параметра b_n формально задает решение трансцендентного выражения $\Gamma(2n) = 2\gamma(2n, b_n)$. Здесь $\Gamma(a)$ – гамма-функция, а $\gamma(a, x)$ – неполная гамма-функция.

¹⁰<https://bitbucket.org/latrop/decomposer/src/master/>

4. Для каждой из двух моделей было автоматически посчитано значение BIC (the Bayesian information criterion), рассчитываемое по формуле: $BIC = -2 \ln L + k \ln(n)$, где L – максимальное значение функции правдоподобия наблюдаемой выборки с известным числом параметров, k – количество свободных параметров, n – количество незамаскированных пикселей на изображении. Выбиралась та модель, значение BIC для которой наименьшее.

5. На выходе мы имеем конфигурационный файл Imfit, в котором описаны 7 параметров диска:

X0	– координата центра по оси X изображения
Y0	– координата центра по оси Y изображения
EdgeOnDisk	– функция для аппроксимации
PA	– позиционный угол (угол между осью Y изображения и осью координаты r, отсчитываемый против часовой стрелки)
L_0	– центральная плотность светимости L_0
h	– радиальный масштаб h
n	– индекс Серсика n
z_0	– вертикальный масштаб z_0

6. Следующий выполненный этап – двумерная декомпозиция в Imfit[6]. На вход программы осуществлялась подача изображения галактики, конфигурационного файла с комбинацией двумерных функций (результат одномерной декомпозиции), которые должны аппроксимировать распределение поверхностной яркости при декомпозиции, также файлы с маской и весами, psf-изображение.

7. Построены модельные изображения галактик, описываемых комбинацией двумерных функций с заданными параметрами.

8. Получены разностные изображения и вычислена статистическая разница реального и модельного изображений галактики (по критерию χ^2) с применением информации о достоверности значений в пикселях, содержащейся в изображениях масок и весов.

9. Выполнена корректировка параметров модельных двумерных функций в сторону уменьшения статистической разницы χ^2 методом градиентного спуска.
10. Построены срезы вдоль большой и малой полуоси галактики в сравнении с моделями, описываемыми полученными в процессе двумерной декомпозиции параметрами (Рис. 11). Получены изображения моделей и их разностей с изображениями реальных галактик (Рис. 12).

Глава 8. Результаты декомпозиции

В процессе анализа результатов двумерной декомпозиции был сделан вывод о том, что не для всех галактик "золотой" выборки полученные модели являются достоверным приближением распределения их поверхностной яркости. Некоторые галактики требуют введения более сложных моделей (учитывающих изломы диска или же угол наклона относительно луча зрения). Из выборки галактик, с которыми производилась фотометрическая декомпозиция (73 галактики), 51 галактика имеет адекватно построенную модель, остальные требуют введения более сложных 3D моделей (все дальнейшие шаги производились именно с подвыборкой галактик, имеющих хорошие результаты фотометрической декомпозиции – 51 галактика).

Прежде, чем переходить к анализу, мы решили сравнить звездные величины модельных галактик со звездными величинами из базы данных SDSS¹¹, таким образом, мы сможем сделать выводы о качестве выполненной декомпозиции. В таблице 3 приведены видимые звездные величины построенных модельных галактик и звездные величины реальных галактик выборки, полученные из базы данных SDSS в фильтре g.

¹¹<http://skyserver.sdss.org/DR16/en/tools/crossid/crossid.aspx>

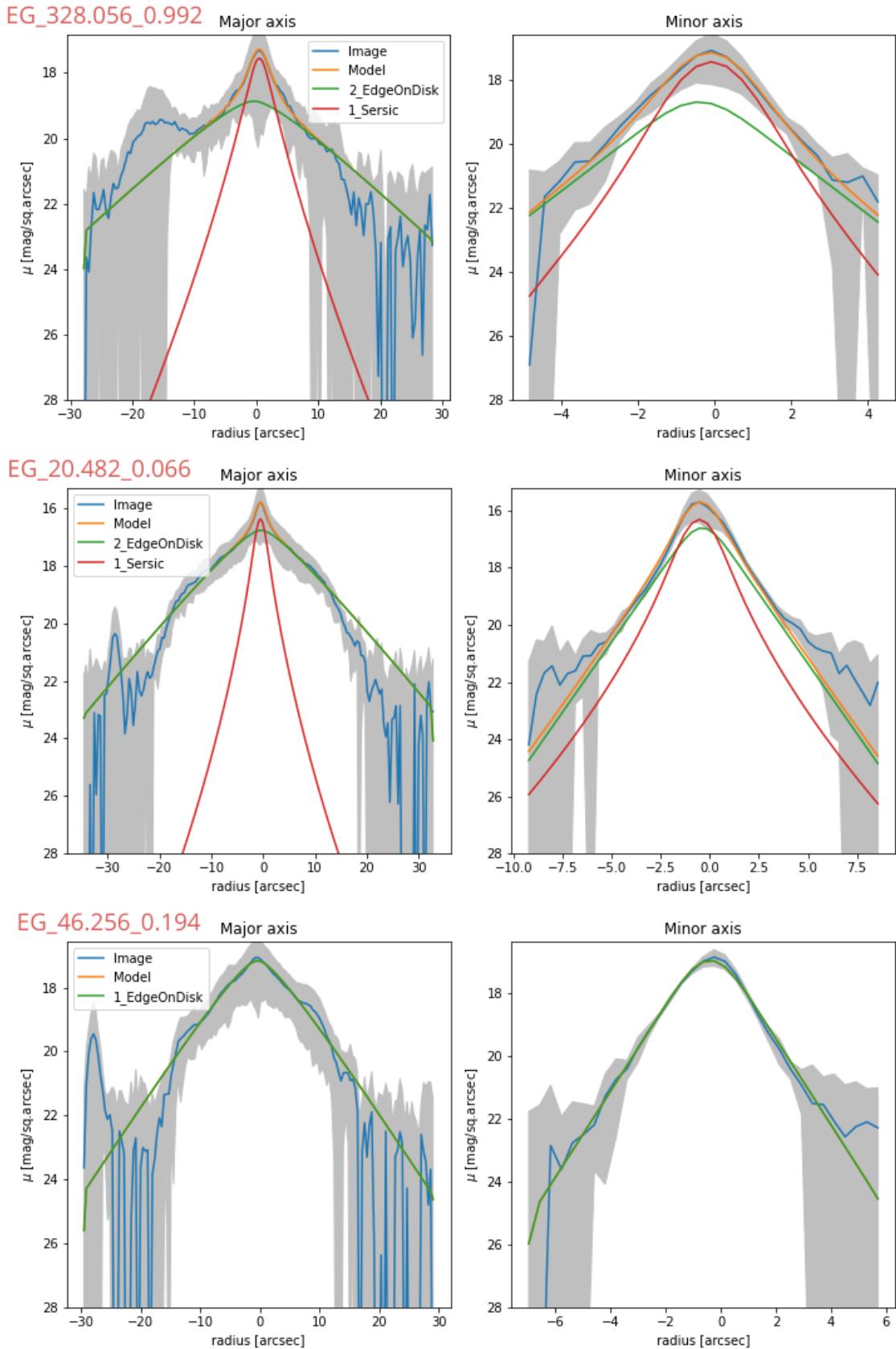
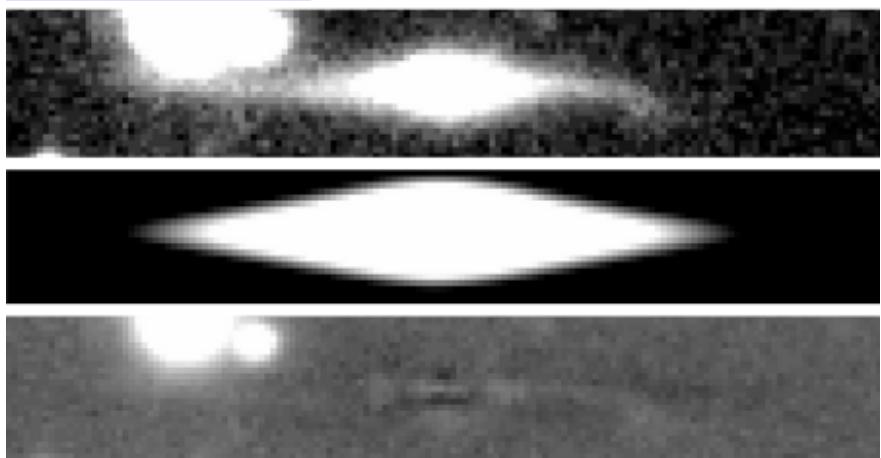
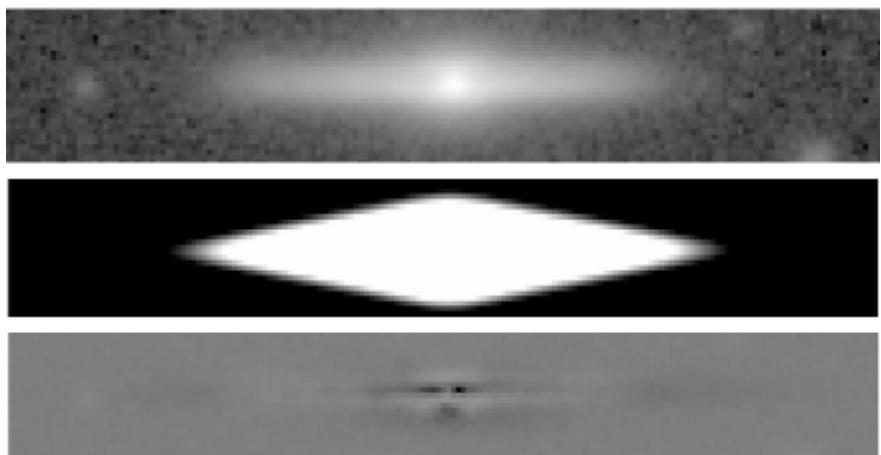


Рис. 11: Примеры полученных результатов двумерной декомпозиции: левая панель – разрез вдоль большой полуоси галактики, правая панель – разрез вдоль малой полуоси галактики. Зеленым цветом изображена модельная компонента диска, красным – компонента балджа (если имеется), желтым – сумма двух компонент.

EG_328.056_0.992



EG_20.482_0.066



EG_46.256_0.194

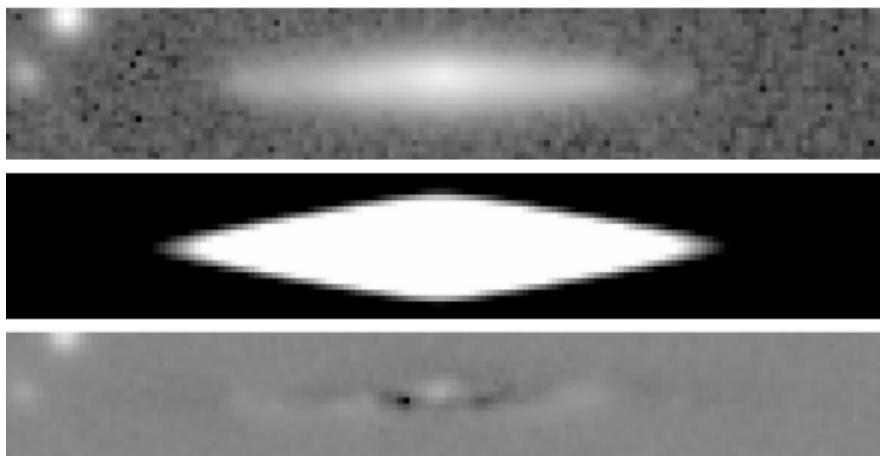


Рис. 12: Примеры полученных результатов двумерной декомпозиции: левая панель – изображение реальной галактики, средняя панель – модель, правая панель – разность изображения реальной галактики и модели.

Таблица 3: Значения видимых звездных величин из базы данных SDSS и модельных (SDSS фильтр r). Первый столбец – номер галактики, второй – звездная величина реальной галактики из базы данных SDSS, третий – модельная звездная величина, посчитанная по результатам одномерной декомпозиции, четвертый – модельная звездная величина, посчитанная по результатам двумерной декомпозиции, пятые и шестой – модули разностей реальных и модельных звездных величин.

N	$m_r(SDSS)$	$m_r(1d)$	$m_r(2d)$	$ m_r(SDSS)-m_r(1d) $	$ m_r(SDSS)-m_r(2d) $
1	18.021	18.551	18.063	0.53	0.041
2	17.891	20.49	17.854	2.599	0.038
3	16.538	19.218	16.424	2.68	0.114
4	16.398	16.898	15.625	0.5	0.773
5	16.903	19.992	16.815	3.089	0.088
6	17.572	20.234	17.269	2.662	0.303
7	16.456	16.807	16.657	0.351	0.201
8	17.709	17.652	17.441	0.057	0.269
9	17.099	19.876	17.057	2.777	0.041
10	17.208	17.414	17.359	0.206	0.151
11	18.102	20.861	18.078	2.76	0.024
12	16.308	16.339	16.284	0.03	0.025
13	16.016	19.056	15.89	3.039	0.127
14	17.021	19.87	16.915	2.849	0.106
15	16.36	18.872	16.272	2.512	0.088
16	15.829	15.561	15.259	0.269	0.57
17	17.435	19.811	17.357	2.376	0.078
18	15.475	18.257	15.85	2.782	0.375
19	17.788	19.632	17.598	1.844	0.189
20	16.917	19.691	16.907	2.775	0.009
21	17.113	19.661	17.089	2.548	0.024
22	16.217	16.826	16.49	0.609	0.272
23	17.357	18.164	17.504	0.807	0.147
24	15.843	16.652	16.006	0.809	0.163
25	16.973	19.09	16.818	2.118	0.154
26	17.258	16.875	17.056	0.383	0.202
27	16.851	18.854	16.787	2.003	0.064

28	15.43	14.465	15.273	0.965	0.157
29	17.639	17.894	17.528	0.255	0.111
30	17.562	20.137	17.554	2.575	0.008
31	17.119	17.582	16.891	0.463	0.228
32	16.667	17.167	16.502	0.5	0.165
33	16.659	20.212	16.422	3.553	0.237
34	15.283	15.288	15.393	0.006	0.111
35	16.256	17.112	16.497	0.856	0.241
36	14.617	17.11	14.458	2.493	0.158
37	16.345	16.184	16.038	0.16	0.307
38	17.744	20.385	17.628	2.641	0.115
39	16.393	16.385	16.529	0.008	0.136
40	16.304	16.034	16.473	0.27	0.169
41	17.577	18.195	17.538	0.618	0.04
42	17.496	18.45	17.054	0.954	0.442
43	17.27	17.198	17.247	0.073	0.024
44	16.78	17.194	16.722	0.413	0.058
45	15.82	16.846	15.413	1.026	0.407
46	16.936	17.844	16.723	0.908	0.213
47	16.727	19.026	16.64	2.299	0.087
48	16.826	17.562	17.041	0.737	0.216
49	15.766	18.25	15.604	2.484	0.162
50	17.561	18.829	17.281	1.268	0.28
51	15.966	16.98	15.694	1.014	0.272

Обращаем внимание на то, что результаты одномерной декомпозиции значительно хуже результатов двумерной. В то время, как модельная звездная величина, полученная по результатам двумерной декомпозиции отличается от реальной (SDSS) в десятых или сотых, разница модельной звездной величины, полученной по результатам одномерной декомпозиции с реальной (SDSS) в некоторых случаях отличается на 2 или 3 звездные величины. Таким образом, результаты двумерной декомпозиции более точные, в дальнейшем мы будем опираться на них, но и анализ одномерной декомпозиции также

будет осуществлен для сравнения.

Возвращаясь к масштабным параметрам, в таблице 4 приведены параметры (радиальный и вертикальный масштабы) для галактик выборки.

Таблица 4: Масштабные параметры галактик выборки, полученные в результате декомпозиции. Столбцы $1d$ содержат в себе информацию по одномерной декомпозиции. Столбцы $2d$ - информацию по двумерной декомпозиции. h и h_z - радиальный и вертикальные экспоненциальные масштабы дисков.

N	h (1d) (arcsec)	h (2d) (arcsec)	h (1d) (kpc)	h (2d) (kpc)	h_z (1d) (arcsec)	h_z (2d) (arcsec)	h_z (1d) (kpc)	h_z (2d) (kpc)
1	3.077	5.719	7.001	13.01	0.261	0.596	0.595	1.356
2	3.553	5.04	9.304	13.2	0.193	0.355	0.505	0.93
3	5.897	5.648	4.977	4.767	0.32	0.555	0.27	0.469
4	6.48	4.321	11.372	7.584	0.36	0.635	0.631	1.115
5	6.048	7.329	4.59	5.563	0.22	0.448	0.167	0.34
6	3.312	4.523	3.571	4.876	0.159	0.357	0.172	0.385
7	2.818	3.992	5.439	7.704	0.359	0.47	0.693	0.908
8	3.3	3.65	4.184	4.629	0.5	1.085	0.634	1.375
9	3.136	3.651	3.434	3.997	0.164	0.369	0.18	0.404
10	3.115	4.001	6.174	7.929	0.4	0.505	0.793	1.002
11	3.277	4.435	4.217	5.708	0.139	0.252	0.178	0.324
12	3.871	3.947	3.329	3.394	0.469	0.82	0.403	0.705
13	6.278	8.729	1.952	2.715	0.333	0.726	0.103	0.226
14	4.731	5.304	3.174	3.559	0.222	0.447	0.149	0.3
15	3.401	3.169	2.945	2.745	0.244	0.612	0.211	0.53
16	6.305	5.78	5.302	4.861	0.711	0.867	0.598	0.729
17	2.63	2.503	4.337	4.127	0.148	0.334	0.245	0.55
18	5.814	4.464	4.803	3.687	0.261	0.495	0.216	0.409
19	2.638	3.087	4.366	5.109	0.255	0.306	0.422	0.506
20	3.402	5.384	3.045	4.819	0.174	0.382	0.156	0.342
21	2.685	2.999	1.404	1.568	0.172	0.394	0.09	0.206
22	3.37	4.741	4.941	6.951	0.27	0.555	0.396	0.813
23	2.905	3.66	5.162	6.504	0.182	0.382	0.323	0.679
24	3.822	5.839	3.528	5.389	0.221	0.394	0.204	0.364

25	3.58	4.086	4.131	4.716	0.445	0.542	0.513	0.626
26	4.511	5.172	3.749	4.298	0.459	0.387	0.382	0.321
27	3.299	4.396	2.688	3.583	0.378	0.535	0.308	0.436
28	9.264	9.776	7.485	7.899	1.196	0.781	0.966	0.631
29	3.07	3.844	4.213	5.274	0.235	0.487	0.322	0.668
30	3.055	3.643	4.622	5.512	0.177	0.397	0.267	0.6
31	6.163	6.925	5.14	5.776	0.219	0.535	0.183	0.446
32	5.844	6.295	8.62	9.285	0.234	0.604	0.346	0.891
33	9.506	11.934	4.858	6.098	0.238	0.652	0.122	0.333
34	6.315	6.355	3.214	3.235	0.486	0.85	0.248	0.433
35	4.543	5.567	4.734	5.801	0.254	0.766	0.265	0.798
36	7.672	8.467	1.995	2.202	0.814	1.153	0.212	0.3
37	7.62	8.876	7.689	8.956	0.491	1.016	0.495	1.025
38	3.393	4.098	3.257	3.934	0.152	0.329	0.146	0.316
39	4.332	5.721	6.169	8.147	0.613	0.714	0.874	1.016
40	2.957	3.677	4.142	5.151	0.641	0.557	0.898	0.78
41	2.742	2.67	4.469	4.353	0.193	0.369	0.315	0.602
42	2.458	2.202	4.756	4.261	0.637	0.501	1.233	0.97
43	3.145	3.421	6.149	6.688	0.407	0.601	0.796	1.175
44	3.194	3.134	4.519	4.434	0.233	0.512	0.329	0.725
45	3.938	3.755	3.887	3.706	1.051	0.591	1.037	0.583
46	1.909	1.907	2.163	2.161	0.626	0.391	0.709	0.443
47	3.531	4.705	4.383	5.839	0.419	0.672	0.519	0.834
48	2.981	3.54	4.558	5.413	0.251	0.58	0.384	0.887
49	5.065	6.266	3.049	3.772	0.447	0.784	0.269	0.472
50	2.988	2.366	5.515	4.368	0.513	0.372	0.946	0.688
51	5.501	4.739	7.581	6.53	1.611	0.83	2.22	1.143

На рис. 13 приведены распределения радиального и вертикального масштабов, построенные на основе результатов по обоим типам выполненной декомпозиции.

Получены средние значения радиальных масштабов диска: $\langle h \rangle_{1d} = 4.29 \pm 0.25$ arcsec и $\langle h \rangle_{2d} = 4.89 \pm 0.28$ arcsec, для одномерной и двумерной деком-

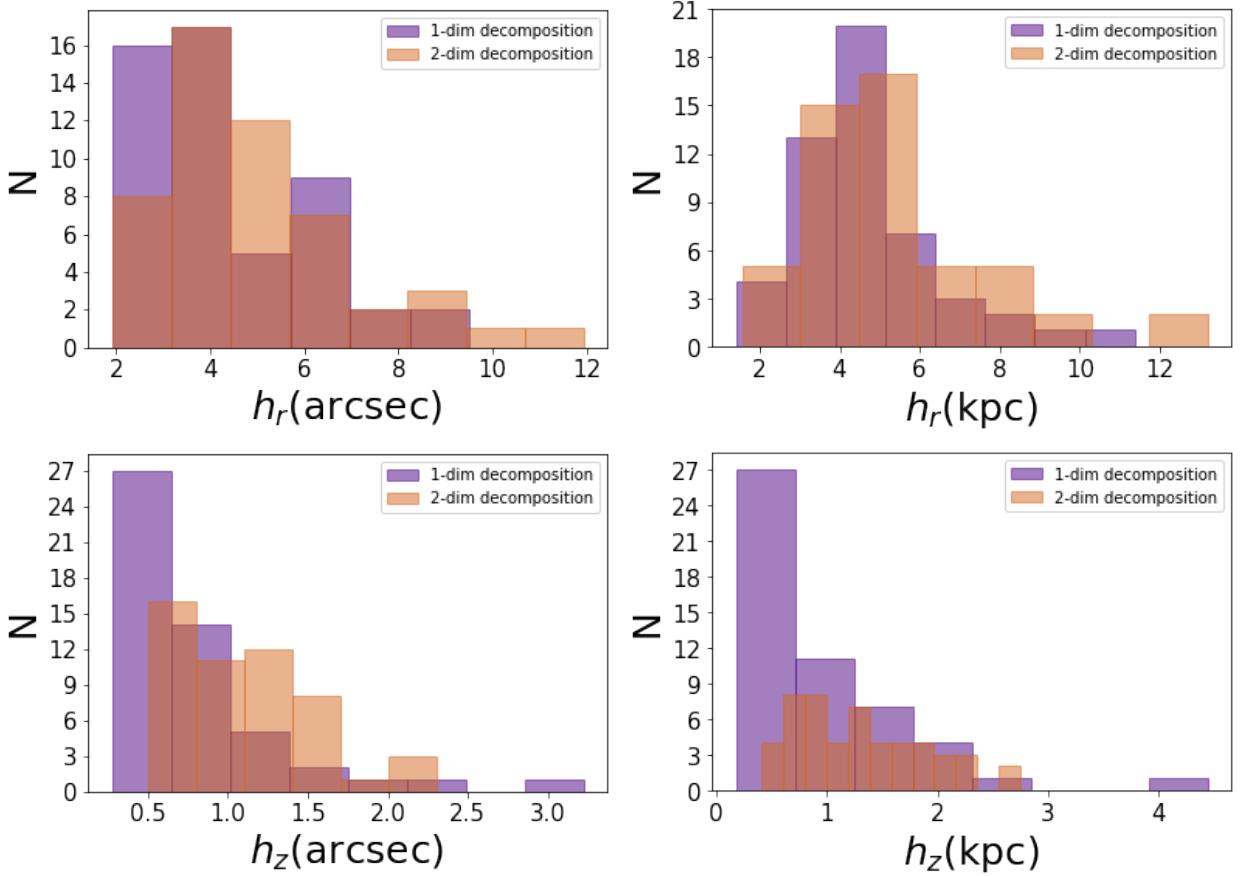


Рис. 13: Распределения по радиальным и вертикальным масштабам дисков галактик, выраженные в угловых секундах (левая панель) и в килопарсеках (правая панель). Цвет обозначает тип декомпозиции, в результате которой получены данные параметры: фиолетовый – одномерная декомпозиция, оранжевый – двумерная декомпозиция.

позиции (в качестве ошибки здесь и далее приведено значение выборочной дисперсии). Средние значения вертикальных масштабов диска $\langle h_z \rangle$ равны 0.79 ± 0.08 arcsec и 1.13 ± 0.05 arcsec также для одномерной и двумерной декомпозиции соответственно. Аналогично посчитаны средние значения радиальных и вертикальных масштабов диска, выраженные в килопарсеках: $\langle h \rangle_{1d} = 4.72 \pm 0.27$ kpc и $\langle h \rangle_{2d} = 5.41 \pm 0.32$ kpc, для одномерной и двумерной декомпозиции. Средние значения вертикальных масштабов диска $\langle h_z \rangle$ равны 0.46 ± 0.05 kpc и 0.65 ± 0.04 kpc для одномерной и двумерной декомпозиции соответственно. Приведенные значения масштабов выглядят типичными для наблюдаемых в ориентации с ребра близких галактик (см., например, рис. 10 в [2]).

Для получения значений масштабных параметров в килопарсеках из базы данных SDSS были взяты значения спектральных красных смещений для

галактик выборки. При помощи красных смещений, используя пакет IMAN, мы смогли определить значения масштабов, связывающих размеры объектов, выраженные в угловых секундах с размерами, выраженными в килопарсеках. Распределение по красным смещениям для нашей выборки представлено на рис. 14. Все числовые величины в работе приведены для космологической модели с постоянной Хаббла $H_0 = 70 \text{ } c^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$, $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$. Сред-

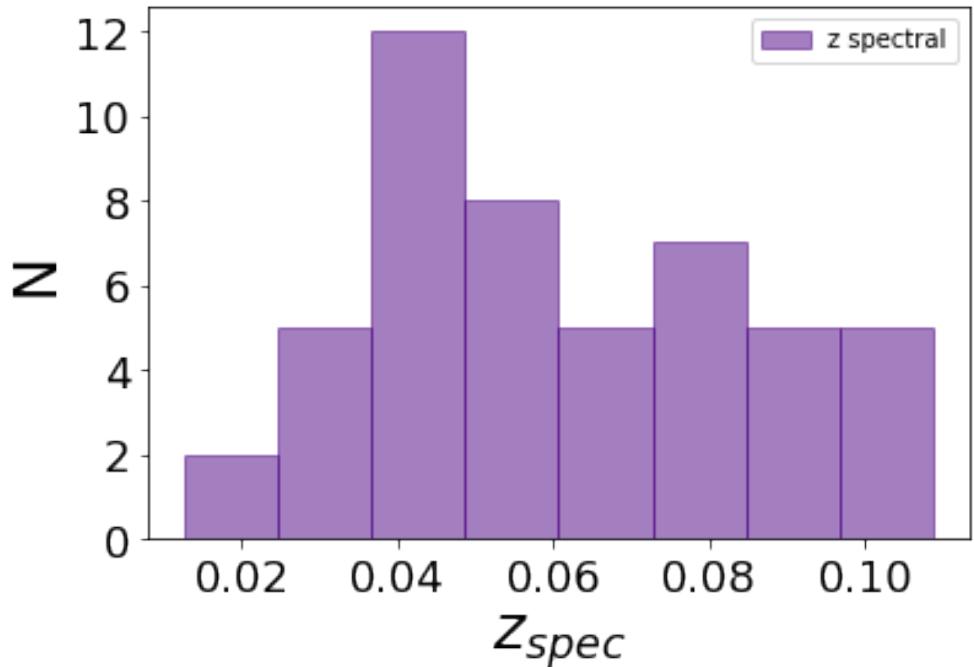


Рис. 14: Распределение по спектральным красным смещениям галактик выборки, полученные из базы данных SDSS в фильтре r .

нее красное смещение рассматриваемых нами галактик составляет $\langle z_{spec} \rangle = 0.064 \pm 0.004$. Галактики являются достаточно далекими для того, чтобы при дальнейших расчетах абсолютных звездных величин помимо галактического поглощения также учитывать значение К-поправки.

Распределение галактик по абсолютным звездным величинам (M) приведены на рис. 15. Абсолютные звездные величины были вычислены по формуле 6:

$$M = m_{model} - 5 \log(D_L^{Mpc}) - 25 - A - K, \quad (6)$$

Где m_{model} – видимая звездная величина модельной галактики, D_L^{Mpc} (lumonocity distance) = $\sqrt{\frac{L}{4\pi F}}$ (где L – светимость, F – поток). Для расчета К-поправок

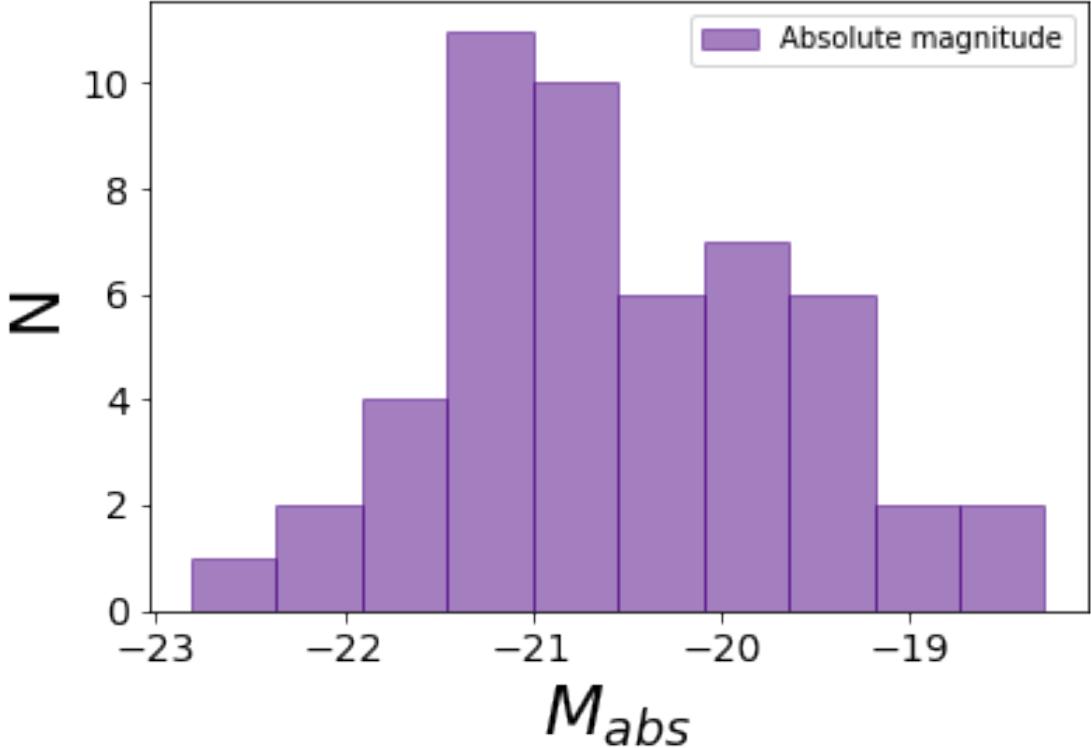


Рис. 15: Распределение по абсолютным звездным величинам в фильтре r, рассчитанным для модельных галактик.

использовался скрипт I. Chilingarian, A.-L. Melchior, and I. Zolotukhin.¹² Среднее значение M для галактик выборки: $\langle M \rangle_{2d} = -20.53 \pm 0.13$, что согласуется с результатами работы [2].

О том, насколько галактика имеет тонкий звездный диск мы также можем судить по наблюдениям галактик, видимых с ребра. В большинстве своем, данная характеристика представляет собой отношения двух масштабных параметров h и z_0 или h и h_z . Существует четкая корреляция между этими двумя параметрами, что подтверждалось, например, в работах [10] или [12]. В нашей работе эта корреляция также присутствует (см. рис.17). Примечательно, что продолжение линейной регрессии проходит вблизи точки с координатами (0, 0).

Мы также построили распределение толщин звездных дисков для одномерной и двумерной декомпозиции 16. Видим, что существует большой разброс значений h/z_0 по результатам одномерной декомпозиции, в то время, как h/z_0 для двумерной декомпозиции ограничивается значением ≈ 9.5 .

¹²<http://kcor.sai.msu.ru/getthecode/>

Считаем, что данная несостыковка произошла из-за неточного определения значения z_0 в процессе одномерной декомпозиции, как минимум значения толщин $h/z_0 \approx 20.0$ – нефизичны. Еще одно подтверждение того, что одномерную декомпозицию лучше использовать исключительно в качестве начального приближения для двумерной.

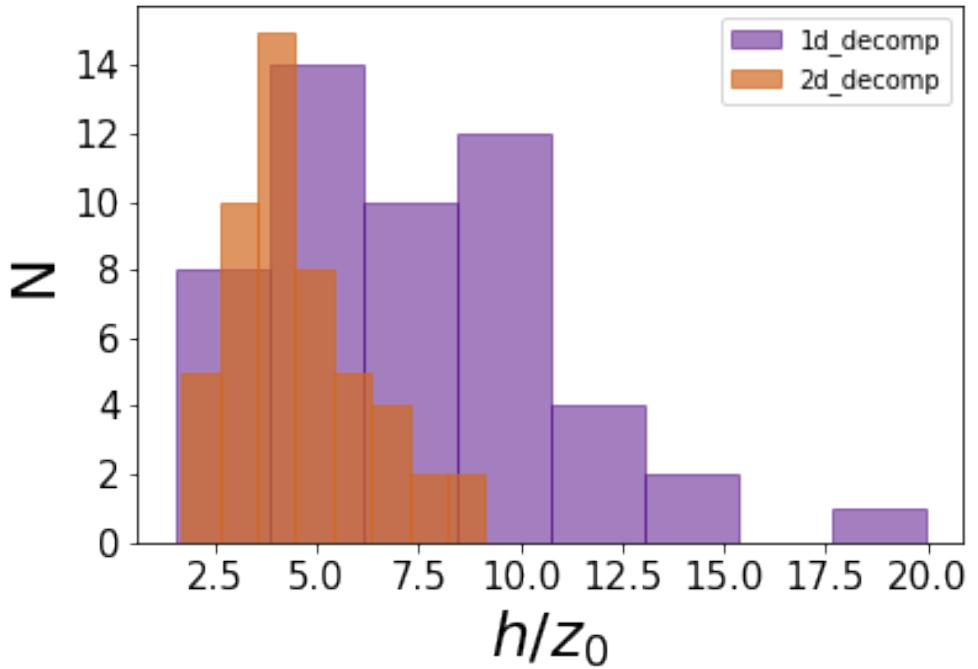


Рис. 16: Распределение галактик по значениям толщин звездных дисков. Фиолетовая гистограмма демонстрирует параметры, полученные в процессе одномерной декомпозиции, оранжевая гистограмма – в процессе двумерной.

Заключительный и наиболее важный раздел анализа, выполненный в рамках данной работы, это анализ толщин звездных дисков галактик в зависимости от наличия или отсутствия у тех приливных структур. Из теоретических соображений следует, что толщина звездных дисков чувствительна к внешнему возмущению и акреции вещества [17]. При гравитационном взаимодействии галактик, в частности, при малых и больших слияниях, часть энергии орбитального движения галактик может преобразоваться в их внутреннюю энергию, "разогреть" звездные диски, тем самым увеличив дисперсию скоростей звезд в вертикальном направлении, следовательно, и наблюдаемую толщину. Эффект приливного утолщения был, действительно, открыт при сравнении распределений яркости в вертикальном направлении в выборках взаимодействующих и относительно изолированных галактик в работе [14].

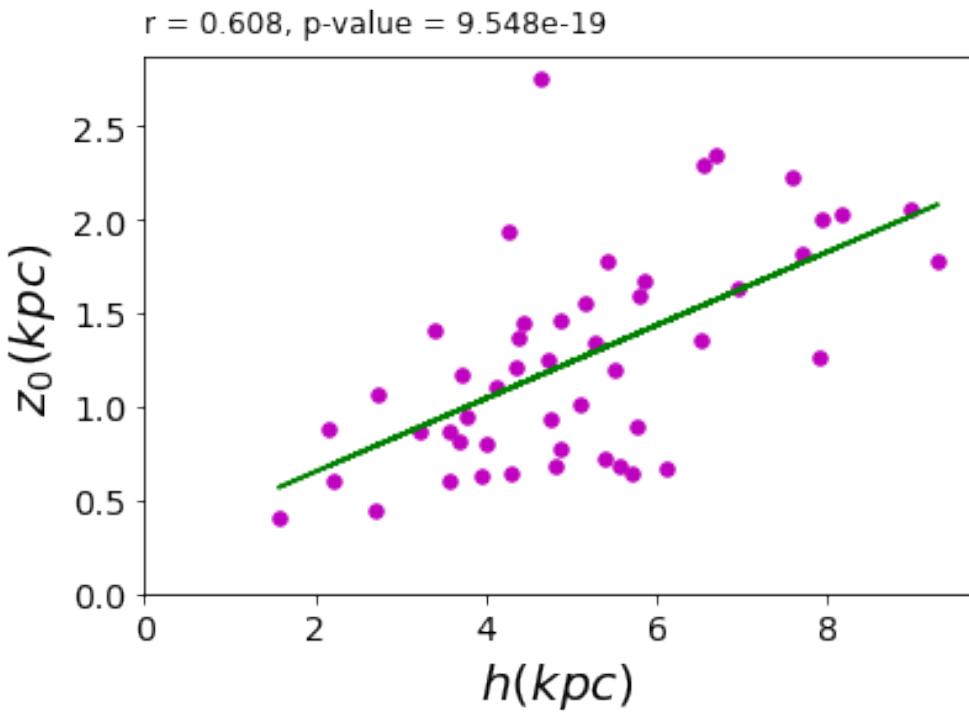


Рис. 17: Распределение галактик на плоскости h – h_z , зеленая сплошная линия – линейная регрессия для данной выборки галактик, r – коэффициент Пирсона, p – p -значение.

Было продемонстрировано, что галактики во взаимодействующих системах демонстрируют в 1.5-2 раза более толстые диски по сравнению с галактиками в более бедном пространственном окружении. Мы решили проверить этот факт на нашей выборке. В данном случае речь идет о всем каталоге галактик EG82, содержащем 831 объект, так мы имеем возможность учесть все галактики из предыдущего раздела, посвященного приливным структурам. В качестве критерия оценки толщин дисков мы будем использовать отношение полуосей b/a . Соответственно, чем меньше это соотношение, тем тоньше диск, и наоборот. На 831 объект выборки у нас приходится 43 галактики с наблюдаемыми приливными структурами. Мы построили распределение толщин для двух подвыборок: галактик с приливными структурами и оставшейся части выборки (788 объектов) (см. рис. 18.)

Среднее значение толщины диска для выборки с приливными структурами – $\langle b/a \rangle_{2d} = 0.412 \pm 0.03$, в то время, как для выборки галактик, у которых приливные структуры отсутствуют это же значение равно $\langle b/a \rangle_{2d} = 0.325 \pm 0.003$. Не в два раза, но все равно диски галактик со структурами заметно толще дисков визуально не взаимодействующих галактик.

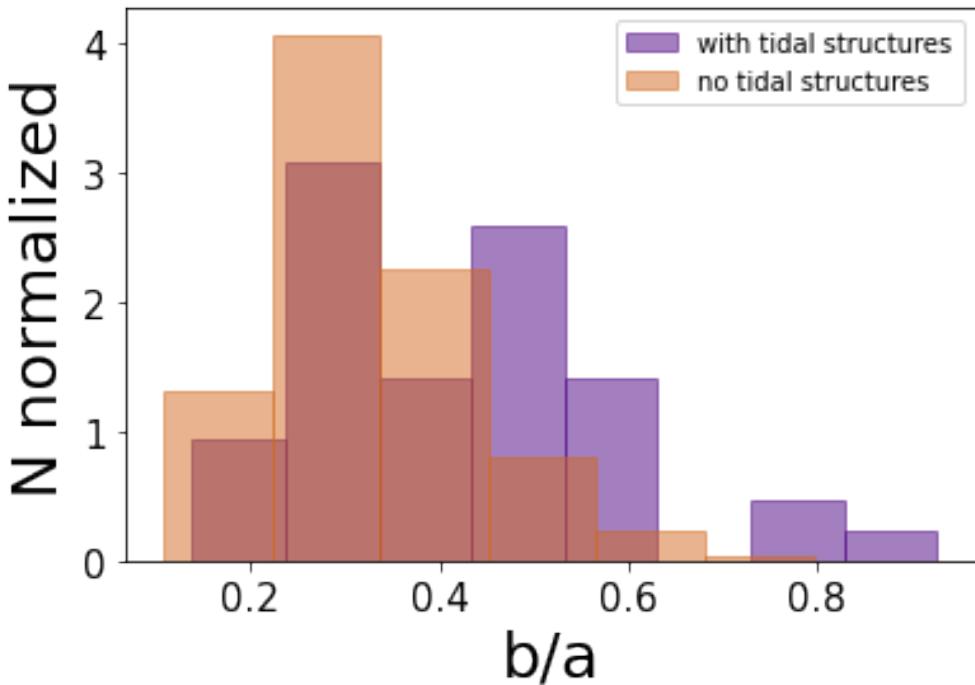


Рис. 18: Распределение толщин галактик (отношение малой полуоси к большой) для двух выборок галактик: фиолетовая гистограмма для галактик с наблюдаемыми приливными структурами, оранжевая гистограмма для галактик с отсутствующими приливными структурами.

Глава 9. Заключение

- В рамках данной работы был создан каталог галактик с ребра в SDSS полосе Stripe 82 – SG82. Каталог на данный момент содержит 831 объект, включая галактики с углом наклона меньше 85° (визуально), 710 объектов, если исключить галактики, не являющиеся галактиками с ребра.
- Был проведен тест V/V_m на полноту выборки. Для галактик с размером большой полуоси $SMA > 18$ arcsec наша выборка, по существу, полна: в фильтре $r \langle V/V_m \rangle = 0.489$.
- Были уточнены такие параметры галактик из каталога, как размеры полуосей и позиционные углы.
- Обработаны изображения объектов из каталога в фильтрах g, r, i, rdeep.
- Получены цветные RGB и суммарные изображения.
- Отобрано и проklassифицировано 43 галактики, обладающие прилив-

ными LSB структурами, 86 галактик обладает структурными особенностями, не являющимися приливными. Важный результат этой работы заключается в том, что несмотря на глубину исследуемых изображений, количество галактик, обладающих структурами низкой поверхностной яркости в выборке намного меньше, чем ожидалось. Возможно глубины исследуемых данных недостаточно, чтобы выявить все галактики с приливными структурами и структурными особенностями.

- Выполнена одномерная фотометрическая декомпозиция для 73 галактик, для 51 галактики результаты фотометрической декомпозиции оказались хорошими или удовлетворительными. Оставшиеся 22 галактики либо не являются галактиками, видимыми точно с ребра, либо нуждаются в более сложных моделях для аппроксимации (например 3D модели с изломами диска).
- Был произведен анализ масштабных параметров и сделаны оценки их средних значений. Средние значения вертикального и радиального масштабов, а также средние абсолютные звездные величины согласуются с результатами ранее выполненных работ других авторов. На основании графиков еще раз был подтвержден факт о наличии корреляции между радиальным и вертикальным масштабами диска,
- Для всех галактик с результатами анализа распределения яркости выполнены отождествления с опубликованными списками спектральных красных смещений. Среднее красное смещение галактик выборки оказалось равным ≈ 0.064 .
- Показано, что звездные диски галактик с наблюдаемыми приливными структурами в среднем являются более толстыми, чем диски галактик, у которых эти структуры отсутствуют.

Составленный каталог галактик можно в дальнейшем использовать для более подробного анализа структур низкой поверхностной яркости. Полученные результаты находятся в согласии с современными представлениями об эволюции дисковых подсистем галактик. Результаты дипломной работы

дают важную информацию о структуре взаимодействующих галактик и они могут быть использованы для дальнейшего исследования фотометрических параметров и эволюции подсистем.

Благодарность

В заключение, я хочу выразить благодарность своему научному руководителю за постановку актуальной и интересной задачи, сопровождение на всем пути написания дипломной работы, конструктивную обратную связь, за понимание и помочь в освоении нового теоретического материала и программ. Благодарю сотрудников кафедры астрофизики за ценные замечания и обсуждение вопросов, связанных с дипломной работой и обучением в целом. Также хочу поблагодарить всех преподавателей университета за переданные знания и опыт, которые помогли мне получить качественное образование и привить любовь астрономии, математике и другим точным наукам. И я очень благодарна своей семье и университетским друзьям, которые поддерживали меня на протяжении всего периода обучения в университете.

Список литературы

- [1] H. Aihara, Y. AlSayyad, and M. Ando. Third data release of the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program. *Publications of the ASJ*, 74(2):247–272, Apr. 2022.
- [2] D. V. Bizyaev, S. J. Kautsch, A. V. Mosenkov, V. P. Reshetnikov, N. Y. Sotnikova, N. V. Yablokova, and R. W. Hillyer. The Catalog of Edge-on Disk Galaxies from SDSS. I. The Catalog and the Structural Parameters of Stellar Disks. *Astrophysical Journal*, 787(1):24, May 2014.
- [3] D. V. Bizyaev, S. J. Kautsch, N. Y. Sotnikova, V. P. Reshetnikov, and A. V. Mosenkov. Very thin disc galaxies in the SDSS catalogue of edge-on galaxies. *Monthly Notices of the RAS*, 465(4):3784–3792, Mar. 2017.
- [4] G. de Vaucouleurs. Classification and Morphology of External Galaxies. *Handbuch der Physik*, 53:275, Jan. 1959.
- [5] A. Dey, D. J. Schlegel, and Lang. Overview of the DESI Legacy Imaging Surveys. *Astronomical Journal*, 157(5):168, May 2019.
- [6] P. Erwin. IMFIT: A Fast, Flexible New Program for Astronomical Image Fitting. *Astrophysical Journal*, 799(2):226, Feb. 2015.
- [7] J. Fliri and I. Trujillo. The IAC Stripe 82 Legacy Project: a wide-area survey for faint surface brightness astronomy. *Monthly Notices of the RAS*, 456(2):1359–1373, Feb. 2016.
- [8] R. E. Hart, S. P. Bamford, K. W. Willett, K. L. Masters, C. Cardamone, C. J. Lintott, R. J. Mackay, R. C. Nichol, C. K. Rosslowe, B. D. Simmons, and R. J. Smethurst. VizieR Online Data Catalog: Galaxy Zoo 2: new classification (Hart+, 2016). *VizieR Online Data Catalog*, page J/MNRAS/461/3663, Nov. 2017.
- [9] W. A. Joye and E. Mandel. New Features of SAOImage DS9. In H. E. Payne, R. I. Jedrzejewski, and R. N. Hook, editors, *Astronomical Data Analysis*

Software and Systems XII, volume 295 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 489, Jan. 2003.

- [10] M. Kregel, P. C. van der Kruit, and R. de Grijs. Flattening and truncation of stellar discs in edge-on spiral galaxies. *Monthly Notices of the RAS*, 334(3):646–668, Aug. 2002.
- [11] A. V. Mosenkov, A. A. Smirnov, O. K. Sil’chenko, R. M. Rich, V. P. Reshetnikov, and J. Kormendy. Tilted outer and inner structures in edge-on galaxies? *Monthly Notices of the RAS*, 497(2):2039–2056, Sept. 2020.
- [12] A. V. Mosenkov, N. Y. Sotnikova, and V. P. Reshetnikov. 2MASS photometry of edge-on spiral galaxies - I. Sample and general results. *Monthly Notices of the RAS*, 401(1):559–576, Jan. 2010.
- [13] F. S. Patterson. The Luminosity Gradient of Messier 33. *Harvard College Observatory Bulletin*, 914:9–10, Dec. 1940.
- [14] V. Reshetnikov and F. Combes. Tidally-triggered disk thickening. II. Results and interpretations. *Astronomy and Astrophysics*, 324:80–90, Aug. 1997.
- [15] V. P. Reshetnikov and A. V. Mosenkov. New candidates to polar-ring galaxies from the Sloan Digital Sky Survey. *Monthly Notices of the RAS*, 483(2):1470–1480, Feb. 2019.
- [16] T. X. Thuan and P. O. Seitzer. An H I survey of Nilson dwarf galaxies. II. Statistical properties. *Astrophysical Journal*, 231:680–687, Aug. 1979.
- [17] G. Toth and J. P. Ostriker. Galactic Disks, Infall, and the Global Value of Omega. *Astrophysical Journal*, 389:5, Apr. 1992.
- [18] P. van der Kruit and K. Freeman. Galaxy disks. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 49(1):301–371, sep 2011.
- [19] P. C. van der Kruit. The three-dimensional distribution of light and mass in disks of spiral galaxies. *Astronomy and Astrophysics*, 192:117–127, Mar. 1988.

- [20] P. C. van der Kruit and L. Searle. Surface photometry of edge-on spiral galaxies. I - A model for the three-dimensional distribution of light in galactic disks. *Astronomy and Astrophysics*, 95:105–115, Feb. 1981.