

УДК 524.7:520.82; 524.7-8

## ДЕКОМПОЗИЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ УЛЬТРАТОНКИХ ГАЛАКТИК

© 2021 А. В. Антипова<sup>1\*</sup>, А. В. Мосенков<sup>2</sup>, Д. И. Макаров<sup>1</sup>, В. П. Решетников<sup>3</sup><sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия<sup>2</sup>Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

Поступила в редакцию 20 февраля 2021 года; после доработки 14 июля 2021 года; принята к публикации 14 июля 2021 года

В данной работе мы представляем фотометрическую декомпозицию спиральных галактик, видимых под очень большим углом к наблюдателю, практически с ребра. Наша выборка содержит порядка 150 галактик морфологических типов Sc–Sd с видимым отношением осей  $a/b > 10$  в фильтре  $B$ . Данный тип галактик интересен тем, что их существование сложно объяснить в рамках современной иерархической модели формирования галактик. Кроме того, галактики, видимые под углом к наблюдателю  $i \sim 90^\circ$ , позволяют изучать распределение вещества в вертикальном направлении. В работе были использованы данные обзора неба Pan-STARRS в фильтрах  $g, r, i, z, y$ . При декомпозиции применялась двухкомпонентная модель, включающая балдж и диск. В статье представлены результаты исследования данной выборки, в том числе поиск корреляций между полученными при декомпозиции параметрами, а также результаты сравнения параметров с данными каталога видимых с ребра галактик EGIS для пересекающихся объектов.

Ключевые слова: галактики: фотометрия — галактики: структура

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Тонкими называют галактики с видимым отношением осей  $a/b > 7$  в фильтре  $B$ , которые располагаются под очень большим углом к наблюдателю (практически с ребра). Этот простой критерий ограничивает галактики до Sc–Sd-морфологических типов (Karachentsev et al. 1999). Среди галактик данного типа следует выделить объекты с еще большим отношением осей  $a/b > 10$  — такие галактики называют ультратонкими (Goad and Roberts 1979). Исследование этих объектов чрезвычайно важно для понимания эволюции галактик поздних типов. Теории формирования и эволюции галактик предсказывают большое количество малых слияний за время жизни галактики, что должно приводить к разогреву диска (Kazantzidis et al. 2008) и последующему росту балджа (Naab and Burkert 2003). Согласно предсказаниям моделей иерархического сгущивания (White and Frenk 1991), в ходе космологической эволюции к настоящему моменту должна сохраниться только малая доля простых дисковых галактик. Наблюдаемая частота встречаемости этих галактик объясняется наличием у них массивного темного гало. Было показано, что массивное сферическое гало подавляет возникновение гравитационных неустойчивостей в самогравитирующем

звездном диске и определяет его минимально возможную толщину (Zasov et al. 1991, Sotnikova and Rodionov 2006, Khoperskov et al. 2010). Тем не менее Kormendy (2013) неоднократно подчеркивал, что существование большого числа массивных тонких дисков без балджа представляет большую проблему для современных теорий формирования галактик.

Галактики, видимые с ребра, являются практически единственными объектами за пределами Млечного Пути, в которых возможно непосредственное исследование вертикального распределения вещества в дисках, что, в свою очередь, открывает возможность изучения трехмерного распределения вещества в галактиках. Вследствие интегрирования светимости вдоль луча зрения галактики, видимые с ребра, имеют большую поверхностную яркость, нежели имели бы, находясь «плашмя» к наблюдателю, что упрощает поиск галактик низкой поверхностной яркости. Согласно работе Karachentsev et al. (1999), угол наклона плоских галактик известен с точностью лучше  $5^\circ$ . Немаловажным является тот факт, что галактики Sc–Sd-морфологических типов, к которым относятся ультратонкие галактики, демонстрируют более однородное распределение в локальной Вселенной, чем галактики ранних типов, что важно при исследовании крупномасштабных течений во Вселенной.

\*E-mail: osen.nayti@gmail.com

Массовое изучение ультраплоских галактик стало возможным с появлением первых каталогов, например, Revised Flat Galaxy Catalog (RFGC) (Kagachentsev et al. 1999), который содержит информацию о 4236 тонких галактиках, из которых было выделено 817 ультратонких (Kagachentseva et al. 2016). Большие выборки тонких и ультратонких дисковых галактик были проанализированы с использованием цифровых данных оптической фотометрии (Kautsch 2009) и по данным в ближнем инфракрасном диапазоне (Vizyaev et al. 2020). Также изучаются свойства отдельных галактик (Mendelowitz et al. 2000, van der Kruit et al. 2001, Matthews and Uson 2008, Banerjee and Bapat 2017, Kurapati et al. 2018). Наиболее известна и хорошо изучена галактика UGC 7321 (RFGC 2246), которая является одной из самых тонких галактик; ей посвящено много работ, например, Matthews et al. (1999), Matthews (2000), Matthews and Wood (2001), Uson and Matthews (2003), O'Brien et al. (2010a), Sarkar and Jog (2019), Aditya et al. (2020). Ряд сверхтонких галактик был изучен спектроскопически (например, Goad and Roberts 1981, Matthews and van Driel 2000, O'Brien et al. 2010b, Vizyaev et al. 2017). Имеются работы, в которых использовались данные в среднем инфракрасном диапазоне (например, Salo et al. 2015).

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.

В настоящей работе исследуется выборка примерно из 150 ультратонких галактик по данным обзора неба Pan-STARRS в фильтрах  $g$ ,  $r$ ,  $i$ ,  $z$ ,  $y$ . Для этой выборки галактик в течении нескольких лет велась программа по исследованию кинематики на 6-м телескопе CAO РАН. Для большой доли галактик получены кривые вращения по эмиссии в линии  $H\alpha$  (статья готовится к печати). В данной работе мы впервые выполняем аккуратную двумерную декомпозицию для большой однородной выборки ультратонких галактик, видимых с ребра, и сравниваем полученные параметры галактик с результатами из работы Vizyaev et al. (2014), также

включающей большую подвыборку ультратонких галактик.

В разделе 2 мы описываем формирование выборки. В разделе 3 приведена обработка данных и фотометрическая декомпозиция. В разделе 4 мы описываем полученные результаты, сравниваем их с работами других авторов и приводим различные зависимости между параметрами моделей. В разделе 5 дана краткая сводка полученных результатов.

## 2. ФОРМИРОВАНИЕ ВЫБОРКИ И ДАННЫЕ

Наша выборка основана на каталоге тонких галактик RFGC (Kagachentsev et al. 1999) и включает порядка 160 галактик с наблюдаемым отношением осей  $a/b > 10$  в фильтре  $B$  и  $a/b > 8.5$  в фильтре  $R$ . Мы отобрали галактики со склонением  $\text{Dec} \geq -25^\circ$  и размером большой оси  $a \leq 4'$ , не имеющих известных кривых вращения. Данные критерии были подобраны из соображений удобства спектроскопических наблюдений с редуктором светосилы SCORPIO на 6-м телескопе CAO РАН, так как длина щели спектрографа составляет  $6'$ . В дальнейшем планируется провести совместный анализ параметров описанных выше галактик, полученных из кривых вращений и результатов декомпозиции.

В данной работе мы используем изображения, полученные в ходе обзора неба Pan-STARRS1 (DR2)<sup>1</sup> (Chambers et al. 2016) 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 Pan-Starrs Collaboration et al. (2019), а затем объединяются в стеки (Magnier 2006).

## 3. ДЕКОМПОЗИЦИЯ

Одним из способов анализа распределения света, полученного в астрономических наблюдениях, является его моделирование с помощью аналитических функций. При данном подходе осуществляется подгонка параметров, характеризующих источник света. Исторически первый подобный анализ проводился на одномерных профилях поверхностной яркости. Однако на данный момент успешно применяется анализ двумерных изображений. Преимущество двумерного анализа заключается в

<sup>1</sup><https://ps1images.stsci.edu/cgi-bin/ps1cutouts>

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 (Point Spread Function, PSF), учитывающая влияние оптической системы и дрожание атмосферы.

В нашей работе проводилась декомпозиция двумерных изображений ультратонких галактик с помощью программного пакета DECA (Mosenkov 2014)<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>3</sup>. В данной работе мы ограничиваемся декомпозицией галактик на два компонента: балдж и диск, с определением параметров этих компонентов, поскольку для галактик, расположенных под большим углом к наблюдателю, сложно определить наличие спиральных ветвей, бара и других структур.

Перед проведением декомпозиции необходимо выполнить предварительную обработку 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 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. В данной работе для аппроксимации профиля галактик используется двухкомпонентная модель, включающая дисковый компонент и балдж. Далее под балджем мы подразумеваем любой центральный компонент, который может оказаться в том числе и баром. Диск описывается законом  $\text{sech}^2$  вдоль вертикальной шкалы и модифицированной функции Бесселя в радиальном направлении; балдж описывается законом Серсика (Mosenkov 2014). Так как наша выборка была основана на каталоге RFGC, в который входят безбалджевые галактики, мы можем предположить, что для нашей выборки параметр Серсика должен иметь значение меньше 2. Во всех случаях, когда

коэффициент Серсика превышал значение 2, мы либо использовали первоначальные параметры по данным в другой полосе, что приводило к уменьшению значения коэффициента, либо исключали из рассмотрения центральный компонент и проводили декомпозицию, используя только модель диска. Фотометрический центр являлся свободным параметром для каждого из компонентов в каждом фильтре. 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: используется фотометрический разрез галактики, проведенный вдоль большой и малой осей. На рис. 1 приведено прямое изображение галактики RFGC 2714, фотометрический разрез вдоль ее большой оси, аппроксимирующие модели и разность прямого изображения и модели.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Параметры, полученные в ходе декомпозиции, представлены в таблице 1 (приведен фрагмент таблицы, размещенной по адресу <https://www.sao.ru/edgeon/projects/UltraThin160/decomposition.html>). Также данные будут доступны на CDS Genova et al. (2000). Число галактик, для которых была проведена декомпозиция, варьируется в зависимости от фильтра:  $g$  — 138,  $r$  — 148,  $i$  — 145,  $z$  — 147,  $y$  — 126. Это связано с тем, что изображения галактик в разных фильтрах имеют разное отношение  $S/N$ , а также на некоторых кадрах могут находиться дефекты, которые не позволяют провести качественную декомпозицию.

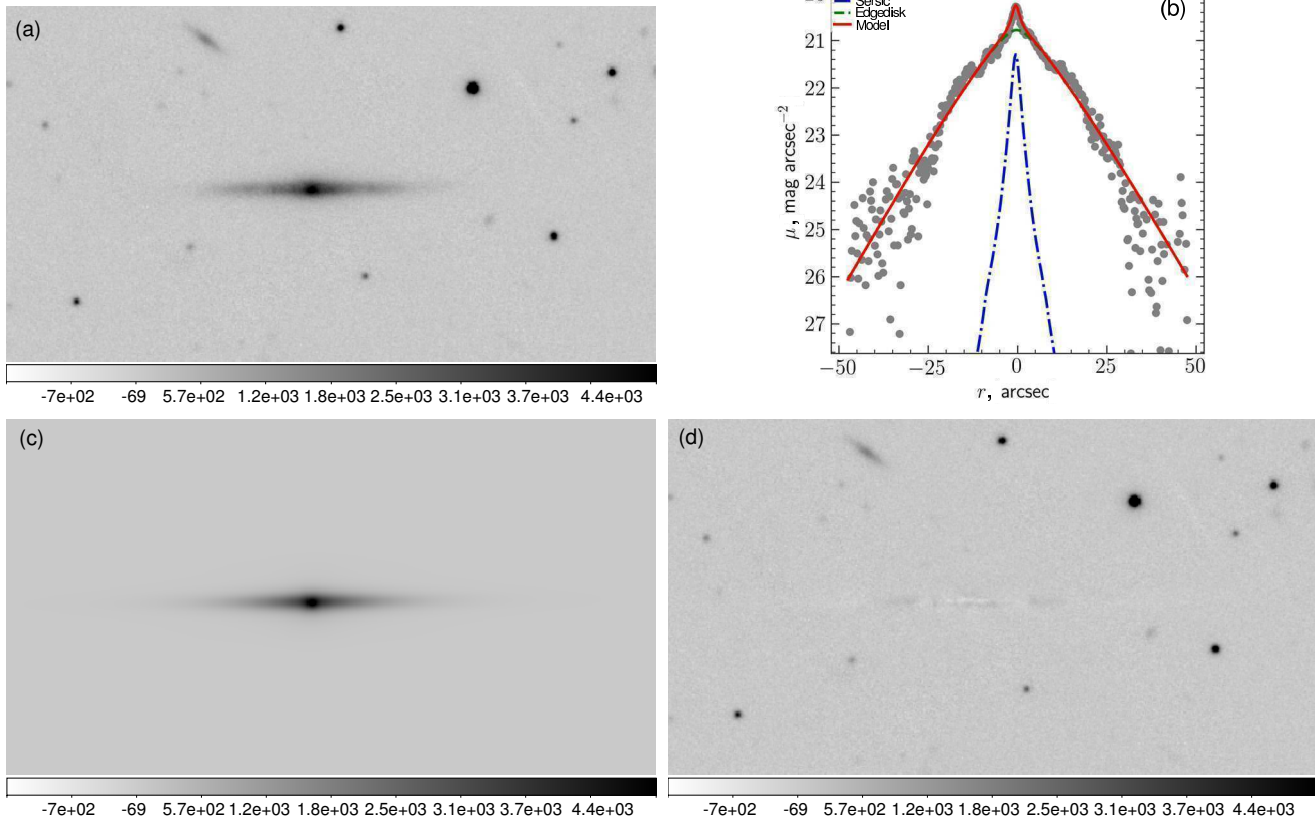
Для пересекающихся выборок мы приводим сравнение параметров, полученных в ходе декомпозиции, с данными из Catalog of Edge-on Disk Galaxies from SDSS (EGIS) (Bizuayev et al. 2014), который содержит 5747 галактик, видимых с ребра. Наши выборки пересекаются по 23 галактикам в  $r$ - и  $g$ -фильтрах и по 19 в  $i$ -фильтре. Мы привели сравнение интегральных звездных величин, поскольку они наименее подвержены влиянию методики измерений, используемой разными авторами. С учетом поглощения в нашей Галактике по работе Schlafly and Finkbeiner (2011) для фильтра  $g$  разность величин с каталогом EGIS составила  $-0^m25 \pm 0^m03$ . Разность для фильтров  $r$  и  $i$  соответственно равна  $-0^m18 \pm 0^m02$ ,  $-0^m11 \pm 0^m03$ .

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

<sup>3</sup><https://users.obs.carnegiescience.edu/peng/work/galfit/galfit.html>

**Таблица 1.** Таблица с результатами декомпозиции. RA(J2000), Dec(J2000) — координаты центра галактики;  $dx_0, dy_0$  — разность между положениями центров диска и центральным компонентом;  $\mu_d$  — центральная поверхностная яркость видимого с ребра диска;  $z_0, h$  — вертикальная и радиальная шкалы диска;  $frac_d$  — доля светимости диска галактики в полной светимости галактики;  $m_{ob}$  — видимая звездная величина центральной структуры;  $r_e$  — эффективный радиус центральной структуры;  $n$  — коэффициент Серсика;  $q$  — отношение  $b/a$  центральной структуры;  $frac_b$  — доля светимости балджа в полной светимости галактики;  $m_{tot}$  — интегральная звездная величина галактики;  $\chi^2/DOF$  - приведенный хи-квадрат. Величины были исправлены за поглощение в нашей Галактике (Schlafly and Finkbeiner 2011)

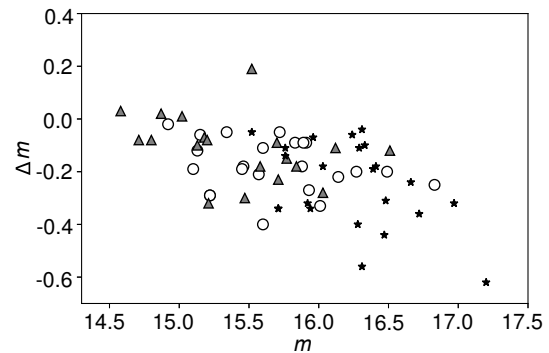
| Name      | RA(J2000),<br>deg | Dec(J2000),<br>deg | Filter   | $dx_0$ ,<br>arcsec | $dy_0$ ,<br>arcsec | $\mu_0$ ,<br>mag arcsec <sup>-2</sup> | $z_0$ ,<br>arcsec | $h$ ,<br>arcsec | $frac_d$ | $m_{ob}$ ,<br>mag | $r_e$ ,<br>arcsec | $n$  | $q$  | $frac_b$ | $m_{tot}$ ,<br>mag | $\chi^2$ |
|-----------|-------------------|--------------------|----------|--------------------|--------------------|---------------------------------------|-------------------|-----------------|----------|-------------------|-------------------|------|------|----------|--------------------|----------|
| RFGC 0006 | 0.510833          | 80.641944          | <i>r</i> | 0.11               | -0.14              | 21.86                                 | 2.80              | 14.33           | —        | 19.12             | 3.41              | 0.5  | 0.15 | —        | 19.87              | 1.19     |
| RFGC 0006 | 0.510833          | 80.641944          | <i>g</i> | 0.31               | -0.14              | 22.30                                 | 2.50              | 14.71           | 0.96     | 19.93             | 2.65              | 0.58 | 0.08 | 0.04     | 15.75              | 1.22     |
| RFGC 0006 | 0.510833          | 80.641944          | <i>i</i> | 0.78               | -0.17              | 21.61                                 | 3.01              | 14.08           | —        | 18.75             | 3.51              | 0.58 | 0.18 | —        | 19.61              | 1.19     |
| RFGC 0006 | 0.510833          | 80.641944          | <i>z</i> | 0.8                | -0.09              | 21.49                                 | 2.91              | 13.92           | —        | 18.34             | 4.02              | 0.42 | 0.18 | —        | 19.49              | 1.20     |
| RFGC 0006 | 0.510833          | 80.641944          | <i>y</i> | -0.73              | -0.18              | 21.36                                 | 2.69              | 15.98           | 0.92     | 17.97             | 3.92              | 0.71 | 0.2  | 0.08     | 14.98              | 1.21     |
| RFGC 0016 | 1.093750          | 51.675000          | <i>r</i> | -0.41              | -1.3               | 20.47                                 | 1.54              | 10.08           | 0.86     | 17.44             | 4.6               | 1.12 | 0.1  | 0.14     | 14.81              | 1.39     |
| RFGC 0016 | 1.093750          | 51.675000          | <i>g</i> | -0.2               | -1.36              | 21.51                                 | 1.55              | 10.77           | 0.86     | 18.45             | 4.59              | 0.93 | 0.11 | 0.14     | 15.56              | 1.23     |
| RFGC 0016 | 1.093750          | 51.675000          | <i>i</i> | -0.55              | -1.29              | 19.73                                 | 1.43              | 9.16            | 0.88     | 17.09             | 4.05              | 1.08 | 0.14 | 0.12     | 14.41              | 1.43     |
| RFGC 0016 | 1.093750          | 51.675000          | <i>z</i> | -0.57              | -1.24              | 19.24                                 | 1.34              | 8.61            | 0.89     | 16.86             | 3.56              | 1.02 | 0.14 | 0.11     | 14.16              | 1.34     |
| RFGC 0016 | 1.093750          | 51.675000          | <i>y</i> | -0.39              | -1.11              | 19.21                                 | 1.60              | 9.26            | 0.89     | 16.57             | 3.33              | 1.11 | 0.14 | 0.11     | 13.91              | 1.20     |
| RFGC 0046 | 2.694583          | 0.892222           | <i>y</i> | —                  | —                  | 18.76                                 | 0.46              | 5.49            | 1.0      | —                 | —                 | —    | —    | —        | 15.73              | 1.36     |
| RFGC 0046 | 2.694583          | 0.892222           | <i>z</i> | —                  | —                  | 18.86                                 | 0.38              | 5.50            | 1.0      | —                 | —                 | —    | —    | —        | 16.00              | 1.34     |
| RFGC 0046 | 2.694583          | 0.892222           | <i>r</i> | —                  | —                  | 20.06                                 | 0.57              | 6.36            | 1.0      | —                 | —                 | —    | —    | —        | 16.58              | 1.54     |
| RFGC 0046 | 2.694583          | 0.892222           | <i>i</i> | —                  | —                  | 19.72                                 | 0.62              | 6.04            | 1.0      | —                 | —                 | —    | —    | —        | 16.23              | 1.45     |
| RFGC 0058 | 3.421250          | 5.978056           | <i>r</i> | 1.11               | 1.29               | 20.46                                 | 1.30              | 8.50            | 0.86     | 17.78             | 3.42              | 0.63 | 0.2  | 0.14     | 15.63              | 1.28     |
| RFGC 0058 | 3.421250          | 5.978056           | <i>g</i> | 1.15               | 1.44               | 21.08                                 | 1.18              | 9.67            | 0.87     | 18.53             | 3.46              | 0.54 | 0.18 | 0.13     | 16.21              | 1.26     |
| RFGC 0058 | 3.421250          | 5.978056           | <i>i</i> | 0.58               | 0.99               | 20.45                                 | 1.41              | 9.39            | 0.79     | 17.06             | 4.74              | 1.39 | 0.23 | 0.21     | 15.35              | 1.29     |
| RFGC 0058 | 3.421250          | 5.978056           | <i>z</i> | 0.67               | 0.77               | 19.64                                 | 1.04              | 8.77            | 0.81     | 16.85             | 2.94              | 0.91 | 0.3  | 0.19     | 14.99              | 1.26     |
| RFGC 0058 | 3.421250          | 5.978056           | <i>y</i> | 0.37               | 0.54               | 19.39                                 | 1.26              | 7.33            | 0.87     | 17.01             | 2.06              | 1.14 | 0.6  | 0.13     | 14.80              | 1.23     |
| RFGC 0106 | 6.998333          | -15.222778         | <i>g</i> | -0.27              | 0.41               | 23.11                                 | 1.20              | 7.39            | 0.78     | 20.09             | 1.53              | 1.01 | 0.33 | 0.22     | 18.40              | 1.23     |
| RFGC 0106 | 6.998333          | -15.222778         | <i>r</i> | -0.9               | 0.21               | 22.22                                 | 0.77              | 8.91            | 0.66     | 18.84             | 1.23              | 1.64 | 0.38 | 0.34     | 17.62              | 1.22     |
| RFGC 0132 | 9.056250          | -18.868611         | <i>y</i> | 0.31               | 0.02               | 18.97                                 | 1.08              | 4.97            | 0.85     | 17.04             | 0.89              | 0.76 | 0.49 | 0.15     | 14.96              | 1.24     |
| RFGC 0132 | 9.056250          | -18.868611         | <i>i</i> | -0.59              | -0.01              | 19.44                                 | 1.16              | 4.88            | 0.94     | 18.5              | 0.0               | 0.55 | 0.5  | 0.06     | 15.47              | 1.48     |
| RFGC 0132 | 9.056250          | -18.868611         | <i>z</i> | 0.17               | 0.01               | 19.27                                 | 1.18              | 5.12            | 0.89     | 17.59             | 0.79              | 0.84 | 0.38 | 0.11     | 15.17              | 1.26     |
| RFGC 0207 | 13.378333         | 28.276944          | <i>r</i> | —                  | —                  | 19.79                                 | 1.21              | 5.58            | 1.0      | —                 | —                 | —    | —    | —        | 15.62              | 1.49     |
| RFGC 0207 | 13.378333         | 28.276944          | <i>g</i> | 0.35               | 0.65               | 21.34                                 | 1.51              | 11.18           | 0.82     | 17.93             | 3.56              | 2.0  | 0.19 | 0.18     | 15.92              | 1.22     |
| RFGC 0207 | 13.378333         | 28.276944          | <i>i</i> | —                  | —                  | 19.18                                 | 1.08              | 4.67            | 1.0      | —                 | —                 | —    | —    | —        | 15.35              | 1.51     |
| RFGC 0207 | 13.378333         | 28.276944          | <i>z</i> | —                  | —                  | 18.80                                 | 1.03              | 4.53            | 1.0      | —                 | —                 | —    | —    | —        | 15.08              | 1.32     |
| RFGC 0207 | 13.378333         | 28.276944          | <i>y</i> | —                  | —                  | 18.33                                 | 0.95              | 4.36            | 1.0      | —                 | —                 | —    | —    | —        | 14.74              | 1.22     |



**Рис. 1.** 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.

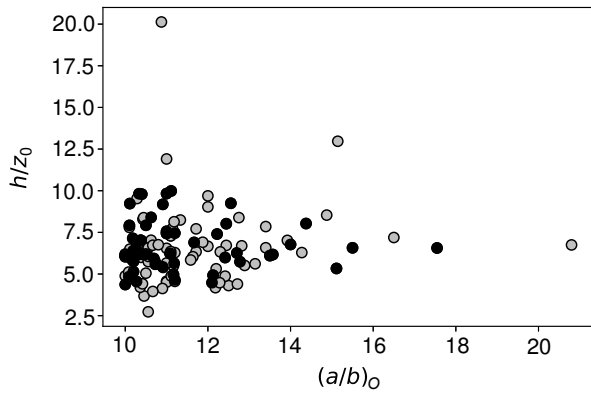
Таким образом, наши измерения показывают статистически более высокий поток, чем приводится в каталоге EGIS. Здесь и далее ошибка рассчитывалась как ошибка среднего. Разница увеличивается для более слабых галактик (рис. 2). Мы связываем это с разницей применяемых подходов. В каталоге EGIS звездные величины галактик определяются в конечных апертурах, что приводит к недооценке их блеска. В нашей работе для определения звездных величин галактик мы используем аналитическую модель, что позволяет получать оценки в бесконечной апертуре.

В каталоге RFGC галактики классифицируются как тонкие и ультратонкие по отношению их видимых осей  $a/b$ , соответствующих размеру галактики для определенной изофоты. В других работах (например, Vizyaev et al. 2017) тонкие галактики отбирают по отношению шкал  $h/z_0$ , которые соответствуют характерному масштабу изменения яркости. Мы строим зависимость отношения шкал от отношения видимых осей для нашей выборки галактик (рис. 3). Отношение осей было взято из



**Рис. 2.** Разность звездных величин, полученных в нашей работе и взятых из каталога EGIS. Незаполненными кружками показаны измерения в фильтре  $r$ , серыми треугольниками — в фильтре  $i$ , черными звездочками — в фильтре  $g$ .

каталога RFGC. Мы нашли очень слабую корреляцию, с коэффициентом Пирсона 0.07, между описанными выше величинами. Из нее следует, что галактика, отобранная по одному из критериев как



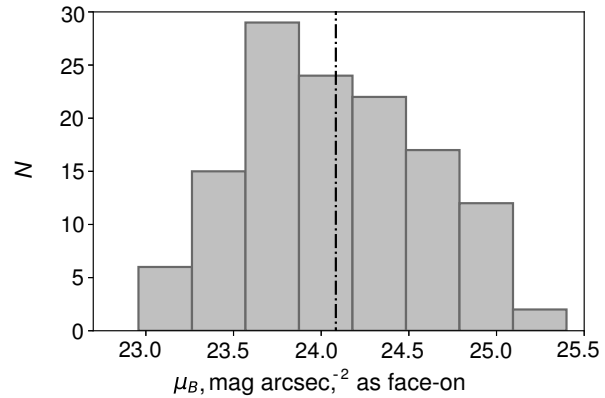
**Рис. 3.** Зависимость отношения шкал  $h/z_0$  от отношения видимых осей  $(a/b)_O$ . Отношение шкал получено в ходе данной работы в фильтре  $g$ . Отношение видимых осей взято из каталога RFGC в фильтре  $B$ . Серые кружки — галактики без центрального компонента, черные кружки — галактики с центральным компонентом.

тонкая, может не соответствовать данному классу по второму критерию.

Неоднократно подчеркивалось, что ультратонкие галактики являются галактиками низкой поверхностной яркости (Bizyaev et al. 2017, Kautsch 2009, Matthews et al. 1999), если их поверхностная яркость  $\mu_B > 22.75 \text{ mag arcsec}^{-2}$  (McGaugh 1996). Мы получили значение  $\mu_B$  галактик в положении «плашмя» в фильтре  $B$ , используя соотношение из работы Freeman (1970) и цвет  $(g-r)$  (Kostov and Bonev 2018). Распределение галактик по величине поверхностной яркости представлено на рис. 4. Среднее арифметическое значение составляет  $24.08 \pm 0.05 \text{ mag arcsec}^{-2}$ , медианное значение —  $24.05 \text{ mag arcsec}^{-2}$ . Значение центральной поверхностной яркости, величин шкал (см. рис. 5), звездной величины галактик, звездной величины балджа и экспоненциальный радиус балджа уменьшаются, а индекс Серсика увеличивается с ростом длины волны. Данный эффект может быть связан с неравномерным распределением звезд разного звездного населения и влиянием пыли.

Вывод о низкой поверхностной яркости ультратонких галактик основан на соотношении «поверхностная яркость—отношение шкал», где поверхностные яркости пересчитаны в положение «плашмя». В статье Mosenkov et al. (2014) 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.

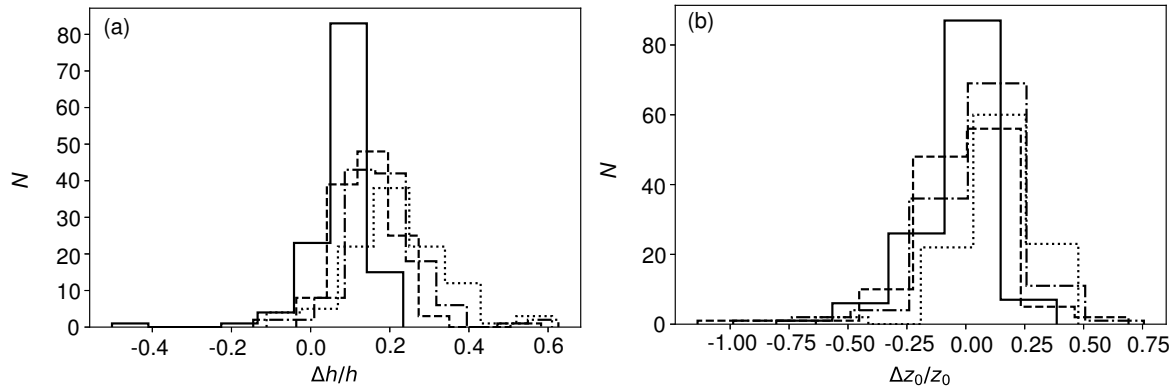
Мы строим зависимость центральной поверхностной яркости галактик от отношения шкал



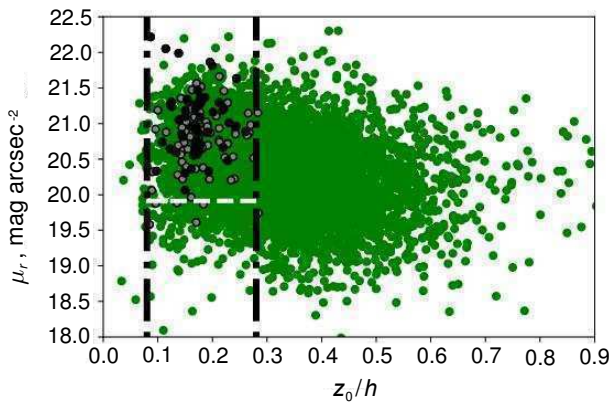
**Рис. 4.** Распределение галактик из нашей выборки по поверхностной яркости в фильтре  $B$  в положении «плашмя».

(рис. 6). При построении использовались данные из каталога EGIS (зеленые кружки) и данные, полученные в настоящей работе (серые кружки — галактики без центрального компонента, черные кружки — галактики с центральным компонентом). Отметим, что в данном случае поверхностная яркость не приводилась к положению «плашмя». В соответствии с результатами Mosenkov et al. (2014), мы не нашли значимой корреляции (коэффициент Пирсона равен  $-0.25$ ), однако для одних и тех же отношений шкал галактики из нашей выборки имеют более низкие поверхностные яркости, чем галактики из каталога EGIS.

Мы сравниваем величины поверхностной яркости галактик из каталога EGIS и из нашей выборки. Галактики из каталога были отобраны по отношению осей, соответствующему максимальному и минимальному отношению осей для галактик нашей выборки, то есть в диапазоне от 0.08 до 0.28 (штрихпунктирная линия на рис. 6). Для поверхностной яркости в фильтре  $r$  тесты Колмогорова—Смирнова для отобранных галактик из каталога EGIS и галактик нашей выборки (138 галактик) дают значение  $p\text{-value} = 6.7 \times 10^{-16}$ . При этом средние величины поверхностной яркости для них близки по значению. Средняя поверхностная яркость нашей выборки галактик  $20.86 \pm 0.04 \text{ mag arcsec}^{-2}$ , медиана  $20.88 \text{ mag arcsec}^{-2}$ . Выборка, сформированная из каталога EGIS, дает среднее значение  $20.47 \pm 0.01 \text{ mag arcsec}^{-2}$ , медианное значение —  $20.49 \text{ mag arcsec}^{-2}$ . Таким образом, галактики нашей выборки в среднем имеют чуть более низкую поверхностную яркость в сравнении с галактиками из EGIS, что отражает рис. 6. Различие в распределении и среднем значении поверхностной яркости может быть связано с критериями отбора галактик, исследуемых в данной работе.



**Рис. 5.** Зависимость размера шкал диска от длины волны. По оси абсцисс откладываются относительные изменения шкал в разных фильтрах ((a) — горизонтальная шкала, (b) — вертикальная шкала). По оси ординат — число галактик. Сплошная прямая — разность шкал ( $g-r$ ); пунктирная линия — ( $g-i$ ); штрихпунктирная — ( $g-z$ ); пунктирная линия — ( $g-y$ ).



**Рис. 6.** 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.

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 mag arcsec<sup>-2</sup> до 22.05 mag arcsec<sup>-2</sup>, белая прямая на рис. 6), из каталога EGIS и нашей выборки показывают различное распределение по цвету ( $g-r$ ),  $p$ -value =  $3.8 \times 10^{-11}$ . Опять же, как и в случае величин поверхностной яркости, средние значения показателя цвета ( $g-r$ ) для галактик нашей выборки и галактик из каталога EGIS оказались близки друг к другу:  $0^m50 \pm 0^m01$  и  $0^m62 \pm 0^m004$  соответственно. Галактики нашей выборки имеют медианное значение  $0^m51$ , выборка из каталога EGIS —  $0^m63$ . Чуть более голубой цвет галактик нашей выборки может быть связан с более молодым звездным населением галактик или с меньшим влиянием пыли.

Мы также провели тест Колмогорова—Смирнова для двух выборок галактик каталога EGIS, значения отношения шкал которых находятся в том же диапазоне, что и для галактик нашей выборки. При этом значения поверхностной яркости у галактик первой выборки находятся выше минимального значения (19.92 mag arcsec<sup>-2</sup>) поверхностной яркости галактик из нашей выборки, а второй — ниже (белая пунктирная линия на рис. 6). Эти две выборки галактик также показывают явное различие в распределении по цвету ( $g-r$ ),  $p$ -value =  $4.4 \times 10^{-16}$ . Среднее значение показателя цвета в выборке с галактиками более низкой поверхностной яркости составляет  $0^m62 \pm 0^m004$ , в выборке с более высокой —  $0^m70 \pm 0^m008$ , медианные значения соответственно равны  $0^m63$  и  $0^m74$ . Полученный результат может отражать зависимость поверхностной яркости от цвета галактик (Blanton et al. 2003). Согласно Vizuiev et al. (2017), галактики низкой поверхностной яркости имеют более голубые цвета, чем обычные галактики.

Ниже мы описываем ряд проведенных проверок для выявления особенностей галактик из пересечения каталогов RFGC и EGIS и галактик, рассматриваемых в данной работе. Морфологический тип, значение полуосей  $a$  и  $b$  в полосе  $B$ , количество соседей взяты из каталога RFGC, значения поверхностной яркости и шкал  $h$  и  $z_0$  — из каталога EGIS для фильтра  $r$ .

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 = 0.001. Различие выборок проявляется сильнее ( $p$ -value =  $1.2 \times 10^{-9}$ ) при сравне-

нии 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 и 0.190. Галактики более поздних типов оказываются в среднем тоньше.

Существование ультратонких галактик представляет собой проблему для современной теории эволюции галактик, так как многократные процессы слияния с близкими карликовыми галактиками должны приводить к разогреву диска в вертикальном направлении (Naab and Burkert 2003, Kazantzidis et al. 2008). Однако компактная сфероидальная составляющая (балдж, темное гало) может оказать стабилизирующее влияние на рост изгибных возмущений (Sotnikova and Rodionov 2005; 2006). Поэтому можно предположить, что разогрев диска в ходе поглощения спутников для таких галактик может оказаться не столь существенным. В наблюдениях встречаются галактики с тонким диском и явными событиями слияний (Reshetnikov 1995, Uson and Matthews 2003, Matthews and Uson 2004). В то же время взаимодействие галактик стимулирует рост звездообразования и, как следствие, может приводить к увеличению поверхностной яркости галактик. В недавних исследованиях было обнаружено, что количество соседей галактик низкой и высокой поверхностной яркости отличается, и галактики с высокой поверхностной яркостью находятся в более плотном окружении (Rosenbaum and Bomans 2004, Galaz et al. 2011). Для проверки мы выделили галактики, которые имеют больше трех спутников, предполагая, что наличие относительно большого количества спутников является маркером более активного мерджинга. В данном случае рассматриваются соседи диаметром не менее половины большой оси галактики, находящиеся в пределах проекционного расстояния в 10 больших осей галактики. Мы получили, что среднее значение поверхностной яркости для галактик, которые имеют больше трех спутников, равно  $20.51 \pm 0.04 \text{ mag arcsec}^{-2}$ , меньше трех спутников —  $20.60 \pm 0.02 \text{ mag arcsec}^{-2}$ , их медианные значения соответственно равны  $20.53 \text{ mag arcsec}^{-2}$  и  $20.60 \text{ mag arcsec}^{-2}$ . Отношения шкал этих выборок также близки по значению:  $0.239 \pm 0.007$  и  $0.226 \pm 0.002$ . Иными словами, спутники могут оказывать влияние на поверхностную яркость галактики и ее толщину, но пока мы не можем достоверно это доказать. Данный вопрос нуждается в дополнительных исследованиях, так как галактики RFGC-каталога имеют небольшое количество соседей, а в каталоге EGIS имеется существенная доля галактик с малым отношением шкал  $z_0/h$  и повышенной поверхностной яркостью, для которых

неизвестно количество их спутников. Кроме того, используемая методика отбора соседей не учитывает информацию об их скоростях, в результате чего в качестве спутников могут оказаться проецирующиеся галактики, а значительное ограничение на размер галактик может привести к недоучету малых спутников. Все эти эффекты вносят искажения в наши результаты.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В данной работе была проведена декомпозиция изображений порядка 150 ультраплоских галактик. Наша выборка уникальна тем, что для нее получены кривые вращения по данным 6-м телескопа САО РАН. Декомпозиция проводилась в программном пакете DECA с использованием двухкомпонентной модели «диск + балдж». Для пересекающихся с каталогом EGIS объектов мы находим, что наши измерения показывают статистически более высокий поток, чем приводится в каталоге EGIS.

Мы не находим значимой корреляции между поверхностной яркостью и отношением шкал, однако при сравнении выборки галактик, исследуемой в данной работе, с галактиками из каталога EGIS было обнаружено, что наша выборка галактик в среднем имеет чуть меньшую поверхностную яркость для одних и тех же отношений шкал.

В результате сравнения галактик морфологических типов Sc и Sd по поверхностным яркостям и отношению шкал показано, что галактики Sd-типа имеют более низкую поверхностную яркость и в среднем являются чуть более тонкими.

Мы нашли, что количество спутников может оказывать влияние на поверхностную яркость галактики и ее относительную толщину, однако для достоверного подтверждения этого результата требуются дополнительные исследования.

В дальнейшем планируется совместный анализ фотометрических и кинематических данных для выборки галактик, исследуемой в данной работе.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Благодарим рецензента за ценные замечания, существенно улучшившие текст статьи. В работе используется база данных EGIS (Bizyaev et al. 2014) каталог RFGC (Karachentsev et al. 1999).

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная работа была поддержана грантом РФФИ 19-32-50129\19.



## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликт интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. K. Aditya, I. Banerjee, A. Banerjee, and S. SenGupta, arXiv:2004.05627 (2020).
2. A. Banerjee and D. Bapat, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **466** (3), 3753 (2017).
3. D. Bizyaev, A. Tatarnikov, N. Shatsky, et al., *Astronomische Nachrichten* **341** (3), 314 (2020).
4. D. V. Bizyaev, S. J. Kautsch, A. V. Mosenkov, et al., *Astrophys. J.* **787** (1), 24 (2014).
5. D. V. Bizyaev, S. J. Kautsch, N. Y. Sotnikova, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **465** (4), 3784 (2017).
6. M. R. Blanton, D. W. Hogg, N. A. Bahcall, et al., *Astrophys. J.* **594** (1), 186 (2003).
7. K. C. Chambers, E. A. Magnier, N. Metcalfe, et al., arXiv:1612.05560 (2016).
8. K. C. Freeman, *Astrophys. J.* **160**, 811 (1970).
9. G. Galaz, R. Herrera-Camus, D. Garcia-Lambas, and N. Padilla, *Astrophys. J.* **728** (2), 74 (2011).
10. F. Genova, D. Egret, O. Bienaymé, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **143**, 1 (2000).
11. J. W. Goad and M. S. Roberts, *Bull. Amer. Astron. Soc.* **11**, 668 (1979).
12. J. W. Goad and M. S. Roberts, *Astrophys. J.* **250**, 79 (1981).
13. E. Kankare et al. (Pan-Starrs Collab.), *Astron. and Astrophys.* **626**, id. A117 (2019).
14. I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, Y. N. Kudrya, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **47**, 5 (1999).
15. V. E. Karachentseva, Y. N. Kudrya, I. D. Karachentsev, et al., *Astrophysical Bulletin* **71** (1), 1 (2016).
16. S. J. Kautsch, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **121** (886), 1297 (2009).
17. S. Kazantzidis, J. S. Bullock, A. R. Zentner, et al., *Astrophys. J.* **688** (1), 254 (2008).
18. A. Khoperskov, D. Bizyaev, N. Tiurina, and M. Butenko, *Astronomische Nachrichten* **331** (7), 731 (2010).
19. J. Kormendy, *Secular Evolution in Disk Galaxies*, Ed. by J. Falcon-Barroso and J. H. Knapen (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2013).
20. A. Kostov and T. Bonev, *Bulgarian Astron. J.* **28**, 3 (2018).
21. S. Kurapati, A. Banerjee, J. N. Chengalur, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **479** (4), 5686 (2018).
22. E. Magnier, in *Proc. Conf. on The Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies, Wailea, Maui, Hawaii, 2006*, Ed. by S. Ryan (The Maui Economic Development Board, 2006), id. E50.
23. L. Matthews and J. M. Uson, in *Proc. Conf. on Baryons in Dark Matter Halos, Novigrad, Croatia, 2004*, Ed. by R. Dettmar, U. Klein, and P. Salucci (SISSA, Trieste, 2004), p. 70.
24. L. D. Matthews, *Astron. J.* **120** (4), 1764 (2000).
25. L. D. Matthews, J. S. Gallagher, III, and W. van Driel, *Astron. J.* **118** (6), 2751 (1999).
26. L. D. Matthews and J. M. Uson, *Astron. J.* **135** (1), 291 (2008).
27. L. D. Matthews and W. van Driel, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **143**, 421 (2000).
28. L. D. Matthews and K. Wood, *Astrophys. J.* **548** (1), 150 (2001).
29. S. S. McGaugh, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **280** (2), 337 (1996).
30. C. M. Mendelowitz, L. D. Matthews, J. E. Hibbard, and E. M. Wilcots, *Bull. Amer. Astron. Soc.* **32**, 1459 (2000).
31. A. V. Mosenkov, *Astrophysical Bulletin* **69** (1), 99 (2014).
32. A. V. Mosenkov, N. Y. Sotnikova, and V. P. Reshetnikov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **441** (2), 1066 (2014).
33. T. Naab and A. Burkert, *Astrophys. J.* **597** (2), 893 (2003).
34. J. C. O'Brien, K. C. Freeman, and P. C. van der Kruit, *Astron. and Astrophys.* **515**, id. A63 (2010a).
35. J. C. O'Brien, K. C. Freeman, P. C. van der Kruit, and A. Bosma, *Astron. and Astrophys.* **515**, id. A60 (2010b).
36. V. P. Reshetnikov, *Astronomical and Astrophysical Transactions* **8** (1), 31 (1995).
37. S. D. Rosenbaum and D. J. Bomans, *Astron. and Astrophys.* **422**, L5 (2004).
38. H. Salo, E. Laurikainen, J. Laine, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **219** (1), 4 (2015).
39. S. Sarkar and C. J. Jog, *Astron. and Astrophys.* **628**, id. A58 (2019).
40. E. F. Schlafly and D. P. Finkbeiner, *Astrophys. J.* **737** (2), 103 (2011).
41. N. Y. Sotnikova and S. A. Rodionov, *Astronomy Letters* **31** (1), 15 (2005).
42. N. Y. Sotnikova and S. A. Rodionov, *Astronomy Letters* **32** (10), 649 (2006).
43. J. M. Uson and L. D. Matthews, *Astron. J.* **125** (5), 2455 (2003).
44. P. C. van der Kruit, J. Jiménez-Vicente, M. Kregel, and K. C. Freeman, *Astron. and Astrophys.* **379**, 374 (2001).
45. S. D. M. White and C. S. Frenk, *Astrophys. J.* **379**, 52 (1991).
46. A. V. Zasov, D. I. Makarov, and E. A. Mikhailova, *Sov. Astron. Lett.* **17**, 374 (1991).

**Decomposition of Images of Ultra-Flat Galaxies****A. V. Antipova<sup>1</sup>, A. V. Mosenkov<sup>2</sup>, D. I. Makarov<sup>1</sup>, and V. P. Reshetnikov<sup>3</sup>**<sup>1</sup>Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnij Arkhyz, 369167 Russia<sup>2</sup>Central (Pulkovo) Astronomical Observatory, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 196140 Russia<sup>3</sup>St. Petersburg University, St. Petersburg, 199034 Russia

We present the photometric decomposition of spiral galaxies seen at a very large, almost edge-on, angle to the observer. Our sample contains about 150 galaxies of the Sc–Sd morphological types with apparent axis ratios  $a/b > 10$  in the  $B$ -band. This type of galaxies is of special interest, because their phenomenon is difficult to explain within the modern hierarchical model of galaxy formation. In addition, the galaxies seen at an angle to the observer  $i \sim 90^\circ$  allow to study the vertical matter distribution. We used the Pan-STARRS sky survey data in the  $g$ -,  $r$ -,  $i$ -,  $z$ -, and  $y$ -bands. Our two-component decomposition model included a bulge and a disk. The paper presents the study of this sample including the search for correlations between the parameters obtained during the decomposition, as well as the results of comparing the parameters with the data from the EGIS catalog of visible edge-on galaxies for overlapping objects.

Keywords: *galaxies: photometry—galaxies: structure*