

УДК 524.74

УЛЬТРАПЛОСКИЕ ГАЛАКТИКИ, ОТОБРАННЫЕ ИЗ КАТАЛОГА RFGC. I. СВОЙСТВА ВЫБОРКИ

© 2016 В. Е. Караченцева¹, Ю. Н. Кудря¹,
И. Д. Караченцев², Д. И. Макаров^{2*}, О. В. Мельник³

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 03680 Украина

¹Астрономическая обсерватория Киевского национального университета им. Тараса Шевченко, Киев, 04053 Украина

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

³Киевский Национальный университет им. Тараса Шевченко, Киев, 01033 Украина

Поступила в редакцию 27 октября 2015; принята в печать 22 декабря 2015

Мы использовали The Revised Flat Galaxy Catalog (RFGC) для создания выборки ультраплоских галактик (UFG), покрывающей все северное и южное небо, за исключением зоны Млечного Пути. Она включает 817 спиральных галактик, видимых с ребра, выделенных в выборку UFG по их видимым отношениям осей $(a/b)_B > 10.0$ и $(a/b)_R > 8.53$ в синей и красной полосах соответственно. Из нее мы выделили образцовую выборку из 441 галактики UFG со следующими характеристиками: $V_{LG} < 10\,000$ км с⁻¹, галактическая широта $|b| > 10^\circ$ и угловой диаметр $a_B > 1'.0$ в синем цвете. Согласно тесту Шмидта, образцовая выборка 441 галактики полна до 80–90% уровня, что вполне достаточно для изучения различных свойств ультраплоских галактик. Мы нашли, что более 3/4 галактик UFG имеют морфологические типы в узком диапазоне $T = 7 \pm 1$, т.е. наиболее тонкие звездные диски встречаются среди типов Scd, Sd и Sdm. Средняя поверхностная яркость галактик UFG имеет тенденцию к ослаблению в сторону самых плоских галактик, не имеющих балджа. Диски правильной формы без признаков асимметрии составляют примерно 2/3 как среди всех галактик каталога RFGC, так и выборки UFG. Около 60% ультраплоских галактик могут рассматриваться как динамически изолированные объекты, примерно 30%, вероятно, принадлежат к рассеянным ассоциациям (волокам, стенкам) и только около 10% из них являются динамически доминирующими галактиками по отношению к своим соседям.

Ключевые слова: галактики: спиральные — галактики

1. ВВЕДЕНИЕ

В работе «The Classification of Spiral Galaxies» [1] Хаббл, отвечая на критические замечания Рейнольдса, повторно обозначил структурные признаки, которые разделяют спиральные галактики на «ранние» типы (Sa), «промежуточные» (Sb) и «поздние» (Sc). Первым и основным критерием им был назван относительный размер неразрешенной ядерной области (признак 1), т.е. в современной терминологии — размер балджа по отношению к диску. К тому времени для классификации спиралей было использовано всего 290 фотографий, поэтому Хаббл не считал отношение осей существенным критерием классификации, на чем настаивал Рейнольдс. Тем не менее признак (1) вместе с

развернутостью спиральной структуры (2) и степенью концентрации вещества в рукавах (3) явились прочной основой для статистических выводов Хаббла о связи различных характеристик галактик. В той же работе [1] Хаббл не согласился с утверждением Рейнольдса, что спирали, видимые с ребра, должны быть выделены в отдельный класс, согласно отношению их осей и картине поглощения в них.

Уточнение и развитие Хаббловской последовательности галактик связано, в основном, с широко известными работами Сэндиджа и де Вокулера (см., например, обзор [2]). Класс поздних Хаббловских спиралей Sc получил естественное продолжение для «безбалджевых» типов Scd, Sd, Sdm для всех углов наклона к лучу зрения i . При этом, как показал Караченцев [3], галактики, видимые почти с ребра ($i > 85^\circ$), гораздо легче классифици-

*E-mail: dim@sao.ru

ровать по (обратному) отношению «балдж/диск» и выделять среди них очень тонкие чисто дисковые спирали. Как было подчеркнуто Корменди и Кенникаттом [4], сверхтонкие спиральные галактики представляют особый интерес в свете их происхождения и выживания в окружении разной плотности.

Плоские галактики были известны давно как спиральные галактики поздних морфологических типов, видимые с ребра, с малым либо отсутствующим ядром [5, 6]. К настоящему времени проведено большое количество наблюдений плоских галактик в оптическом и радиодиапазонах (см. обзор [7]). Однако систематическая каталогизация плоских галактик стала возможной только на однородных обзорах неба с выполнением определенных условий отбора.

Первый каталог плоских галактик, видимых с ребра, Flat Galaxy Catalog, FGC(E), и его уточненная версия RFGC опубликованы в [8, 9]. Каталог RFGC [9] охватывает все небо и содержит 4236 галактик, визуально отобранных на синих (далее B) и красных (далее R) картах Первого Паломарского обзора неба POSS-I и обзора ESO/SERC с «синим» в системе POSS-I отношением осей $(a/b)_B \geq 7$ при угловом диаметре (большая ось) $a_B \geq 0.6$. Далее для краткости будем использовать выражения «синий (красный) диаметр» и «синее (красное) отношение осей», говоря о диаметре и отношении осей изображения галактики на синей (красной) карте. Критерий отношения осей был в дальнейшем использован как один из основных при создании каталогов плоских спиральных галактик: в ближнем инфракрасном 2MASS диапазоне [10], 2MFGC [11] и в разных версиях Слоунского обзора: SDSS DR1 [12] и SDSS DR7 [13].

В обзорной статье [7] описаны различные модели формирования и эволюции тонких дисков, свойства таких объектов по данным из каталогов [8, 9, 12], а также результаты наблюдений отдельных объектов. Подробности можно найти в приведенном там же обширном списке литературы. Заметим, что выбор критерия видимого отношения осей для сверхтонких галактик у разных авторов является достаточно произвольным (см. обзор наблюдательных данных в [7]). Например, в [14] даны результаты спектральных наблюдений для галактик с a/b в интервале 9–20 (оптический диапазон).

Хорошо известная как «классическая» сверхтонкая изолированная галактика UGC 7321 = FGC 1403 = RFGC 2246 = 2MFGC 9681 (KIG 524 [15] = 2MIG 1699 [16]) имеет в RFGC отношения осей $(a/b)_B = 16$, $(a/b)_R = 13$. А наблюдения в линии $H\alpha$ дают для подсистемы эмиссионных областей H II этой галактики отношение осей $(a/b)_{H\alpha} = 38$ (см. рис. 1).

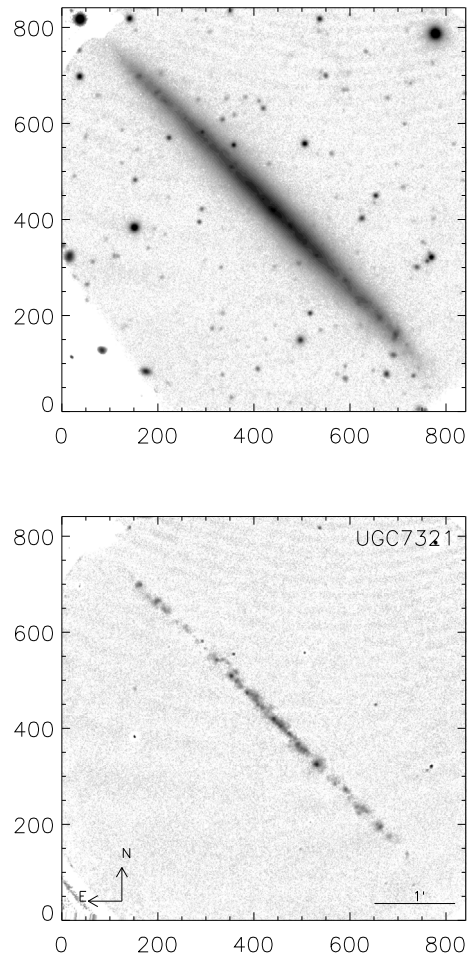


Рис. 1. Пара изображений галактики UGC 7321, полученных на 6-метровом телескопе ВТА с редуктором SCORPIO [17]. Вверху: снимок в континууме с фильтрами SED607+SED707, $a/b = 14$. Внизу: снимок в линии $H\alpha$ с вычитанием континуума, $a/b = 38$. Масштаб и ориентация показаны в углах нижнего снимка.

Эти числа показывают, что отношение осей галактики зависит от цвета (возраста) ее звездного населения. Наиболее плоскую подсистему образуют самые молодые звезды с возрастом порядка 10 млн лет, сосредоточенные в областях H II.

Для всех галактик каталога FGC(E) видимое отношение осей в синем диапазоне не превышает величины $(a/b)_B = 22.4$. Этому соответствует максимальное значение истинного (пространственного) отношения осей 25.8 [18]. Последняя величина имеет важное значение для моделей образования и устойчивости тонких звездных дисков.

Целью настоящей работы является создание образцовой выборки сверхтонких галактик из каталога RFGC и сравнение представленных в нем свойств таких объектов, находящихся в различном

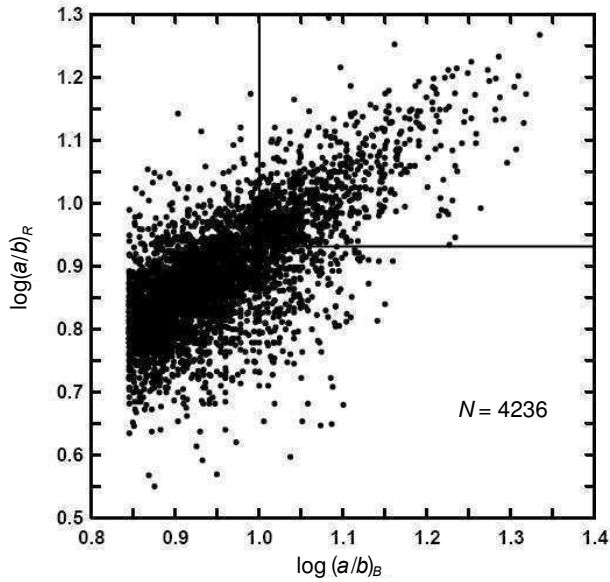


Рис. 2. Распределение галактик RFGC по красным (R) и синим (B) отношениям осей. В правом верхнем углу располагаются галактики UFG, ограниченные линиями $(a/b)_B = 10$ и $(a/b)_R = 8.53$.

окружении. В разделе 2 мы кратко перечисляем эффекты селекции, влияющие на изображение спиральной галактики, видимой с ребра, и описываем процедуру отбора сверхтонких галактик из каталога RFGC. В разделе 3 приведены характеристики сверхтонких галактик в сравнении со всеми галактиками каталога RFGC. В разделе 4 мы рассматриваем разные способы выявления окружения и сравниваем между собой каталожные свойства сверхтонких галактик, находящихся в разном окружении. Краткие выводы даны в разделе 5.

2. ВЫБОРКА СВЕРХТОНКИХ СПИРАЛЬНЫХ ГАЛАКТИК, НАБЛЮДАЕМЫХ С РЕБРА

Распределение RFGC-галактик по синим (B) и красным (R) отношениям осей представлено на рис. 2. Как было показано в [19], линейная регрессия между ними имеет вид $(a/b)_R = 0.853(a/b)_B$ с довольно значительной дисперсией. Чтобы отсеять галактики с заметными балджами, в качестве критерия сверхтонкой (ультраплатной) галактики (Ultra Flat Galaxies = UFG) мы выбрали условия: $(a/b)_B \geq 10.0$ и $(a/b)_R \geq 8.53$ (правая верхняя часть рис. 2).

Очевидно, что на статистике наблюдаемых свойств выделенных таким образом сверхтонких галактик сказываются различные эффекты селекции. Перечислим основные:

(1) У далеких/мелких/слабых галактик отношение осей определяется, в основном, размером малой оси b , на который влияет разрешение эмульсии и качество изображения (seeing). Так, для галактики с $a = 36''$ и $a/b = 10$ величина $b = 3.6''$, что сравнимо с типичным разрешением на снимках Паломарского обзора порядка $3''$.

(2) Количество данных о лучевых скоростях далеких, $V_{LG} > 10\,000$ км с⁻¹, галактик быстро падает с увеличением расстояния, поэтому становится трудным оценивать число их физических спутников.

(3) На вид галактик в зоне Млечного Пути, особенно поздних спиралей, ориентированных с ребра, влияет поглощение в нашей Галактике, а также звезды переднего фона.

Распределение угловых размеров у галактик каталога RFGC и влияние отмеченных выше эффектов хорошо видны на панелях рис. 3, где представлены диаграммы « $\lg(b_B) - \lg(a_B)$ » и « $\lg(b_R) - \lg(a_R)$ » слева и справа соответственно. Тонкая линия на обеих панелях определяется условием $a/b = 7$, то есть $\lg(b) = \lg(a) - 0.845$. Отчетливо заметны такие особенности: а) в красном цвете галактики RFGC выглядят в среднем толще, чем в синем; б) дисперсия диаметров возрастает с уменьшением размеров галактик; в) при значении $\lg(b) \sim -1.3$ ($b \sim 3''$) становится заметным недобор числа галактик из-за предела, обусловленного разрешением фотоэмульсии. Для мелких галактик видна дискретность измерения малого диаметра.

Совместное выполнение условий $(a/b)_B \geq 10.0$ и $(a/b)_R \geq 8.53$ выделяет из всего RFGC-каталога 19% ультраплатных галактик с диаметром $a_B \geq 0.6$. Эту выборку 817 галактик назовем «базовой UFG». Учитывая влияние упомянутых эффектов селекции, мы вводим дополнительные ограничения: $V_{LG} \leq 10\,000$ км с⁻¹, галактическая широта $|b| > 10^\circ$. Нужным критериям сверхтонких галактик удовлетворяет 490 объектов (выборка « $N = 490$ »).

В таблице 1 приведено сравнение двумерных распределений галактик каталога RFGC по лучевым скоростям в системе Местной группы и синим угловым большим диаметрам. Оценки лучевых скоростей взяты нами из баз данных NED ([www.ned.ipac.caltech.edu](http://ned.ipac.caltech.edu)) и HyperLeda (<http://leda.univ-lyon1.fr/>). В знаменателе дроби дано число всех галактик RFGC ($a_B \geq 0.6$, $(a/b)_B \geq 7$) с $V_{LG} \leq 10\,000$ км с⁻¹ (это выборка « $N = 2078$ »), в числителе — число сверхтонких, а в скобках — процент сверхтонких галактик в соответствующем бине.

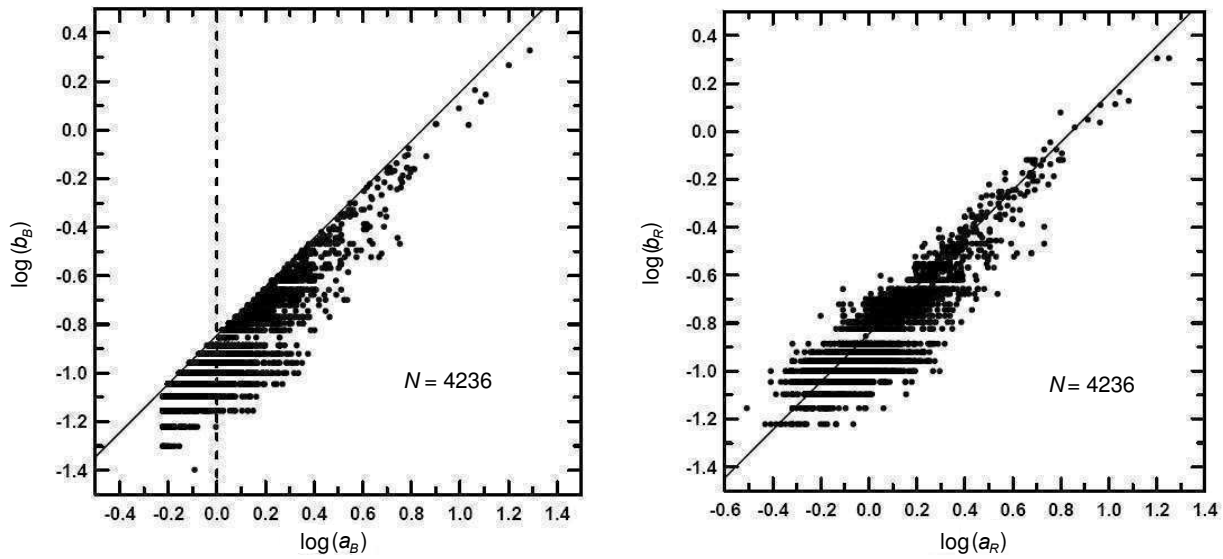


Рис. 3. Слева показано распределение 4236 плоских галактик каталога RFGC по синим большим и малым диаметрам $\lg(b_B)$ от $\lg(a_B)$ в минутах дуги. Тонкая линия соответствует условию $(a/b)_B = 7$, то есть $\lg(b_B) = \lg(a_B) - 0.845$. Штриховая линия проведена для значения $a_B = 1'.0$. Справа показано распределение 4236 плоских галактик каталога RFGC по красным большим и малым диаметрам $\lg(b_R)$ от $\lg(a_R)$. Тонкая линия соответствует условию $(a/b)_R = 7$.

Из данных таблицы 1 видно существенное уменьшение доли сверхтонких галактик с угловыми диаметрами от $0'.60$ до $0'.99$ во всех интервалах лучевых скоростей. Заметного различия в доле сверхтонких галактик выборки $N = 490$ не наблюдается во всех интервалах лучевых скоростей, кроме первого (где малое число объектов) и последнего. Напомним, что на статистику для далеких галактик влияют эффекты селекции, отмеченные выше. Поэтому для достижения приемлемой полноты мы выделяем более рафинированную выборку, $N = 441$ (последний столбец таблицы 1), в которой соблюдается условие $a_B \geq 1'.0$ вместо $a_B \geq 0'.6$. Она составляет около 10% от полного числа плоских галактик RFGC. Ранее [20] мы нашли, что сам каталог FGC(E) имеет примерно 90% полноту при $a_B \geq 1'.0$. Данные таблицы 1 показывают, что и выборка сверхтонких галактик практически полна для галактик со скоростями менее $10\,000 \text{ км с}^{-1}$ именно при $a_B \geq 1'.0$.

Тест Шмидта $\langle V/V_{max} \rangle$ [21] для выборки $N = 441$ приведен на рис. 4. Для максимального и начального углового диаметра были приняты значения $6'$ и $0'.6$ соответственно. Видно, что полнота на уровне 80–90% достигается при $a_{min} \sim 1'.0$.

В Приложении мы приводим список номеров RFGC для 817 галактик базовой UFG-выборки. RFGC-номера галактик рафинированной UFG-выборки $N = 441$ отмечены двумя звездочками, 49 галактик, не входящие в UFG-выборку, но

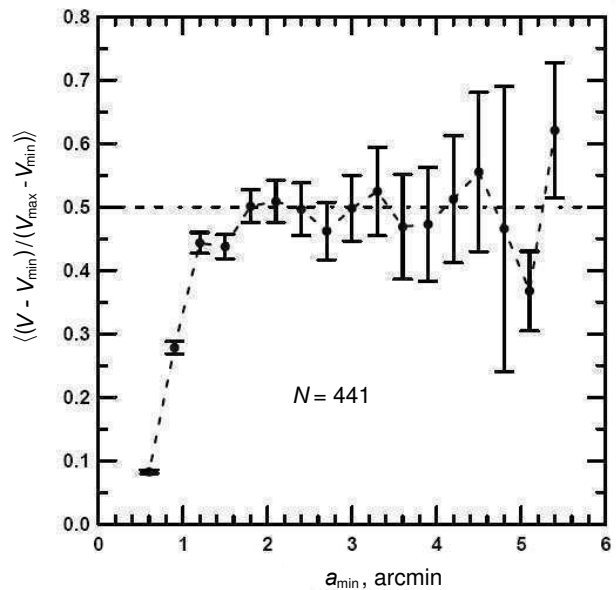


Рис. 4. Тест Шмидта для выборки $N = 441$

входящие в выборку $N = 490$, отмечены одной звездочкой.

На рис. 5 приводятся карты распределений на небе в экваториальных координатах для галактик RFGC (точки) и выборки UFG (заполненные кружки). Серой размывкой обозначена область сильного поглощения вблизи галактического экватора $|b| > 10^\circ$. Представлены срезы по лучевым скоростям: $V_{LG} < 3000 \text{ км с}^{-1}$,

Таблица 1. Распределение галактик RFGC по синим большим диаметрам и лучевым скоростям V_{LG}

V_{LG} , км с ⁻¹	$a_B \geq 2'.0$	1'99–1'50	1'49–1'00	0'99–0'60	$a_B \geq 0'.6$	$a_B \geq 1'.0$
(0–1000]	4/35 (11)	2/11 (18)	0/5 (0)	0/5 (0)	6/56 (11)	6/51 (12)
(1000–2000]	16/69 (23)	9/27 (33)	5/23 (22)	3/22 (14)	33/141 (23)	30/119 (25)
(2000–3000]	20/79 (25)	7/36 (19)	7/57 (30)	3/28 (11)	47/200 (24)	44/172 (26)
(3000–4000]	12/38 (32)	16/47 (34)	19/61 (31)	3/36 (8)	50/182 (27)	47/146 (32)
(4000–5000]	14/39 (36)	14/65 (22)	39/125 (31)	8/53 (15)	75/282 (27)	67/229 (29)
(5000–6000]	12/33 (36)	15/53 (28)	40/129 (31)	8/65 (12)	75/280 (27)	77/215 (36)
(6000–7000]	9/24 (38)	14/36 (39)	41/117 (35)	6/108 (6)	70/285 (25)	64/177 (36)
(7000–8000]	5/14 (36)	8/34 (24)	31/89 (38)	6/99 (6)	50/236 (21)	44/137 (32)
(8000–9000]	3/6 (50)	12/26 (46)	30/90 (33)	4/92 (4)	49/214 (23)	45/122 (37)
(9000–10 000]	2/2 (100)	3/18 (17)	22/71 (31)	8/111 (7)	35/202 (17)	27/91 (30)
(0–10 000]	97/339 (29)	100/353 (28)	244/767 (32)	49/620 (8)	490/2078 (24)	441/1459 (30)
> 10 000	2	27	255	657	941	284
RFGC, with V_{LG}	341	380	1022	1277	3020	1743
All RFGC	343	384	1174	2335	4236	1901

$3000 < V_{LG} < 10\,000$ км с⁻¹, $V_{LG} > 10\,000$ км с⁻¹, лучевые скорости не измерены. Совокупность рисунков дает представление о взаимном расположении объектов выборки UFG и всех плоских галактик каталога RFGC на различной глубине.

На верхней панели рис. 5 видно, что близкие сверхтонкие галактики едва очерчивают Местное сверхскопление. Избыток UFG в области центра Местного сверхскопления (RA = 12^h5, Dec = +12°) по сравнению с однородным распределением составляет всего $\Delta N \sim 5$ галактик. Срез 3000–10 000 км с⁻¹ (вторая панель сверху) заполнен наиболее равномерно в основном благодаря наблюдениям на 300-м радиотелескопе в Аресибо [22], на 6-м телескопе БТА [23] и 100-м радиотелескопе в Эффельсберге [24, 25]. Галактики в этом интервале лучевых скоростей также показывают едва заметную концентрацию в областях известных скоплений Coma и Pisces–Perseus. Заметим, что рис. 5 и данные таблицы 1 хорошо дополняют друг друга. Так, в двух последних строчках таблицы 1 для галактик с угловыми диаметрами в интервале 0'60–0'99 отчетливо заметен недостаток измерений лучевых скоростей. При этом избыточная локализация галактик без лучевых скоростей отмечается в южном полушарии (нижняя панель).

3. СВОЙСТВА УЛЬТРАПЛОСКИХ ГАЛАКТИК ПО СРАВНЕНИЮ С ГАЛАКТИКАМИ RFGC

Среди 2078 галактик каталога RFGC с лучевыми скоростями $V_{LG} < 10\,000$ км с⁻¹ среднее значение лучевой скорости в системе Местной группы составляет 5553 ± 54 км с⁻¹. Для выборки галактик UFG с угловыми диаметрами более 0'6 ($N = 490$) и более 1'0 ($N = 441$) среднее значение скорости равно соответственно 5438 ± 104 км с⁻¹ и 5366 ± 110 км с⁻¹. То есть все три выборки существенно различаются по глубине.

В таблице 2 приводятся распределения числа галактик по морфологическим типам спиралей в исходном каталоге RFGC, в выборке сверхтонких галактик, а также в выборках RFGC и UFG с измеренными скоростями. В двух последних строках таблицы 2 указано процентное содержание галактик выборки сверхтонких галактик в соответствующих бинах. В первой строке даны обозначения типов спиралей в Хаббловской системе, во второй — в цифровой системе де Вокулера. Как было показано в [19], наши оценки типов отличаются от цифровых оценок де Вокулера в среднем не более чем на ± 1 . В этой же работе [19] было отмечено, что галактики RFGC не показывают зависимости видимого сжатия (или типа) от лучевой скорости вплоть до значений порядка 10 000–12 000 км с⁻¹.

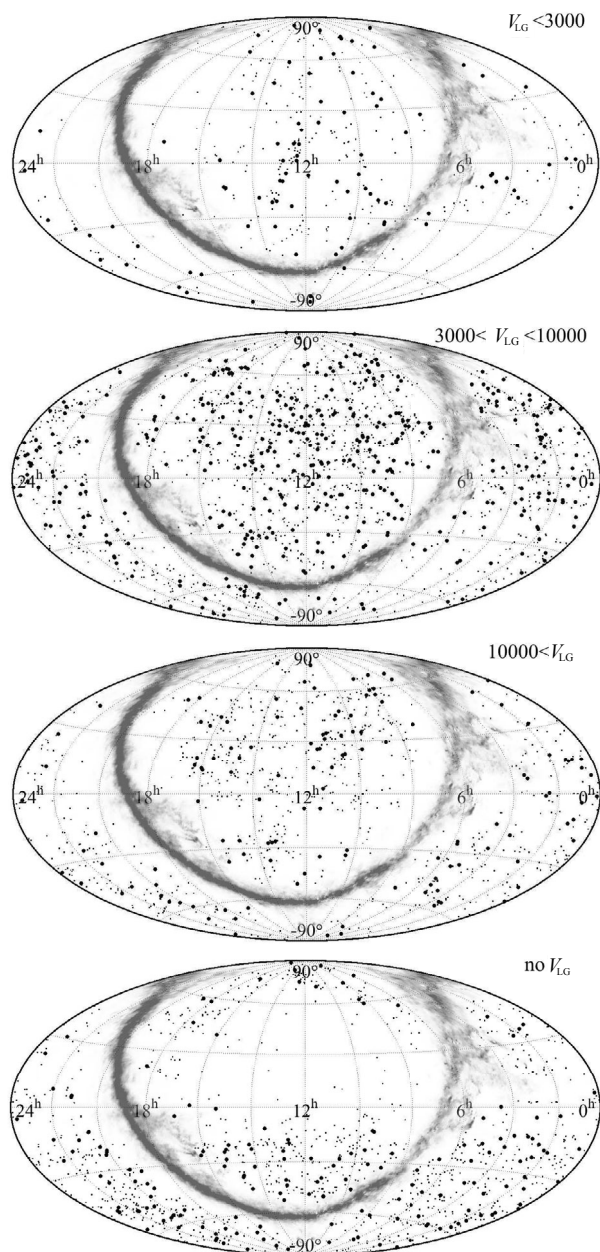


Рис. 5. Карты распределений на небе в экваториальных координатах для галактик RFGC (точки) и выборки UFG (заполненные кружки). Серой размывкой обозначена область сильного поглощения вблизи Галактического экватора $|b| \leq 10^\circ$. Сверху вниз представлены срезы по лучевым скоростям: $V_{LG} < 3000$ км с⁻¹, $3000 < V_{LG} < 10\,000$ км с⁻¹, $V_{LG} > 10\,000$ км с⁻¹; лучевые скорости не измерены.

Как следует из данных таблицы 2, пик числа галактик для всего каталога, а также выборки $N = 2078$, приходится на тип Sc. Для выборок UFG $N = 817$ и $N = 441$ максимум смещается к типу Sd, причем как в общем, так и в долевого распределениях. Доля сверхтонких галактик быстро падает от типа Sd к еще более поздним типам Sdm и Sm, по-

скольку в динамике последних значительную роль играют турбулентные движения. Как видим, 80% UFG-галактик имеют морфологические типы в узком интервале значений $T = 7 \pm 1$. Это согласуется с результатом [6]: самые тонкие звездные диски встречаются у галактик, классифицируемых как Scd, Sd, Sdm.

Поверхностные яркости для галактик RFGC оценивались визуально и разделялись по индексу средней поверхностной яркости SB: I, II, III и IV (галактики класса I имеют самую высокую поверхностную яркость). В таблице 3 приводятся распределения числа плоских галактик RFGC, выборки $N = 2078$ и выборки $N = 441$ по классу поверхностной яркости SB. Максимум в распределениях 55–63% для всех выборок приходится на SB = II (что соответствует примерно $25.4 \text{ mag/arcsec}^2$ в B-полосе [8]). В двух последних строках таблицы 3 указано процентное содержание галактик UFG среди RFGC-галактик каждого класса SB с учетом и без учета измерения лучевых скоростей. Из этих данных видно, что имеет место уменьшение доли объектов высокой поверхностной яркости при переходе от плоских RFGC-галактик к ультраплоским UFG. Эта тенденция соответствует ожидаемому отсеvu галактик с небольшими балджами (типа Sbc) при построении выборки UFG. Иными словами, при переходе от плоских к ультраплоским галактикам происходит сдвиг индекса SB к более слабым поверхностным яркостям, SB = III, IV (или примерно $25.6\text{--}25.9 \text{ mag/arcsec}^2$ [8]).

Таким образом, типичной сверхтонкой галактикой оказывается спиральная галактика типа Sd с пониженной поверхностной яркостью. Причина ослабленной поверхностной яркости может быть вызвана более сильным поглощением света у сверхтонких галактик, видимых строго с ребра, или же меньшей плотностью их звездных дисков.

Асимметрию формы плоской галактики довольно трудно оценить без достаточно глубокой поверхностной фотометрии. Так что результаты, приводимые в таблице 4, нужно оценивать как предварительные. Асимметрия формы характеризовалась в каталоге RFGC индексом A_s , который принимал значения 0, 1 и 2 для правильных, промежуточных и явно искаженных форм соответственно. Как видно из табличных данных, плоские галактики правильной формы составляют от 62 до 70%, а наиболее асимметричные — от 5 до 8% как во всем каталоге, так и в отдельных выборках. Из данных таблицы 4 также следует, что доля сверхтонких галактик разных типов асимметрии среди галактик выборки $N = 2078$ составляет примерно 20%, показывая слабую тенденцию к уменьшению от правильных форм к промежуточным и искаженным формам.

Таблица 2. Распределение галактик RFGC и ультраплоских галактик по типам спиралей

Type	Sab	Sb	Sbc	Sc	Scd	Sd	Sdm	Sm	All
T	2	3	4	5	6	7	8	9	–
RFGC	1	151	573	1535	960	718	252	37	4236
$N = 2078$	8	82	266	544	490	465	195	28	2078
UFG, $N = 817$	0	11	31	252	211	270	40	2	817
UFG, $N = 441$	0	9	17	81	109	188	35	2	441
N817/NRFGC, %	7	5	16	22	38	16	5	19	
N441/N2078, %	11	6	15	22	40	18	7	21	

Таблица 3. Распределение галактик RFGC и сверхтонких галактик по индексу средней поверхностной яркости SB

SB	I	II	III	IV	All
RFGC	242	2480	1369	145	4236
$N = 2078$	190	1306	534	48	2078
UFG, $N = 817$	23	451	310	33	817
UFG, $N = 441$	22	268	139	12	441
N817/NRFGC, %	10	18	23	23	19
N441/N2078, %	12	20	26	25	21

Таблица 4. Распределение галактик RFGC и сверхтонких галактик по индексу асимметрии As

As	0	1	2	All
RFGC	2830	1159	247	4236
$N = 2078$	1260	640	178	2078
UFG, $N = 817$	568	209	40	817
UFG, $N = 441$	272	135	34	441
N817/NRFGC, %	20	18	16	19
N441/N2078, %	22	21	19	21

Таким образом, по нашим данным не видно связи между относительной толщиной звездного диска спиральной галактики и степенью возмущения его периферии.

4. СВОЙСТВА СВЕРХТОНКИХ ГАЛАКТИК В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОКРУЖЕНИЯ

Плотность окружения мы определяли несколькими способами.

(1) В каталоге RFGC для каждой галактики диаметром a_B подсчитывались значимые соседи с угловыми диаметрами в интервале $[a_B/2 - 2a_B]$, находящиеся в круге радиусом $R = 10a_B$. При этом соседи выявлялись для всех галактик одинаковым способом. На момент публикации каталога данные о лучевых скоростях галактик RFGC и тем более их слабых соседей были очень скудными. Поэтому приведенные числа соседей в проекции дают представление только о поверхностной плотности фона вокруг галактик RFGC без учета его глубины. На рис. 6 приведены гистограммы распределения галактик четырех выборок: RFGC, $N = 2078$, $N = 490$ и $N = 441$ по числу значимых соседей. Правая шкала на каждой панели указывает процент галактик в соответствующей выборке с обозначенным числом соседей в проекции. Ход распределения примерно одинаков для рассмотренных выборок, а более трех соседей имеют всего 2–5% галактик в каждой выборке и во всем каталоге RFGC. Как следует из данных рис. 6, имеется слабая тенденция роста доли изолированных галактик при переходе от плоских к ультраплоским галактикам.

(2) Для каждой сверхтонкой галактики выборки UFG мы определяли число галактик с относительными лучевыми скоростями в интервале $+500, -500 \text{ км с}^{-1}$ до предельного проекционного расстояния $R = 750 \text{ кпк}$. В отличие от предыдущего случая здесь уже учитывались лучевые скорости галактик. Однако соседи, как и в отборе (1), не могут гарантированно образовывать физические системы с галактиками выборки UFG, хотя и входят с ними в достаточно хорошо обозначенное общее поле по скоростям и расстояниям.

Распределение сверхтонких галактик по числу таких соседей для выборок $N = 490$ и $N = 441$ приведено на панелях рис. 7 соответственно слева и справа. Левая шкала панелей показывает число

галактик в бине, а правая — их процентное содержание. Последнее значение на обеих панелях соответствует случаям семнадцати и более соседей.

Из данных рис. 7 видно, что только треть (31%) сверхтонких галактик не имеют соседей в указанном интервале лучевых скоростей и проекционных расстояний. Эта величина меньше, чем доля изолированных галактик, 56%, при учете соседей способом (1). Следует отметить, однако, что далеко не все соседи со скоростями в интервале $+500, -500 \text{ км с}^{-1}$ и проекционными расстояниями $R < 750 \text{ кпк}$ являются физическими спутниками ультраплоских галактик. Некоторые из них могут входить совместно с UFG в диффузные элементы крупномасштабной структуры (волока и стенки).

(3) Ко всем галактикам с лучевыми скоростями меньше $20\,000 \text{ км с}^{-1}$ в базе HyperLeda на галактической широте $|b| > 10^\circ$ был применен алгоритм кластеризации, подробно описанный в [26, 27]. При объединении галактик в системы различной населенности использовались индивидуальные характеристики всех галактик, а именно лучевые скорости, проекции взаимных расстояний и массы, определяемые по интегральной светимости в инфракрасной K_s -полосе. Вначале выделялись физические пары, удовлетворяющие условиям полной отрицательной энергии и нахождению пары внутри сферы «нулевой скорости» [28]. Затем все пары с каким-либо общим компонентом объединялись в группу. В результате была получена информация для всего неба о группах галактик и их окружении до $10\,000 \text{ км с}^{-1}$. Полученный каталог использовался для анализа окружения галактик из RFGC-каталога и выборок $N = 490$ и $N = 441$. В данной работе мы использовали для описания окружения такой статус: «isol» — изолированная галактика, «root» — главный член группы, «mem» — член группы. Таким образом, способ (3) дает более точное представление о физическом окружении сверхтонких галактик, чем способ (2) и тем более (1).

Для выборок $N = 490$ и $N = 441$ мы определили частоту встречаемости галактик, находящихся в различном окружении. Рассматривались случаи отбора способом (3) со статусом галактики «isol», «root» и «mem», а также способом (2), когда галактика имеет 0, 1 и 2 или больше соседей. Результаты представлены в таблице 5. Как следует из этих данных, более 60% сверхтонких галактик относятся к категории динамически изолированных объектов, около 30% являются неглавными членами рассеянных группировок (ассоциаций, волокон, стенок) и только десятая часть классифицируется как динамически доминирующие объекты по отношению к своим ближайшим соседям. Числа в трех правых колонках таблицы 5 согласуются с данными рис. 6,

Таблица 5. Частота встречаемости сверхтонких галактик в различном динамическом окружении

Количество	isol	root	mem	соседи		
				0	1	≥ 2
$N = 490$	303	43	144	273	120	97
%	62 ± 4	9 ± 2	29 ± 3	56 ± 4	24 ± 3	20 ± 2
$N = 441$	267	41	133	248	110	83
%	61 ± 4	9 ± 2	30 ± 3	56 ± 4	25 ± 3	19 ± 2

показывая, что более половины UFG-галактик, у которых отсутствуют соседи по способу отбора (2), являются динамически обособленными объектами.

Анализируя средние характеристики ультраплоских галактик, относящихся к категориям «isol», «root» и «mem», мы отметили следующие тенденции. Изолированные сверхтонкие галактики имеют в среднем более поздний морфологический тип. Самая слабая средняя поверхностная яркость характерна для изолированных UFG-галактик. Степень асимметрии сверхплоской галактики показывает положительную корреляцию с числом ее соседей.

5. ОБСУЖДЕНИЕ И КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Среди 4236 плоских галактик каталога RFGC [9], у которых по определению синие отношения осей удовлетворяют условию $(a/b)_B \geq 7.0$, нами выделена выборка ультраплоских спиральных галактик, Ultra Flat Galaxies, UFG. Эта выборка охватывает все северное и южное небо (кроме зоны Млечного Пути) и насчитывает 817 галактик с синими и красными отношениями осей $(a/b)_B \geq 10.0$ и $(a/b)_R \geq 8.53$ соответственно. Внутри этой исходной (базовой) выборки сверхтонких спиралей, видимых с ребра, мы фиксируем рафинированную выборку 441 UFG-галактики, удовлетворяющих следующим условиям: лучевая скорость галактики $V_{LG} < 10\,000 \text{ км с}^{-1}$, галактическая широта $|b| > 10^\circ$, большой угловой диаметр $a_B \geq 1'0$. Согласно тесту Шмидта, список из 441 UFG-галактики, обозначенный как (***) в Приложении, имеет полноту примерно 80–90% и может служить образцовой выборкой для анализа различных характеристик ультраплоских галактик.

В качестве прототипа UFG-галактик мы отмечаем UGC 7321=RFGC 2246 — изолированную спираль с синим и красным отношением осей 16 и 13 соответственно. На снимке в линии $H\alpha$ [17] подсистема молодых (порядка 10 млн лет) звезд, погруженных в области H II, имеет видимое отношение осей $(a/b)_{H\alpha} = 38$, что является рекордным

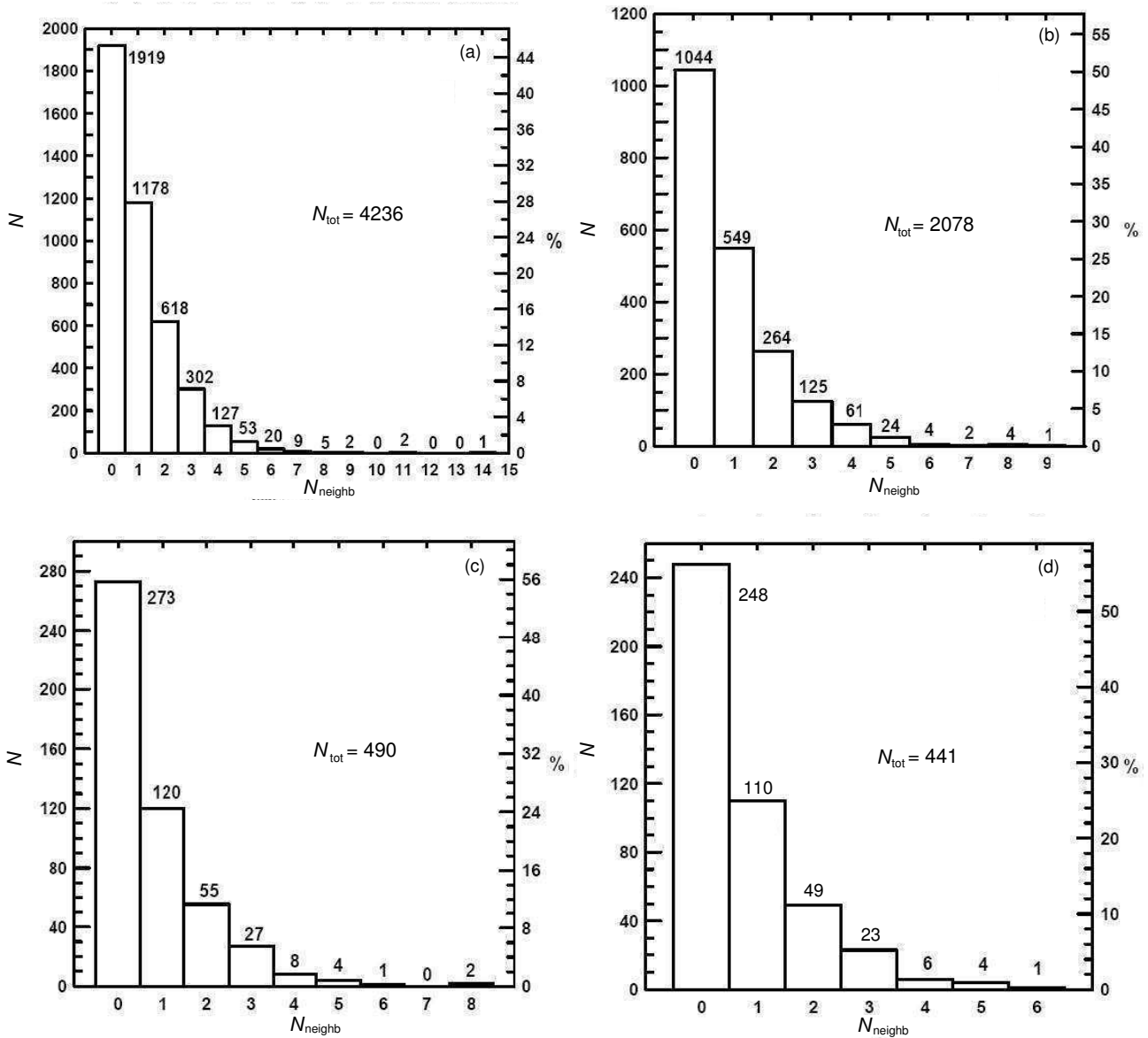


Рис. 6. Распределение плоских галактик по числу значимых соседей с угловыми диаметрами в интервале $[a_B/2 - 2a_B]$ в круге радиусом $R = 10 a_B$ для: (а) всего каталога RFGC, (б) выборки RFGC с лучевыми скоростями менее $10\,000 \text{ км с}^{-1}$, $N = 2078$, (с) выборки сверхтонких галактик с $a_B \geq 0.6$, $N = 490$, (д) выборки сверхтонких галактик с $a_B \geq 1.0$.

значением среди плоских галактик. Как известно, сверхтонкие диски галактик встречаются преимущественно в областях низкой плотности числа окружающих галактик. Мы оценили плотность окружения UFG тремя разными способами.

(1) В каталоге RFGC для каждой галактики диаметром a_B подсчитывались значимые соседи с угловыми диаметрами в интервале $a_B/2 - 2a_B$, находящиеся в круге радиусом $R = 10 a_B$.

(2) Определялось число галактик с относительными лучевыми скоростями в интервале $+500$,

-500 км с^{-1} до спроектированного линейного расстояния $R = 750 \text{ кпк}$.

(3) Плотность окружения определялась методом кластеризации.

Сравнение галактик списка UFG с объектами всего каталога RFGC позволяет нам сделать следующие выводы.

(а) Более $3/4$ UFG-галактик имеют морфологические типы в узком интервале значений $T = 7 \pm 1$. Иными словами, наиболее тонкие звездные диски встречаются у галактик, классифицируемых как Scd, Sd, Sdm. Этот вывод

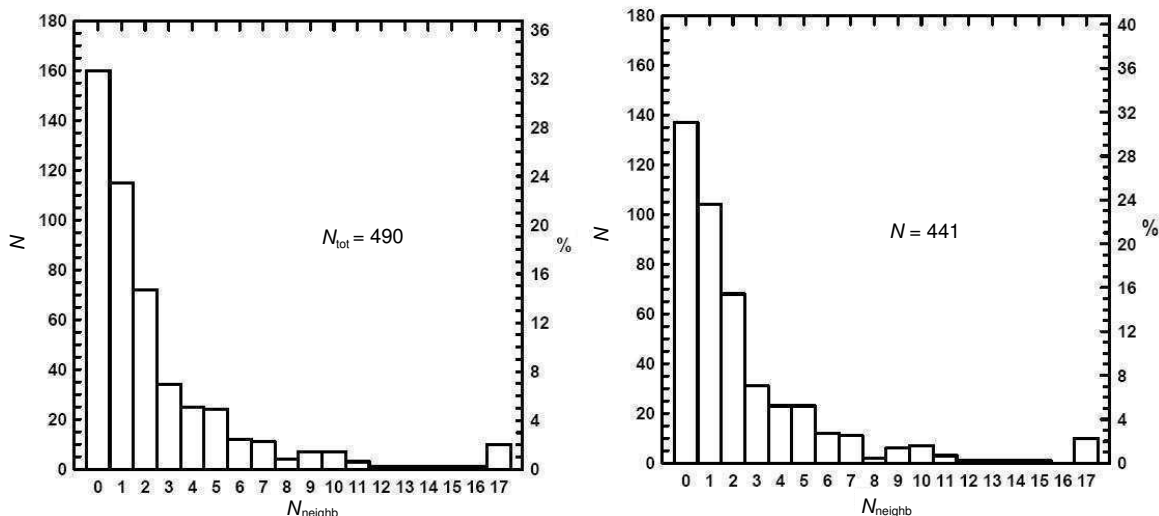


Рис. 7. Распределение сверхтонких галактик по числу соседей до предельного проекционного расстояния $R = 750$ кпк и с лучевыми скоростями V_{LG} в интервале $+500, -500$ км с $^{-1}$; выборка $N = 490$ (слева), выборка $N = 441$ (справа).

находится в прямом соответствии с результатом, полученным ранее Эйдманном и др. [6].

(b) Проявляется тренд к ослаблению средней поверхностной яркости ультратонких галактик при переходе от выборки RFGC к UFG. В основном он обусловлен вымыванием из выборки UFG галактик типа Sbc с небольшими балджами. Другой причиной может быть более сильное внутреннее поглощение света у сверхтонких галактик, видимых с ребра.

(c) Диски галактик правильной формы без признаков асимметрии (возмущений) составляют около $2/3$ как в основном каталоге RFGC, так и в выборке UFG. Заметна только слабая тенденция к увеличению относительного числа невозмущенных форм у сверхтонких галактик. В целом же толщина звездного диска спиральной галактики не связана со степенью возмущенности (асимметрией) его периферии.

(d) Используя разные способы оценки плотности окружения галактик UFG и RFGC, мы показали, что относительное число обособленных галактик

лишь в малой степени зависит от видимого сжатия звездного диска. По нашим предварительным оценкам около 60% ультраплоских галактик могут быть отнесены к категории динамически изолированных объектов, около 30% входят в состав рассеянных ассоциаций (волокон, стенок) и только около 10% являются динамически доминирующими объектами по отношению к своим ближайшим соседям.

В следующих публикациях этого цикла мы предполагаем рассмотреть интегральные (оптические и радио) свойства ультраплоских спиральных галактик и сделать оценку массы темных гало, охватывающих диски UFG-галактик.

БЛАГОДАРНОСТИ

В работе были использованы базы данных NASA/IPAC Extragalactic Database (NED) и HyperLeda (<http://leda.univ-lyon1.fr/>). ИДК, ДИМ благодарят за поддержку Российский научный фонд (грант 14–12–00965).

ПРИЛОЖЕНИЕ

Список номеров RFGC для 817 галактик базовой выборки. Каталогные RFGC-номера галактик из выборки $N = 490$ отмечены одной звездочкой (*). Каталогные RFGC-номера галактик из выборки $N = 441$ (Ultra Flat Galaxies) отмечены дополнительной звездочкой и входят в базовую выборку как (**).

1**	6**	16	18	25	31	34**	46	58	73**	81	88	96
99**	106	113**	119**	122**	123	124**	132	136**	155	161**	164**	166**

175	176**	187	193**	195	207**	210	213**	225**	229	234**	237**	239**
248	255**	261**	267	278**	282**	283	292	296**	300	301	302**	321
322	325	330**	333	337	342**	344**	357**	365**	368	371**	374**	377
381*	385**	389**	392	393	403	415	430*	433	438**	446**	461	463**
465**	467**	483	484**	485**	486	493	500*	504**	505**	509**	510**	511**
512	513	517**	523	527	529	531**	537	539	542	544**	557	560**
569	598**	603**	604**	615	620**	622**	625**	626**	627**	631	634**	642
653**	660	666	674**	676**	679	687**	693**	695**	697**	701	705	719**
720	722**	730	744**	746**	754	756**	766**	768	769**	772	778**	793
798**	809*	813	826**	827	828*	831	835	844*	849**	854	855**	858**
863	869*	871	877**	880	888**	900**	903**	911**	912*	925**	928	934
940	942	944**	946	950	972	975	979	988**	990	995	1000**	1005
1010	1013	1015*	1016	1021	1029*	1045	1046	1050	1051**	1055**	1059	1065
1083	1091**	1094	1095**	1099**	1107	1109**	1112**	1113*	1114**	1124	1129	1132**
1133**	1135**	1140**	1143**	1147**	1148	1149**	1150	1155	1157	1162	1169	1170
1171	1172**	1184**	1189*	1195**	1196**	1200**	1201	1211**	1231**	1234	1236**	1248**
1256	1259**	1275	1277**	1278	1284	1285*	1291**	1293**	1298**	1300**	1305	1313*
1322**	1325**	1329**	1333	1339**	1344	1346*	1348**	1355	1357	1358	1359**	1362**
1363	1365**	1366**	1374	1375**	1383**	1384*	1385	1387**	1392	1394**	1399**	1406
1407	1412	1413	1417**	1420**	1424	1425**	1433	1434**	1435**	1439**	1440**	1443**
1446**	1461*	1462**	1468**	1470**	1486**	1490**	1502**	1504**	1514**	1522**	1527**	1530**
1549	1551	1552	1553**	1555**	1556**	1560**	1561**	1562	1563	1567**	1568**	1569**
1572	1587**	1595**	1596	1597	1607	1620**	1625**	1626**	1627**	1630**	1636	1637
1646**	1648	1650**	1660**	1664	1670**	1672**	1674*	1685**	1687	1691**	1692**	1696*
1700**	1710**	1716**	1737	1739**	1742	1744**	1745	1753**	1761**	1766**	1771	1778
1782**	1783	1785	1789**	1791**	1795**	1796**	1807	1823	1834	1837*	1843	1845
1847	1864**	1871**	1874**	1880**	1886	1888**	1892**	1918	1925**	1936**	1940**	1943
1951	1952	1953	1957*	1958**	1959**	1973	1976**	1979**	1992	1993**	1996	2000**
2002**	2004	2005	2006**	2010**	2014*	2020**	2021**	2026**	2030	2035**	2037**	2039
2041	2042**	2045	2046	2048*	2050**	2051**	2053	2057**	2058	2061**	2067**	2069**
2077**	2078	2079**	2085**	2106**	2108	2111**	2118	2123	2126**	2127**	2129**	2132**
2145**	2146**	2148**	2156**	2158*	2165**	2173**	2175	2186	2187	2195*	2206**	2207
2210**	2211	2218**	2233**	2243	2246**	2250**	2253**	2259**	2260**	2266**	2283*	2290**
2295**	2297**	2301	2308**	2317**	2320**	2322**	2327**	2333**	2339**	2341	2347	2350
2357**	2361**	2368**	2378**	2380**	2382**	2387**	2392	2396	2398	2399**	2403	2415**
2421**	2428**	2429**	2430**	2443**	2446**	2450	2453**	2459**	2461*	2467**	2468**	2474**

2482	2496**	2506	2510	2523**	2524**	2526**	2531**	2546**	2548*	2549**	2550	2551**
2553	2555**	2556	2569**	2580**	2581**	2585	2590**	2592*	2597	2605	2611**	2617**
2623**	2631**	2635**	2637	2642	2652**	2668**	2676	2687**	2694**	2699**	2702**	2705**
2714	2716	2725**	2727	2736*	2740	2750*	2751	2752*	2755*	2757**	2768**	2774**
2779*	2785*	2791	2795**	2802**	2803**	2805**	2808*	2811**	2819**	2821	2834	2842
2843	2853**	2855	2864**	2872**	2875**	2876	2881	2885**	2886**	2897**	2898	2901**
2905	2906**	2908**	2918**	2919	2923**	2927**	2928**	2929	2931**	2932	2953	2965
2966**	2968	2969**	2979	2988**	2999*	3001	3007**	3008	3013	3027**	3032	3034
3036**	3037**	3044**	3046**	3054**	3064	3069	3076	3077	3078	3079	3080	3081**
3082	3087**	3094**	3095**	3097**	3103	3118**	3119	3125	3126	3129	3132**	3140
3153*	3158	3160**	3164**	3170	3172	3184	3185**	3186**	3190**	3198	3200	3208
3212**	3218**	3219**	3232**	3243**	3245	3256	3258**	3262**	3274**	3277**	3285**	3289**
3296	3297**	3304**	3316**	3322	3326	3331**	3337**	3350	3354	3356**	3359**	3364*
3365**	3367**	3371	3372	3377**	3378**	3383	3385**	3397	3400	3405**	3414**	3424
3431	3437**	3438	3439	3444**	3452	3465**	3468	3481**	3488	3489**	3491**	3515**
3516	3517	3518	3519**	3520**	3521	3522	3526	3527**	3532**	3534	3540	3555
3558	3561**	3563	3575**	3580**	3582	3587	3596	3598	3600**	3601	3603	3608**
3611	3619	3622*	3628	3631**	3636	3643**	3644**	3645**	3651**	3659*	3672	3684*
3686	3689	3697	3699**	3703	3707	3712**	3715	3723**	3727**	3729	3740	3750
3752*	3753**	3761	3769	3779	3783	3792**	3798	3803**	3804	3820**	3822	3824**
3827**	3828**	3833**	3846**	3854**	3856	3858**	3879**	3880**	3896**	3901	3915**	3919
3924	3928*	3930	3935**	3952**	3953**	3968	3975	3977**	3984*	3986**	3998**	4003
4010	4013**	4025**	4028**	4032**	4039**	4046	4053*	4054	4057**	4066**	4072**	4073
4074**	4076**	4078**	4080**	4081**	4091**	4101	4106**	4113**	4119**	4123*	4131	4134**
4137	4149**	4151	4163**	4172	4190**	4199	4203**	4209**	4214*	4230		

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Hubble, *Observatory* **50**, 276 (1927).
2. R. Buta, in: *Proc. Conf. on The World of Galaxies, Paris, France, 1988*, Ed. by H. G. Corwin and L. Bottinelli (Springer-Verlag, New York, 1989), p.29.
3. I. Karachentsev, *Astron. J.* **97**, 1566 (1989).
4. J. Kormendy and R. C. Kennicutt, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **42**, 603 (2004).
5. B. A. Vorontsov-Vel'yaminov, *Sov. Astron.* **17**, 452 (1974).
6. J. Heidmann, N. Heidmann, and G. de Vaucouleurs, *Mem. R. Astr. Soc.* **75**, 85 (1972).
7. S. J. Kautsch, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **121**, 1297 (2009).
8. I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, and S. L. Parnovskij, *Astronomische Nachrichten* **314**, 97 (1993).
9. I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, Yu. N. Kudrya, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **47**, 5 (1999).
10. T. H. Jarrett, T. Chester, R. Cutri, et al., *Astron. J.* **125**, 525 (2000).
11. S. N. Mitronova, I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **57**, 5 (2004).
12. S. J. Kautsch, E. K. Grebel, F. D. Barrazza, and J. S. Gallagher, *Astron. and Astrophys.* **445**, 765 (2006).
13. D. V. Bizyaev, S. J. Kautsch, A. V. Mosenkov, et al., *Astrophys. J.* **787**, 24 (2014).
14. J. W. Goad and M. S. Roberts, *Astrophys. J.* **250**, 79 (1981).
15. V. E. Karachentseva, *Communications Spec. Astrophys. Obs.*, No. 8, 3 (1973).

16. V. E. Karachentseva, S. N. Mitronova, O. V. Melnyk, and I. D. Karachentsev, *Astrophysical Bulletin* **65**, 1 (2010).
17. I. D. Karachentsev, S. S. Kaisin, and E. I. Kaisina, *Astrophysics* **58**, 453 (2015).
18. Yu. N. Kudrya, I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, and S. L. Parnovskii, *Astronomy Letters* **20**, 8 (1994).
19. I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, Yu. N. Kudrya, and S. L. Parnovsky, *Astronomy Letters* **23**, 573 (1997).
20. Yu. N. Kudrya, I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, and S. L. Parnovskii, *Astronomy Letters* **23**, 11 (1997).
21. M. Schmidt, *Astrophys. J.* **151**, 393 (1968).
22. R. Giovanelli, E. Avera, and I. Karachentsev, *Astron. J.* **114**, 122 (1997).
23. D. I. Makarov, A. N. Burenkov, and N. V. Tyurina, *Astronomy Letters* **27**, 213 (2001).
24. W. K. Huchtmeier, I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, et al., *Astron. and Astrophys.* **435**, 459 (2005).
25. S. N. Mitronova, W. K. Huchtmeier, I. D. Karachentsev, et al., *Astronomy Letters* **31**, 501 (2005).
26. I. D. Karachentsev and D. I. Makarov, *Astrophysical Bulletin* **63**, 299 (2008).
27. D. Makarov and I. Karachentsev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **412**, 2498 (2011).
28. A. Sandage, *Astrophys. J.* **307**, 1 (1986).

Ultra-Flat Galaxies Selected from RFGC Catalog. I. The Sample Properties

V. E. Karachentseva, Yu. N. Kudrya, I. D. Karachentsev, D. I. Makarov, and O. V. Melnyk

We used the Revised Flat Galaxy Catalog (RFGC) to create a sample of ultra-flat galaxies (UFG) covering the whole northern and southern sky apart from the Milky Way zone. It contains 817 spiral galaxies seen edge-on, selected into the UFG sample according to their apparent axial ratios $(a/b)_B \geq 10.0$ and $(a/b)_R \geq 8.53$ in the blue and red bands, respectively. Within this basic sample we fixed an exemplary sample of 441 UFG galaxies having the radial velocities of $V_{LG} < 10000 \text{ km s}^{-1}$, Galactic latitude of $|b| > 10^\circ$ and the blue angular diameter of $a_B > 1''.0$. According to the Schmidt test the exemplary sample of 441 galaxies is characterized by about (80–90)% completeness, what is quite enough to study different properties of the ultra-flat galaxies. We found that more than 3/4 of UFGs have the morphological types within the narrow range of $T = 7 \pm 1$, i.e. the thinnest stellar disks occur among the Scd, Sd, and Sdm types. The average surface brightness of UFG galaxies tends to diminish towards the flattest bulge-less galaxies. Regularly shaped disks without signs of asymmetry make up about 2/3 both among all the RFGC galaxies, and the UFG sample objects. About 60% of ultra-flat galaxies can be referred to dynamically isolated objects, while 30% of them probably belong to the scattered associations (filaments, walls), and only about 10% of them are dynamically dominating galaxies with respect to their neighbours.

Keywords: *galaxies: spiral—galaxies*