

УДК 524.726

## УЛЬТРАПЛОСКИЕ ГАЛАКТИКИ, ОТОБРАННЫЕ ИЗ КАТАЛОГА RFGC. II. ОРБИТАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ МАССЫ ГАЛО

© 2016 И. Д. Караченцев<sup>1\*</sup>, В. Е. Караченцева<sup>2</sup>, Ю. Н. Кудря<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup>Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 03680 Украина

<sup>3</sup>Астрономическая обсерватория Киевского национального университета им. Тараса Шевченко, Киев, 04053 Украина

Поступила в редакцию 21 января 2016 года; принята в печать 25 февраля 2016 года

Мы использовали «Revised Flat Galaxy Catalog» (RFGC) для выделения 817 ультраплоских (UF) галактик, ориентированных с ребра, чьи диски имеют видимые синие и красные отношения осей  $(a/b)_B > 10.0$  и  $(a/b)_R > 8.5$ . Эта выборка охватывает все небо, кроме зоны Млечного Пути, и содержит 490 UF-галактик с измеренными лучевыми скоростями. Обзор окрестностей этих галактик выявил всего 30 компаньонов с разностью лучевых скоростей  $|\Delta V| < 500 \text{ км с}^{-1}$  в пределах проекционного расстояния  $R_p < 250$  кпк. При этом более широкая область вокруг UF-галактики радиусом  $R_p = 750$  кпк не содержит других соседей ярче самой UF-галактики в том же интервале скоростей. UF-галактики полученной выборки принадлежат в основном морфологическим типам Sc, Scd, Sd. Они имеют умеренную амплитуду кривой вращения приблизительно  $120 \text{ км с}^{-1}$  и умеренную светимость в K-полосе порядка  $10^{10} L_\odot$ . Медианная разность лучевых скоростей их спутников равна  $87 \text{ км с}^{-1}$ , что соответствует медианной оценке орбитальной массы приблизительно  $5 \times 10^{11} M_\odot$ . За исключением шести вероятных неизолированных пар, типичное отношение массы гало к звездной массе UF-галактик составляет примерно 30, почти такое же, как у главных спиральных галактик типа M31 и M81 в ближайших группах. Мы отмечаем, что ультраплоские галактики выглядят гораздо менее «запыленными» чем другие спирали той же светимости.

Ключевые слова: галактики: спиральные — галактики

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Популяция тонких (плоских) спиральных галактик представляет собой наиболее подходящую лабораторию для изучения физических процессов формирования и эволюции дисков галактик. Как было отмечено многими авторами [1–3], простые диски галактик без видимых признаков балджа избегают областей с высокой плотностью окружения. Очевидной причиной этого предполагается отсутствие у изолированных дисков заметного приливного возмущения от близких соседей, способного «разогреть» звездные диски в вертикальном направлении. Согласно [4–7], тонкие диски выделяются среди других спиральных галактик пониженной средней поверхностной яркостью, голубым цветом и невысокой амплитудой кривой вращения. Спектральные наблюдения нескольких сверхтонких галактик [8] показали, что в них слабо выражены эффекты возбуждения эмиссионных линий крупномасштабными ударными волнами.

Корменди [9] неоднократно подчеркивал, что само наличие значительной популяции массивных галактик, лишенных балджей, представляет собой большую проблему для современных теорий формирования галактик, где многочисленные слияния мелких объектов приводят к последовательному росту балджей. Сравнивая изображения плоских галактик, полученные на космическом телескопе Хаббла, с изображениями из Слоуновского обзора неба, Сачдева и др. [10] установили, что за последние 8 миллиардов лет с эпохи  $z \sim 1$  до настоящего времени линейные размеры и массы дисков галактик увеличились примерно в два раза. Из этого авторами сделан вывод, что доминантной модой роста тонких дисков является аккреция межгалактического газа, а не процесс иерархического слияния карликовых галактик.

Выявление сверхтонких дисков среди галактик, ориентированных под произвольными углами к лучу зрения, является непростой задачей. Самый надежный способ для этого — использовать выборку спиралей, ориентированных с реб-

\*E-mail: [ikar@sao.ru](mailto:ikar@sao.ru)

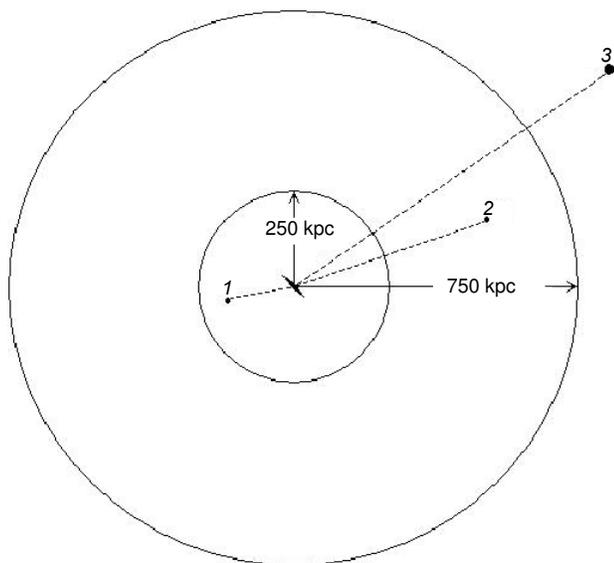


Рис. 1. Схема, поясняющая отбор физических спутников вокруг ультраплоской галактики.

ра. В нашей предыдущей работе [11] мы провели отбор наиболее плоских галактик, взяв за основу «Revised Flat Galaxy Catalog» [12]. Среди 4236 объектов RFGC было выделено 817 ультраплоских (ultraflat = UF) галактик, чьи видимые синие ( $B$ ) и красные ( $R$ ) отношения осей удовлетворяют условию  $(a/b)_B > 10.0$  и  $(a/b)_R > 8.5$ . Эта выборка охватывает все северное и южное небо, кроме области Млечного Пути ( $|b| < 10^\circ$ ) и имеет полноту приблизительно 90% до углового диаметра  $a_B = 1'.2$  [11]. Из анализа данной достаточно представительной выборки мы сделали вывод, что около 60% UF-галактик не имеют близких соседей в пределах проекционного расстояния  $R_p = 750$  кпк и разности лучевых скоростей  $|\Delta V| < 500$  км с $^{-1}$ . Остальная часть UF-выборки (примерно 30%) входит в состав рассеянных ассоциаций и волокон наряду с другими более яркими соседями, и только порядка 10% UF-галактик являются доминирующими объектами в динамически связанных кратных системах. Последнюю категорию мы используем ниже для оценки массы темного гало ультраплоских галактик, которая, насколько нам известно, никем пока не проводилась.

## 2. ОЦЕНКА ОРБИТАЛЬНОЙ МАССЫ UF-ГАЛАКТИК

Ярчайшие спиральные галактики в близких группах, такие как M 31, M 81, NGC 253, имеют характерную звездную массу  $M^* \sim 8 \times 10^{10} M_\odot$ , типичную амплитуду кривой вращения  $V_m \sim 250$  км с $^{-1}$  и радиус гало приблизительно

250 кпк [13, 14]. У этих галактик, которые динамически доминируют в своем окружении, имеются довольно заметные балджи. Отношение массы гало к звездной массе у них составляет  $M_h/M^* \sim 30$  [15]. Ультраплоские спирали по величинам  $M^*$  и  $V_m$  значительно уступают «хозяйским» спиральным галактикам в близких группах. Это дает нам основание предполагать, что характерный радиус гало вокруг UF-галактик не превышает 250 кпк.

Для поиска физических спутников, связанных с UF-галактиками, мы использовали следующий простой алгоритм, иллюстрацией к которому служит рис. 1. Рассматриваемая ультраплоская галактика не должна иметь других более ярких галактик с разностью скоростей  $|\Delta V| < 500$  км с $^{-1}$  в пределах радиуса  $R_p = 750$  кпк. Среди соседних более слабых галактик в заданном интервале лучевых скоростей мы считали физически связанными спутниками только те, которые располагаются в пределах проекционного расстояния  $R_p = 250$  кпк. Таким образом, на схеме рис. 1 галактика 1 является спутником UF, а галактика 2 может быть или спутником UF, или же компаньоном более массивной галактики 3. Разумеется, используемый нами критерий нельзя назвать идеальным. Ему может удовлетворять пара «UF + близкий в проекции сосед», компоненты которой входят в состав рассеянной (невириализованной) ассоциации или цепочки галактик.

Поиск спутников вокруг 490 ультраплоских галактик с измеренными лучевыми скоростями проводился нами с использованием опций NASA Extragalactic Database (NED)<sup>1</sup>. Линейное проекционное расстояние соседей определялось в предположении, что их радиальные расстояния равны расстоянию UF-галактики,  $D_{UF} = V_h/H_0$  с параметром Хаббла  $H_0 = 73$  км с $^{-1}$  Мпк $^{-1}$ . Результатом этого массового поиска стало обнаружение всего лишь 30 предполагаемых физических спутников, данные о которых представлены в таблице 1. Малое количество спутников еще раз свидетельствует о том, что ультраплоские галактики без балджей располагаются в областях очень низкой плотности числа галактик.

В столбцах таблицы 1 указаны: (1) номер UF-галактики по каталогу RFGC; (2) сокращенное имя галактики-спутника или название обзора неба, в котором измерена ее лучевая скорость; (3) гелиоцентрическая лучевая скорость из NED (км с $^{-1}$ ) и гелиоцентрическая скорость спутника (км с $^{-1}$ ) с ошибками измерения; (4) морфологический тип: для RFGC-галактики — по данным каталога, для спутника — по нашей оценке; (5, 6) видимые отношения осей в синем и

<sup>1</sup>[www.ned.ipac.caltech.edu](http://www.ned.ipac.caltech.edu)

красном фильтре согласно RFGC; (7) видимая величина RFGC-галактики в  $B$  из NED и  $B$ -величина спутника; (8) Галактическое поглощение в  $B$ -полосе; (9) видимая величина в  $K_s$ -полосе из обзора 2MASS [16, 17], а там, где данные 2MASS отсутствовали, мы использовали для ее оценки соотношение между амплитудой кривой вращения,  $V_m$  и  $K$ -светимостью (см. раздел 4); (10) HI-поток (Ян км с<sup>-1</sup>), выраженный в звездных величинах со-

гласно HyperLeda (<http://leda-univ-lyon1.fr>) как  $m_{21} = -2.5 \lg F(\text{HI}) + 17.4$ ; (11) амплитуда кривой вращения из HyperLeda (км с<sup>-1</sup>); (12) проекционное расстояние спутника в кпк; (13) логарифм орбитальной оценки массы (в  $M_\odot$ ); (14) логарифм звездной массы ультраплоской галактики (в  $M_\odot$ ); (15) логарифм отношения орбитальной массы к звездной массе.

Таблица 1. Ультраплоские галактики с оценками орбитальной массы

RFGC	Neighb	$V_h \pm \sigma$	$T$	$(a/b)_B$	$(a/b)_R$	$B$	$A_B$	$K_s$	$m_{21}$	$V_m$	$R_p$	$\lg(M_{\text{orb}})$	$\lg M^*$	$\lg(M_{\text{orb}}/M^*)$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
99		$5339 \pm 6$	Sc	11.2	10.2	15.03	0.09	10.19	14.6	190				
	2dF	$5306 \pm 89$	BCD			18.2					33	10.64	10.99	-0.35
124		$7170 \pm 12$	Sb	10.0	8.7	14.64	0.07	9.83	16.5	294				
	2MASX	$7225 \pm 64$	BCD			17.3					68	12.03	11.36	0.67
166		$9448 \pm 53$	Sc	14.1	11.1	16.29	0.07							
	GALEX	$9500 \pm 89$	BCD			18.6					114	11.56	11.01	0.55
239		$7083 \pm 45$	Sc	10.1	10.4	16.0	0.13	12.15						
	SDSS	$6935 \pm 5$	Im			17.6					94	12.39	10.44	1.95
365		$5439 \pm 15$	Scd	10.0	10.7	16.5	0.10	13.66	16.1	93				
	MCG-2-5-36	$5456 \pm 4$	Sm			16.5					175	10.78	9.60	1.18
625		$4955 \pm 13$	Sd	11.2	11.2	16.3	0.33	11.92	16.1	128				
	SDSS	$5042 \pm 18$	Im			18.4					167	12.17	10.22	1.95
627		$5279 \pm 6$	Sd	13.7	12.3	16.5	0.42	13.86	16.3	87				
	UGC 2397	$5117 \pm 9$	Sm			16.9					100	12.50	9.50	3.00
722		$1873 \pm 2$	Sd	11.5	8.6	15.33	0.15	11.27	14.2	101				
	MCG-3-9-37	$1866 \pm 5$	Sm			16.5					39	9.34	9.60	-0.26
1000		$4121 \pm 11$	Scd	12.5	11.5	15.3	0.47	9.63	14.1	250				
	MCG+13-5-3	$4267 \pm 25$	dE			16.0					216	12.73	11.00	1.73
1236		$2475 \pm 14$	Sd	11.2	11.2	16.5	0.09	14.07	16.2	84				
	UGC 3940	$2453 \pm 6$	Im			16.5					189	11.03	8.80	2.23
1462		$596 \pm 6$	Sdm	10.1	9.3	15.0	0.11	11.24	14.0	48				
	SDSS	$588 \pm 34$	Im			17.2					48	9.46	8.62	0.84
1522		$7698 \pm 31$	Sd	11.2	11.8	16.7	0.07	13.58						
	2MASX	$8082 \pm 17$	BCD			16.8					90	13.17	9.93	3.24
1567		$3219 \pm 10$	Sd	14.1	9.8	16.6	0.16	12.77	15.4	84				
	SDSS	$3505 \pm 1$	BCD			18.1					182	13.24	9.44	3.80
1716		$7905 \pm 33$	Scd	13.1	10.2	16.3	0.05	12.09						
	SDSS	$7933 \pm 25$	Im			17.9					58	10.73	10.55	0.18
	MCG8-18-65	$7956 \pm 28$	Sd			17.0					65	11.30	10.55	0.75
1744		$3150 \pm 34$	Sd	10.2	9.0	17.0	0.05	13.10	16.7	78				
	SDSS	$3127 \pm 14$	BCD			18.2					157	11.00	9.34	1.66

Таблица 1. Продолжение

RFGC Neighb	$V_h \pm \sigma$	$T$	$(a/b)_B$	$(a/b)_R$	$B$	$A_B$	$K_s$	$m_{21}$	$V_m$	$R_p$	$\lg(M_{\text{orb}})$	$\lg M^*$	$\lg(M_{\text{orb}}/M^*)$	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
1782	$9722 \pm 4$	Scd	11.5	11.2	16.2	0.05	12.87	16.8	184					
SDSS	$9674 \pm 28$	BCD			17.6					117	11.49	10.40	1.09	
1880	$5612 \pm 5$	Sd	13.9	11.2	15.75	0.05	12.11	15.8	132					
SDSS	$5528 \pm 34$	Im			18.1					190	12.20	10.25	1.95	
1925	$4162 \pm 1$	Sd	11.7	11.7	16.1	0.10	13.23	15.7	88					
U 6054Not.1	$4270 \pm 8$	Sm			18.0					13	11.23	9.51	1.72	
2111	$5254 \pm 4$	Sd	12.2	11.0	16.1	0.10	13.24	15.8	105					
SDSS	$5146 \pm 10$	Sdm			17.9					99	12.11	9.70	2.41	
2210	$2452 \pm 2$	Scd	11.6	10.1	14.9	0.11	12.37	13.9	94					
UGC 7133	$2567 \pm 7$	Sd			14.9					204	12.51	9.38	3.13	
2474	$1642 \pm 3$	Sm	15.5	14.0	16.04	0.38	12.10	16.1	65					
GALEX	$1450 \pm 45$	Im			16.8					74	12.50	9.07	3.43	
GALEX	$1509 \pm 45$	BCD			16.9					199	12.62	9.07	3.55	
2546	$6724 \pm 6$	Sc	11.7	9.5	15.9	0.08	11.93							
SDSS	$6857 \pm 30$	Sm			18.4					183	12.58	10.46	2.12	
2819	$5832 \pm 2$	Scd	11.7	10.5	15.58	0.11	11.50	15.7	144					
SDSS	$5746 \pm 30$	Ir			18.8					107	11.97	10.52	1.45	
3021	$1915 \pm 3$	Sc	10.6	8.5	13.9	0.41	10.6	14.5	113					
UGC 9979	$1961 \pm 3$	Im			14.6					116	11.46	9.91	1.55	
3087	$5694 \pm 3$	Sc	11.2	10.2	16.7	0.23	13.60	15.6	99					
SDSS	$5728 \pm 27$	BCD			18.7					68	10.97	9.68	1.29	
3444	$7178 \pm 10$	Sc	11.1	9.6	16.2	0.50	11.74	14.4	199					
2MASX	$7074 \pm 45$	Sb			16.2					94	12.08	10.61	1.47	
4081	$4839 \pm 6$	Sc	10.4	9.1	14.53	0.39	10.38	14.3	236					
RFGC 4082	$4720 \pm 3$	Sdm			16.0					192	12.50	10.84	1.66	
4091	$4961 \pm 2$	Scd	11.1	10.1	15.4	0.20	11.30	14.8	134					
2MASX	$4739 \pm 235$	Sm			16.0					80	12.68	10.49	2.19	

Для оценки орбитальной массы мы использовали выражение

$$M_{\text{orb}} = (16/\pi G)(\Delta V)^2 R_p, \quad (1)$$

справедливое при случайной ориентации орбит спутников и среднеквадратичном значении эксцентриситета орбит  $\langle e^2 \rangle = 1/2$  [18]; здесь  $G$  — постоянная гравитации, а  $\Delta V$  — разность лучевых скоростей спутника и UF-галактики.

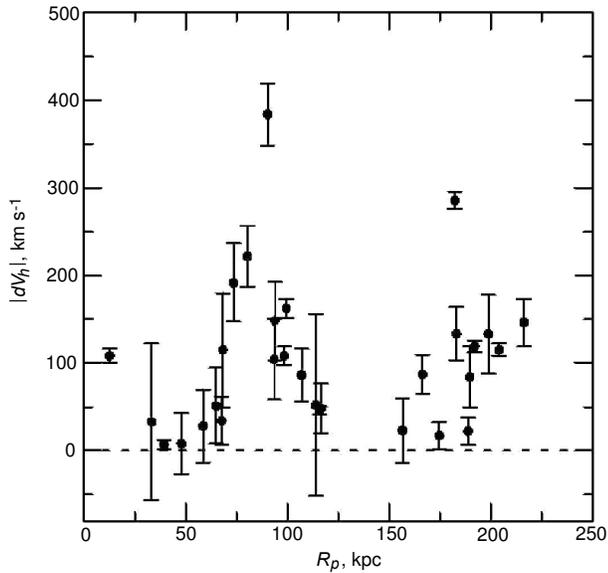
При вычислении светимости галактики в  $K$ -полосе

$$\lg L_K = 0.4(5 \lg D_{\text{Mpc}} - K + 28.28 + E(B - V)/2.93) \quad (2)$$

мы принимаем абсолютную  $K$ -величину Солнца  $m_{\odot}^K = 3.28$  [19] и поправку за поглощение света в Галактике согласно [20].

Как видно из таблицы 1, только две ультраплоские галактики (RFGC 1716 и 2474) имеют по два спутника в пределах  $R_p = 250$  кпк, у остальных же 26 UF-галактик «свита» представлена всего одним спутником.

Распределение ультраплоских галактик и их спутников по проекционному расстоянию и модулю разности лучевых скоростей показано на рис. 2. Вертикальные отрезки на нем соответствуют квадратичной сумме ошибок  $\sigma_v$  у компонентов пары.



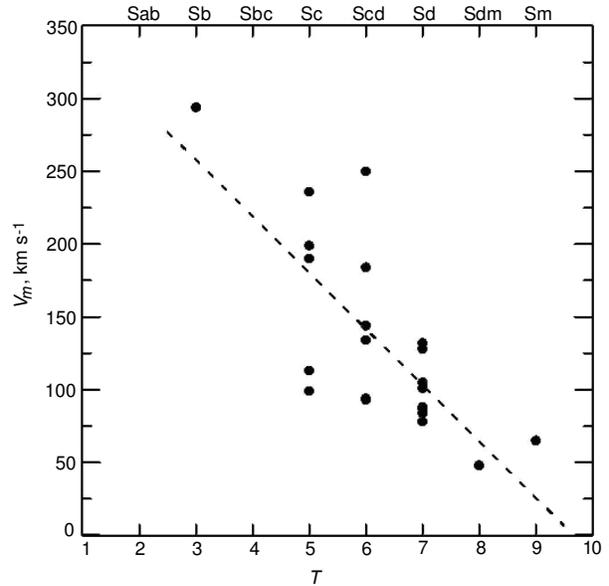
**Рис. 2.** Распределение 30 спутников ультраплоских галактик по модулю разности лучевых скоростей и проекционному расстоянию.

В некоторых случаях ошибка разности скоростей превышает сам модуль разности. Как видно из рис. 2, разности лучевых скоростей невелики. Только в двух случаях они превышают  $250 \text{ км с}^{-1}$ . Медианное значение модуля разности скоростей составляет  $87 \text{ км с}^{-1}$ . Орбитальные оценки массы UF-галактик, представленные в столбце (13) таблицы 1, характеризуются большой дисперсией, значительная часть которой обусловлена случайными факторами проекции. Среднее значение логарифма орбитальной массы равно  $11.77 \pm 0.18$ , что близко к значению логарифма медианы,  $12.04$ . Насколько нам известно из литературы, эти оценки являются первыми оценками массы гало вокруг ультраплоских галактик, сделанными на шкале эффективного радиуса гало.

### 3. МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ТИПЫ УЛЬТРАПЛОСКИХ ГАЛАКТИК

Как было показано Эйдманом и др. [21], максимальное видимое отношение осей  $(a/b)_{\text{max}}$  у спиральных галактик возрастает вдоль Хаббловской последовательности от типа Sa к типу Sd, а затем резко падает для спиралей иррегулярной структуры Sm. По данным [22] максимальное видимое и максимальное истинное отношение осей для разных типов спиралей характеризуются значениями: 13.0 и 14.1 (Sb), 15.3 и 17.2 (Sbc), 19.2 и 22.0 (Sc), 19.5 и 22.4 (Scd), 22.4 и 27.0 (Sd).

Среди 30 рассматриваемых пар «UF-галактика + спутник» в 26 случаях ультраплоская галактика



**Рис. 3.** Распределение 23 UF-галактик из таблицы 1 по амплитуде кривой вращения и морфологическому типу.

относится к морфологическому типу Sc, Scd, Sd или  $T = 5, 6, 7$  по шкале de Vaucouleurs. При средней ошибке классификации галактик в RFGC  $\Delta T = \pm 1$  [23] можно предполагать, что почти все ультраплоские галактики обладают единообразным строением дисков.

Рисунок 3 представляет распределение UF-галактик из таблицы 1 по морфологическому типу и амплитуде кривой вращения  $V_m$ . Несмотря на малую статистику, на рисунке видно уменьшение амплитуды кривой вращения от ранних типов к поздним. Для спиралей типов Sdm, Sm амплитуда регулярного движения  $V_m \sim 60 \text{ км с}^{-1}$  становится сопоставима со средней скоростью турбулентных движений  $V_{\text{turb}} \sim 15 \text{ км с}^{-1}$ , которые затрудняют формирование сверхтонких дисков.

Морфологические типы у спутников UF-галактик в столбце (4) таблицы 1 относятся к еще более поздним типам, чем у самих ультраплоских галактик. Более половины спутников классифицированы нами как Sm и VCD, что указывает на пребывание их в фазе активного звездообразования.

### 4. ЗВЕЗДНЫЕ МАССЫ УЛЬТРАПЛОСКИХ ГАЛАКТИК

Для определения полной звездной массы галактики обычно используют ее светимость в  $K_s$ -полосе, полагая  $M^*/L_K = 1.0 M_\odot / L_\odot$  [24]. Каталог 2MASX [16] содержит данные о  $K_s$ -величинах для примерно 70% UF-галактик. Однако, будучи неглубоким обзором неба, 2MASS недооценивает светимость периферийных областей

галактик, особенно голубых объектов низкой поверхностной яркости, к которым относятся многие UF-галактики. Верхняя панель рис. 4 представляет зависимость Талли-Фишера [25] между  $K$ -светимостью по данным 2MASS и логарифмом амплитуды кривой вращения для 24 галактик из таблицы 1. Линия регрессии для них (показана штрихами) выражается как

$$\lg(L_K/L_\odot) = 3.57(\pm 0.21) \lg V_m + 2.55(\pm 0.44), \quad (3)$$

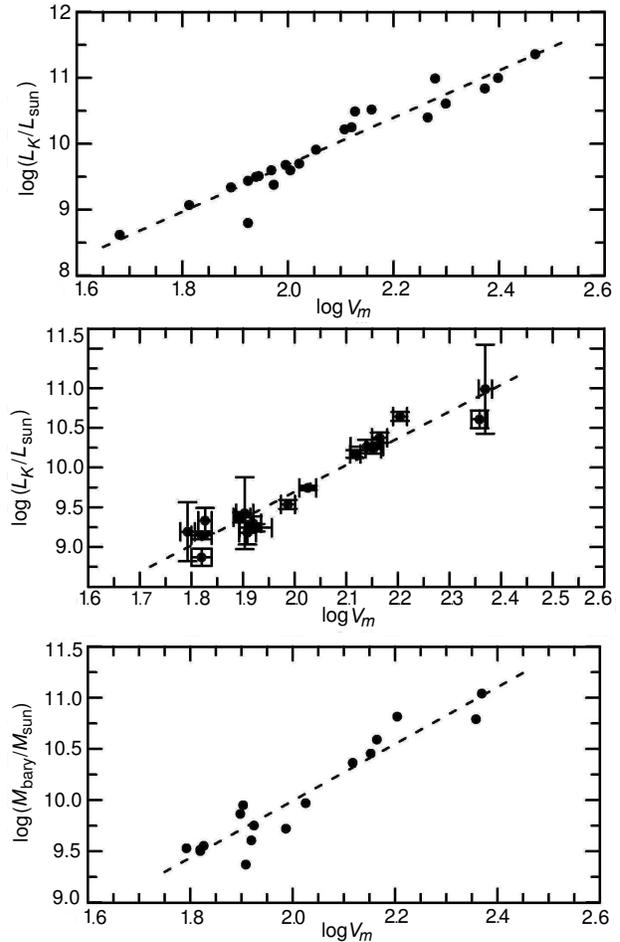
а среднее квадратичное отклонение от линии регрессии составляет 0.20. Параметры этой регрессии близки к параметрам, полученным по более обширной выборке RFGC-галактик [5].

Далкантон и Бернштейн [26] выполнили глубокую фотометрию 49 RFGC-галактик в полосах  $B$ ,  $R$  и  $K_s$ . Среди них оказалось 25 ультраплоских галактик, данные о которых представлены в таблице 2. В ее столбцах содержатся: (1) номер галактики в каталоге RFGC; (2) гелиоцентрическая лучевая скорость; (3) морфологический тип; (4, 5) видимое отношение осей в  $B$ - и  $R$ -полосах из RFGC; (6) амплитуда кривой вращения и ее ошибка из HyperLeda; (7) видимая  $B$ -величина в пределах изофоты  $27m_B/\square''$ ; (8) видимая  $K_s$ -величина в пределах изофоты  $22m_K/\square''$  и ее погрешность; (9) избыток цвета  $E(B - V)$  из-за Галактического поглощения; (10) логарифм  $K$ -светимости при  $m_K^0 = 3^m 28$ ; (11) HI-поток из HyperLeda, выраженный в звездных величинах.

Диаграмма Талли-Фишера для 18 галактик с индивидуальной  $K_s$ -фотометрией из [26] представлена на средней панели рис. 4. Линия регрессии на ней (штрихи) имеет вид

$$\lg(L_K/L_\odot) = 3.37(\pm 0.22) \lg V_m + 2.96(\pm 0.45) \quad (4)$$

с дисперсией  $\sigma(\lg L_K) = 0.167$ . Ошибки измерения  $V_m$  и  $L_K$  показаны горизонтальными и вертикальными барами. Средние квадратичные ошибки измерения светимости и амплитуды кривой вращения для этих галактик составляют соответственно  $\sigma(\lg L_K) = 0.149$  и  $\sigma(\lg V_m) = 0.043$ , что с учетом наклона линии регрессии 3.37 дает суммарную погрешность 0.207. Таким образом, наблюдаемый разброс галактик относительно регрессии (4) почти целиком обусловлен ошибками измерения  $L_K$  и  $V_m$ . Принимая во внимание структурное единообразие UF-галактик, мы можем ожидать, что истинная (космическая) дисперсия их на диаграмме Талли-Фишера крайне мала, а соотношение типа (4) пригодно для надежного определения индивидуальных расстояний UF-галактик.



**Рис. 4.** Соотношение Талли-Фишера для ультраплоских галактик. Сверху вниз: 23 UF-галактики из таблицы 1 с оценками  $V_m$  и 2MASS-фотометрией; 18 UF-галактик из таблицы 2 с аккуратной  $K_s$ -фотометрией; барионное соотношение Талли-Фишера для 17 UF-галактик с аккуратной  $K_s$ -фотометрией и оценками водородной массы.

Соотношение (4) было использовано нами для определения  $K$ -светимости ультраплоских галактик в таблице 1 по величине  $V_m$  в тех случаях, когда отсутствовали данные 2MASS обзора.

МакГаух [27, 28] неоднократно обращал внимание на то, что более определенный физический смысл имеет соотношение между амплитудой кривой вращения  $V_m$  и полной барионной массой галактики,  $M_{\text{bary}} = M^* + M_{\text{gas}}$ . С учетом поправки за обилие гелия  $M_{\text{gas}} = 1.33 \times M_{\text{HI}}$  и соотношения  $M^*/L_K = 1M_\odot/L_\odot$  [24] мы получаем выражение

$$\lg(M_{\text{gas}}/M^*) = 0.4(K_s - m_{21} + 2.86), \quad (5)$$

из которого следует, что при  $m_{21} < K + 2^m 86$  масса газовой компоненты галактики превышает ее звездную массу. Такие объекты составляют более 40% как в таблице 1, так и в таблице 2. Барионная

**Таблица 2.** Ультраплоские галактики с  $K_s$ -фотометрией по Далкэнтон и Бернштейн

RFGC	$V_h$	Type	$(a/b)_B$	$(a/b)_R$	$V_m \pm \sigma$	$B_{27}$	$K_{22} \pm \sigma$	$E(B - V)$	$\lg(L_K)$	$m_{21}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
73	5287	Sdm	12.4	9.9	$66 \pm 3$	17.52	$15.42 \pm 0.27$	0.053	8.87	16.94
267	16186	Sd	11.0	9.1	—	17.72	$12.86 \pm 0.07$	0.049	10.86	—
415	11430	Sd	11.4	10.0	$146 \pm 5$	17.20	$13.33 \pm 0.16$	0.051	10.38	16.69
430	5620	Scd	10.1	11.0	$106 \pm 4$	17.19	$13.39 \pm 0.07$	0.112	9.74	16.63
500	4316	Sd	11.2	8.9	$84 \pm 6$	17.94	$14.10 \pm 0.12$	0.201	9.24	16.08
676	7619	Sd	15.1	13.1	—	17.71	$13.50 \pm 0.11$	0.126	9.96	—
769	6101	Sd	13.9	10.5	$160 \pm 5$	16.15	$11.36 \pm 0.14$	0.234	10.64	14.97
1587	4329	Sd	11.0	9.6	$83 \pm 3$	17.02	$13.91 \pm 0.22$	0.038	9.30	16.74
1672	2156	Scd	11.8	8.6	$97 \pm 3$	15.39	$11.81 \pm 0.14$	0.057	9.54	15.38
1761	3755	Sd	17.1	14.9	$131 \pm 3$	15.33	$11.41 \pm 0.12$	0.010	10.17	14.89
2260	1598	Sd	13.3	11.9	$81 \pm 3$	15.16	$12.04 \pm 0.37$	0.023	9.18	15.54
2295	4240	Sd	20.4	15.9	$142 \pm 5$	15.72	$11.52 \pm 0.15$	0.020	10.23	14.80
2928	2023	Sd	14.8	13.0	$62 \pm 2$	15.24	$12.53 \pm 0.93$	0.051	9.19	15.20
3064	10387	Scd	10.9	9.7	$228 \pm 8$	16.64	$12.54 \pm 0.28$	0.042	10.60	16.04
3274	2781	Sd	10.2	9.1	$67 \pm 2$	16.70	$12.91 \pm 0.40$	0.167	9.33	16.20
3385	4500	Scd	13.8	11.9	$234 \pm 7$	15.74	$9.86 \pm 1.4$	0.294	10.98	14.75
3468	—	Scd	10.2	8.6	—	17.94	$12.57 \pm 0.15$	0.247	—	—
3515	6008	Sd	14.3	10.4	$138 \pm 10$	16.89	$12.27 \pm 0.21$	0.225	10.26	—
3516	—	Sc	11.1	9.7	—	17.79	$14.07 \pm 0.14$	0.169	—	—
3549	—	Sc	10.0	9.3	—	17.78	$14.35 \pm 0.22$	0.146	—	—
3558	—	Sc	12.3	9.1	—	18.59	$13.59 \pm 0.10$	0.057	—	—
3659	5563	Scd	11.2	8.7	$80 \pm 3$	17.58	$14.16 \pm 1.13$	0.100	9.42	16.07
3779	—	Scd	11.7	8.7	—	18.17	$13.67 \pm 0.10$	0.045	—	—
3879	7827	Scd	10.6	10.2	$79 \pm 3$	17.84	$15.02 \pm 0.16$	0.067	9.37	17.06
4209	3865	Sd	11.2	10.1	$66 \pm 3$	17.29	$14.06 \pm 0.12$	0.089	9.15	16.68

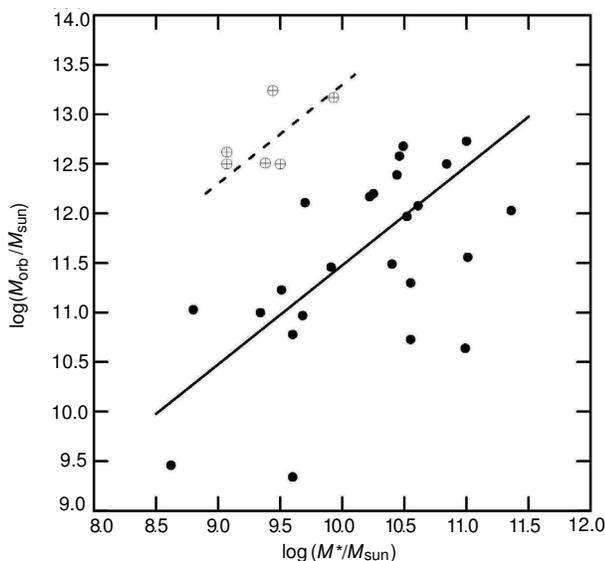
версия зависимости Талли-Фишера для UF-галактик из таблицы 2 приведена на нижней панели рис. 4. Линейная регрессия для них имеет вид

$$\lg(M_{\text{bary}}/M_{\odot}) = 2.78(\pm 0.23) \lg V_m + 4.44(\pm 0.47) \quad (6)$$

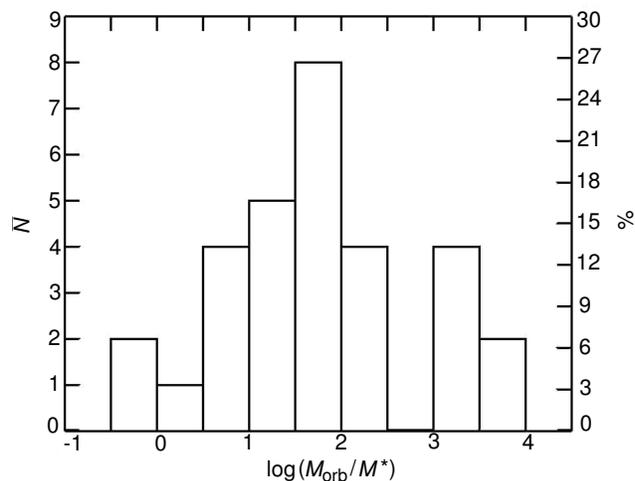
с дисперсией  $\sigma(\lg M_{\text{bary}}) = 0.172$ . Более пологий наклон в соотношении (6) по сравнению с (3) и (4) обусловлен известным фактом, что карликовые спирали содержат гораздо больше газа на единицу

звездной массы, чем диски галактик высокой светимости.

Таблица 3 содержит сводку различных средних характеристик UF-галактик из выборок таблиц 1 и 2 с ошибками среднего. Как следует из этих данных, выборки имеют примерно одинаковую глубину ( $V_h$ ), морфологический состав, видимое отношение осей, амплитуду кривой вращения,  $K$ -светимость и показатель цвета ( $B - K$ ), исправленный за Галактическое поглощение. Поэтому обе выбор-



**Рис. 5.** Соотношение между звездной массой и орбитальной оценкой массы для UF-галактик таблицы 1. Сплошная линия соответствует значению  $M_{\text{orb}}/M^* = 30$ , а штриховая  $M_{\text{orb}}/M^* = 2000$  для темного гало вокруг массивных спиралей и для ассоциаций карликовых галактик, соответственно.



**Рис. 6.** Распределение 30 пар «UF-галактика+спутник» по отношению орбитальной массы к звездной массе.

**Таблица 3.** Средние параметры для двух выборок UF-галактик из таблиц 1 и 2

Параметр	Галактики	Галактики
	табл. 2	табл. 1
$V_h, \text{ km s}^{-1}$	$5100 \pm 620$	$5040 \pm 440$
Type	$6.72 \pm 0.14$	$6.23 \pm 0.23$
$(a/b)_B$	$12.77 \pm 0.63$	$11.90 \pm 0.28$
$(a/b)_R$	$10.90 \pm 0.51$	$10.52 \pm 0.25$
$V_{\text{max}}, \text{ km s}^{-1}$	$114 \pm 12$	$129 \pm 13$
$\lg(L_K/L_\odot)$	$9.76 \pm 0.15$	$10.03 \pm 0.13$
$(B - K) - E_{(B-K)}$	$3.33 \pm 0.16$	$3.54 \pm 0.13$
$m_{21} - K$	$3.02 \pm 0.20$	$3.23 \pm 0.18$

ки вполне могут рассматриваться как взятые из единой генеральной совокупности.

Распределение 30 пар «UF-галактика + спутник» по орбитальным и звездным массам представлено в логарифмической шкале на рис. 5 кружками. Распределение их числа по отношению  $\lg(M_{\text{orb}}/M^*)$  показано на рис. 6. В области значений  $M_{\text{orb}}/M^* \sim 10^3-10^4$  имеется шесть пар, состоящих из карликовых галактик, светимость которых слабее, чем у Большого Магелланового облака. Согласно [29] подобные ассоциации карликовых галактик являются несвязанными системами с

формальным отношением вириальной массы к звездной массе примерно  $2 \times 10^3$ . Ближайший пример такой системы — карликовый квартет NGC 3109+Sex A+Sex B+Antlia. На рис. 5 эти шесть пар выделены перечеркнутыми символами. Для остальных пар «UF-галактика + спутник» видна тенденция следовать соотношению  $M_{\text{halo}}/M^* \simeq 30$ , найденному для ярчайших спиралей в близких группах [15]. В значительной степени дисперсия на этой диаграмме обусловлена эффектом проекции.

При наличии в выборке примеси фиктивных несвязанных пар наиболее устойчивой оценкой отношения  $M_{\text{orb}}/M^*$  является медианная оценка, которая составляет 49 или 32 в зависимости от учета или же игнорирования шести предполагаемых несвязанных пар.

Здесь следует отметить два фактора, содействующих снижению оценки  $M_{\text{orb}}/M^*$ . Определяя  $M_{\text{orb}}$ , мы пренебрегали ошибками измерения лучевых скоростей галактик. При медианной разности скоростей в парах  $87 \text{ km s}^{-1}$  и медианной ошибке разности  $34 \text{ km s}^{-1}$  несмещенная оценка  $M_{\text{orb}}$  оказывается меньше указанной в таблице 1 на 15%.

Вычисляя светимость сверхтонких галактик, мы игнорировали поправку за внутреннее поглощение света. Согласно [30] эта поправка зависит как от отношения осей галактики, так и от амплитуды кривой вращения:

$$A_B(\text{int}) = (1.54 + 2.54(\lg V_m - 2.2)) \lg(a/b). \quad (7)$$

При указанных в таблице 3 средних амплитудах кривой вращения  $114-129 \text{ km s}^{-1}$  и средних видимых сжатиях  $10.52-12.77$  типичное

внутреннее поглощение в UF-галактиках составляет  $A_K(\text{int}) = 0.083A_B = 0^{\text{m}}10 - 0^{\text{m}}12$  или  $A_B(\text{int}) = 1^{\text{m}}22 - 1^{\text{m}}41$ . Учет внутреннего поглощения повышает звездную массу в среднем примерно на 11%. С принятием обеих поправок медианное отношение  $M_{\text{orb}}/M^*$  снижается до значений 36–24, в согласии с характерным отношением приблизительно 30 для массивных спиралей в близких группах.

Как следует из данных таблицы 3, средний морфологический тип UF-галактик по шкале де Воккулера равен для двух подвыборок  $6.5 \pm 0.22$ . Согласно [17], этому типу соответствует средний истинный показатель цвета  $\langle B - K \rangle_0 = 2.85 \pm 0.10$ . Сравнивая это значение со средним значением  $(B - K) - E(B - K)$  в предпоследней строке таблицы 3, мы получаем средний наблюдаемый избыток цвета в UF-галактиках из-за внутреннего поглощения

$$E(B-K)_{\text{int}} = 3.12(\pm 0.10) - 2.85(\pm 0.10) = 0.27 \pm 0.14$$

или же среднюю величину внутреннего поглощения  $A_B(\text{int}) = E(B - K)/0.917 = 0.29 \pm 0.15$ . Как видим, наблюдаемое поглощение в диске типичной ультраплоской галактики оказывается примерно в 4 раза меньше ожидаемого по соотношению (7). Это значимое различие может свидетельствовать о дефиците пылевой компоненты в UF-галактиках из-за особенностей их эволюции или же о неприменимости соотношения Верхейна [30] к очень тонким дискам галактик.

## 5. БЛИЖАЙШИЕ ПРЕДСТАВИТЕЛИ УЛЬТРАПЛОСКИХ ГАЛАКТИК

Рассматривая случаи самых близких сверхтонких галактик, мы имеем возможность в деталях оценить особенности окружения, в котором они находятся. С этой целью мы выделили четыре UF-галактики с лучевыми скоростями относительно центра Местной группы  $V_{\text{LG}} < 600 \text{ км с}^{-1}$ .

*RFGC 1462 = UGC 4704.* У этой изолированной галактики типа Sdm с лучевой скоростью  $V_{\text{LG}} = 584 \text{ км с}^{-1}$  и видимой величиной  $B = 15^{\text{m}}0$  имеется близкий карликовый спутник ( $B = 17^{\text{m}}2$ ) на проекционном расстоянии 48 кпк с разностью скоростей  $\Delta V = 8 \text{ км с}^{-1}$ . Помимо него, на расстоянии  $R_p = 574 \text{ кпк}$  находится другой карликовый спутник ( $B = 17^{\text{m}}8$ ) с разностью лучевых скоростей  $18 \text{ км с}^{-1}$ , который мы не включили в таблицу 1 из-за большого проекционного расстояния.

*RFGC 1561 = UGC 5047.* Спиральная галактика типа Sdm с видимой величиной  $B = 16^{\text{m}}0$  и лучевой скоростью  $V_{\text{LG}} = 552 \text{ км с}^{-1}$  имеет 17 соседей в пределах  $R_p = 750 \text{ кпк}$  в интервале лучевых скоростей  $|\Delta V| < 500 \text{ км с}^{-1}$ . Некоторые галактики

в группе ярче самой UF-галактики, что делает некорректной оценку ее массы по орбитальным движениям соседей.

*RFGC 1700 = UGCA 193.* Карликовая спираль типа Sdm с лучевой скоростью  $V_{\text{LG}} = 426 \text{ км с}^{-1}$  и видимой величиной  $B = 14^{\text{m}}7$ . Имеет 16 соседей в указанном выше интервале  $R_p$  и  $|\Delta V|$ . Эта UF-галактика является периферийным спутником массивной S0 галактики NGC 3115, расположенной на расстоянии  $D = 9.7 \text{ Мпк}$ .

*RFGC 2246 = UGC 7321.* Одна из самых тонких галактик типа Sd с лучевой скоростью  $V_{\text{LG}} = 344 \text{ км с}^{-1}$  и видимой величиной  $B = 14^{\text{m}}1$ . Подсистема областей H II у нее имеет рекордно большое отношение осей:  $(a/b)_{\text{H II}} = 38$  [35]. Галактика находится на далекой окраине скопления Virgo на расстоянии  $D = 17.2 \text{ Мпк}$  в рассеянной группе с другими более яркими членами [36].

*RFGC 2937 = ESO 274-01.* Эта обособленная Scd-галактика с лучевой скоростью  $V_{\text{LG}} = 337 \text{ км с}^{-1}$  и видимой величиной  $B = 11^{\text{m}}7$  не входит в список UF-галактик, поскольку находится на низкой галактической широте  $b = 9^\circ$ . Отношение синих диаметров у нее составляет  $(a/b)_B = 10.34$ , но отношение красных диаметров 8.18, что несколько меньше принятого нами [11] предела 8.5. Тем не менее эта «почти-UF» галактика интересна своим малым расстоянием,  $D = 3.1 \pm 0.3 \text{ Мпк}$ , измеренным с высокой точностью по вершине ветви красных гигантов [37]. На проекционном расстоянии от нее  $160'$ , или 144 кпк, находится более слабая Im-галактика ESO 223-09; разность их лучевых скоростей составляет  $\Delta V = 64 \text{ км с}^{-1}$ . По принятому нами критерию эту галактику следовало бы считать физическим спутником RFGC 2937. Однако, расстояние ESO 223-09,  $D = 6.4 \pm 0.6 \text{ Мпк}$ , также измеренное по ветви красных гигантов [37], указывает на случайную оптическую близость этих галактик, разделенных пространственным расстоянием в  $3.3 \pm 0.7 \text{ Мпк}$ . Наличие такой плоской галактики в сфере радиусом всего 3.1 Мпк вокруг Млечного Пути может свидетельствовать о значительном обилии тонких дисковых галактик в местной вселенной.

## 6. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Изучение свойств сверхтонких спиральных галактик, видимых с ребра, не обладает пока необходимой систематичностью. Избранные UF-галактики наблюдались разными авторами в оптическом и радио диапазонах [4, 26, 38–41]. Высказывалось предположение [42], что экстремальная уплощенность UF-галактик вызвана

особенным строением их темного гало, в частности, высоким отношением массы гало к массе звездного диска. Однако представленные нами первые оценки отношения  $M_{\text{orb}}/M^*$  у сверхтонких галактик по движению их спутников не отличаются существенно от типичных значений  $M_{\text{halo}}/M^* \simeq 30$  для ярчайших спиралей типа M 31, M 81 в близких группах. Заметим, что примерно такие же отношения  $M_{\text{orb}}/M^* \sim 17\text{--}63$  имеют изолированные спиральные и эллиптические галактики каталога 2MIG [43], которые расположены в областях низкой плотности числа галактик или же входят в состав диффузных облаков и филаментов. Для уточнения величины  $M_{\text{orb}}/M^*$  у сверхтонких галактик необходимы систематические поиски вокруг них карликовых спутников с измерением лучевых скоростей как в линии H I по типу обзора AGES [44], так и по оптическим спектрам. Как было отмечено выше, среди спутников UF-галактик преобладают карликовые BCD, Im-галактики, богатые газом и молодыми звездами, что делает их удобными объектами для измерения лучевой скорости. Представленный нами список 817 ультраплоских галактик [11] является подходящей основой для такой программы.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

В работе были использованы базы данных NED ([www.ned.ipac.caltech.edu](http://www.ned.ipac.caltech.edu)) и HyperLeda (<http://leda.univ-lyon1.fr>). ИДК благодарит за поддержку Российский научный фонд (грант 14-02-00965).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. Karachentsev, *Astron. J.* **97**, 1566 (1989).
2. S. J. Kautsch, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **121**, 1297 (2009).
3. X. Shao, K. Disseau, Y. B. Yang, et al., *Astron. and Astrophys.* **579**, A57 (2015).
4. L. D. Matthews and W. van Driel, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **143**, 421 (2000).
5. I. D. Karachentsev, S. N. Mitronova, V. E. Karachentseva, et al., *Astron. and Astrophys.* **396**, 431 (2002).
6. S. J. Kautsch, J. S. Gallagher, and E. K. Grebel, *Astronomische Nachrichten* **330**, 1056 (2009).
7. M. Kregel, P. C. van der Kruit, and K. C. Freeman, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **358**, 503 (2005).
8. J. W. Goad and M. S. Roberts, *Astrophys. J.* **250**, 79 (1981).
9. J. Kormendy, *Secular Evolution in Disk Galaxies* (2013), p. 1.
10. S. Sachdeva, D. A. Gadotti, K. Saha, and H. P. Singh, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **451**, 2 (2015).
11. V. E. Karachentseva, Y. N. Kudrya, I. D. Karachentsev, et al., *Astrophysical Bulletin* **71**, 1 (2016).
12. I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, Y. N. Kudrya, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **47** (1999).
13. I. D. Karachentsev, E. I. Kaisina, and D. I. Makarov, *Astron. J.* **147**, 13 (2014).
14. I. D. Karachentsev and Y. N. Kudrya, *Astronomische Nachrichten* **336**, 409 (2015).
15. I. D. Karachentsev and Y. N. Kudrya, *Astron. J.* **148**, 50 (2014).
16. T. H. Jarrett, T. Chester, R. Cutri, et al., *Astron. J.* **119**, 2498 (2000).
17. T. H. Jarrett, T. Chester, R. Cutri, et al., *Astron. J.* **125**, 525 (2003).
18. I. D. Karachentsev, *Dvoynye galaktiki (Double galaxies)*. (1987).
19. J. Binney and M. Merrifield, *Galactic Astronomy* (1998).
20. D. J. Schlegel, D. P. Finkbeiner, and M. Davis, *Astrophys. J.* **500**, 525 (1998).
21. J. Heidmann, N. Heidmann, and G. de Vaucouleurs, *Mem. R. Astr. Soc.* **75**, 85 (1972).
22. Y. N. Kudrya, I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, and S. L. Parnovskii, *Astronomy Letters* **20**, 8 (1994).
23. Y. N. Kudrya, V. E. Karachentseva, and I. D. Karachentsev, *Astronomy Letters* **23**, 633 (1997).
24. E. F. Bell, D. H. McIntosh, N. Katz, and M. D. Weinberg, *Astrophys. J. Suppl.* **149**, 289 (2003).
25. R. B. Tully and J. R. Fisher, *Astron. and Astrophys.* **54**, 661 (1977).
26. J. J. Dalcanton and R. A. Bernstein, *Astron. J.* **120**, 203 (2000).
27. S. S. McGaugh, *Astrophys. J.* **632**, 859 (2005).
28. S. S. McGaugh and J. M. Schombert, *Astrophys. J.* **802**, 18 (2015).
29. R. B. Tully, L. Rizzi, A. E. Dolphin, et al., *Astron. J.* **132**, 729 (2006).
30. M. A. W. Verheijen, *Astrophys. J.* **563**, 694 (2001).
31. L. D. Matthews, J. S. Gallaher, and W. van Driel, *Astron. J.* **118**, 2751 (1999).
32. L. D. Matthews, *Astron. J.* **120**, 1764 (2000).
33. J. M. Uson and L. D. Matthews, *Astron. J.* **125**, 2455 (2003).
34. L. D. Matthews and K. Wood, *Astrophys. J.* **593**, 721 (2003).
35. I. D. Karachentsev, S. S. Kaisin, and E. I. Kaisina, *Astrophysics* **58**, 453 (2015).
36. I. D. Karachentsev, O. G. Nasonova, and H. M. Courtois, *Astrophys. J.* **743**, 123 (2011).
37. I. D. Karachentsev, R. B. Tully, A. Dolphin, et al., *Astron. J.* **133**, 504 (2007).
38. W. K. Huchtmeier, I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, et al., *Astron. and Astrophys.* **435**, 459 (2005).
39. D. I. Makarov, A. N. Burenkov, and N. V. Tyurina, *Astronomy Letters* **25**, 706 (1999).
40. D. I. Makarov, A. N. Burenkov, and N. V. Tyurina, *Astronomy Letters* **27**, 213 (2001).
41. M. Kregel, P. C. van der Kruit, and W. J. G. de Blok, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **352**, 768 (2004).

42. A. Banerjee and C. J. Jog, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **431**, 582 (2013).  
 43. V. E. Karachentseva, I. D. Karachentsev, and O. V. Melnyk, *Astrophysical Bulletin* **66**, 389 (2011).  
 44. R. F. Minchin, E. Momjian, R. Auld, et al., *Astron. J.* **140**, 1093 (2010).

## Ultra-Flat Galaxies Selected from RFGC Catalog. II. Orbital Estimates of Halo Masses

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

We used the Revised Flat Galaxy Catalog (RFGC) to select 817 ultra-flat (UF) edge-on disk galaxies with blue and red apparent axial ratios of  $(a/b)_B > 10.0$  and  $(a/b)_R > 8.5$ . The sample covering the whole sky, except the Milky Way zone, contains 490 UF galaxies with measured radial velocities. Our inspection of the neighboring galaxies around them revealed only 30 companions with radial velocity difference of  $|\Delta V| < 500 \text{ km s}^{-1}$  inside the projected separation of  $R_p < 250 \text{ kpc}$ . Wherein, the wider area around the UF galaxy within  $R_p < 750 \text{ kpc}$  contains no other neighbors brighter than the UF galaxy itself in the same velocity span. The resulting sample galaxies mostly belong to the morphological types Sc, Scd, Sd. They have a moderate rotation velocity curve amplitude of about  $120 \text{ km s}^{-1}$  and a moderate K-band luminosity of about  $10^{10} L_\odot$ . The median difference of radial velocities of their companions is  $87 \text{ km s}^{-1}$ , yielding the median orbital mass estimate of about  $5 \times 10^{11} M_\odot$ . Excluding six probable non-isolated pairs, we obtained a typical halo-mass-to-stellar-mass of UF galaxies of about 30, what is almost the same one as in the principal spiral galaxies, like M 31 and M 81 in the nearest groups. We also note that ultra-flat galaxies look two times less “dusty” than other spirals of the same luminosity.

Keywords: *galaxies: spiral—galaxies*