

УДК 524.74-52

Н α ИЗОБРАЖЕНИЯ УЛЬТРА-ПЛОСКИХ СПИРАЛЬНЫХ ГАЛАКТИК, ВИДИМЫХ С РЕБРА

© 2020 С. С. Кайсин^{1*}, И. Д. Караченцев¹,
Г. Эрнандес-Толедо², Л. Гутьеррес³, В. Е. Караченцева⁴

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Институт астрономии UNAM, Мехико, Мексика

³Национальная астрономическая обсерватория, Энсенада, Мексика

⁴Главная астрономическая обсерватория Национальной Академии наук, Киев, 02000 Украина

Поступила в редакцию 24 сентября 2019 года; после доработки 14 ноября 2019 года;
принята к публикации 14 ноября 2019 года

Мы представляем Н α изображения ультра-плоских (UF) спиральных галактик, видимых почти с ребра. Галактики имеют угловой диаметр в B -полосе $a > 1'.9$ и видимые отношения осей $(a/b) > 10$. Мы обнаружили, что их Н α изображения выглядят, в среднем, почти в два раза тоньше, чем в красном континууме. Темп звездообразования в изучаемых объектах, определенный по Н α -поток, хорошо согласуется с темпом, вычисленным по FUV -поток из GALEX обзора, если использовать модифицированную формулу Верхейна и Санчизи для учета внутреннего поглощения в UF-галактиках. Логарифм удельного темпа звездообразования в UF-галактиках показывает малый разброс, 0.19, с плавным уменьшением от -10.4 для карликовых спиралей к -10.7 для массивных. Относительное количество водородной массы в UF-дисках меняется от примерно 50% в карликовых дисках до около 8% в массивных. Искажения структуры в UF-галактиках встречаются менее часто (примерно 16%), чем в толстых (менее изолированных) дисках спиральных галактик, видимых с ребра. На космической шкале времени, 13.7 млрд. лет, диски больших спиралей являются более эффективными «машинами» для переработки газа в звезды, чем карликовые спирали.

Ключевые слова: галактики: спиральные — галактики: звездообразование

1. ВВЕДЕНИЕ

Реферативный каталог плоских галактик (RFGC) (Karachentsev et al. 1999) содержит 4236 объектов, распределенных по всему небу. В каталог отбирались галактики с угловым диаметром в B -полосе $a \geq 0'.6$ и видимым отношением осей $a/b \geq 7$, измеренными на Первом Паломарском обзоре неба POSS-1 и обзоре ESO/SERC. Каталог RFGC включает в себя спиральные галактики разных морфологических типов от S0, Sa до Sd, Sm. Из этого массива была выделена выборка 817 ультра-плоских галактик (UFgg) (Karachentseva et al. 2016) с «синим» и «красным» отношением осей $(a/b)_B \geq 10$ и $(a/b)_R \geq 8.5$. Основную долю в UF-выборке составляют спиральные галактик типов Sc, Scd, Sd, у которых сфероидальная звездная подсистема вносит незначительный вклад в общую массу/светимость галактики. Такие дискообразные

галактики с пренебрежимо малыми балджами являются привлекательными объектами для различных исследований их кинематики, динамики и особенностей звездообразования ввиду простой структуры этих галактик.

Согласно данным Karachentsev et al. (2016), Melnyk et al. (2017), UF-галактики располагаются в областях пониженной плотности, избегая тесного соседства с другими галактиками. Очевидно, что отсутствие близких соседей является важным условием для выживания тонкого звездного диска. Наличие у UF-галактик редких мелких спутников дает возможность оценить полную массу по измерениям разности лучевых скоростей и проекционных расстояний спутников. Вопреки некоторым ожиданиям Vanerjee and Jog (2013), темные гало UF-галактик не показали избытка темной материи по сравнению с другими спиральными галактиками (Karachentsev et al. 2016).

Получение изображений ультраплоских галактик в эмиссионной линии Н α представляет большой интерес, поскольку позволяет выделить Н II-

*E-mail: skai@sao.ru

области с молодым звездным населением. К сожалению, данные об $H\alpha$ -изображениях тонких дисков галактик, видимых с ребра, крайне редки в литературе. Однако, уже первый $H\alpha$ -снимок UF-галактики RFGC 2246 = UGC 7321 показал (Karachentsev et al. 2015), что подсистема молодого населения галактики имеет отношение осей $(a/b)_{H\alpha} = 38$, гораздо большее, чем старое население диска, $(a/b) = 14$. Связь между сжатием диска и возрастом его населения можно было бы проследить по изображениям UF-галактик в ультрафиолетовых диапазонах FUV и NUV , но низкое угловое разрешение существующего GALEX-обзора (Gil de Paz et al. 2007) препятствует успеху такого подхода.

Для наблюдений в линии $H\alpha$ мы отбирали наиболее крупные UF-галактики с угловым диаметром в B -полосе $(a/b) > 1'.9$, расположенные в зоне склонений $DEC > -30^\circ$.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Наблюдения UF-галактик в эмиссионной линии $H\alpha$ выполнялись на 2.12-м $f/7.5$ кассегреновском телескопе Национальной астрономической обсерватории Сан Педро в Мексике в течение нескольких сетов с февраля 2016 г. по сентябрь 2017 г. Телескоп был оснащен $2K \times 2K$ CCD камерой с размером пикселя $13.5 \times 13.5 \mu m$. При биннинге 2×2 камера обеспечивала поле зрения $6' \times 6'$ с разрешением $0.352 \text{ arcsec/pixel}$. Наблюдения проводились с набором узких интерференционных фильтров, центрированных на различные длины волн: 6603, 6643, 6683 и 6723 Å и с эквивалентными ширинами 80 Å сообразно лучевой скорости галактики. Кривые спектрального пропускания фильтров приведены на рис. 1.

Для вычитания континуума были сделаны снимки галактик в широкополосном g -Gunn фильтре. Калибровка снимков осуществлялась каждую ночь с помощью спектрофотометрических стандартов.

Обработка наблюдательных данных выполнялась набором стандартных процедур, которые включали в себя: вычитание bias, деление на плоское поле, удаление космических частиц и вычитание фона неба. Снимки в континууме нормировались к изображению в $H\alpha$ -фильтре с использованием нескольких дюжин звезд и затем вычитались. $H\alpha$ -поток галактики определялся по $H\alpha$ -изображению с вычтенным континуумом. Типичная погрешность измерения $H\alpha$ -потока определялась, как правило, погодными условиями и составляла около 0.1 dex. При этой точности мы игнорировали вклад в поток эмиссионного дублета [N II], соседнего с $H\alpha$.

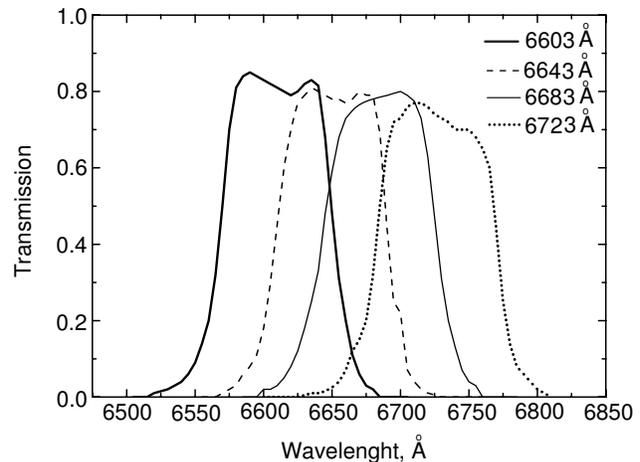


Рис. 1. Кривые спектрального пропускания фильтров, использовавшихся в наблюдениях.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Первая страница мозаики 45 пар полученных изображений UF-галактик представлена на рис. 2. Левые изображения в каждой паре соответствуют суммарной экспозиции в линии $H\alpha$ и в континууме, а правые показывают разность снимков в $H\alpha$ и континууме. Имя каждого объекта, масштаб снимка и ориентация «север–восток» указаны на правых изображениях. На ряде снимков видны остаточные следы от ярких звезд и объектов с аномальным цветом.

Сводка основных параметров наблюдавшихся UF-галактик представлена в таблице 1. В столбцах таблицы содержатся: (1) — номер галактики в каталоге RFGC; (2) — экваториальные координаты; (3,4) — угловой диаметр в arcmin и видимое отношение осей из каталога RFGC, измеренные на репродукциях Паломарского обзора неба в B -полосе; (5) — гелиоцентрическая лучевая скорость галактики в km s^{-1} ; (6) — эффективная длина волны фильтра (Å), в котором экспонировалась галактика; (7) — время экспозиции в $H\alpha$ -фильтре в сек; (8) — логарифм потока в линиях $H\alpha + [N II]$ в $\text{erg cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$.

Помимо линии $H\alpha$, в используемые нами фильтры попадают линии азота [N II]: 6548 Å и 6584 Å. Согласно Kennicutt et al. (2008), отношение интенсивностей линий [N II] и $H\alpha$ для спиральных галактик зависит от абсолютной величины галактики и выражается соотношением

$$\lg(F[N II]/F(H\alpha)) = -0.173M_B - 3.90 \quad (1)$$

при $M_B > -21^m0$ и -0.27 при $M_B < -21^m0$ со средним квадратичным отклонением 0.26 dex. Для типичной галактики нашей выборки с $M_B \simeq -19^m4$ величина поправки к потоку $F(H\alpha)$ за счет вклада

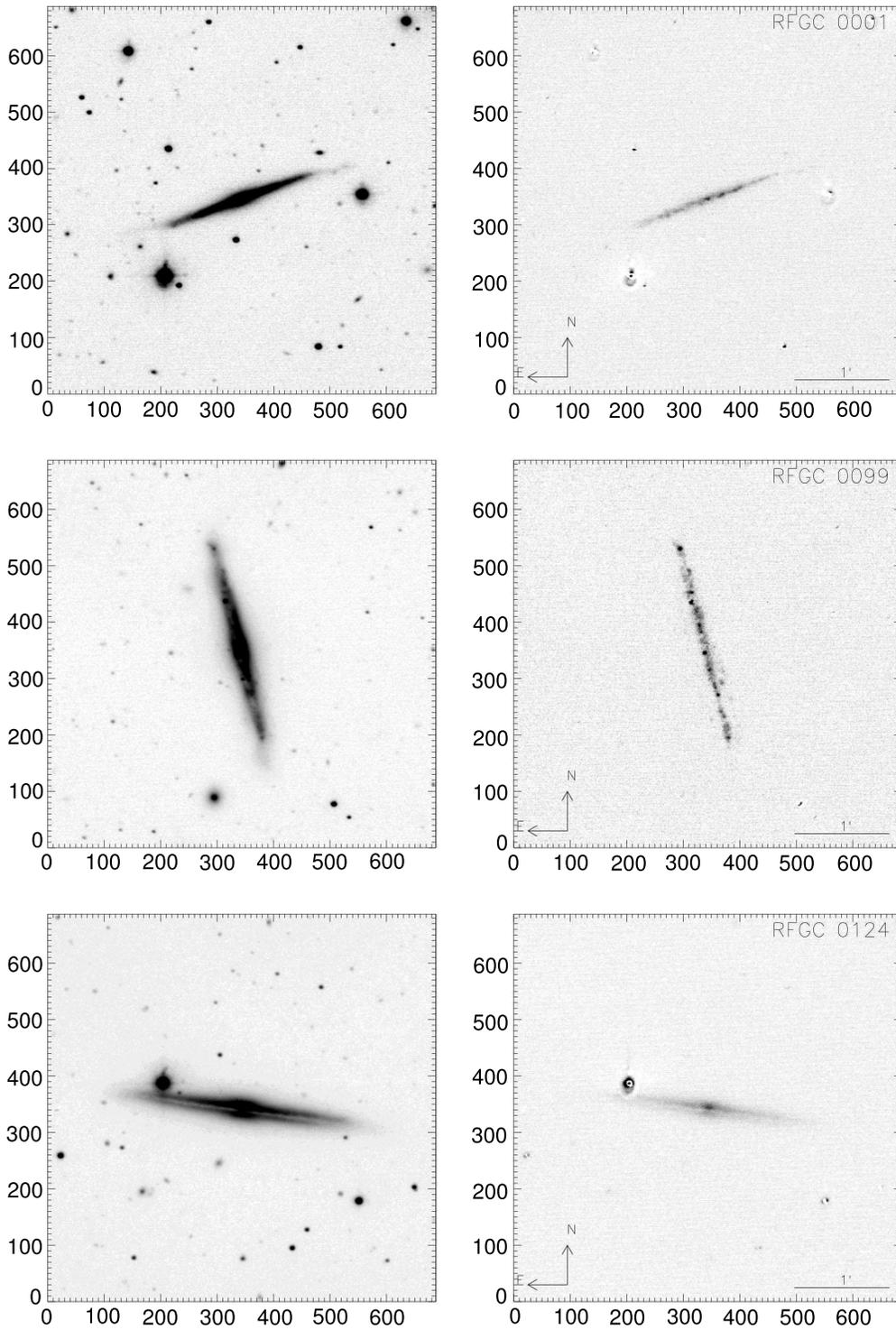


Рис. 2. Мозаика изображений ультра-плоских галактик. Левые изображения в каждой паре представляют сумму экспозиций в линии Н α и в континууме, а правые изображения соответствуют разности «Н α —континуум». На правых снимках указаны: имя галактики, линейный масштаб, направление «север—восток». Полная сводка Н α -изображений UF-галактик доступна по адресу <http://lv.sao.ru/EDGE-ON/>.

Таблица 1. Список ультра-плоских галактик, наблюдавшихся в линии H α

Galaxy	RA (2000.0) DEC	a'	$\log(a/b)$	V_h	Filter	T_{exp}	$\log F_{\text{H}\alpha}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
RFGC 001	000056.0 +202016	2.02	1.07	6804	6723	1440	-13.45
RFGC 099	002547.7 -021705	2.46	1.05	5339	6643	2160	-12.97
RFGC 124	003149.4 -264312	2.80	1.00	7235	6723	2160	-12.72
RFGC 161	004214.7 -180942	3.36	1.05	1553	6603	2700	-12.80
RFGC 176	004708.2 +302027	2.50	1.08	5248	6643	2160	-12.98
RFGC 255	010836.9 +013830	4.65	1.19	1982	6603	2700	-12.77
RFGC 438	020302.0 -093922	2.80	1.19	3864	6643	1800	-12.73
RFGC 463	020926.4 +371529	2.13	1.29	4586	6643	2160	-13.46
RFGC 504	022131.0 +141155	2.52	1.06	3744	6643	2160	-12.85
RFGC 511	022356.1 -064216	1.97	1.22	9560	6723	2160	-13.61
RFGC 517	022515.5 +452704	2.02	1.00	5195	6643	2160	-13.21
RFGC 531	022827.3 +153625	1.90	1.16	4080	6643	2160	-13.39
RFGC 560	023631.6 +071834	2.89	1.12	6122	6723	2160	-12.91
RFGC 603	025017.5 -083550	2.55	1.01	5326	6643	2160	-13.42
RFGC 620	025426.2 +423900	2.43	1.21	2162	6603	1800	-13.11
RFGC 722	032524.8 -161405	3.23	1.06	1873	6603	2400	-12.81
RFGC 798	040048.9 +350049	2.55	1.06	4157	6643	2160	-12.93
RFGC 855	042921.8 -044535	2.12	1.03	4353	6643	3600	-13.03
RFGC 911	045146.0 +034005	2.02	1.00	4578	6643	2160	-13.41
RFGC 944	050732.0 -113905	2.26	1.12	2358	6603	2400	-13.39
RFGC 1133	064854.0 +661540	2.24	1.01	3304	6643	3600	-12.76
RFGC 1339	081357.6 +523853	4.87	1.09	5459	6683	3600	-13.31
RFGC 1434	084850.8 +295212	2.13	1.05	5964	6683	3600	-13.57
RFGC 1462	085901.0 +391233	4.14	1.00	595	6603	2400	-12.98
RFGC 1504	091154.6 -200700	4.76	1.19	2177	6603	2400	-12.95
RFGC 1700	100236.0 -060049	4.31	1.16	661	6603	3600	-12.90
RFGC 3359	182402.4 +651822	2.52	1.22	7124	6723	2160	-13.20
RFGC 3378	183339.5 +320822	1.95	1.25	5456	6683	2400	-13.62
RFGC 3385	183754.4 +173201	2.63	1.14	4500	6683	1800	-13.05
RFGC 3608	203523.7 -061440	2.11	1.07	5798	6643	2400	-13.39
RFGC 3645	204838.4 -171430	2.08	1.32	8336	6723	2160	-13.50
RFGC 3651	204952.2 -070119	3.47	1.05	6047	6723	2160	-12.94
RFGC 3803	214439.4 -064121	2.06	1.27	3090	6643	2400	-13.39
RFGC 3824	215235.8 +281823	2.08	1.09	3476	6643	2160	-12.88
RFGC 3827	215245.5 +385611	3.09	1.11	5989	6723	2160	-12.95
RFGC 3846	215807.4 +010032	3.47	1.13	3011	6643	2160	-13.17
RFGC 3880	220804.8 -101959	2.16	1.33	2866	6643	2400	-13.63
RFGC 3935	222316.6 -285851	3.64	1.03	1808	6603	2700	-12.68
RFGC 4039	225912.8 +133624	3.44	1.24	2568	6643	2160	-12.84
RFGC 4072	230754.9 +050940	1.90	1.02	3523	6643	2160	-13.26
RFGC 4078	231203.6 +484859	1.93	1.29	8657	6723	2160	-13.25
RFGC 4081	231313.1 +062548	4.70	1.02	4839	6683	1800	-13.23
RFGC 4091	231502.6 +012608	2.11	1.05	4961	6643	2160	-13.41
RFGC 4106	231930.4 +160429	3.25	1.06	7238	6723	2160	-12.97
RFGC 4149	233543.6 +322306	2.37	1.12	4957	6683	2100	-12.95

дублета [N II] составляет -0.14 dex, что меньше стандартного отклонения в соотношении (1). Поэтому мы не исправляли измеренный поток $F(\text{H}\alpha + [\text{N II}])$ за вклад азотного дублета.

Измеренный интегральный поток галактики $F_c(\text{H}\alpha)$, исправленный за Галактическое и внутреннее поглощение, использовался нами для определения интегрального темпа звездообразования, $SFR(\text{H}\alpha)$, в единицах $M_\odot/\text{год}$. Согласно Kennicutt (1998),

$$\lg(SFR(\text{H}\alpha)) = \lg F_c(\text{H}\alpha) + 2 \lg D + 8.98, \quad (2)$$

где расстояние D выражено в Мпк.

У большинства галактик нашей выборки имеются оценки видимой величины m_{FUV} в FUV -полосе далекого ультрафиолета ($\lambda_{\text{ef}} = 1539 \text{ \AA}$, $\text{FWHM} = 269 \text{ \AA}$), измеренной на спутнике GALEX¹. Следуя Lee et al. (2011), мы определяли интегральный темп звездообразования галактики как

$$\lg(SFR(FUV)) = 2.78 - 0.4m_{FUV}^c + 2 \lg D, \quad (3)$$

где видимая FUV -величина исправлена за внешнее и внутреннее поглощение. Сравнение значений $SFR(\text{H}\alpha)$ и $SFR(FUV)$ дает возможность уточнить величину внутреннего поглощения в галактиках, которое в случае edge-on галактик оказывается значительным.

Расширенная сводка основных параметров UF-галактик представлена в таблице 2. Помимо 45 наблюдавшихся нами галактик мы включили в конце таблицы данные об еще десяти UF-галактиках с измерениями $F(\text{H}\alpha)$ -потока, сделанными Gavazzi et al. (2015), Karachentsev et al. (2015), Spector and Brosch (2017). В столбцах таблицы 2 содержатся: (1) — номер галактики в RFGC; (2) — морфологический тип по шкале de Vaucouleurs: 4 — Sbc, 5 — Sc, 6 — Scd, 7 — Sd, определенный нами по изображениям галактики в PanSTARRS-обзоре (Chambers et al. 2016); (3) — логарифм видимого отношения осей, приведенного к стандартной изофоте из HyperLEDA (Makarov et al. 2014); (4, 5) — видимая B -величина и Галактическое поглощение в B -полосе из Makarov et al. (2014), Schlegel et al. (1998); (6) — расстояние до галактики (Мпк), определенное по лучевой скорости относительно центра Местной группы при параметре Хаббла $H_0 = 73 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$; для более близких галактик с $V_{LG} < 2500 \text{ км с}^{-1}$ оценка D сделана в рамках модели Shaya et al. (2017), учитывающей падение галактик к скоплению Virgo и расширение Местной космической пустоты; (7) — амплитуда вращения галактики (в км с^{-1}) из Makarov et al. (2014); (8) — видимая величина m_{21} из Makarov et al. (2014),

характеризующая поток галактики в линии нейтрального водорода 21 см; (9) — логарифм потока в линии $\text{H}\alpha$; (10) — видимая величина галактики в FUV -полосе по данным GALEX; (11) — логарифм водородной массы галактики

$$\lg M_{\text{H I}} = 12.33 - 0.4m_{21} + 2 \lg D, \quad (4)$$

выраженный в единицах M_\odot ; (12) — величина принятого нами внутреннего поглощения в галактике в B -полосе (см. раздел 4); (13) — видимая величина галактики в K -полосе, определенная по интегральной B -величине и морфологическому типу T как

$$K = B + T/4 - 4.60 \quad (5)$$

с учетом внутреннего и внешнего поглощения; такой рецепт, предложенный Jarrett et al. (2003), нивелирует систематическую недооценку потока от периферийных областей при фотометрии голубоватых edge-on галактик в обзоре 2MASS (Jarrett et al. 2000); (14) — интегральная светимость галактики в K -полосе (в L_\odot), которая при $M_*/L_K = 1M_\odot/L_\odot$ (Bell et al. 2003) соответствует звездной массе галактики; (15,16) — интегральный темп звездообразования, определенный по $\text{H}\alpha$ и FUV потокам; (17) — удельный темп звездообразования $sSFR(\text{H}\alpha)/M_*$ в единицах (yr^{-1}) в предположении $M_*/L_K = 1$.

4. УЧЕТ ВНУТРЕННЕГО ПОГЛОЩЕНИЯ В UF-ГАЛАКТИКАХ

Пример нашей Галактики показывает, что пыль, H II-области и голубые звезды распределены в спиральном диске крайне неравномерно. Картина клочковатого распределения пыли далека от простой модели плоско-параллельных слоев. По этой причине до сих пор не было предложено надежной схемы учета внутреннего поглощения. Обычно величину поглощения в B -полосе выражают в виде

$$A_B^i = \gamma \lg(a/b), \quad (6)$$

где коэффициент γ зависит от светимости или же морфологического типа галактики. Схема учета внутреннего поглощения, используемая в HyperLEDA, подразумевает зависимость γ от морфологического типа. Ее несовершенством является монотонный рост величины γ с увеличением T , что приводит к сильной переоценке поглощения у карликовых галактик поздних типов.

Другие авторы (Bothwell et al. 2009, Devour and Bell 2016, Lee et al. 2009) использовали схемы, где параметр γ зависел от абсолютной величины галактики, причем характер этой зависимости был существенно различным у разных авторов. Очевидно, что сама абсолютная величина галактики зависит от принимаемого внутреннего поглощения,

¹<http://galex.stsci.edu/GalexView/>

Таблица 2. Основные характеристики ультра-плоских галактик

RFGC	T	$\log r_{25}$	B_t	A_G	D	V_m	m_{21}	$\log F_{H\alpha}$	m_{FUV}	$\log M_{HI}$	A_B	m_K	$\log L_K$	$\log SF R\alpha$	$\log SF R\alpha$	$\log SF R\alpha$	$\log sFR\alpha$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(17)
1	5	0.85	15.65	0.34	97	204	15.53	-13.45	19.18	10.09	1.29	10.67	11.01	0.14	0.34	-10.87	
99	5	0.88	15.69	0.11	75	190	15.02	-12.97	17.26	10.07	1.28	10.95	10.68	0.34	0.70	-10.34	
124	5	0.82	14.61	0.09	101	294	16.54	-12.72	19.92	9.72	1.51	9.66	11.45	0.94	0.06	-10.51	
161	7	0.82	14.33	0.09	22	86	14.33	-12.80		9.28	0.63	10.76	9.69	-0.84		-10.53	
176	6	0.89	14.77	0.29	75	165	14.93	-12.98	17.67	10.11	1.19	10.19	10.98	0.33	0.60	-10.65	
255	7	0.73	14.67	0.11	24	89	14.48	-12.77	16.41	9.30	0.58	11.13	9.62	-0.75	-0.49	-10.37	
438	7	1.04	14.61	0.11	53	117	14.88	-12.73	16.71	9.83	1.08	10.57	10.53	0.19	0.46	-10.34	
463	6	0.73	16.08	0.21	66	104	15.77	-13.46		9.66	0.68	12.09	10.11	-0.50		-10.61	
504	6	0.86	14.73	0.66	53	180	15.03	-12.85	18.28	9.77	1.21	9.76	10.85	0.26	0.36	-10.59	
511	5	1.00	15.88	0.13	131			-13.61	18.90		1.50	10.98	11.12	0.28	0.71	-10.84	
517	5	0.86	15.41	0.40	74	128	16.15	-13.21	19.66	9.61	1.07	10.59	10.81	0.07	-0.21	-10.74	
531	6	0.75	16.0	1.00	58	93	15.67	-13.39	20.06	9.59	0.63	11.27	10.33	-0.37	-0.46	-10.70	
560	5	0.90	15.44	0.54	85	202	14.74	-12.91	18.71	10.29	1.36	10.19	11.09	0.64	0.62	-10.45	
603	5	0.95	15.02	0.13	73	130	16.08	-13.42	18.52	9.62	1.07	10.47	10.85	-0.22	0.02	-11.07	
620	7	0.69	15.63	0.40	32	86	15.53	-13.11	18.47	9.13	0.53	11.85	9.58	-0.79	-0.88	-10.37	
722	7	0.83	15.33	0.18	25	101	14.12	-12.81	16.61	9.48	0.75	11.55	9.48	-0.67	-0.35	-10.15	
798	5	0.89	15.19	0.92	59	166	15.20	-12.93		9.79	1.19	9.73	10.96	0.33		-10.63	
855	6	0.92	15.38	0.23	59	136	15.40	-13.03	18.09	9.71	1.07	10.98	10.46	0.01	0.09	-10.45	
911	6	0.94	16.0	0.27	62	111	14.68	-13.41		10.04	0.93	11.70	10.21	-0.38		-10.59	
944	7	0.75	15.40	0.69	31	99	15.48	-13.39		9.12	0.67	11.19	9.82	-0.97		-10.79	
1133	4	0.98	15.28	0.35	47	142	15.34	-12.76		9.54	1.18	10.15	10.59	0.16		-10.43	
1339	5	0.89	15.23	0.19	74	277	14.52	-13.31	19.27	10.26	1.59	10.10	11.01	0.14	0.18	-10.87	
1434	5	0.69	15.52	0.17	81	186	15.66	-13.57	19.00	9.88	0.99	11.01	10.72	-0.31	-0.11	-11.03	
1462	7	0.98	15.18	0.13	15	48	14.39	-12.98	16.21	8.93	0.26	11.94	8.89	-1.50	-1.05	-10.39	
1504	5	1.14	14.74	0.66	26	156	13.82	-12.95	18.18	9.63	1.47	9.26	10.44	-0.35	-0.02	-10.79	
1700	7	1.15	14.70	0.17	10	53	14.40	-12.90	16.60	8.57	0.40	11.28	8.80	-1.71	-1.42	-10.51	
3359	5	1.01	15.76	0.18	101	191	15.40	-13.20	18.96	10.18	1.48	10.75	11.02	0.47	0.49	-10.55	
3378	5	1.15	16.50	0.38	78	184	16.11	-13.62	19.82	9.67	1.64	11.13	10.64	-0.06	0.19	-10.70	

Таблица 2. Основные характеристики ультра-плоских галактик. (Продолжение)

RFGC	T	$\log r_{25}$	B_t	A_G	D	V_m	m_{21}	$\log F_{H\alpha}$	m_{FUV}	$\log M_{HI}$	A_B	m_K	$\log L_K$	$\log SFR\alpha$	$\log SFRu$	$\log sSFR\alpha$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)
3385	5	0.74	15.39	1.27	65	234	14.75	-13.05		10.06	1.21	9.56	11.11	0.38		-10.73
3608	5	0.96	15.38	0.22	82	278	15.44	-12.92	19.06	9.98	1.72	10.09	11.10	0.68	0.48	-10.42
3645	6	1.03	16.1	0.25	116			-13.50			1.40	11.39	10.86	0.27		-10.59
3651	5	0.90	15.15	0.27	85	253	14.80	-12.94	18.03	10.27	1.54	9.99	11.17	0.62	0.82	-10.55
3803	6	0.99	15.70	0.16	45	89	16.11	-13.39	17.58	9.19	0.79	11.65	9.96	-0.72	-0.21	-10.68
3824	6	0.94	15.28	0.36	52	113	15.22	-12.88		9.67	0.95	10.87	10.39	0.03		-10.36
3827	5	1.12	16.50	1.39	86	231	15.55	-13.25		9.98	1.82	9.94	11.20	0.72		-10.48
3846	4	0.79	15.48	0.23	44	143	14.69	-13.17	18.41	9.74	0.96	10.69	10.32	-0.43	-0.48	-10.75
3880	7	1.09	16.0	0.16	42	84	15.72	-13.63	18.03	9.29	0.82	12.17	9.69	-1.01	-0.43	-10.70
3935	7	0.93	14.36	0.08	19	60	14.24	-12.68	16.10	9.19	0.42	11.01	9.46	-0.94	-0.72	-10.40
4039	6	0.82	14.92	0.35	38	121	14.23	-12.84		9.80	0.87	10.60	10.23	-0.24		-10.47
4072	5	0.67	16.39	0.29	51	113	15.63	-13.26	19.03	9.49	0.67	12.08	9.89	-0.51	-0.68	-10.40
4078	5	1.22	16.50	1.00	123	269	15.83	-13.55		10.18	2.14	10.01	11.48	0.77		-10.71
4081	5	0.95	14.53	0.47	70	236	14.00	-13.23	17.90	10.42	1.56	9.15	11.34	0.22	0.88	-11.12
4091	5	0.94	15.57	0.24	71	137	15.36	-13.41	18.51	9.89	1.10	10.88	10.66	-0.20	0.11	-10.86
4106	5	0.67	15.51	0.24	102	217	15.12	-12.97	18.04	10.30	1.05	10.87	10.98	0.54	0.58	-10.44
4149	6	0.70	15.54	0.35	72	100	14.78	-12.95	17.31	10.13	0.63	11.46	10.44	0.10	0.33	-10.34
2246	7	1.22	14.10	0.12	17	98	13.70	-12.69	16.30	9.31	1.08	10.05	9.75	-0.76	-0.35	-10.51
626	7	0.85	16.93	0.60	91	101	16.23	-13.77		9.76	0.77	12.71	10.14	-0.40		-10.54
1446	5	0.85	16.40	0.19	82	126	16.32	-13.36	19.46	9.63	0.94	11.92	10.37	-0.10	-0.30	-10.47
251824	5	1.00	17.52	0.17	88	93	16.65	-13.80	19.43	9.56	0.84	13.16	9.93	-0.53	-0.32	-10.46
2026	5	0.90	15.75	0.08	104	218	16.10	-13.34	19.85	9.92	1.42	10.90	10.98	0.30	0.03	-10.68
2079	5	0.80	16.71	0.10	94	158	16.30	-13.34	19.77	9.76	1.04	12.22	10.37	0.06	-0.30	-10.31
2253	5	0.99	16.65	0.12	91	160	16.98	-13.43	20.73	9.46	1.30	11.88	10.48	0.06	-0.50	-10.42
2322	5	0.71	16.07	0.07	94	164	15.93	-13.33	18.31	9.90	0.94	11.71	10.57	0.02	0.18	-10.55
2339	5	0.82	15.87	0.09	100	180	15.28	-13.38	18.57	10.22	1.16	11.27	10.80	0.12	0.32	-10.68
2461	6	0.80	17.00	0.07	97	116	16.62	-13.51	19.63	9.66	0.82	13.01	10.08	-0.19	-0.41	-10.27

поэтому схема оценки A_B^i для edge-on галактик требует ряда последовательных итераций.

Verheijen and Sancisi (2001) предложили выражать параметр γ через амплитуду вращения галактики:

$$\gamma(V_m) = [1.54 + 2.5(\lg V_m - 2.2)] \quad (7)$$

при $V_m > 43 \text{ км с}^{-1}$ и $\gamma = 0$ при $V_m < 43 \text{ км с}^{-1}$. Такой подход свободен от итераций, однако применим только к галактикам с известной амплитудой вращения. Рассматривая статистику отношения $SFR(H\alpha)/SFR(FUV)$ для галактик Местного объема, Karachentsev et al. (2018) пришли к заключению, что выражение (6) несколько завышает величину поглощения у массивных галактик и занижает ее для карликовых галактик. По нашей оценке оптимальное значение поправки за внутреннее поглощение в спиральных дисках позднего типа имеет вид

$$A_B^i = (1.3 + 2.0(\lg V_m - 2.2)) \lg r_{25} \quad (8)$$

при $V_m > 36 \text{ км с}^{-1}$ и $A_B^i = 0$ при $V_m < 36 \text{ км с}^{-1}$, где $r_{25} = (a/b)_{25}$ — видимое отношение осей, приведенное к стандартной изофоте (Makarov et al. 2014). Посчитанные по этому рецепту значения A_B^i представлены в таблице 2. Для двух галактик с неизвестными V_m оценки поглощения сделаны нами по эмпирическому соотношению

$$A_B^i(T) = \begin{cases} (3.0 - 0.3T) \lg r_{25} & , T > 4 \\ 0.3(1 + T) \lg r_{25} & , T < 5, \end{cases} \quad (9)$$

которое более адекватно описывает поглощение в галактиках поздних типов, чем схемы Bothwell et al. (2009), Devour and Bell (2016), Lee et al. (2009) или алгоритм, использованный в HyperLEDA. Следуя Lee et al. (2009), мы принимали для Галактического поглощения в $H\alpha$ и FUV -полосе коэффициенты перехода

$$A_{H\alpha}^G = 0.61A_B^G, \quad A_{FUV}^G = 1.93A_B^G. \quad (10)$$

Для внутреннего поглощения, согласно Lee et al. (2009), были приняты соотношения

$$A_{H\alpha}^i = 1.07A_B^i, \quad A_{FUV}^i = 1.93A_B^i. \quad (11)$$

Здесь более высокое значение коэффициента перехода для линии $H\alpha$ по сравнению с соотношением (9) обусловлено наличием тесной корреляции между распределением пыли и HII-областей в дисках галактик, а его величина оценена по спектрофотометрическим измерениям бальмеровского декремента (см. детали в Lee et al. (2009)).

Определяя водородную массу галактик M_{HI} , мы игнорировали поправку за внутреннее самопоглощение эмиссии в линии 21 см. Для галактик, видимых с ребра, HyperLEDA вводит поправку к m_{21} за

эффект самопоглощения, равную $\Delta m_{21} = -0.082$. Однако, такая поправка представляется нам завышенной. Jones et al. (2018) исследовали эффект самопоглощения в линии 21 см на выборке 2022 галактик из обзора ALFALFA и пришли к выводу, что диски галактик почти прозрачны в линии 21 см, а величина необходимой поправки составляет всего

$$\Delta \lg M_{HI} = (0.13 \pm 0.03) \lg(a/b). \quad (12)$$

Однако, сравнение выборки UF-галактик с выборкой Sc, Sd-галактик, видимых анфас (Karachentsev and Karachentseva 2019), показывает, что эффект самопоглощения в действительности оказывается еще меньше, теряясь в ошибках измерения HI-потока галактик и ошибках морфологической классификации галактик.

5. ТЕМПЫ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ В УЛЬТРА-ПЛОСКИХ ГАЛАКТИКАХ

Зависимость темпа звездообразования, определенного по $H\alpha$ -потоку, от K -светимости UF-галактик представлена на верхней панели рис. 4. Наши измерения показаны сплошными кружками, а данные из литературы — открытыми кружками. Пунктирная прямая соответствует случаю $\lg(SFR) = \lg L_K - 10.14$, когда галактика успевает воспроизвести свою наблюдаемую звездную массу при наблюдаемом темпе SFR за космологическое время $T_0 = 13.7 \text{ Гуг}$. Линейная регрессия (сплошная линия) имеет наклон 0.87 ± 0.04 , указывая на то, что более массивным галактикам в прошлом требовались более высокие темпы звездообразования, чтобы обеспечить наработанную звездную массу. Аналогичная диаграмма в случае SFR , вычисленных по FUV -потоку, показана на нижней панели рис. 3. В общем, диаграмма имеет аналогичный вид, хотя дисперсия оценок SFR оказывается большей.

Сравнение полученных значений $SFR(H\alpha)$ и $SFR(FUV)$ представлено на рис. 4. Данные хорошо группируются вдоль диагонали, имея средние значения $\langle SFR(H\alpha) \rangle = -0.11 \pm 0.08$ и $\langle SFR(FUV) \rangle = -0.03 \pm 0.09$. Это обстоятельство косвенно подтверждает, что различие в калибровках эмпирических соотношений (1) и (2) невелико, а принятая нами схема учета внутреннего поглощения в дисках галактик близка к реальности.

Рисунок 5 воспроизводит соотношение между удельным темпом звездообразования $sSFR(H\alpha)$ и интегральной K -светимостью или звездной массой UF-галактик при $M_*/L_K = 1$. Горизонтальная пунктирная линия соответствует параметру Хаббла $H_0 = 73 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$. Разброс галактик относительно квадратичной линии регрессии невелик, 0.19 dex, что указывает на довольно единообразный характер звездообразования в тонких дисках

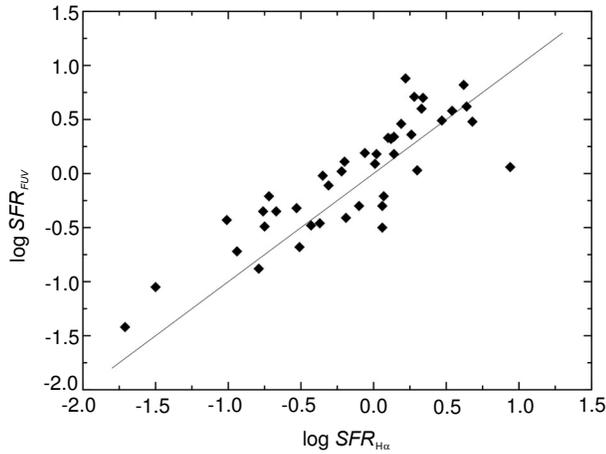


Рис. 3. Соотношение между оценками SFR , сделанными по $H\alpha$ и FUV -потокам для UF-галактик.

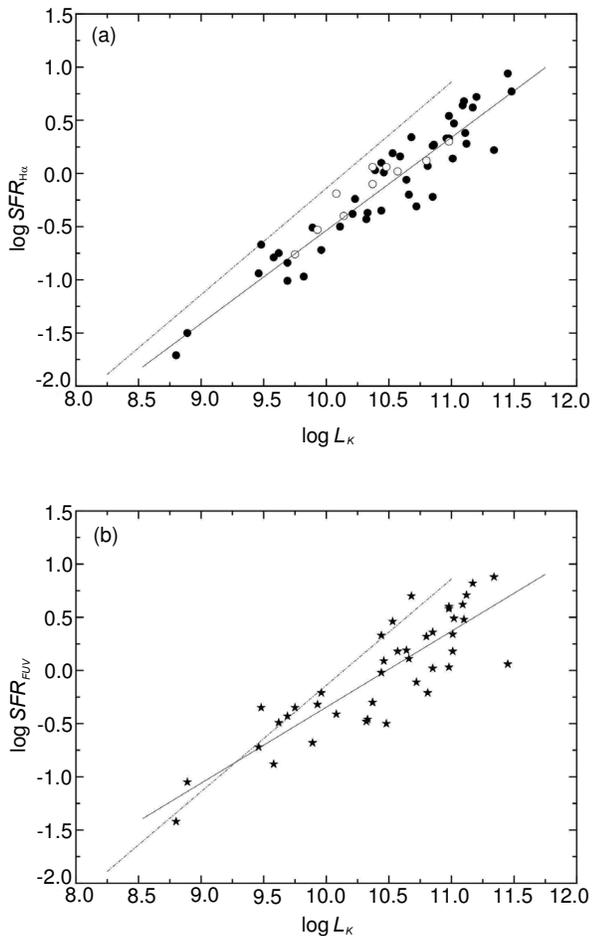


Рис. 4. Зависимость темпа звездообразования, определенного по а) $H\alpha$ -потоку, б) потоку в FUV -полосе, от K -светимости галактик. Данные об $H\alpha$ -потоках из литературы отмечены пустыми кружками. Пунктирная линия соответствует космическому времени 13.7 Гуг, за которое наблюдаемая звездная масса галактики воспроизводится при наблюдаемом темпе SFR . Линейные регрессии имеют наклон 0.87 ± 0.04 и 0.71 ± 0.06 для $H\alpha$ и FUV -потоков соответственно.

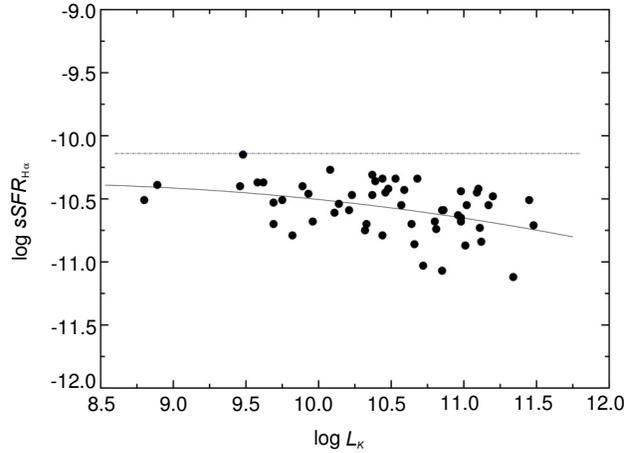


Рис. 5. Зависимость удельного темпа звездообразования от K -светимости для галактик, наблюдавшихся в линии $H\alpha$. Пунктирная горизонтальная линия соответствует параметру Хаббла $H_0 = 73 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$. Сплошная линия обозначает квадратичную регрессию.

спиральных галактик поздних типов. При этом в массивных дисках преобразование газа в звезды происходило в прошлом примерно в два раза более высокими темпами, чем в карликовых спиральных.

Следует отметить, что это различие нивелируется, если нормировать SFR не на звездную массу, а на полную барионную массу галактики.

6. НЕКОТОРЫЕ ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА УЛЬТРА-ПЛОСКИХ СПИРАЛЬНЫХ ДИСКОВ

В категории ультра-плоских представлены галактики с большим диапазоном линейных размеров. Минимальный линейный диаметр в нашей выборке, 13 кпк, имеет близкая карликовая Sd спираль RFGC 1700 = UGCA 193. Среди гигантских дисков наибольшим диаметром, 105 кпк, обладает Sbc галактика RFGC 1339 = UGC 4704. Медианное значение линейного диаметра UF-галактик составляет 44 кпк. Коррекция за наклон, принятая в NuregLEDA, уменьшает изофотный диаметр UF-галактики примерно в полтора раза.

Зависимость между водородной массой и K -светимостью UF-галактик представлена на рис. 6. Как следует из этих данных, отношение $M_{H\text{I}}/L_K$ систематически уменьшается от карликовых галактик к объектам высокой светимости. Такая закономерность указывает на то, что процесс преобразования газа в звезды был наиболее интенсивным у самых массивных дисков галактик. Отмеченный эффект не связан, очевидно, с наличием у галактик балджей, поскольку их вклад в светимость UF-галактик совсем невелик.

Сравнивая значения логарифма водородной массы для галактик, видимых анфас (Karachentsev

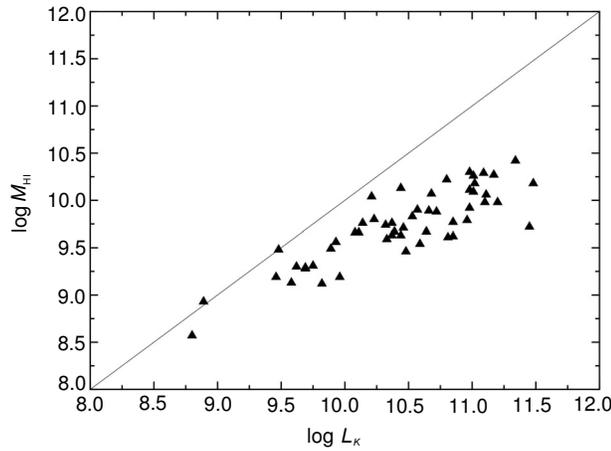


Рис. 6. Распределение ультра-плоских галактик по интегральной водородной массе и K -светимости.

and Karachentseva 2019) и видимых с ребра, в одинаковых интервалах значений L_K -светимости, мы получили среднюю разность $\langle \lg M_{\text{HI}} \rangle_{\text{face-on}} - \langle \lg M_{\text{HI}} \rangle_{\text{edge-on}} = -0.08 \pm 0.06$. Отрицательная величина этой разности при типичном отношении $\lg(a/b) \simeq 1$ для UF-галактик указывает на то, что диски ультраплоских галактик практически прозрачны в линии 21 см, и поправка (12) для них является избыточной.

Верхняя и нижняя панели рис. 7 воспроизводят зависимость темпа звездообразования, определенного по $\text{H}\alpha$ и FUV потокам от водородной массы UF-галактик. Линии регрессии на них имеют наклон 1.27 ± 0.12 и 1.16 ± 0.08 , заметно меньший, чем ожидаемый 1.4 ± 0.1 по соотношению Schmidt–Kennicutt (Kennicutt 1998) для отдельных очагов звездообразования. Следует также отметить, что в отличие от диаграмм $SFR-L_K$ (рис. 3), на диаграммах $SFR-M_{\text{HI}}$ дисперсия наблюдательных данных по FUV -потокам оказывается заметно меньшей, чем по $\text{H}\alpha$ -потокам. Мы не нашли объяснения этой особенности.

Сравнение изображений, представленных на рис. 2, показывает, что все без исключения UF-галактики выглядят в $\text{H}\alpha$ -фильтре более тонкими, чем в красном континууме. Это различие тем сильнее, чем ближе угол наклона галактики к $i = 90^\circ$. Рисунок 8 воспроизводит отношение a/b в линии $\text{H}\alpha$ и в красном континууме для 45 рассматриваемых галактик. Средние значения $\langle \lg(a/b)_{\text{H}\alpha} \rangle = 1.23 \pm 0.03$ и $\langle \lg(a/b)_r \rangle = 0.97 \pm 0.02$ показывают, что толщина эмиссионного диска в среднем почти в два раза меньше, чем толщина диска в красном континууме. Как известно, комплексы голубых горячих звезд, которые регулируют свечение H II -областей, имеют возраст примерно 10^7 лет. Следовательно,

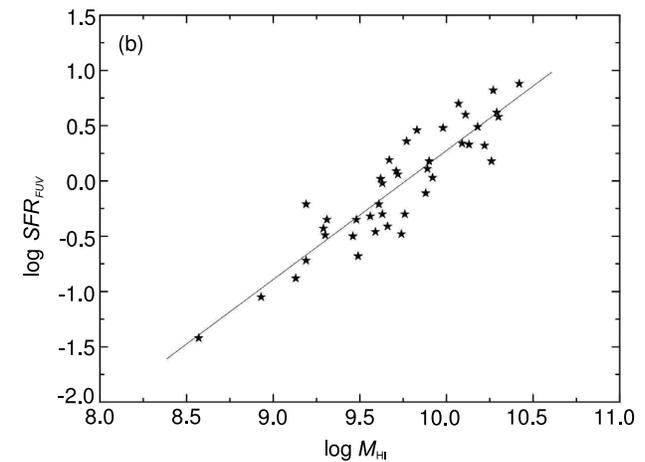
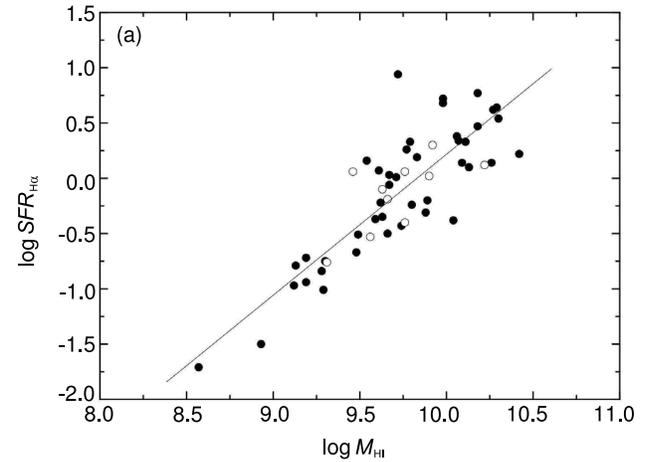


Рис. 7. Зависимость темпа звездообразования, определенного по а) $\text{H}\alpha$ -потоку, б) потоку в FUV -полосе от водородной массы. Линейные регрессии имеют наклон 1.27 ± 0.12 и 1.16 ± 0.08 для $\text{H}\alpha$ и FUV -потоков соответственно.

формирование молодого звездного населения происходит в более тонком слое диска по сравнению с толщиной диска старого звездного населения. Этот вывод вполне ожидаем в картине образования молодых H II -комплексов при гравитационной нестабильности молекулярных газовых облаков.

Reshetnikov and Combes (1998) исследовали статистику S-образных искривлений в оптических изображениях плоских галактик каталога FGC. Согласно данным Reshetnikov and Combes (1998), такие искажения видны у 40% edge-on галактик, причем их частота возрастает с ростом плотности окружения RFGC-галактики. Последнее обстоятельство указывает на внешний, приливной характер искажений, видимых на окраинах дисков. В нашей выборке 45 UF-галактик мы обнаружили отчетливые искажения эмиссионного диска лишь у

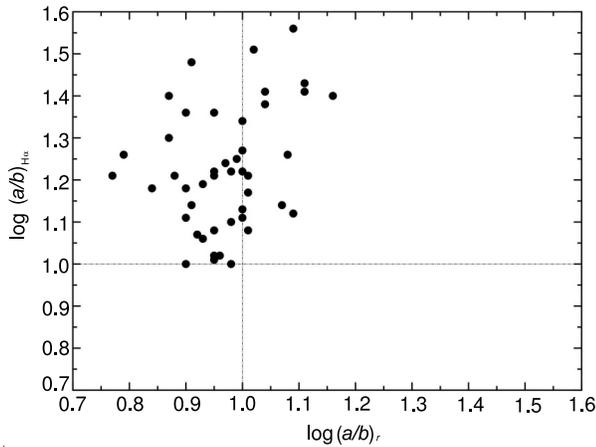


Рис. 8. Видимое отношение осей в линии Н α и в континууме для UF-галактик.

одной галактики, RFGC 1133 = UGC 3539², и слабые искажения у еще 6 галактик: RFGC 504, 531, 722, 1434, 3935 и 4039. Т.о. частота встречаемости искажений Н α -диска у ультра-плоских галактик, не более $(16 \pm 5)\%$, оказывается заметно меньше, чем у объектов каталога RFGC. Малый процент периферийных искажений в дисках ультраплоских галактик находится в согласии с фактом их предпочтительного нахождения в областях очень низкой плотности.

7. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Представленные результаты наблюдений в линии Н α ультраплоских галактик привели к многократному увеличению числа исследованных объектов этой категории. UF-галактики, видимые с ребра, имеют углы наклона оси вращения к лучу зрения в диапазоне $i \simeq (85-90)^\circ$, что при отсутствии значительных балджей соответствует видимому отношению осей $a/b > 10$ в синей области спектра. В эмиссионной линии Н α UF-галактики выглядят еще более тонкими, имея характерное отношение осей $\langle a/b \rangle_{\text{H}\alpha} \simeq 17$. Это свидетельствует о том, что молодое звездное население дисков галактик формируется в узком слое, толщина которого растет при переходе к более старому населению.

Внутреннее поглощение в UF-галактиках оказывается значительным. При характерном линейном диаметре около 44 кпк поглощение в линии Н α достигает $1-2^m$, а в FUV-полосе — даже $3-4^m$. Следствием большого поглощения является тусклый вид UF-галактик в ультрафиолетовом обзоре неба GALEX. Используемая нами манера

²Эта галактика интеграло-образной формы является весьма изолированной. Ближайшая ее соседка, галактика CGCG 308-039, имеет разность лучевых скоростей 228 км с^{-1} и проекционное расстояние 410 кпк.

учета внутреннего поглощения приводит к хорошему согласию оценок темпа звездообразования, сделанных по Н α и FUV-потокам. В эмиссионной линии 21 см ультра-плоские галактики нашей выборки являются практически прозрачными.

Удельный темп звездообразования в UF-галактиках, отнесенный к единице K -светимости или звездной массы, показывает систематическое падение от $sSFR \sim -10.4 \text{ dex}$ при $L_K \sim 9 \text{ dex}$ до примерно -10.7 dex при $L_K \sim 11 \text{ dex}$. Малая дисперсия на диаграмме $sSFR-L_K$ относительно линии регрессии указывает на единообразие процесса звездообразования в тонких дисках спиральных галактик.

Чтобы воспроизвести наблюдаемую звездную массу, средний темп звездообразования у карликовых и массивных UF-галактик должен был быть в прошлом выше в два и четыре раза соответственно, чем их современное значение $sSFR$.

Относительное содержание водородной массы в дисках UF-галактик в среднем составляет приблизительно 20%, меняясь от 50% у карликовых дисков до примерно 8% у массивных галактик. Следовательно, UF-галактики обладают запасами газа для поддержания наблюдаемых темпов звездообразования на протяжении еще нескольких миллиардов лет.

Искажения формы диска у UF-галактик встречаются заметно реже, чем у остальных галактик RFGC каталога, видимых с ребра. Нахождение UF-галактик в зонах низкой космической плотности согласуется с предположением, что многие искажения периферии спиральных галактик обусловлены приливным влиянием близких соседей.

БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использованы данные обзоров неба GALEX и PanSTARRS, а также база внегалактических данных HyperLEDA.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа поддержана грантом РФФ 19-12-00145.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Banerjee and C. J. Jog, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **431** (1), 582 (2013).
2. E. F. Bell, D. H. McIntosh, N. Katz, and M. D. Weinberg, *Astrophys. J. Suppl.* **149** (2), 289 (2003).
3. M. S. Bothwell, R. C. Kennicutt, and J. C. Lee, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **400** (1), 154 (2009).
4. K. C. Chambers, E. A. Magnier, N. Metcalfe, et al. [arXiv:1612.05560](https://arxiv.org/abs/1612.05560) (2016).
5. B. M. Devour and E. F. Bell, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **459** (2), 2054 (2016).
6. G. Gavazzi, G. Consolandi, E. Viscardi, et al., *Astron. and Astrophys.* **576**, A16 (2015).
7. A. Gil de Paz, S. Boissier, B. F. Madore, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **173** (2), 185 (2007).
8. T. H. Jarrett, T. Chester, R. Cutri, et al., *Astron. J.* **119** (5), 2498 (2000).
9. T. H. Jarrett, T. Chester, R. Cutri, et al., *Astron. J.* **125** (2), 525 (2003).
10. M. G. Jones, M. P. Haynes, R. Giovanelli, and C. Moorman, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **477** (1), 2 (2018).
11. I. D. Karachentsev, S. S. Kaisin, and E. I. Kaisina, *Astrophysics* **58** (4), 453 (2015).
12. I. D. Karachentsev, E. I. Kaisina, and D. I. Makarov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **479** (3), 4136 (2018).
13. I. D. Karachentsev and V. E. Karachentseva, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **485** (1), 1477 (2019).
14. I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, and Y. N. Kudrya, *Astrophysical Bulletin* **71** (2), 129 (2016).
15. I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, Y. N. Kudrya, et al., *Bulletin of the Special Astrophysical Observatory* **47**, 5 (1999).
16. V. E. Karachentseva, Y. N. Kudrya, I. D. Karachentsev, et al., *Astrophysical Bulletin* **71** (1), 1 (2016).
17. R. C. Kennicutt, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **36**, 189 (1998).
18. R. C. Kennicutt, J. C. Lee, J. G. Funes, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **178** (2), 247 (2008).
19. J. C. Lee, A. Gil de Paz, R. C. Kennicutt, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **192** (1), 6 (2011).
20. J. C. Lee, A. Gil de Paz, C. Tremonti, et al., *Astrophys. J.* **706** (1), 599 (2009).
21. D. Makarov, P. Prugniel, N. Terekhova, et al., *Astron. and Astrophys.* **570**, A13 (2014).
22. O. V. Melnyk, V. E. Karachentseva, and I. D. Karachentsev, *Astrophysical Bulletin* **72** (1), 1 (2017).
23. V. Reshetnikov and F. Combes, *Astron. and Astrophys.* **337**, 9 (1998).
24. D. J. Schlegel, D. P. Finkbeiner, and M. Davis, *Astrophys. J.* **500** (2), 525 (1998).
25. E. J. Shaya, R. B. Tully, Y. Hoffman, and D. Pomarède, *Astrophys. J.* **850** (2), 207 (2017).
26. O. Spector and N. Brosch, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **469** (1), 347 (2017).
27. M. A. W. Verheijen and R. Sancisi, *Astron. and Astrophys.* **370**, 765 (2001).

H α Images of Ultra-Flat Edge-On Spiral Galaxies

S. S. Kaisin, I. D. Karachentsev, H. Hernandez-Toledo, L. Gutierrez, and V. E. Karachentseva

We present the H α images of ultra-flat (UF) spiral galaxies seen practically edge-on. The galaxies have the angular diameter in the *B* band $a > 1'9$ and the apparent axial ratio $(a/b) > 10$. We found that their H α images look, on average, almost two times thinner than those in the red continuum. The star-formation rate in the studied objects, determined from the H α flux, is in good agreement with that calculated from the *FUV* flux from the GALEX survey if we use the modified Verheijen and Sancisi formula taking into account the internal extinction in the UF galaxies. The logarithm of the specific star-formation rate in the UF galaxies shows a small scatter, 0.19, with a smooth decrease from -10.4 for dwarf spirals to -10.7 for massive ones. The relative amount of the hydrogen mass in UF disks varies from about 50% in dwarf disks to about 8% in massive ones. Structural distortions are less common in the UF galaxies (about 16%) than those in thick (less isolated) disks of edge-on spiral galaxies. On the cosmic time scale, 13.7 Gyr, large spiral disks are more efficient “engines” for gas processing into stars than dwarf spirals.

Keywords: *galaxies: spiral—galaxies: star formation*