

УДК 524.74-52

УЛЬТРАПЛОСКИЕ ГАЛАКТИКИ ИЗ КАТАЛОГА RFGC. III. ТЕМП ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ

© 2017 О. В. Мельник^{1*}, В. Е. Караченцева², И. Д. Караченцев^{3**}¹ Университет Загреб, Загреб, 10000 Хорватия² Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев, 03143 Украина³ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 21 декабря 2016 года; принята в печать 3 января 2017 года

Мы рассматриваем особенности звездообразования в галактиках с очень тонкими дисками из каталога RFGC (Revised Flat Galaxy Catalog). Выборка состоит из 333 ультраплоских галактик (UFG), расположенных на высоких галактических широтах, $|b| > 10^\circ$, угловой диаметр которых по большой оси на синих снимках составляет $a \geq 1''.2$, отношение видимых осей — $(a/b)_b > 10$, $(a/b)_r > 8.5$ на синих и красных изображениях, соответственно, а лучевая скорость не превышает $10\,000 \text{ км с}^{-1}$. Совокупность находящихся в том же объеме менее плоских 722 RFGC-галактик, с $(a/b)_b > 7$, используется как контрольная группа. По распределению UFG-галактик на небе их следует отнести к довольно изолированным. Удельный темп звездообразования $sSFR_{\text{FUV}}$, определенный нами по FUV-поток на основе данных GALEX, монотонно возрастает от галактик ранних типов к более поздним для обеих выборок, UFG и RFGC–UFG, без каких-либо существенных различий в рамках каждого морфологического типа T . Средняя величина отношения HI-массы к звездной массе населения UFG-галактик на $(0.25 \pm 0.03) \text{ dex}$ выше, чем у RFGC–UFG-галактик. При сравнении с произвольно ориентированными дисками того же типа полная HI-масса ультраплоских галактик, видимых с ребра, оказывается в среднем на 0.20 dex меньше из-за самопоглощения в линии 21 см. Мы показываем, что при использовании наиболее надежного способа оценки звездной массы тонких дисков с помощью $\langle B - K \rangle$ -цвета и типа галактики T и современной манере учета внутреннего поглощения получаемые величины $sSFR$ оказываются несомненно ниже предела $-9.4 \text{ dex (yr}^{-1})$. Собранный нами наблюдательный материал дает основания предположить, что в прошлом средний темп звездообразования в UFG-дисках был примерно втрое выше современного. Запасы газа в UFG-галактиках позволяют поддерживать наблюдаемый темп звездообразования в них на протяжении еще около 9 млрд лет.

Ключевые слова: галактики: структура — галактики: звездообразование

1. ВВЕДЕНИЕ

Со времени первых работ [1, 2] звездообразование в галактиках изучается на масштабах Местного объема (на расстояниях до 10 Мпк [3–5]), близкой Вселенной (примерно до 50 Мпк [6, 7]), а также на $z \sim 1$, где становятся значимыми эволюционные эффекты [8–10]. Разработаны методы определения темпа звездообразования по излучению в далеком и близком ультрафиолетовом диапазонах, в линии H α , по эквивалентным ширинам спектральных линий и т.д. (см. обзор [11]). Проведены детальные оптические и радионаблюдения и определены темпы звездообразования для небольших выборок близких галактик (например, [12, 13]).

Массовое изучение звездообразования в галактиках стало возможным с появлением широкомасштабных обзоров неба, выполняемых в ультрафиолетовом, оптическом и инфракрасном диапазонах: GALEX [14], SDSS [15], 2MASS [16, 17], WISE [18]. Преимущества и недостатки определения SFR у самых близких (возможность индивидуального подхода) и далеких галактик (объемы выборок порядка десятков тысяч объектов) очевидны.

Общий вывод из громадного массива публикаций (не касаясь самых далеких объектов) таков: звездообразование в эллиптических галактиках, не содержащих пыли и газа, подавлено, а спиральные и иррегулярные карликовые галактики демонстрируют высокий темп звездообразования, достаточный для объяснения наблюдаемого количества их звездной массы.

*E-mail: melnykol@gmail.com

**E-mail: ikar@sao.ru

Для галактик близкой Вселенной ($D \sim 50$ Мпк) найден верхний предел удельного темпа звездообразования, $\lg sSFR = -9.4 \text{ yr}^{-1}$ [19–21]. Это условие выполняется для галактик Местного объема ($D < 10$ Мпк), находящихся в окружении разной плотности [19], а также для изолированных галактик каталогов LOG [22] и 2MIG [23], имеющих глубину $z \sim 0.01$.

В работах, посвященных звездообразованию в спиральных галактиках, обычно рассматриваются объекты, произвольно наклоненные к лучу зрения [24]. Лишь немногие авторы отдельно изучали сильно наклоненные (edge-on) спирали (см. [25] и приведенные там ссылки).

Ранее Эйдманн и др. [26] нашли, что именно спирали поздних типов характеризуются наибольшим отношением осей a/b , где a — большой и b — малый угловые диаметры. Как было показано в работе Караченцева [27], отбор галактик по видимому отношению осей $a/b \geq 7$ позволяет выбрать из массива спиралей плоские диски без заметных признаков балджа. Применение этого простого критерия отбора привело к созданию каталогов плоских галактик: Flat Galaxy Catalog (FGC [28]) и его улучшенной версии Revised Flat Galaxy Catalog (RFGC [29]), которые охватывают все небо.

Кроме морфологических, плоские спирали поздних типов имеют и другие особенности. Во-первых, они распределены на небе достаточно однородно, без заметных сгущений в областях, занимаемых скоплениями галактик [28]. Более детальное рассмотрение показало, что примерно 60% ультраплоских галактик, видимых с ребра, являются изолированными, около 30% входят в диффузные ассоциации галактик и только 10% имеют близких физически связанных соседей [30, 31]. Поэтому можно считать, что звездообразование в этих объектах обусловлено в основном внутренними процессами, без влияния на него ближайших соседей. Во-вторых, для поздних спиральных галактик характерна высокая степень детектирования в линии H I 21 см. Это позволяет с хорошей точностью определять их максимальную амплитуду вращения V_m , которую используют в частности для учета внутреннего поглощения света.

Подчеркнем, что систематическое изучение звездообразования в спиральных галактиках из каталога RFGC стало возможно с появлением ультрафиолетового обзора неба GALEX [14]. Целью настоящей работы является сравнение темпов звездообразования в ультраплоских галактиках и в плоских галактиках, видимых с ребра. Обе выборки взяты из каталога RFGC. Особое внимание уделено различным способам оценки внутреннего поглощения A^i и определения интегральной звездной массы галактики M_* .

В разделе 2 описываются выборки плоских и ультраплоских галактик. В разделе 3 обсуждаются способы учета внутреннего поглощения в галактиках, видимых с ребра. В разделе 4 кратко рассмотрены особенности определения FUV-потока и темпа звездообразования. Раздел 5 посвящен различным способам оценки звездной массы галактики и выбору наиболее оптимального из них. В разделе 6 приведены основные результаты. Обсуждение и выводы даны в разделе 7.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ УЛЬТРАПЛОСКИХ ГАЛАКТИК

Каталог RFGC [29] содержит $N = 4236$ галактик с угловыми диаметрами $a \geq 0.6$ и видимым отношением осей $a/b \geq 7$ на синих снимках Первого Паломарского обзора неба. Из каталога RFGC были выделены ультраплоские галактики UFG (ultra-flat galaxies, $N = 817$), для которых выполнялись совместные условия для «синего» и «красного» отношений осей: $(a/b)_{\text{blue}} \geq 10$, $(a/b)_{\text{red}} \geq 8.5$. Чтобы уменьшить влияние эффектов селекции, были добавлены ограничения по угловому диаметру, галактической широте и лучевой скорости: $a_{\text{blue}} \geq 1.0$, $|b| > 10^\circ$, $V_h < 10\,000 \text{ km s}^{-1}$. Число тонких UF-галактик составило $N = 441$.

Применение теста Шмидта показало, что полнота каталога RFGC при $a_{\text{blue}} \geq 1.0$ составляет 70%, а полнота примерно 90% достигается при угловом диаметре $a_{\text{blue}} = 1.2$ [29]. Мы усилили критерий отбора, чтобы обеспечить приемлемую полноту (около 90%), уменьшить эффекты селекции и в то же время иметь достаточно большое число галактик. Из каталога RFGC были отобраны плоские галактики с такими характеристиками: $a_{\text{blue}} \geq 1.2$, $(a/b)_{\text{blue}} \geq 7$, $|b| > 10^\circ$, $V_h < 10\,000 \text{ km s}^{-1}$.

Несколько галактик были исключены из рассмотрения по следующим причинам:

- 1) плохая фотометрия из-за проецирования яркой звезды (случай RFGC 514, 1543, 1747 и 3830);
- 2) несоответствие прямой оценки расстояния и расстояния, определенного по лучевой скорости — RFGC 384, 2239 и 2246;
- 3) галактика RFGC 2614 была ошибочно включена в выборку (в базе данных LEDA у нее приведена $V_h = 11\,354 \text{ km s}^{-1}$).

Таким образом, в нашей усеченной выборке каталога RFGC (далее в статье эта выборка обозначается как RFGC) остается $N = 1055$ плоских галактик. Среди них популяция ультраплоских галактик (UFG) насчитывает $N = 333$ объекта.

Использованы следующие данные каталога RFGC [29]: экваториальные координаты галактик, их «синие» и «красные» отношения осей a/b , а также морфологические типы. Из баз данных NED¹ и HyperLEDA² [32] были взяты гелиоцентрические лучевые скорости V_h и пересчитаны в V_{LG} , согласно [33]. Из HyperLEDA мы взяли также значения полной звездной величины B_t (для 1055 объектов RFGC и 333 объектов UFG), максимальной скорости вращения V_m (979 и 311) и звездной величины в линии 21 см m_{21} (831 и 258). Звездные величины g, r, i при $0 < g - r < 1.1$ (448 и 156) были взяты из обзора SDSS (DR13), а из обзора 2MASS — значения K_s (837 и 235), из WISE — звездные величины соответственно для 988 и 301 галактики. Звездные величины в последних трех обзорах определены в системе AB.

На рис. 1 показано распределение по небу в экваториальных координатах отобранных плоских галактик $N = 1055$ (верхняя панель) и ультраплоских $N = 333$ (нижняя панель). Галактики с лучевыми скоростями $V_{LG} < 3500$ км с⁻¹ обозначены символами большего размера. Область с галактической широтой $|b| < 10^\circ$ окрашена серым цветом. Наблюдается слабая концентрация близких плоских галактик вдоль экватора Местного сверхскопления и в области близкого рассеянного облака в Гончих Псах. Эффект практически не заметен для ультраплоских галактик, что свидетельствует о более высокой доле среди них изолированных галактик.

Общее представление о распределении основных наблюдаемых характеристик дает рис. 2. На каждой его панели ультраплоские галактики выделены черным цветом. Как видно из распределения по лучевым скоростям, выборка UFG-галактик имеет примерно такую же глубину, что и выборка RFGC-галактик. Следовательно, эффект селекции галактик по светимости не играет существенной роли при сравнении свойств UFG- и RFGC-популяций.

Распределение RFGC-галактик по морфологическим типам имеет максимум для типов Sc–Scd ($T = 5–6$), тогда как у UFG-галактик максимум сдвинут к более позднему типу Sd ($T = 7$). Это еще раз подчеркивает известный факт, что наиболее тонкие диски характерны для галактик, спиральная структура которых находится на грани перехода от регулярного узора к хаотическому.

Как видно на рис. 2с, рассматриваемая выборка RFGC-галактик имеет фотометрическую полноту до видимой величины $B_t \simeq 16^m0$. Для UFG-галактик предел полноты сдвинут на

$\Delta B \simeq +0^m5$, причем систематическое различие сохраняется в пределах каждого морфологического типа.

Рисунок 2d свидетельствует о том, что в фотометрической полосе K_s обзора 2MASS обе выборки начинают терять свою полноту при $K_s \simeq 12^m0$. Для многих плоских галактик, имеющих голубоватый цвет и низкую поверхностную яркость, 2MASS-фотометрия при $K_s > 12^m0$ оказывается отягощенной значительными систематическими погрешностями.

В таблице 1 приводятся средние значения и ошибки среднего для наблюдаемых характеристик UFG- и RFGC–UFG-галактик в зависимости от типа. Нижняя строка соответствует ультраплоским галактикам, а верхняя — плоским. Малочисленные случаи $T = 2$ и $T = 9$ объединены соответственно с типами $T = 3$ и $T = 8$. Из сравнения представленных данных можно сделать следующие заключения.

- Среднее видимое отношение осей показывает ожидаемое возрастание от ранних типов спиралей к поздним. Пик распределения для UFG-галактик как в синей, так и в красной полосе приходится на $T = 7$, тогда как для RFGC–UFG-галактик максимум фиксируется на $T = 6$.
- Среди всех морфологических типов ультраплоские галактики выглядят несколько более тусклыми, чем просто плоские (RFGC–UFG). Средняя разность видимых величин составляет $+0^m52 \pm 0^m05$ в B -полосе и $+0^m71 \pm 0^m08$ в K_s -полосе. Причиной этого различия могло бы быть внутреннее поглощение в сильно наклоненных дисках. Однако тогда разница в инфракрасной полосе была бы заметно меньше, чем в синей. Более вероятными причинами являются скрытые эффекты селекции, вызванные методическими особенностями фотометрии вытянутых слабоконтрастных изображений галактик.
- Средняя лучевая скорость (т.е. расстояние) ультраплоских галактик мало отличается от среднего для RFGC–UFG-объектов. Также малое различие имеет место для средней амплитуды вращения V_m , которая тесно коррелирует со светимостью галактики. Иначе говоря, обе выборки относятся примерно к одному и тому же объему пространства.
- Значительная часть рассматриваемых объектов находится в зоне SDSS-обзора (DR13), что позволяет сравнить их средние оптические показатели цвета $\langle g - r \rangle$. Согласно приведенным в таблице данным, цветовые различия UFG- и RFGC–UFG-галактик невелики, что не накладывает какого-либо ограничения на характер внутреннего поглощения в тонких дисках.

¹<http://nedwww.ipac.caltech.edu>

²<http://leda.univ-lyon1.fr>

Таблица 1. Средние значения и ошибки среднего для исходных характеристик плоских и ультраплоских галактик в зависимости от морфологического типа

Параметр	Морфологический тип						
	Все типы	2+3	4	5	6	7	8+9
$(a/b)_b$	$N_{\text{RFGC-UFG}} = 722$	67	170	201	143	67	74
	8.53 ± 0.04	8.15 ± 0.14	8.35 ± 0.07	8.62 ± 0.09	8.87 ± 0.10	8.68 ± 0.14	8.24 ± 0.12
	$N_{\text{UFG}} = 333$	8	16	70	80	134	25
	12.74 ± 0.13	10.33 ± 0.08	11.60 ± 0.33	12.32 ± 0.23	12.51 ± 0.24	13.50 ± 0.24	12.04 ± 0.35
$(a/b)_r$	$N_{\text{RFGC-UFG}} = 722$	67	170	201	143	67	74
	7.54 ± 0.04	6.91 ± 0.14	7.21 ± 0.07	7.69 ± 0.07	8.01 ± 0.12	7.72 ± 0.15	7.34 ± 0.12
	$N_{\text{UFG}} = 333$	8	16	70	80	134	25
	11.27 ± 0.11	9.19 ± 0.31	9.99 ± 0.31	10.55 ± 0.16	11.05 ± 0.19	11.98 ± 0.18	11.59 ± 0.52
B_t	$N_{\text{RFGC-UFG}} = 722$	67	170	201	143	67	74
	15.40 ± 0.03	15.22 ± 0.11	15.39 ± 0.07	15.48 ± 0.06	15.32 ± 0.10	15.45 ± 0.13	15.49 ± 0.11
	$N_{\text{UFG}} = 333$	8	16	70	80	134	25
	15.92 ± 0.04	15.61 ± 0.23	15.99 ± 0.13	15.88 ± 0.08	15.93 ± 0.07	15.98 ± 0.06	15.77 ± 0.18
K_s	$N_{\text{RFGC-UFG}} = 602$	65	167	181	118	45	26
	11.25 ± 0.05	10.70 ± 0.13	11.06 ± 0.08	11.33 ± 0.08	11.47 ± 0.13	11.52 ± 0.16	11.82 ± 0.27
	$N_{\text{UFG}} = 235$	8	12	56	63	87	9
	11.96 ± 0.06	11.75 ± 0.37	11.29 ± 0.24	11.65 ± 0.15	12.02 ± 0.12	12.23 ± 0.13	12.00 ± 0.41
V_{LG}	$N_{\text{RFGC-UFG}} = 722$	67	170	201	143	67	74
	4708 ± 92	5591 ± 278	5832 ± 181	5285 ± 168	3920 ± 166	3365 ± 240	2498 ± 207
	$N_{\text{UFG}} = 333$	8	16	70	80	134	25
	5057 ± 127	5128 ± 758	7071 ± 397	5467 ± 243	5730 ± 274	4644 ± 179	2660 ± 400
V_m	$N_{\text{RFGC-UFG}} = 722$	67	170	201	143	67	74
	145 ± 2	184 ± 6	178 ± 4	154 ± 4	124 ± 3	108 ± 4	81 ± 5
	$N_{\text{UFG}} = 333$	8	16	70	80	134	25
	131 ± 3	154 ± 24	185 ± 12	150 ± 6	139 ± 6	118 ± 3	84 ± 6
$g-r$	$N_{\text{RFGC-UFG}} = 306$	19	84	97	51	23	32
	0.72 ± 0.03	0.83 ± 0.03	0.77 ± 0.02	0.70 ± 0.02	0.60 ± 0.02	0.51 ± 0.07	0.41 ± 0.10
	$N_{\text{UFG}} = 149$	0	3	30	40	69	7
	0.64 ± 0.02	—	0.95 ± 0.01	0.80 ± 0.02	0.60 ± 0.04	0.57 ± 0.03	0.42 ± 0.16
$W2-W4$	$N_{\text{RFGC-UFG}} = 687$	67	169	196	135	59	61
	5.11 ± 0.03	4.42 ± 0.12	4.81 ± 0.06	5.16 ± 0.05	5.34 ± 0.05	5.43 ± 0.07	5.71 ± 0.08
	$N_{\text{UFG}} = 301$	7	15	64	78	118	19
	5.16 ± 0.04	5.03 ± 0.61	4.77 ± 0.18	4.93 ± 0.09	5.17 ± 0.06	5.26 ± 0.05	5.64 ± 0.13

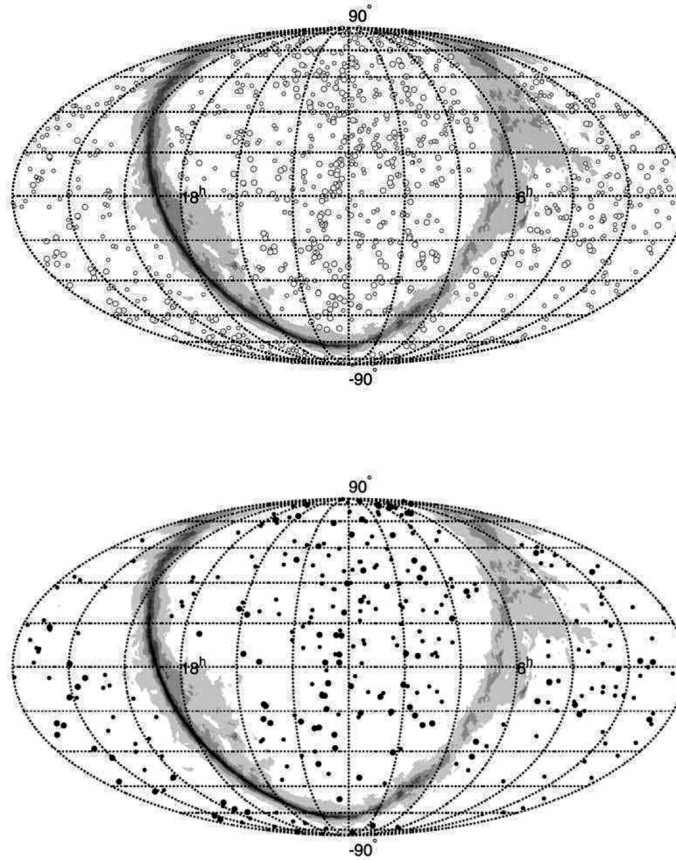


Рис. 1. Распределение по небу в экваториальных координатах плоских галактик RFGC, $N = 1055$, (пустые кружки) и ультраплоских UFG, $N = 333$, (заполненные кружки). Серой заливкой отмечена область сильного галактического поглощения $|b| < 10^\circ$. Крупными кружками обозначены галактики с $V_{LG} < 3500 \text{ км с}^{-1}$, мелкими — с $V_{LG} = 3500 - 10000 \text{ км с}^{-1}$.

- Более 90% RFGC-галактик детектированы в четырех инфракрасных полосах: $W1$, $W2$, $W3$, $W4$ ($3.38 \mu\text{м}$, $4.6 \mu\text{м}$, $12.33 \mu\text{м}$ и $22.00 \mu\text{м}$) обзора неба WISE [18]. Здесь самая длинноволновая полоса наиболее чувствительна к тепловому потоку пыли, переизлучающей суммарный звездный поток. Величина $W4$ является дополнительным индикатором количества пыли и интегрального темпа звездообразования в галактике. Как видно из средних значений $\langle W2 - W4 \rangle$, показатель цвета монотонно растет от ранних морфологических типов к поздним. Между значениями $\langle W2 - W4 \rangle$ у UFG- и RFGC-UFG-галактик в целом значимые различия не наблюдаются. Однако в пределах каждого морфологического типа ультраплоские галактики выглядят несколько более «голубыми» (менее запыленными), чем остальные.

3. УЧЕТ ВНУТРЕННЕГО ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА В СПИРАЛЬНЫХ ГАЛАКТИКАХ

Наличие пыли в диске спиральной галактики уменьшает ее интегральную светимость. Эффект внутреннего поглощения проявляется наиболее сильно у галактик, видимых с ребра, и растет от инфракрасной области спектра к ультрафиолетовой. Распределение ярких голубых звезд и пылевых облаков в диске спиральной галактики крайне неравномерно и не поддается описанию простой моделью плоскопараллельных слоев. Поэтому до сих пор не существует надежной и универсальной схемы учета внутреннего поглощения.

Рецептура поправок к видимой величине галактики за ее наклон, принятая в различных изданиях The Reference Catalogue of Galaxies (см., например, [34]) и в HyperLEDA, менялась со временем. Основным ее недостатком было игнорирование зависимости величины поглощения от светимости спиральной галактики, на что обратили внимание Талли и др. [35] и Верхейен и Санчизи [36].

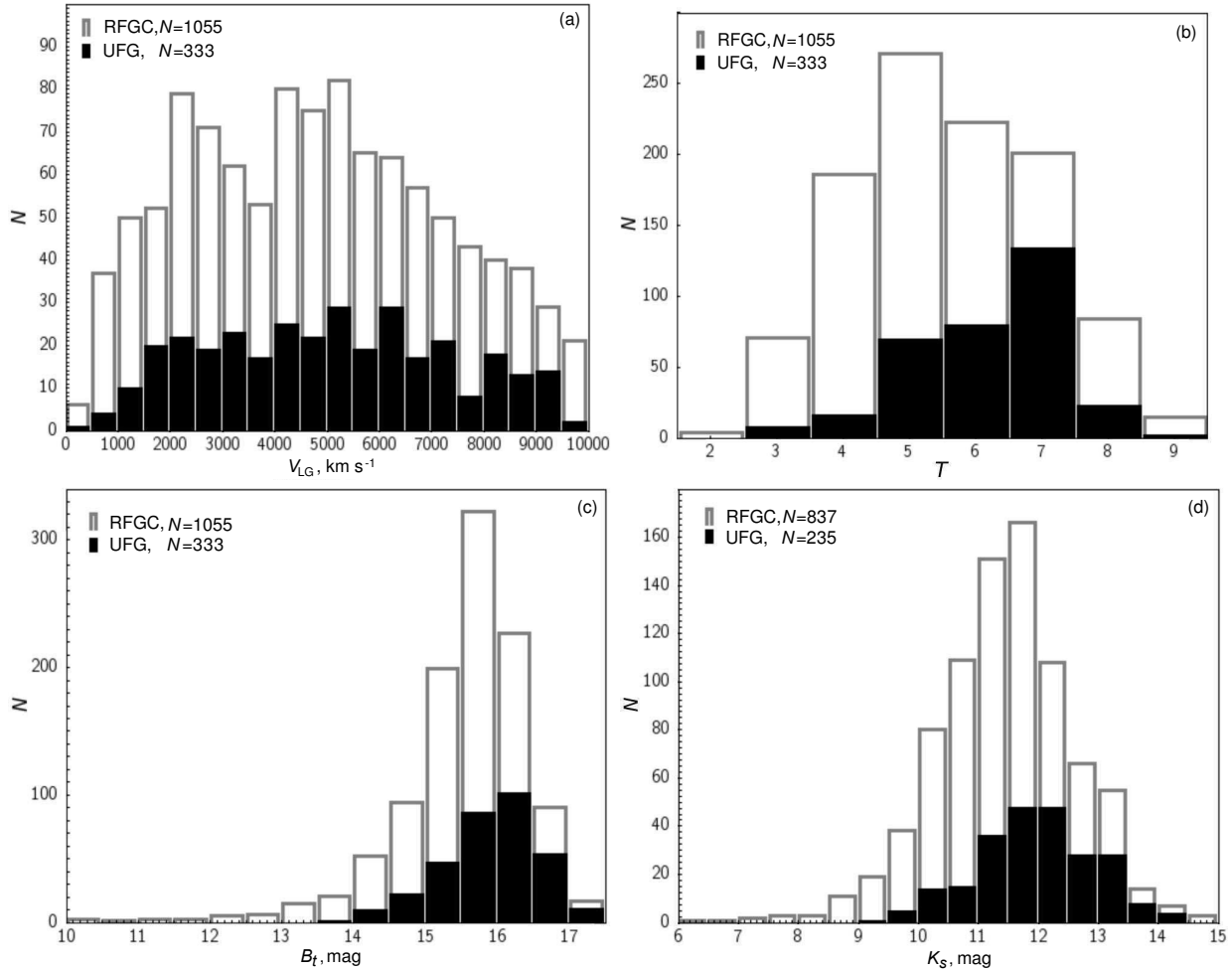


Рис. 2. Гистограммы распределений числа галактик по наблюдаемым характеристикам: (a) – по лучевой скорости V_{LG} ; (b) – по морфологическому типу T ; (c) – по полной видимой звездной величине B_t из базы HyperLEDA; (d) – по звездной величине K_s из обзора 2MASS. Данные, относящиеся к ультраплоским галактикам UFG, затемнены.

Согласно [36], ослабление интегральной звездной величины галактики в полосе B выражается соотношением:

$$A_B^i = [1.54 + 2.54 (\lg V_m - 2.2)] \lg(a/b) \quad (1)$$

для $V_m > 43 \text{ км с}^{-1}$, где a/b — видимое отношение осей, а V_m — амплитуда вращения в км с^{-1} ; $A_B^i = 0$ для $V_m < 43 \text{ км с}^{-1}$. Согласно (1), эффект поглощения неуклонно растет с увеличением V_m или светимости. В принципе эта формула удовлетворительно описывает внутреннее поглощение в спиральных галактиках, давая в среднем меньшую поправку за поглощение, чем RC3 и LEDA.

В недавней публикации [37] Девур и Белл рассмотрели интегральные свойства 78 720 галактик обзора SDSS, имеющих красные смещения $z < 0.1$ и видимые красные величины $m_r < 17^m7$. Сравнивая различные манеры учета внутреннего поглощения, авторы пришли к выводу, что схемы поправок за наклон, предложенные в работах [35] и [38],

переоценивают эффект поглощения для наиболее ярких галактик. Согласно [37], величина внутреннего поглощения увеличивается с ростом светимости спиральной галактики не монотонно, а имеет максимум на абсолютной величине $M_K = -21.7$. Основываясь на данных рис. 12 в статье [37], мы нашли, что величина внутреннего поглощения в полосе B для спиральной галактики с абсолютной величиной M_K при $H_0 = 73 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ может быть представлена параболической зависимостью

$$A_B^i = [0.80 - 0.0584(M_K^{\text{corr}} + 21.7)^2] \lg(a/b)_r, \quad (2)$$

где $(a/b)_r$ — видимое отношение осей галактики, измеренное в каталоге RFGC на красных снимках Паломарского атласа. Выражение (2) применимо к области $-17.7 > M_K > -25.7$, а вне ее отрицательные значения A^i заменяются нулем. К примеру, для карликовой галактики SMC с $M_K = -18.8$, $V_m = 46 \text{ км с}^{-1}$ и $(a/b) = 1.56$ соотношения (1) и (2) дают близкие значения: $A^i = 0^m03$ и 0^m06

соответственно. Однако для ультраплоской галактики с $(a/b) = 10$, $V_m = 200 \text{ км с}^{-1}$ и $M_K = -24.2$ различие поправок A^i становится существенным: $1^{\text{m}}80$ и $0^{\text{m}}44$. Здесь для перехода от V_m к M_K мы использовали калибровочное соотношение из [35]

$$M_K^{\text{corr}} = -23.29 - 8.78 (\lg V_m - 2.20). \quad (3)$$

При этом диапазон положительных значений поправки A^i соответствует интервалу V_m от 39 км с^{-1} до 300 км с^{-1} .

Амплитуда вращения V_m , которую мы брали из HyperLEDA, сейчас известна для 85% RFGC-галактик. При отсутствии данных о V_m мы вычисляли эту величину по эмпирической регрессии между V_m (км с^{-1}) и морфологическим типом галактики:

$$V_m = -20.36 T + 254. \quad (4)$$

Пересчет поправки за внутреннее A_B^i и внешнее (галактическое) поглощение A^G из полосы B в полосы FUV, K_s и $W1$ мы выполняли по соотношениям:

$$\begin{aligned} A_{\text{FUV}}^t &= 1.930 (A_B^i + A^G), \\ A_{K_s}^t &= 0.083 (A_B^i + A^G), \\ A_{W1}^t &= 0.052 (A_B^i + A^G), \end{aligned} \quad (5)$$

где для учета внутреннего поглощения использовалась параболическая зависимость (2).

4. FUV-ПОТОКИ И ТЕМПЫ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ

Интегральный темп звездообразования галактики SFR мы выражали через ее видимую величину в FUV-полосе, исправленную за поглощение, как в [21]:

$$\lg SFR = 2.78 - 0.4 m_{c, \text{FUV}} + 2 \lg D, \quad (6)$$

где расстояние $D = V_{\text{LG}}/73$ выражено в Мпк, а SFR — в $M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$. Согласно [11, 39], это соотношение фиксирует темп звездообразования на характерной шкале времени порядка 10^8 лет, определяемой излучением молодых голубых звезд.

Обзор неба, выполненный с помощью космического телескопа GALEX [14], зарегистрировал FUV-поток для примерно 75% галактик нашей выборки. В более мягком NUV-диапазоне этот процент несколько выше (84%), но мы в дальнейшем ограничимся использованием только FUV-величин, как это делали в предыдущих работах [19–21]. Изображения тонких спиральных дисков в FUV- и NUV-полосах выглядят слабоконтрастными и клочковатыми, часто распадаясь

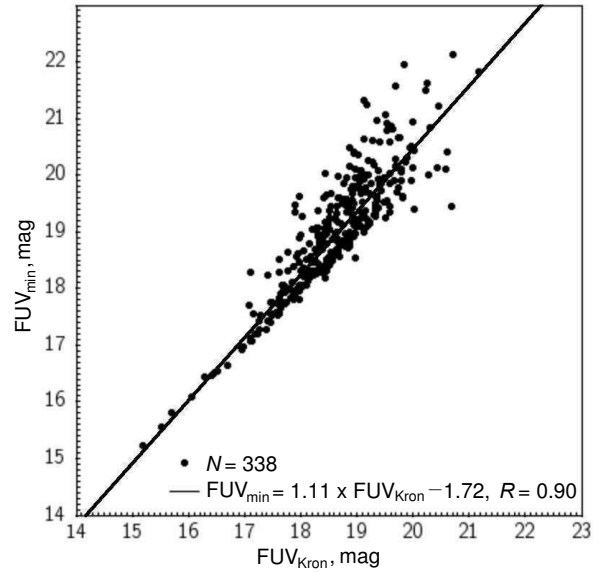


Рис. 3. Сравнение данных FUV-фотометрии в эллиптической Кронской и в круговой апертурах. На рисунке представлены параметры регрессии.

на цепочку отдельных сгущений с индивидуальными оценками m_{FUV} и m_{NUV} . При определении темпа звездообразования галактики мы ориентировались на значения Кронских «эллиптических» звездных величин, которые имеются для почти половины объектов нашей выборки. Для остальных мы использовали так называемые m_{min} , соответствующие FUV-поток от наиболее яркого сгущения в галактике. Этот прием позволил избежать ручного анализа многочисленных индивидуальных изображений, имеющих низкое угловое разрешение (около $5''$) и слабый контраст. Распределение наших галактик по FUV-величинам m_{Kron} и m_{min} представлено на рис. 3. Соотношение между ними описывается регрессией

$$m_{\text{FUV}, \text{Kron}} = 0.9 m_{\text{FUV}, \text{min}} + 1.55 \quad (7)$$

с коэффициентом корреляции $R = 0.90$. В среднем переход от m_{min} к m_{Kron} требовал поправки примерно $-0^{\text{m}}4$ при типичной дисперсии около $0^{\text{m}}5$. Далее в работе мы используем Кронские FUV-величины, прямо измеренные в эллиптических апертурах либо пересчитанные от m_{min} по соотношению (7). Таким образом, интегральный темп звездообразования определялся по соотношению (6) с учетом поправок (2) и (5).

Как известно, интегральный темп звездообразования галактики довольно тесно коррелирует с ее полной звездной массой, образуя так называемую «главную последовательность» на диаграмме $\lg(SFR) \propto \lg M_*$. Поэтому в дальнейшем для каждой галактики нашей выборки мы определяли ее звездную массу, используя для этого разные подходы.

5. ОЦЕНКА ЗВЕЗДНОЙ МАССЫ ГАЛАКТИК

Интегральную звездную массу галактики M_* обычно определяют по спектральному распределению энергии (SED), задавая тот или иной вид начальной функции звездных масс (IMF) по Солпитеру [40], Крупе [41] или Шарбье [42]. На практике для оценки M_* чаще используют интегральную светимость галактики в какой-либо полосе, принимая фиксированное отношение массы к светимости. Мы вычисляли звездную массу по светимости галактики в K -полосе при значении $M_*/L_K = 1(M_\odot/L_\odot)$ [43] и $M_{\odot,K} = 3^m 28$ [44]. Как было отмечено в работе [45], отношение M_*/L_K зафиксировано пока не очень надежно и вероятнее всего заключено в интервале $[0.5 - 1.0]M_\odot/L_\odot$.

Видимую K -величину галактики можно определить несколькими способами.

1) Инфракрасный обзор всего неба 2MASS [16] содержит автоматические оценки K_s -величины для 73% галактик нашей выборки. Однако из-за коротких экспозиций (примерно 8 с) обзор оказывается нечувствительным к слабоконтрастным голубоватым структурам низкой поверхностной яркости. В результате недооценки реальных размеров тонких дисков и частого разбиения их на несколько фрагментов интегральные K_s -потоки многих RFGC-галактик становятся систематически заниженными, особенно для слабых галактик с $K_s > 12^m$.

2) В инфракрасном обзоре неба WISE [18] имеются оценки звездных величин в четырех инфракрасных полосах: $W1$, $W2$, $W3$ и $W4$ для 94% рассматриваемых нами галактик. Этот обзор, как и 2MASS, страдает недооценкой потока от периферии диффузных галактик. Видимая величина RFGC-галактик в полосе $W1$, наиболее близкой к K_s , показывает тесную корреляцию с K_s ; соотношение между ними имеет вид

$$K_s = 0.99 K_{W1}^c - 0.06, \quad (8)$$

где $K_{W1}^c = m_{W1} - 0.83$, коэффициент корреляции $R = 0.90$, число галактик $N = 813$. Эту K_s -величину, полученную из $W1$ -величины, мы называем в дальнейшем K_W .

3) Согласно [46], средний показатель цвета галактики зависит от ее морфологического типа как

$$\langle B - K \rangle_{\text{corr}} = 4.60 - 0.25 T \quad (9)$$

при $T = 2, 3, \dots, 9$. Используя это соотношение и учитывая поправки за поглощение света (2) и (5), мы определили K -величины для всех RFGC-галактик. Эти величины мы обозначаем в дальнейшем как K_B . Линия регрессии для них

и K_s -величин, построенная по 837 галактикам, имеет вид

$$K_s = 0.56 K_B + 4.87. \quad (10)$$

4) Мы также можем оценить абсолютную K -величину по калибровочной зависимости (3) с учетом дополнительного соотношения (4) для галактик без прямых измерений V_m .

Двумерные распределения галактик нашей выборки по величинам $\{K_s, K_W\}$, $\{K_s, K_B\}$ и $\{K_W, K_B\}$ представлены на трех панелях рис. 4. Сплошные и пунктирные прямые обозначают соответственно линию регрессии и диагональ. Помимо основного массива галактик, на каждой панели заметно около 1% случаев с большими отклонениями от линии регрессии. На рис. 4 такие объекты обведены квадратами. Дополнительный анализ показывает, что основными причинами этих отклонений являются ошибки ИК-фотометрии, когда происходит потеря потока от периферии галактики (случаи RFGC 566, 1295, 2245, 2315, 2335, 3854), или же на галактику проектируется яркая звезда (RFGC 668, 1049, 1340, 2140, 3357). По нашему опыту наиболее надежной оценкой звездной массы тонких спиральных галактик, видимых с ребра, является использование K_B -величин.

6. УДЕЛЬНЫЙ И ЭФФЕКТИВНЫЙ ТЕМПЫ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ

Зависимости удельного темпа звездообразования $sSFR = SFR/M_*$ от морфологического типа галактики T для UFG- (темные кружки) и RFGC-UFG- (серые кружки) дисков представлены на четырех панелях рис. 5. Звездная масса отождествлялась с K -светимостью ($M_* = L_K$), а K -величины определялись в четырех вариантах, описанных выше. Для лучшего восприятия данные для выборки UFG сдвинуты вправо по оси абсцисс. Соответствующее число галактик указано в углу каждой панели.

Как следовало ожидать, удельный темп звездообразования в среднем растет от ранних спиралей к поздним. Однако, сравнивая диаграммы, можно видеть, что наиболее четкая зависимость $\lg sSFR$ от типа проявляется при использовании для определения звездной массы K_B -величин. Особые различия по величине $sSFR$ между UFG- и RFGC-UFG-галактиками не наблюдаются.

Рисунок 6 представляет зависимость $\lg sSFR$ от звездной массы для четырех вариантов оценки K -светимости. Обозначения плоских и ультраплоских галактик такие же, как на предыдущем рисунке. Чтобы корректно сравнивать меж-

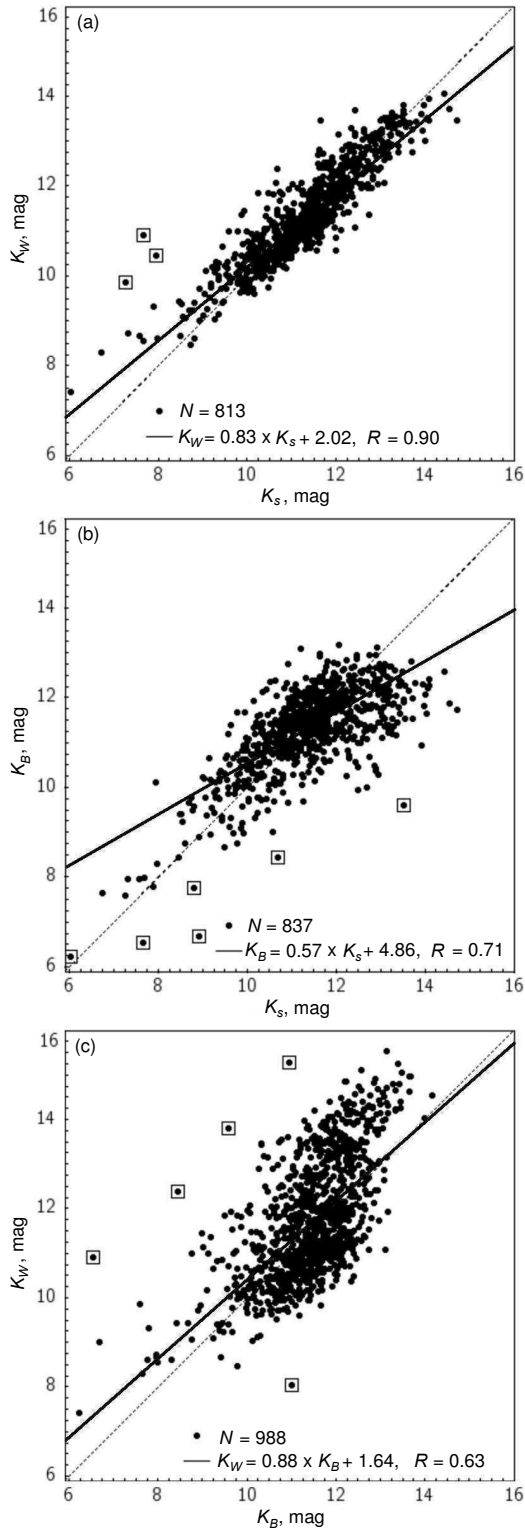


Рис. 4. Взаимные зависимости пересчитанных и наблюдаемых звездных величин для плоских и ультраплоских галактик (сверху вниз): K_W vs K_S ; K_B vs K_S ; K_W vs K_B . На рисунках представлены соответствующие параметры регрессии и числа галактик. Квадратами обведены объекты, сильно отклоняющиеся от линии регрессии.

ду собой данные разных панелей, мы представили на них только 178 галактик UFG и 428 галактик RFGC–UFG, для которых имеются оценки K -величин всеми четырьмя способами. Горизонтальная черта на всех панелях соответствует значению $\lg sSFR = -9.4$, отмеченному нами ранее [19–21] как некий квази-«Эддингтоновский предел» для интенсивности звездообразования в настоящую эпоху. Выше этого предела лежат только несколько галактик, K -светимость (звездная масса) которых недооценена по ИК-фотометрии.

Как видим, ход зависимостей для плоских и ультраплоских галактик приблизительно одинаков. Необходимо отметить, что звездная масса галактики присутствует на обеих шкалах панелей рис. 6, поэтому неизбежные ошибки в определении M_* из-за ненадежной фотометрии (иногда достигающие порядка величины) растягивают наблюдаемое распределение по диагонали $\Delta \lg sSFR = -\Delta \lg M_*$. По этой причине максимальные значения $sSFR$ оказываются у галактик с минимальной оценкой массы. Рисунок 6 еще раз демонстрирует, что наименьший разброс оценок $sSFR$ характерен для случая, когда используется фотометрия в B -полосе. В дальнейшем из четырех способов определения K -величин для RFGC-галактик мы отдаем предпочтение именно B -фотометрии.

Некоторые авторы (см. [47] и цитированную там литературу) для характеристики галактики используют не только удельный, но еще и эффективный темп звездообразования $SFR_{\text{eff}} = \lg(SFR/M_{\text{HI}})$. Здесь масса водорода $M_{\text{HI}} = 2.356 \times 10^5 D^2 F_{\text{HI}}$ выражается в солнечных единицах массы [48], D есть расстояние в Мпк, а F_{HI} — поток в Янкм с^{-1} , вычисленный как $\lg F_{\text{HI}} = 0.4 (17.4 - m_{21})$. Рисунок 7 показывает зависимость эффективного темпа звездообразования от звездной массы (нижняя панель) и водородной массы галактик. Обе диаграммы для SFR_{eff} выглядят заметно более диффузными, чем диаграммы для $sSFR$. Распределения ультраплоских и плоских галактик не обнаруживают особых взаимных различий.

Интегральный поток галактики в ИК-полосе $W4 (22.0 \mu\text{m})$ служит независимым от FUV-потока индикатором темпа звездообразования. Это особенно важно для ультраплоских галактик из-за значительного внутреннего поглощения в ультрафиолете. Согласно [49], глобальный темп звездообразования SFR_{tot} выражается соотношением

$$SFR_{\text{tot}} = SFR_{\text{FUV}} + 0.83 SFR_{\text{IR}}. \quad (11)$$

Зависимость глобального удельного темпа звездообразования $\lg sSFR_{\text{tot}}$ от звездной массы для ультраплоских и плоских галактик представлена на

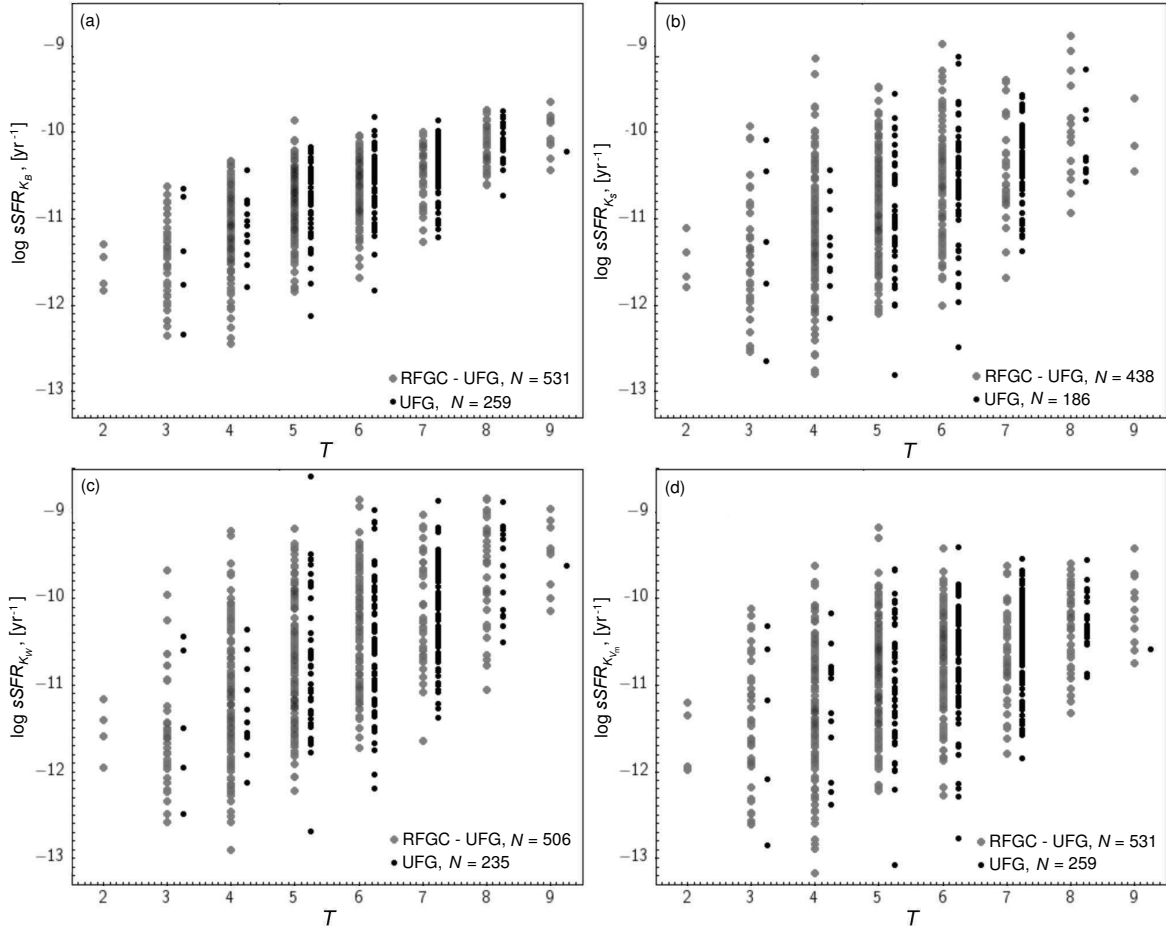


Рис. 5. Зависимость удельного темпа звездообразования $\lg sSFR$ от морфологического типа галактики T для RFGC–UFG- и UFG-галактик — серые и темные кружки соответственно. Звездная масса галактики определялась по ее K -светимости при $M_* = 1M_\odot/L_\odot$. K -величины галактик оценивались четырьмя разными способами: K_B — по B -величине и морфологическому типу, K_s — по данным 2MASS-обзора, K_W — по $W1$ -величине из WISE-обзора, K_{V_m} — по соотношению (3) между амплитудой вращения V_m и абсолютной K -величиной.

диаграмме рис. 8а. Здесь звездная масса вычислялась по K -светимости, определяемой через соотношение (9). В отличие от рис. 6, на этой панели показаны все UFG- и RFGC–UFG-галактики с оценками $sSFR_{tot}$. Рисунок 8b демонстрирует зависимость $sSFR_{tot}$ от величины отношения водородной и звездной масс галактики. Популяция UFG-галактик на ней выглядит заметно более компактной, чем совокупность остальных RFGC-галактик.

Вклад инфракрасной компоненты в соотношении (11) в среднем невелик. Для ультраплоских дисков он составляет 0.10 ± 0.04 dex, а для RFGC–UFG-галактик этот вклад несколько больше: 0.20 ± 0.03 dex. Как следует из данных, представленных на рис. 9, глобальный темп звездообразования в дисках плоских галактик, а также вклад в него ИК-компоненты, показывают тесную корреляцию с морфологическим типом. Средняя величина $\langle sSFR_{tot} \rangle$ монотонно возрастает на порядок величины от типов $T = 2, 3$ к типам

$T = 8, 9$. При этом отношение темпов звездообразования, определяемых уравнениями (11) и (6), систематически падает от 0.4 dex для $T = 2 + 3$ до практически нулевого избытка для типов $T = 8 + 9$. Различия ультраплоских и плоских галактик на обеих панелях рис. 9 находятся в пределах случайных погрешностей, однако в целом выборка UFG обладает более высоким темпом звездообразования за счет наличия в ней большей доли объектов поздних типов. Заметим, что учет ИК-компоненты в соотношении (11) оставляет все галактики ниже предела $\lg sSFR = -9.4$.

Как отмечали Караченцев и Кайсин [50], эволюционный статус галактики удобно характеризовать безразмерными параметрами P (Past) и F (Future), которые не зависят от расстояния:

$$P = \lg(SFR \times T_0/L_K), \quad (12)$$

$$F = \lg[1.85 M_{HI}/(SFR \times T_0)]. \quad (13)$$

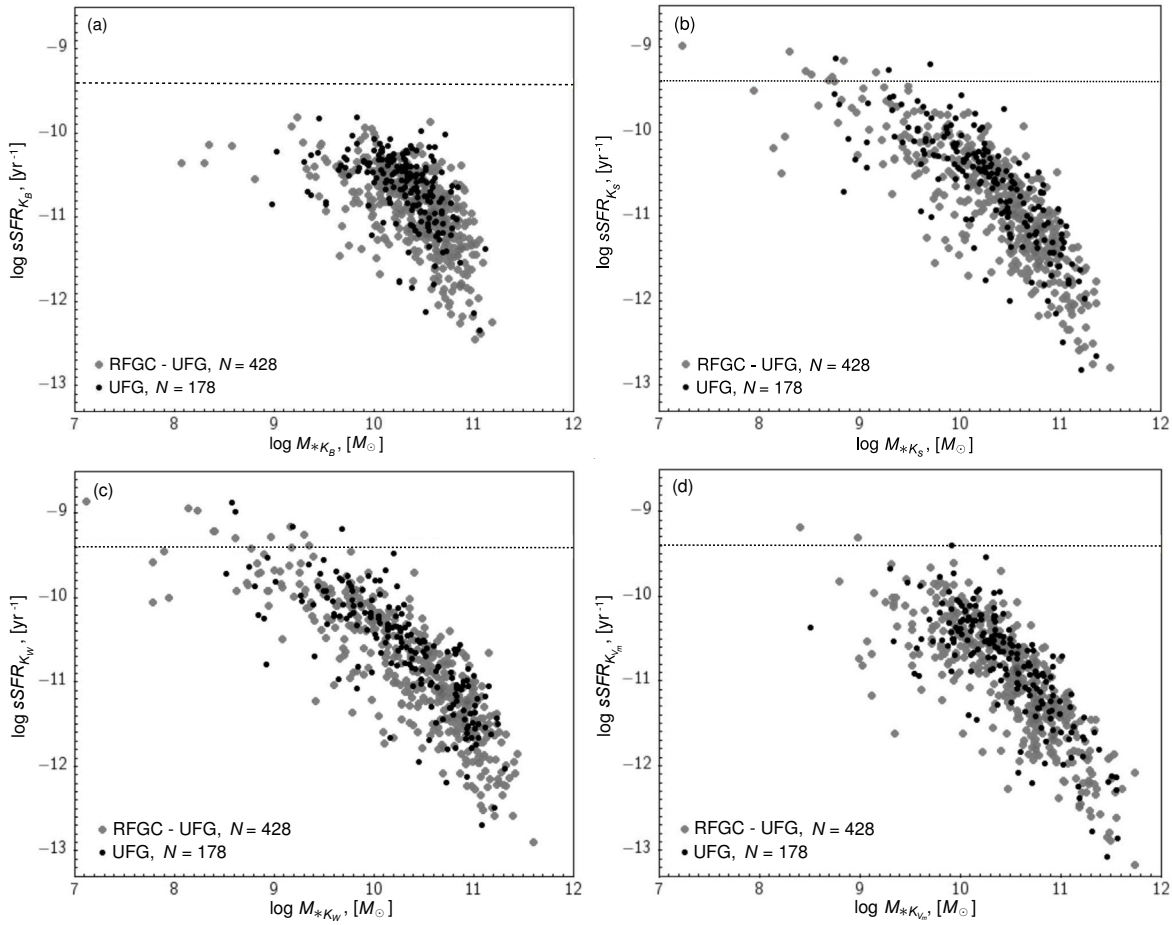


Рис. 6. Удельный темп звездообразования в зависимости от светимости (звездной массы) галактики. На панелях рисунков серыми кружками изображены галактики подвыборки RFG–UFG ($N = 428$), а темными кружками — галактики UFG ($N = 178$). Светимости (звездные массы) определялись четырьмя способами, аналогичными приведенным на рис.5.

Параметр P выражает удельный темп звездообразования, нормированный на возраст Вселенной $T_0 = 13.7$ млрд. лет. Параметр F (по смыслу обратный эффективному темпу звездообразования) показывает, как долго может поддерживаться наблюдаемый темп звездообразования при имеющихся запасах газа в диске. Коэффициент 1.85 при M_{HI} учитывает вклад гелия и молекулярного водорода в общую массу газа [51].

Рисунок 10 представляет диагностическую диаграмму «Past–Future» для ультраплоских и плоских галактик. На верхней панели показаны индивидуальные положения каждой галактики. На нижней панели приведены средние значения параметров P и F и их погрешности для различных морфологических типов. Как видим, общее распределение галактик на P – F -диаграмме вытянуто по диагонали, и диски каждого морфологического типа локализованы в определенной части этой диаграммы.

Средние значения различных параметров, характеризующих массы и темп звездообразования

у галактик разных типов, приведены в таблице 2. Ее структура такая же, как и таблицы 1. В целом различия средних параметров для UFG- и RFGC–UFG-галактик невелики, если сравнивать их в пределах одного и того же морфологического типа. Однако суммарные различия двух рассматриваемых выборок могут быть значимыми из-за различной пропорции в них галактик поздних и ранних типов. Наиболее заметна разница UFG- и RFGC–UFG-дисков по относительному содержанию водорода на единицу звездной массы. В среднем эта разница составляет 0.25 ± 0.03 dex, несколько меняясь от одного морфологического типа к другому. Из этого результата, минимально искаженного эффектами наблюдательной селекции, следует, что преобразование газа в звезды в очень тонких дисках происходит с заметным запаздыванием по сравнению с более толстыми дисками.

7. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Рассматриваемая выборка ультраплоских галактик представляет собой популяцию спиральных

Таблица 2. Средние значения и ошибки среднего для вычисленных характеристик плоских и ультраплоских галактик в зависимости от морфологического типа

Параметр	Все типы	Морфологический тип							
		2+3	4	5	6	7	8+9		
$\lg SFR$	$N_{RFGC-UG} = 531$	45	127	152	108	45	54		
	-0.59 ± 0.02	-0.73 ± 0.05	-0.54 ± 0.04	-0.45 ± 0.03	-0.55 ± 0.05	-0.75 ± 0.09	-0.94 ± 0.09		
	$N_{UG} = 259$	5	12	52	66	102	22		
$\lg M_*$	$N_{RFGC-UG} = 722$	67	170	201	143	67	74		
	10.26 ± 0.02	10.76 ± 0.04	10.6 ± 0.02	10.4 ± 0.03	10.1 ± 0.04	9.81 ± 0.07	9.33 ± 0.08		
	$N_{UG} = 333$	8	16	70	80	134	25		
$\lg M_{HI}$	$N_{RFGC-UG} = 573$	51	132	160	120	54	56		
	8.91 ± 0.03	9.09 ± 0.07	9.16 ± 0.05	9.09 ± 0.04	8.77 ± 0.06	8.61 ± 0.1	8.29 ± 0.08		
	$N_{UG} = 258$	7	12	55	62	102	20		
$\lg(M_{HI}/M_*)$	$N_{RFGC-UG} = 573$	51	132	160	120	54	56		
	-1.34 ± 0.02	-1.66 ± 0.06	-1.44 ± 0.04	-1.31 ± 0.03	-1.31 ± 0.05	-1.19 ± 0.07	-1.05 ± 0.07		
	$N_{UG} = 258$	7	12	55	62	102	20		
$\lg sSFR$	$N_{RFGC-UG} = 531$	45	127	152	108	45	54		
	-10.81 ± 0.02	-11.46 ± 0.06	-11.13 ± 0.04	-10.81 ± 0.03	-10.64 ± 0.03	-10.45 ± 0.05	-10.14 ± 0.03		
	$N_{UG} = 259$	5	12	52	66	102	22		
$\lg SFR_e$	$N_{RFGC-UG} = 423$	35	97	122	92	37	40		
	-9.48 ± 0.03	-9.8 ± 0.08	-9.66 ± 0.06	-9.53 ± 0.05	-9.34 ± 0.06	-9.25 ± 0.1	-9.13 ± 0.07		
	$N_{UG} = 201$	4	9	43	48	79	18		
$\lg sSFR_t$	$N_{RFGC-UG} = 499$	45	124	145	100	40	45		
	-10.61 ± 0.02	-11.08 ± 0.06	-10.82 ± 0.03	-10.6 ± 0.02	-10.5 ± 0.03	-10.39 ± 0.04	-10.09 ± 0.03		
	$N_{UG} = 226$	5	11	46	63	87	14		
P	$N_{RFGC-UG} = 423$	35	97	122	92	37	40		
	-0.65 ± 0.03	-1.29 ± 0.08	-0.95 ± 0.05	-0.69 ± 0.04	-0.5 ± 0.04	-0.3 ± 0.05	0.06 ± 0.04		
	$N_{UG} = 201$	4	9	43	48	79	18		
F	$N_{RFGC-UG} = 423$	35	97	122	92	37	40		
	-0.39 ± 0.03	-1.23 ± 0.41	-0.97 ± 0.13	-0.71 ± 0.08	-0.47 ± 0.06	-0.25 ± 0.03	0.02 ± 0.06		
	$N_{UG} = 201$	4	9	43	48	79	18		
	$N_{RFGC-UG} = 423$	35	97	122	92	37	40		
	-0.39 ± 0.04	0.06 ± 0.46	0.14 ± 0.22	-0.25 ± 0.07	-0.35 ± 0.08	-0.48 ± 0.05	-0.78 ± 0.09		

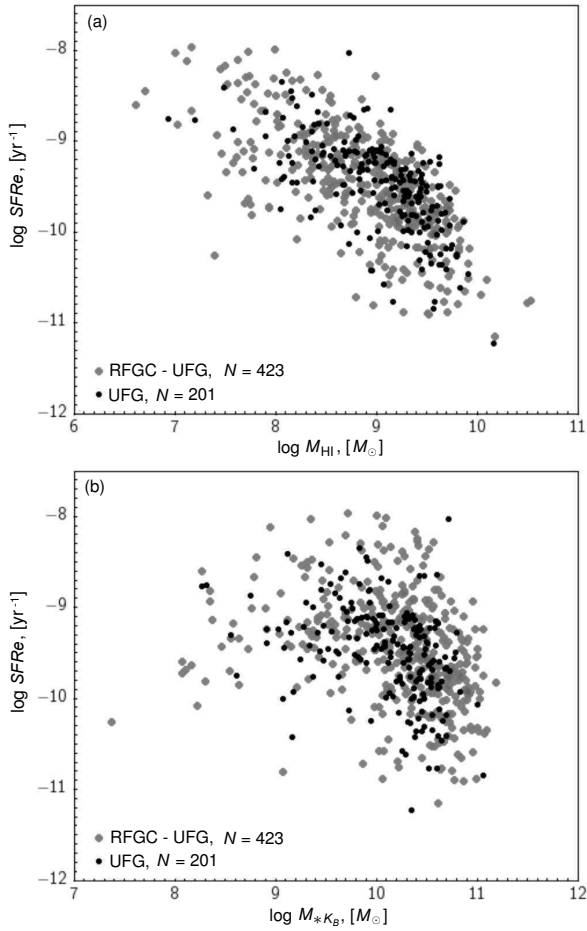


Рис. 7. Эффективный темп звездообразования как функция (a) водородной и (b) звездной массы галактики. Звездные массы определялись через полную видимую величину B_t (см. раздел 5).

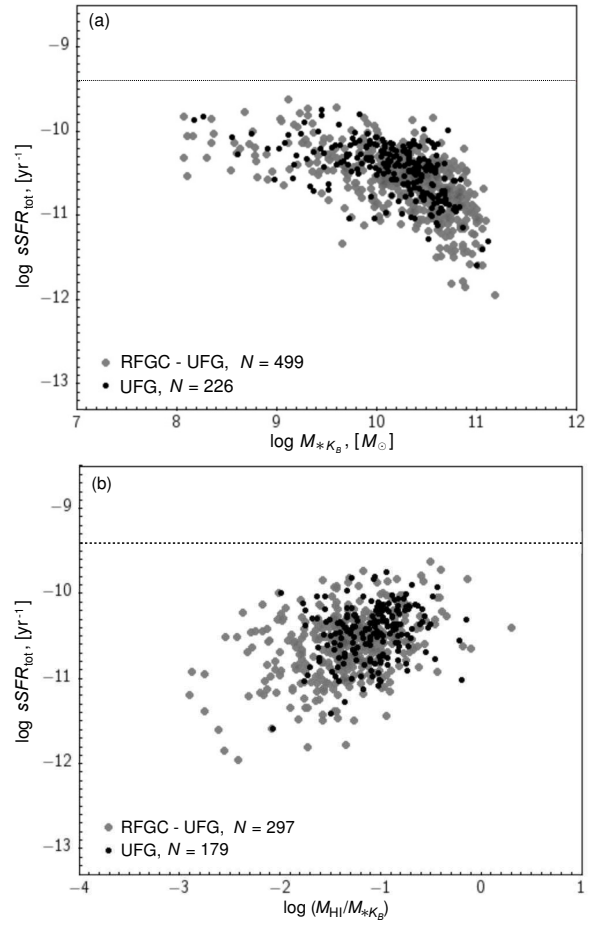


Рис. 8. Полный (FUV + IR) удельный темп звездообразования в зависимости от звездной массы галактики, определяемой по K_s -светимости через видимую величину B_t (a) и в зависимости от величины отношения водородной к звездной массе (b).

дисков простейшей структуры, почти полностью лишенных сфероидального компонента (балджа). В современных моделях формирования галактик предполагается, что такие системы не испытывали частых слияний, находясь в областях низкой плотности числа галактик. По данной причине ультраплоские галактики могут служить эталонной выборкой для изучения автономного процесса звездообразования, где приливные воздействия соседей пренебрежимо малы. При этом, однако, нельзя исключить, что заметное влияние на эволюцию изолированных дисков оказывает процесс аккреции межгалактического газа на тонкий диск.

Диагностическая диаграмма «Past–Future» (рис. 10) является наиболее наглядным способом сравнения эволюционного статуса галактик из различных выборок. Как следует из данных таблицы 2, средние значения параметров P и F составляют для ультраплоских галактик $\langle P \rangle = -0.43 \pm 0.03$ и $\langle F \rangle = -0.39 \pm 0.04$. Для остальных плоских RFGC–UFG-галактик эти параметры несколько

отличны от предыдущих: $\langle P \rangle = -0.65 \pm 0.03$ и $\langle F \rangle = -0.39 \pm 0.03$. По смыслу параметра P типичная ультраплоская галактика способна воспроизвести при наблюдаемом сейчас темпе звездообразования только 1/3 часть своей наличной звездной массы. Следовательно, средний темп звездообразования у тонких дисков был в прошлом примерно в три раза выше, чем в настоящее время. Если принять, что отношение M_*/L_K равно не 1, а $0.5 M_\odot/L_\odot$ [45], то средний удельный темп звездообразования в ультраплоских дисках в прошлом был бы всего на 0.13 dex, или на 35%, выше наблюдаемого в настоящее время. В таком случае тонкие диски галактик выглядели бы как регулярные фабрики, равномерно перерабатывающие газ в звезды. При этом известный наблюдаемый подъем в 5–10 раз космического темпа звездообразования $SFR(z)$ в эпоху $z \sim 1-3$ [52] не имел бы отношения к эволюции тонких дисков галактик. Величина параметра $\langle F \rangle$ показывает,

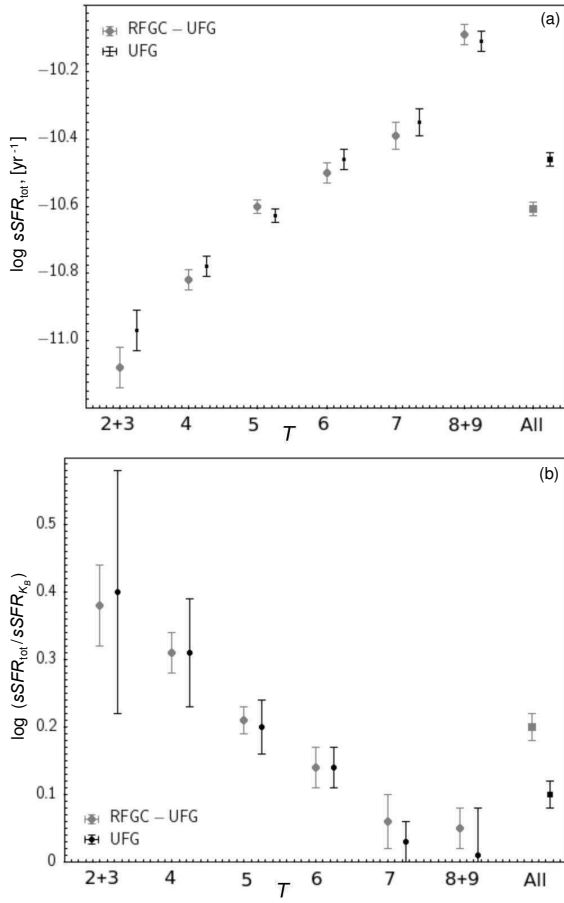


Рис. 9. (а): полный (по FUV + IR) удельный темп звездообразования для ультраплоских и плоских галактик как функция морфологического типа. (б): отношение удельных темпов звездообразования (полного к определяемому по FUV-поток) в зависимости от морфологического типа. Последние пары точек на обеих панелях относятся к усредненным данным по всем типам.

что типичная ультраплоская галактика обладает запасами газа, которые позволяют поддерживать наблюдаемый темп звездообразования на протяжении еще почти 6 млрд лет (если не учитывать внутреннее поглощение HI-потока в ней).

Как видно на рис. 10, диаграмма P – F имеет вытянутость в диагональном направлении. Эта особенность обусловлена систематическим ростом удельного темпа звездообразования вдоль хаббловской последовательности от ранних типов к поздним. Ошибки измерения FUV-потока также приводят к разбросу галактик именно в диагональном направлении.

Рассматривая выборку изолированных галактик из каталога 2MIG [23], Мельник и др. [21] получили средние параметры $\langle P \rangle = -0.62 \pm 0.02$ и $\langle F \rangle = -0.14 \pm 0.02$. Значение $\langle P \rangle$ для 2MIG-галактик совпадает в пределах ошибок со средним -0.65 ± 0.03 для плоских галактик. Од-

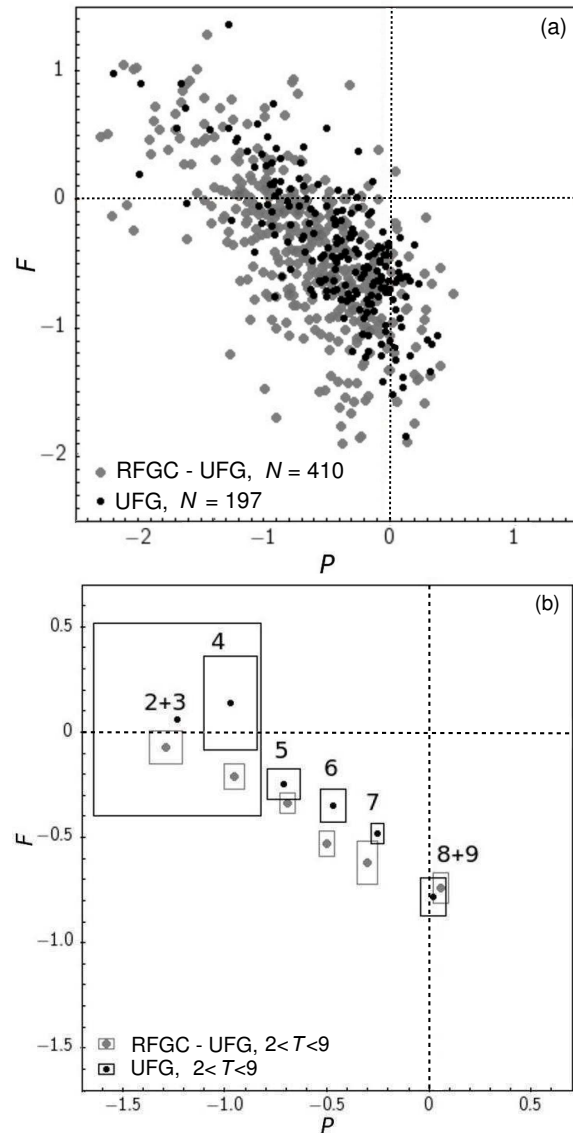


Рис. 10. Диагностические диаграммы «Past–Future» для ультраплоских и плоских галактик: (а) распределения индивидуальных значений P и F ; (б) средние значения P и F для различных морфологических типов. Размеры боксов соответствуют ошибкам среднего.

нако средний параметр $\langle F \rangle = -0.39 \pm 0.03$ для плоских и ультраплоских галактик оказывается значительно меньше, чем для изолированных дисков 2MIG. Причина этого различия, очевидно, обусловлена внутренним поглощением HI-потока у сильно наклоненных галактик. Каталог RC3 [34] и HyperLEDA дают помимо m_{21} -величин еще и m_{21}^c -величины, исправленные за внутреннее поглощение, согласно [26]:

$$m_{21}^c = m_{21} - 2.5 \lg(0.031 \sec i) + 2.5 \lg[1 - \exp(-0.31 \sec i)], \quad (14)$$

где i — угол наклона. При $i > 89^\circ$ величина по-

глощения считалась в RC3 одинаковой и равной 0^m82 . Мы не использовали m_{21}^c -величину для RFGC-галактик, полагая, что эта схема мало применима для видимых с ребра дисков: во-первых, ошибки определения угла наклона для них по отношению осей a/b бывают иногда значительными, во-вторых, величина поглощения должна зависеть не только от угла i , но и от размера (светимости) галактики. Тем не менее, ожидаемая по схеме [26] поправка для галактик с $a/b > 10$ составляет в среднем $\Delta m_{21} = 0^m5$, или $\Delta \lg F_{HI} = 0.20$, учет которой нивелирует различие в $\langle F \rangle$ между UFG- и 2MIG-галактиками. При этом оценка характерного времени исчерпания газа у плоских галактик возрастает с 6 до 9 млрд лет. Добавим, что для шести плоских галактик, кинематика которых исследована в [53], средняя недооценка массы водорода из-за поглощения в линии HI составляет $27 \pm 6\%$.

Для каталога изолированных галактик Местного сверхскопления LOG [22] авторы нашли медианные параметры $P = -0.05$ и $F = -0.03$. Сравнивая их со значениями $\langle P \rangle$ и $\langle F \rangle$ для выборки UFG, следует принимать во внимание, что в близком объеме каталога LOG преобладают карликовые галактики с высоким содержанием газа и высоким темпом звездообразования. Как мы уже отмечали, погрешность определения FUV-потока для ультраплоских галактик, остаточная неопределенность схемы поправок за внутреннее поглощение, а также неясная пока систематика в оценке звездной массы по K -светимости вместе приводят к разбросу UFG-галактик по параметрам P и F порядка 0.2–0.3 dex. Этот разброс несколько меньше наблюдаемого (примерно 0.4 dex). Возможно, что истинное распределение тонких изолированных дисков на диагностической диаграмме $P-F$ является весьма компактным в силу единообразной природы процесса преобразования газа в звезды [54]. Для проверки этого предположения необходимы систематические программы фотометрического и кинематического исследования ультраплоских галактик, в том числе измерения их $H\alpha$ -потоков и определения кривых вращения по оптическим спектрам.

БЛАГОДАРНОСТИ

В данной работе были использованы базы данных NED (<http://nedwww.ipac.caltech.edu>) и HyperLEDA (<http://leda.univ-lyon1.fr>), а также данные обзоров неба GALEX, SDSS, 2MASS и WISE. ИДК благодарит Российский научный фонд за поддержку грантом 14-12-00965.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B. M. Tinsley, *Astrophys. J.* **151**, 547 (1968).
2. R. B. Larson, B. M. Tinsley, and C. N. Caldwell, *Astrophys. J.* **237**, 692 (1980).
3. R. C. Kennicutt, Jr., J. C. Lee, J. G. Funes, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **178**, 247 (2008).
4. R. C. Kennicutt, Jr., C.-N. Hao, D. Calzetti, et al., *Astrophys. J.* **703**, 1672 (2009).
5. J. C. Lee, A. Gil de Paz, R. C. Kennicutt, Jr., et al., *Astrophys. J. Suppl.* **192**, 6 (2011).
6. D. A. Thilker, L. Bianchi, G. Meurer, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **173**, 538 (2007).
7. V. Buat, T. T. Takeuchi, J. Iglesias-Páramo, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **173**, 404 (2007).
8. J. Brinchmann, S. Charlot, S. D. M. White, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **351**, 1151 (2004).
9. K. G. Noeske, S. M. Faber, B. J. Weiner, et al., *Astrophys. J.* **660**, L47 (2007).
10. L. E. Abramson, D. D. Kelson, A. Dressler, et al., *Astrophys. J.* **785**, L36 (2014).
11. R. C. Kennicutt, Jr., *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **36**, 189 (1998).
12. Q. E. Goddard, R. C. Kennicutt, and E. V. Ryan-Weber, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **405**, 2791 (2010).
13. I. D. Karachentsev, S. S. Kaisin, and E. I. Kaisina, *Astrophysics* **58**, 453 (2015).
14. D. C. Martin, J. Fanson, D. Schiminovich, et al., *Astrophys. J.* **619**, L1 (2005).
15. K. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agüeros, et al., *Astron. J.* **126**, 2081 (2003).
16. M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, et al., *Astron. J.* **131**, 1163 (2006).
17. T. H. Jarrett, T. Chester, R. Cutri, et al., *Astron. J.* **119**, 2498 (2000).
18. T. H. Jarrett, F. Masci, C. W. Tsai, et al., *Astron. J.* **144**, 68 (2012).
19. I. D. Karachentsev and E. I. Kaisina, *Astron. J.* **146**, 46 (2013).
20. I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, O. V. Melnyk, and H. M. Courtois, *Astrophysical Bulletin* **68**, 243 (2013).
21. O. Melnyk, V. Karachentseva, and I. Karachentsev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **451**, 1482 (2015).
22. I. D. Karachentsev, D. I. Makarov, V. E. Karachentseva, and O. V. Melnyk, *Astrophysical Bulletin* **66**, 1 (2011).
23. V. E. Karachentseva, S. N. Mitronova, O. V. Melnyk, and I. D. Karachentsev, *Astrophysical Bulletin* **65**, 1 (2010).
24. L. Morselli, A. Renzini, P. Popesso, and G. Erfanianfar, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **462**, 2355 (2016).
25. L. D. Matthews and W. van Driel, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **143**, 421 (2000).
26. J. Heidmann, N. Heidmann, and G. de Vaucouleurs, *Mem. Royal Astron. Soc.* **75**, 85 (1972).
27. I. Karachentsev, *Astron. J.* **97**, 1566 (1989).

28. I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, and S. L. Parnovskij, *Astronomische Nachrichten* **314**, 97 (1993).
29. I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, Y. N. Kudrya, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **47** (1999).
30. V. E. Karachentseva, Y. N. Kudrya, I. D. Karachentsev, et al., *Astrophysical Bulletin* **71**, 1 (2016).
31. I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, and Y. N. Kudrya, *Astrophysical Bulletin* **71**, 129 (2016).
32. D. Makarov, P. Prugniel, N. Terekhova, et al., *Astron. and Astrophys.* **570**, A13 (2014).
33. I. D. Karachentsev and D. A. Makarov, *Astron. J.* **111**, 794 (1996).
34. G. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, H. G. Corwin, Jr., et al., *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies* (Springer-Verlag, New York, 1991).
35. R. B. Tully, M. J. Pierce, J.-S. Huang, et al., *Astron. J.* **115**, 2264 (1998).
36. M. A. W. Verheijen and R. Sancisi, *Astron. and Astrophys.* **370**, 765 (2001).
37. B. M. Devour and E. F. Bell, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **459**, 2054 (2016).
38. A. H. Maller, A. A. Berlind, M. R. Blanton, and D. W. Hogg, *Astrophys. J.* **691**, 394 (2009).
39. J. C. Lee, A. Gil de Paz, C. Tremonti, et al., *Astrophys. J.* **706**, 599 (2009).
40. E. E. Salpeter, *Astrophys. J.* **121**, 161 (1955).
41. P. Kroupa, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **322**, 231 (2001).
42. G. Chabrier, *Astrophys. J.* **586**, L133 (2003).
43. E. F. Bell, D. H. McIntosh, N. Katz, and M. D. Weinberg, *Astrophys. J. Suppl.* **149**, 289 (2003).
44. J. Binney and M. Merrifield, *Galactic Astronomy* (Princeton Univ. Press, Princeton, 1998).
45. S. S. McGaugh and J. M. Schombert, *Astrophys. J.* **802**, 18 (2015).
46. T. H. Jarrett, T. Chester, R. Cutri, et al., *Astron. J.* **125**, 525 (2003).
47. G. Meurer, *ArXiv:1608.05935* (2016).
48. M. P. Haynes and R. Giovanelli, *Astron. J.* **89**, 758 (1984).
49. T. H. Jarrett, F. Masci, C. W. Tsai, et al., *Astron. J.* **145**, 6 (2013).
50. I. D. Karachentsev and S. S. Kaisin, *Astron. J.* **133**, 1883 (2007).
51. M. Fukugita and P. J. E. Peebles, *Astrophys. J.* **616**, 643 (2004).
52. P. Madau and M. Dickinson, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **52**, 415 (2014).
53. S. P. C. Peters, P. C. van der Kruit, R. J. Allen, and K. C. Freeman, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **464**, 32 (2017).
54. A. Oemler, Jr., L. E. Abramson, M. D. Gladders, et al., *ArXiv:1611.05932* (2016).

Ultra-Flat Galaxies Selected from RFGC Catalog. III. Star Formation Rate

O. V. Melnyk, V. E. Karachentseva, and I. D. Karachentsev

We examine the star formation properties of galaxies with very thin disks selected from the Revised Flat Galaxy Catalog (RFGC). The sample contains 333 ultra-flat galaxies (UFG) at high Galactic latitudes, $|b| > 10^\circ$, with a blue major angular diameter of $a \geq 1''.2$, blue and red apparent axial ratios of $(a/b)_b > 10$, $(a/b)_r > 8.5$ and radial velocities within $10\,000\text{ km s}^{-1}$. As a control sample for them we use a population of 722 more thick RFGC galaxies with $(a/b)_b > 7$, situated in the same volume. The UFG distribution over the sky indicates them as a population of quite isolated galaxies. We found that the specific star formation rate, $sSFR_{\text{FUV}}$, determined via the FUV GALEX flux, increases steadily from the early type to late type disks for both the UFG and RFGC–UFG samples, showing no significant mutual difference within each morphological type T . The population of UFG disks has the average H I-mass-to-stellar-mass ratio by (0.25 ± 0.03) dex higher than that of RFGC–UFG galaxies. Being compared with arbitrary orientated disks of the same type, the ultra-flat edge-on galaxies reveal that their total H I mass is hidden by self-absorption on the average by approximately 0.20 dex. We demonstrate that using the robust stellar mass estimate via $\langle B - K \rangle$ -color and galaxy type T for the thin disks, together with a nowadays accounting for internal extinction, yields their $sSFR$ quantities definitely lying below the limit of $-9.4\text{ dex (yr}^{-1}\text{)}$. The collected observational data on UFG disks imply that their average star formation rate in the past has been approximately three times the current SFR . The UFG galaxies have also sufficient amount of gas to support their observed SFR over the following nearly 9 Gyrs.

Keywords: *galaxies: structure—galaxies: star formation*