

## ВИДИМЫЕ С РЕБРА ГАЛАКТИКИ В СВЕРХГЛУБОКОМ ПОЛЕ КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА “ХАББЛ”

© 2019 г. В. П. Решетников<sup>1,2\*</sup>, П. А. Усачев<sup>1,2</sup>, С. С. Савченко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

Поступила в редакцию 17.06.2019 г.; после доработки 11.07.2019 г.; принята к публикации 13.08.2019 г.

Составлена выборка из 58 видимых с ребра спиральных галактик на красном смещении  $z \sim 1$ , отобранных в Сверхглубоком поле Космического телескопа “Хаббл”. Для всех галактик в фильтрах  $V_{606}$  и  $i_{775}$  выполнен анализ 2D распределений яркости и измерены радиальный ( $h_r$ ) и вертикальный ( $h_z$ ) экспоненциальные масштабы яркости. Получены свидетельства в пользу того, что относительная толщина дисков далеких галактик, т.е. отношение вертикального и радиального масштабов, в среднем, превышает толщину дисков близких спиральных галактик. Вертикальная шкала  $h_z$  звездных дисков галактик не показывает больших изменений при  $z \leq 1$ . Обсуждается возможность эволюции с красным смещением радиальной шкалы распределения яркости  $h_r$ .

*Ключевые слова:* галактики, фотометрия, эволюция.

DOI: 10.1134/S0320010819090043

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение видимых “с ребра” спиральных галактик позволяет исследовать ряд важных проблем внегалактической астрономии — строение и устойчивость галактических дисков, свойства и распределение пыли в них, вклад темной материи в структуру галактик, крупномасштабное распределение галактик и пр. (см., например, ван дер Круит, Сирл, 1981; Засов и др., 1991; де Грис, 1998; Мосенков и др., 2010, 2016; Бизяев и др., 2017; Макаров и др., 2018 и ссылки там же). Предшествующие работы были в основном посвящены видимым с ребра галактикам в окружающей нас области Вселенной. Только в нескольких работах изучалась вертикальная структура далеких объектов. Например, Решетников и др. (2003) исследовали видимые с ребра галактики в Северном и Южном глубоких полях Космического телескопа “Хаббл”. Они нашли, что относительная толщина звездных дисков галактик на красном смещении  $z \sim 1$  в 1.5–2 раза превышает толщину дисков близких галактик. Этот вывод был подтвержден при анализе структуры галактик в Сверхглубоком поле телескопа “Хаббл” (Hubble Ultra Deep Field, далее — HUDF) (Элмегрин и др., 2005; Элмегрин, Элмегрин, 2006).

Целью нашей работы является фотометрическое изучение видимых с ребра спиральных галак-

тик в HUDF. Основными отличиями нашей работы от ранее опубликованных исследований являются: анализ полных двумерных распределений яркости вместо одномерных разрезов, использование спектроскопических красных смещений для большинства объектов, большой объем выборки видимых с ребра галактик.

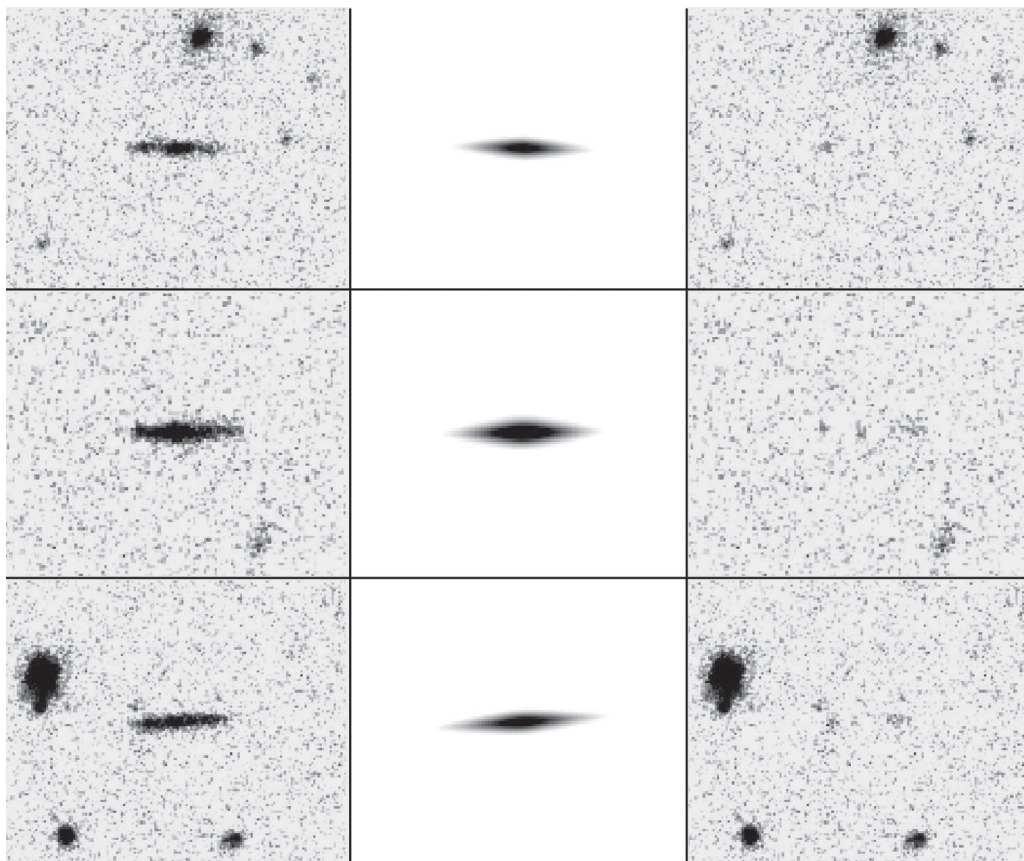
Все числовые величины в статье приведены для космологической модели с постоянной Хаббла  $70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$  и  $\Omega_m = 0.3$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.7$ .

### ВЫБОРКА ГАЛАКТИК И ОБРАБОТКА

Для изучения видимых с ребра галактик мы использовали кадры Сверхглубокого поля Космического телескопа “Хаббл” в фильтрах F606W (далее —  $V_{606}$ ) и F775W ( $i_{775}$ ) (Беквит и др., 2006). В этих цветовых полосах изображения HUDF являются более глубокими по сравнению с другими оригинальными фильтрами. Размер одного элемента (пикселя) изображения равен  $0.03''$ .

На первом этапе на изображении поля в фильтре  $V_{606}$  с помощью пакета SExtractor (Бертин, Арно, 1996) была отобрана 901 галактика с видимым сжатием  $b/a \leq 0.55$ , площадью  $\geq 24$  пикселя и с отношением  $S/N > 3$  в каждом пикселе. Столь большое ограничение по сжатию было использовано для того, чтобы не отсеять галактики, имеющие близких соседей. В ряде случаев SExtractor их не разделяет, а детектирует как единый объект. Далее,

\*Электронный адрес: v.reshetnikov@spbu.ru



**Рис. 1.** Примеры фотометрического моделирования для трех галактик выборки. Слева направо: оригинальное изображение, модель, разность исходного и модельного изображений. В верхнем ряду показаны изображения галактики N 9 из табл. 1 (размер кадра вдоль горизонтальной оси —  $4.6''$ ), в среднем — N 22 (соответствующий размер равен  $3.8''$ ), в нижнем — N 27 ( $4.6''$ ).

на основе визуального просмотра изображений объектов в разных фильтрах и с разным контрастом яркости, в выборке было оставлено 77 кандидатов в видимые с ребра галактики.

Для анализа фотометрической структуры (декомпозиции) галактик был использован пакет *Imfit* (Ирвин, 2015) с PSF (Point Spread Function), сгенерированной для HUDF программой *Tiny Tim* (Крист и др., 2011). Сравнение PSF с объектами выборки показало, что диски всех галактик уверенно разрешаются как в радиальном, так и в вертикальном направлениях.

У отобранных нами кандидатов в видимые с ребра галактики балджи заметны примерно у четверти объектов. Эти балджи в большинстве случаев являются слабыми и находятся на грани разрешения. Поэтому для описания фотометрической структуры галактик мы выбрали простейшую модель видимого с ребра двойного экспоненциального диска (например, ван дер Круит, Сирл, 1981):

$$I(r, z) = I_{0,0} \left( \frac{r}{h_r} \right) K_1 \left( \frac{r}{h_r} \right) e^{-z/h_z},$$

где  $I_{0,0}$ ,  $h_r$  и  $h_z$  — центральная поверхностная яркость, радиальный и вертикальный экспоненциальные масштабы (шкалы) диска, а  $K_1$  — модифицированная функция Бесселя первого порядка. Балджи, если были видны, аппроксимировались функцией Серсика. Близкие объекты, проецирующиеся на изучаемые галактики, перед работой программы *Imfit* были замаскированы. Если же площадь мешающих объектов была слишком велика, то в ходе декомпозиции они аппроксимировались комбинацией разных модельных функций и вычитались.

Анализ разностных изображений (исходное изображение минус модельное) выявил, что 19 из 77 галактик либо не являются видимыми с ребра галактиками, либо имеют очень сложную и асимметричную структуру. Такие объекты были исключены из дальнейшего рассмотрения. Таким образом, итоговая выборка видимых с ребра галактик, изучаемая в нашей работе, состоит из 58 объектов. Примеры фотометрического анализа для трех галактик приведены на рис. 1.

Для 33 галактик выборки были взяты спектроскопические красные смещения из работ Инами и

Таблица 1. Видимые с ребра галактики в HUDF

$N$	$X$	$Y$	CoeID	$V_{606}$	$z$	eon	fit	$h_{r, \text{кпк}}$		$h_{z, \text{кпк}}$	
1	1488	4578				1	3	0.21''	0.21''	0.03''	0.03''
2	1744	6169	6870	27.05	1.14	2	1	1.76	1.48	0.40	0.44
3	1812	5234	4907	26.48	2.02:	3	1	1.36	1.31	0.43	0.42
4	1941	4739	3840	26.77	0.59:	3	1	1.40	1.20	0.37	0.37
5	2084	4477	3299	25.51	1.22	2	2	2.11	1.92	0.46	0.49
6	2148	6006	6478	25.81	2.94:	2	2	2.51	2.42	0.60	0.57
7	2697	6387	7022	25.03	1.55	3	3	2.79	2.50	0.81	0.77
8	2701	5920	6278	26.62	0.94	2	2	2.77	2.47	0.41	0.42
9	2738	4401	3315	27.58	0.97:	2	1	1.99	1.75	0.31	0.34
10	3240	3843	2332	26.29	0.52	3	2	1.18	1.08	0.39	0.41
11	3401	2811	1057	24.83	0.74:	1	2	3.66	3.28	0.55	0.59
12	3631	5784	5995	25.04	0.95	3	2	1.22	1.20	0.52	0.52
13	3973	6512	7269	24.23	0.73	1	2	3.50	3.51	0.70	0.74
14	4140	6814	8801	25.78	1.31	3	1	2.37	2.35	0.57	0.60
15	4168	6469				3	1	0.18''	0.16''	0.05''	0.04''
16	4186	4249	3097	26.56	2.36:	3	1	1.67	1.59	0.63	0.59
17	4213	3054	1242	26.34	2.02:	2	2	4.04	3.72	0.69	0.68
18	4312	8261	9414	27.25	1.38:	3	1	1.96	1.66	0.44	0.46
19	4362	1468	163	27.43	0.65:	3	1	1.09	1.07	0.22	0.23
20	4462	2075	521	25.93	1.04:	1	2	2.53	2.53	0.48	0.51
21	4673	7460	8259	27.33	0.68	3	1	1.17	1.12	0.31	0.31
22	4675	5841	6143	26.97	1.02	1	1	1.67	1.45	0.33	0.38
23	4780	1333	95	26.21	1.76:	2	2	1.64	1.56	0.43	0.45
24	4833	4000	2652	25.17	0.68	1	2	2.46	2.40	0.46	0.47
25	4837	2673	966	26.43	1.04	2	3	1.56	1.44	0.36	0.38
26	4852	2255	666	25.94	1.16	3	1	1.13	1.02	0.33	0.33
27	4942	4289	3101	27.14	1.37	1	1	2.56	2.28	0.34	0.39
28	5022	8056	9171	26.17	0.68	3	1	1.44	1.27	0.37	0.37
29	5023	8224	9425	26.18	1.79:	2	2	1.65	1.47	0.37	0.39
30	5074	2004	446	25.40	1.10	3	1	1.54	1.57	0.36	0.41
31	5404	5620	5615	25.88	1.10	3	1	2.17	1.59	0.77	0.82
32	5560	7272	8351	26.39	1.75:	3	2	1.56	1.49	0.42	0.44
33	5597	9353	9848	26.53	1.04	3	2	2.29	1.96	0.58	0.58

Таблица 1. Окончание

<i>N</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	CoelID	$V_{606}$	<i>z</i>	еоп	fit	$h_r$ , кпк		$h_z$ , кпк	
34	5650	9326	9974	25.12	1.02	2	3	2.46	2.21	0.61	0.62
35	5692	2437	833	26.88	1.55	2	1	1.63	1.45	0.31	0.33
36	5781	7049	8624	25.72	0.83	1	1	4.13	3.70	0.56	0.57
37	5811	5988	6038	24.40	0.67	1	2	4.48	4.27	1.08	1.00
38	5959	3306	1612	26.51	1.76:	3	1	1.38	1.36	0.47	0.45
39	6124	4282	3178	26.21	1.91:	3	2	4.43	3.84	0.73	0.63
40	6178	8569	9807	25.88	0.77	1	2	2.62	2.45	0.39	0.43
41	6416	8780	9834	22.55	0.43	2	2	2.69	3.00	0.77	1.03
42	6462	4440	3418	26.59	3.96:	3	3	1.58	1.89	0.46	0.49
43	6486	6320	6922	25.55	1.26	1	3	5.26	5.29	0.55	0.61
44	6491	7924	9139	25.83	1.84	3	3	1.73	1.58	0.36	0.42
45	6746	7127	8372	23.22	0.53	3	3	2.63	2.41	0.55	0.57
46	6785	2367	735	25.72	1.12:	3	2	1.63	1.30	0.44	0.43
47	6789	5075	4661	26.63	0.04:	2	1	0.16''	0.15''	0.05''	0.05''
48	6894	7813	7737	24.39	0.53	3	2	1.39	1.37	0.42	0.45
49	6976	2949	1253	27.44	2.88:	3	1	1.39	1.24	0.42	0.41
50	7079	5197	4835	25.48	1.32	3	2	1.55	1.44	0.58	0.56
51	7429	5431	5408	26.95	1.42	3	2	1.27	1.27	0.38	0.35
52	7792	4286	3143	25.23	1.10	3	2	2.59	2.14	0.60	0.54
53	7856	3452	1732	25.57	0.66:	3	2	1.62	1.65	0.43	0.46
54	7905	3600	2017	26.53	0.63:	2	1	1.42	1.34	0.31	0.31
55	8020	4758	3871	26.16	0.67	1	2	1.93	1.75	0.35	0.36
56	8614	5763	5898	26.01	1.45:	3	3	1.23	1.24	0.57	0.57
57	8800	4950	4321	26.24	1.10	3	3	1.86	1.74	0.48	0.48
58	9259	5065	4360	24.54	0.14:	3	2	0.82	0.77	0.26	0.27

др. (2017) и Рафелски и др. (2015). Для 23 объектов мы используем фотометрические  $z$ , согласно Рафелски и др. (2015) (BPZ красные смещения). Для двух галактик красные смещения найдены не были.

Итоговые характеристики кандидатов в видимые с ребра галактики в HUDF приведены в табл. 1. В первом столбце таблицы указан порядковый номер объекта в выборке, во втором и третьем приведены координаты центра галактики на оригинальном изображении HUDF в пикселях, далее указаны номер галактики, согласно Коэ и др. (2006) и ее видимая звездная величина в фильтре F606W в АВ системе величин (Рафелски и др., 2015). В шестом столбце таблицы даны значения красных смещений, причем фотометрические  $z$  отмечены двоеточиями. Для галактики N 47 фотометрическое  $z$  очень мало (0.04). Это значение приводит к неправдоподобным характеристикам галактики, и поэтому в дальнейшем мы его не используем. В седьмом и восьмом столбцах табл. 1 приведены

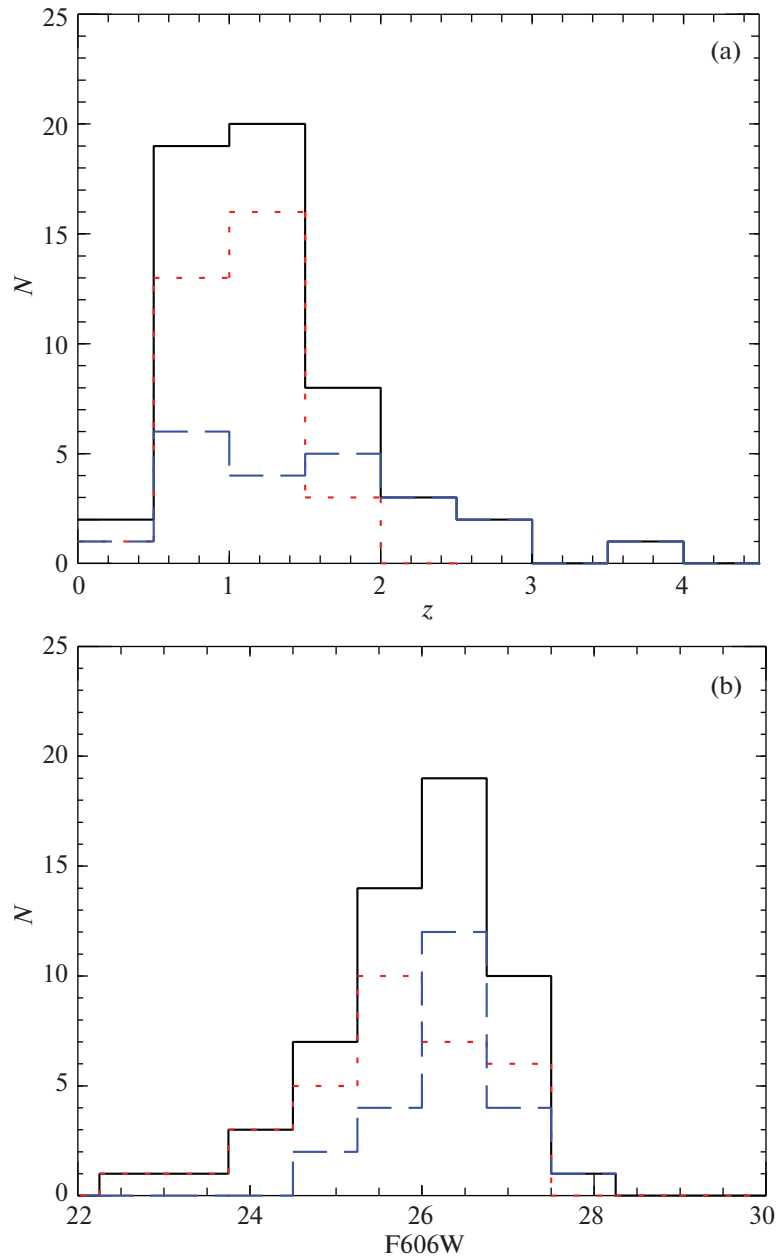
введенные нами классы, отражающие субъективную вероятность принадлежности галактики к видимым с ребра (еоп), а также качество фотометрической декомпозиции (fit) (1 означает наиболее высокую вероятность и качество, 3 — низкую).

Результаты декомпозиции суммированы в последних столбцах таблицы. (Нас интересуют шкалы распределения яркости  $h_r$  и  $h_z$ , так что поверхностные яркости галактик в статье не обсуждаются.) Для обоих экспоненциальных масштабов первое число относится к фильтру  $V_{606}$ , второе — к  $i_{775}$ . Для трех галактик (NN 1, 15, 47) результаты в табл. 1 приведены в угловых секундах. Характерная ошибка измерения шкал, выдаваемая программой Imfit, составляет менее 10%.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### *Общие характеристики галактик выборки*

На рис. 2 изображены распределения галактик по значению красного смещения и по видимой



**Рис. 2.** (a) — Распределение галактик выборки по красным смещениям (линия из точек показывает распределение галактик со спектральными  $z$ , штриховая — с фотометрическими, непрерывной линией изображено суммарное распределение); (b) — то же самое для видимых звездных величин в фильтре  $V_{606}$ .

звездной величине  $V_{606}$ . Среднее красное смещение рассматриваемых нами галактик составляет  $\langle z \rangle = 1.23 \pm 0.69$  (в качестве ошибки здесь и далее приведено значение несмещенной выборочной дисперсии). Галактики со спектральными  $z$  в среднем находятся ближе, чем объекты с фотометрическими оценками ( $\langle z \rangle = 1.01 \pm 0.34$  vs.  $\langle z \rangle = 1.57 \pm 0.92$ ), и являются более яркими (рис. 2).

Для космологической модели, принятой в работе, красное смещение  $z = 1.2$  соответствует времени, прошедшему после начала космологического расширения, равному примерно 5 млрд. лет. Следовательно, эпоху, в которую мы изучаем галактики

в HUDF, и окружающие нас области Вселенной ( $z \approx 0$ ) разделяет более 8 млрд. лет. Можно надеяться, что на такой длительной шкале времени мы сможем обнаружить признаки эволюции глобальной структуры дисковых галактик.

На рис. 3 показано распределение галактик с  $z \leq 2$  по светимости. Ограничение по красному смещению было использовано потому, что фотометрические  $z$  (для галактик с  $z > 2$  известны только они) для далеких галактик, как правило, менее точны, чем для более близких. Для нахождения абсолютных звездных величин в фильтре  $B$  ( $M(B)$ ) мы использовали результаты работы Сирианни и

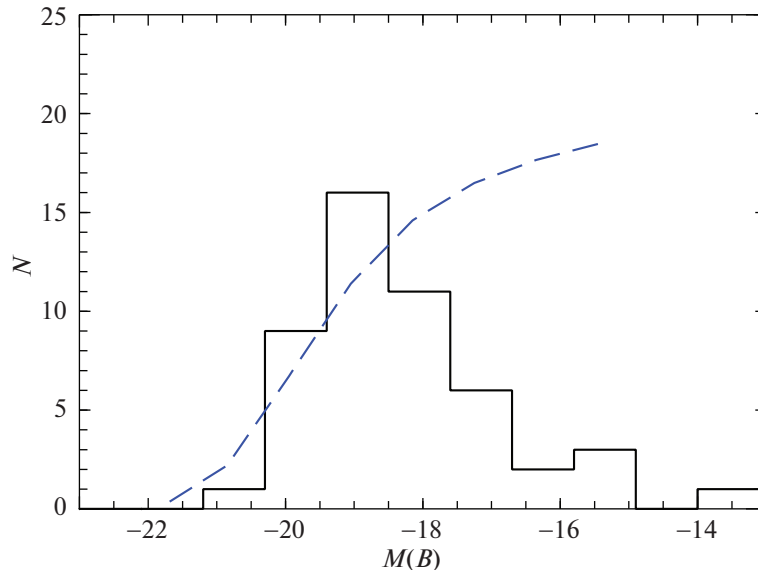


Рис. 3. Распределение видимых с ребра галактик в HUDF с  $z \leq 2$  по абсолютной звездной величине в фильтре  $B$ . Штриховая линия — ожидаемое распределение для видимых с ребра спиральных галактик (см. текст).

др. (2005) и для всех объектов применили значение  $k$ -поправки для Sc галактики согласно Бикеру и др. (2004). Среднее значение наблюдаемой светимости для видимых с ребра галактик в HUDF составляет  $\langle M(B) \rangle = -18^m.5 \pm 1^m.4$ . С учетом поправки за внутреннее поглощение, достигающей для видимых с ребра галактик  $\sim 1^m - 1^m.5$  (см., например, Талли и др., 1998), светимости этих галактик в положении “плашмя” должны, в среднем, достигать значений в диапазоне от  $-19^m$  до  $-20^m$ .

На рис. 4 показаны распределения галактик выборки по выраженным в килопарсеках значениям  $h_r$  и  $h_z$  в фильтре  $i_{775}$ . Средние значения этих распределений:  $\langle h_r \rangle = 1.97 \pm 0.92$  кпк и  $\langle h_z \rangle = 0.49 \pm 0.16$  кпк. Если ограничиться только объектами 1 и 2 классов еоп и fit (число таких галактик в выборке равно 22), то  $\langle h_r \rangle = 2.39 \pm 0.89$  кпк и  $\langle h_z \rangle = 0.52 \pm 0.20$  кпк. Приведенные выше значения шкал выглядят типичными для наблюдаемых в ориентации с ребра близких галактик (Бизяев и др., 2014).

Среднее отношение радиальных масштабов в полосах  $V_{606}$  и  $i_{775}$  равно  $1.08 \pm 0.08$ , что означает существование градиента цвета — звездные диски далеких галактик к периферии становятся в среднем более “голубыми”. Эта особенность характерна для дисков близких спиральных галактик. Отношение вертикальных шкал в этих же фильтрах не показывает заметной зависимости от длины волны:  $\langle h_z(V_{606})/h_z(i_{775}) \rangle = 0.97 \pm 0.07$ . Это также согласуется с данными для близких галактик (например, Бизяев и др., 2014).

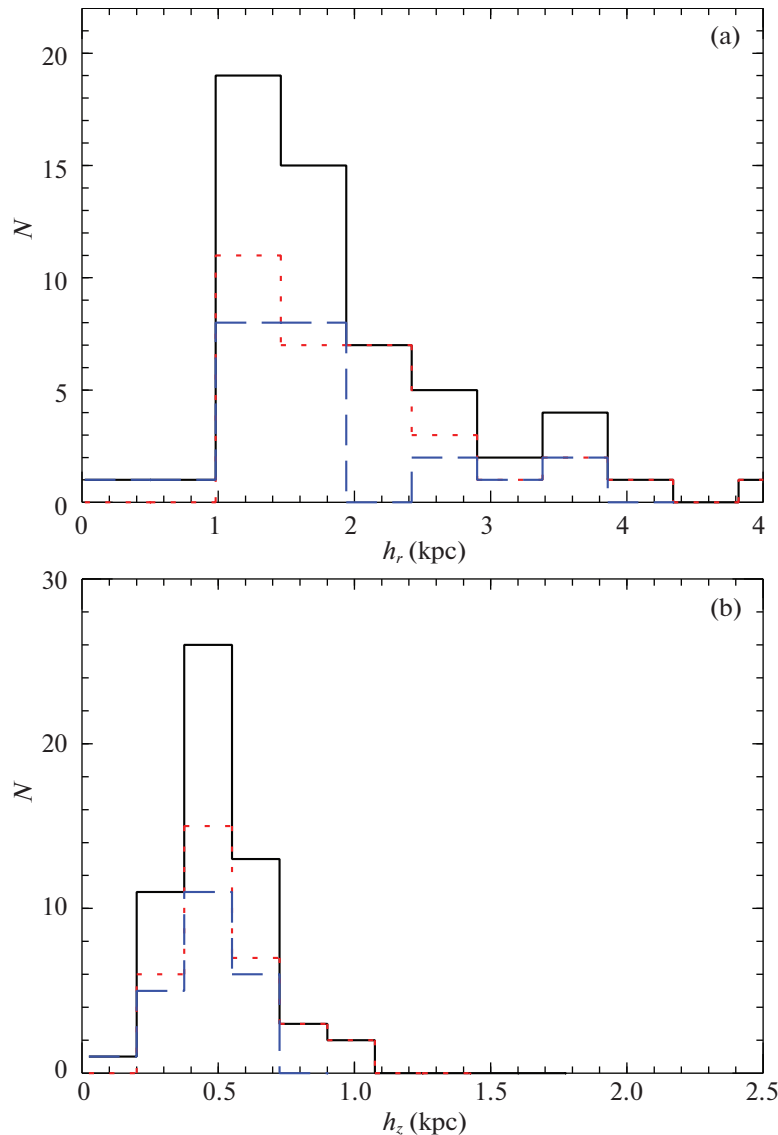
### Полнота выборки

Изучаемая нами выборка видимых с ребра галактик в Сверхглубоком поле, очевидно, неполна. Эта неполнота должна сильнее всего проявляться для слабых и плохо разрешаемых галактик, у которых сложно определить ориентацию звездных дисков по отношению к лучу зрения.

Для приближенной оценки ожидаемого числа видимых с ребра галактик в HUDF мы воспользуемся двумя способами.

С одной стороны, рассмотрим общую статистику галактик в HUDF. Согласно Кое и др. (2006), в этом поле насчитывается около 8000 галактик. Полное число спиральных галактик, отобранных по распределению энергии в их спектрах, с видимой звездной величиной в фильтре F606W ярче  $27^m.5$  (это соответствует самой слабой галактике в нашей выборке) и с  $z \leq 2$  равно 1233. Приняв случайную ориентацию плоскостей галактик, можно грубо оценить относительную долю видимых с ребра галактик (имеющих наклон между лучом зрения и перпендикуляром к плоскости диска  $\geq 85^\circ$ ), как  $|\cos 90^\circ - \cos 85^\circ| = 0.087$ . Следовательно, ожидаемое число видимых с ребра спиральных галактик в HUDF равно  $1233 \times 0.087 \approx 10^2$ .

С другой стороны, можно взять функцию светимости близких видимых с ребра спиральных галактик и оценить, сколько таких объектов должно наблюдаться в направлении HUDF. Для нашей оценки мы взяли функцию светимости спиральных галактик по данным обзора 2dF (Кротон и др., 2005). Согласно Кротону и др. (2005), полная пространственная плотность локальных спиральных галактик в диапазоне абсолютных звездных величин от  $M(B) = -15^m$  до  $M(B) = -21^m$



**Рис. 4.** Распределение галактик выборки по значению радиального масштаба диска (в кпк); (b) — распределение значений вертикального масштаба (кпк). Масштабы приведены в фильтре  $i_{775}$ . Разные линии соответствуют разным подвыборкам галактик (см. подпись к рис. 2).

(рис. 2) равна  $0.022 \text{ Мпк}^{-3}$ . Следовательно, плотность видимых с ребра галактик составляет  $0.022 \times 0.087 = 0.002 \text{ Мпк}^{-3}$ . Проинтегрировав эту пространственную плотность в направлении HUDF (его угловой размер равен примерно  $10^{-6}$  стерадиан), мы получили, что в пределах  $z \leq 2$  в поле должно наблюдаться примерно 90 галактик. Ожидаемое распределение этих 90 галактик по светимости изображено на рис. 2 штриховой линией.

На рис. 3 видно, что для ярких (с  $M(B) \leq -18^m$ ) объектов количество отобранных в HUDF галактик приближенно согласуется с ожидаемым. Наблюдательная селекция при отборе более слабых галактик, по-видимому, гораздо сильнее. Следовательно, для ярких галактик наша выборка, веро-

ятно, относительно полна, а среди более слабых объектов может быть пропущено много галактик.

Стоит отметить, что приведенные выше соображения не слишком надежны, поскольку на рис. 3 мы сравниваем наблюдаемые светимости далеких галактик, видимых с ребра, со светимостями близких галактик. Из-за ориентации с ребра далекие галактики выглядят слабее на  $\sim 1^m$  по сравнению с галактиками, ориентированными плашмя. Но, с другой стороны, галактики на  $z \sim 1$  должны быть ярче, чем близкие объекты, примерно на  $1^m$  из-за эволюции их светимости. Оба эффекта могут частично компенсировать друг друга, и поэтому для иллюстративных целей мы все же сравниваем светимости близких и далеких галактик на рис. 3.

Еще один трудно учитываемый фактор — эволюция свойств самих спиральных галактик. Из-за



этого эффекта многие из далеких галактик, выглядящих на  $z \sim 1$  неправильными и асимметричными, к  $z \sim 0$  могут эволюционировать в типичные спиральные галактики с тонкими звездными дисками.

#### Относительная толщина звездных дисков

Среднее значение отношения радиальных и вертикальных экспоненциальных масштабов дисков для всей выборки (58 галактик) в полосе  $i_{775}$  составляет  $\langle h_r/h_z \rangle = 4.02 \pm 1.28$ . Если ограничиться только объектами классов 1 и 2, характеризующих вероятность отнесения к видимым с ребра галактикам и качество декомпозиции, то  $\langle h_r/h_z \rangle = 4.61 \pm 0.98$  (22 галактики). В фильтре  $V_{606}$  соответствующие значения равны  $\langle h_r/h_z \rangle = 4.46 \pm 1.45$  и  $\langle h_r/h_z \rangle = 5.27 \pm 1.23$ .

Эти средние значения выглядят меньшими (то есть диски галактик являются более толстыми) по сравнению со спиральными галактиками в близкой области Вселенной. Например, в самом большом современном каталоге видимых с ребра галактик, содержащем более 5000 объектов (Бизяев и др., 2014), средние значения этого отношения варьируются от 6.34 в фильтре  $i$  до 7.14 в  $g$  (здесь учтено, что  $h_z = z_0/2$ ;  $g$  и  $i$  — фильтры обзора SDSS<sup>1</sup>). Другие выборки видимых с ребра галактик также свидетельствуют о более тонких звездных дисках близких спиральных галактик: например,  $7.4 \pm 2.6$  (фильтр  $I$ , де Грис, 1998),  $16 \pm 4$  (Sc/Sd галактики в фильтре  $R$ , Шварцкопф, Деттмар, 2000),  $7.3 \pm 2.2$  ( $I$ , Крегел и др., 2002),  $9.6$  ( $K$ , Бизяев, Митронова, 2002),  $7.1$  ( $J$ , Мосенков и др., 2010),  $8.26 \pm 3.44$  (Де Гейтер и др., 2014),  $8.81 \pm 2.78$  (Петерс и др., 2017). В последних двух работах относительные толщины дисков получены одновременным моделированием галактик в фильтрах  $g$ ,  $r$ ,  $i$  и  $z$  обзора SDSS. В статьях Крегела и др. (2002), Де Гейтера и др. (2014) и Петерса и др. (2017) для описания структуры галактик использована такая же фотометрическая модель, как и в нашей работе. Данные остальных статей пересчитаны с учетом соотношения  $h_z = z_0/2$ .

Отметим, что мы сравниваем наблюдаемые относительные толщины галактик из HUDF с аналогичными значениями для видимых с ребра близких галактик. Это связано с тем, что в ориентации с ребра звездные диски выглядят более протяженными из-за интегрирования излучения вдоль луча зрения. Этот эффект может внести определенную систематику в измеряемые разными способами значения радиальных шкал. Например, в работах

Падиллы, Страусса (2008) и Родригеза, Падиллы (2013) толщина спиральных галактик оценивалась на основе изучения распределений галактик из SDSS по видимым сжатиям. В качестве видимых сжатий в этих работах бралось приводимое в SDSS отношение осей, найденное аппроксимацией галактик экспоненциальной моделью. По данным первой статьи истинная сплюснутость дисков спиральных галактик составляет  $0.21 \pm 0.02$ , по данным второй —  $0.27 \pm 0.009$ . Эти значения соответствуют  $h_r/h_z = 4.8$  и  $3.7$  и близки к нашим данным для далеких галактик. С другой стороны, детальное моделирование структуры близких видимых с ребра галактик противоречит столь большим значениям толщин звездных дисков (см. ссылки выше).

На рис. 5 показано положение видимых с ребра галактик с классами  $e_0$  и  $f_1$ , равными 1 и 2, на плоскости абсолютная звездная величина — отношение масштабов диска в полосе  $i_{775}$ . На этом же рисунке изображены данные из каталога близких видимых с ребра галактик (Бизяев и др., 2014). Видно, что галактики из HUDF располагаются вдоль нижней огибающей распределения для близких спиральных галактик, то есть там, где находятся самые толстые наблюдаемые диски. Тонкие звездные диски с отношением экспоненциальных масштабов  $\approx 10$  среди галактик на  $z \approx 1$ , по-видимому, очень редки.

Пониженное отношение  $h_r/h_z$  у далеких галактик в первом приближении может быть объяснено двумя причинами: 1) повышенной (в абсолютном выражении) толщиной их дисков, 2) более короткими дисками в радиальном направлении.

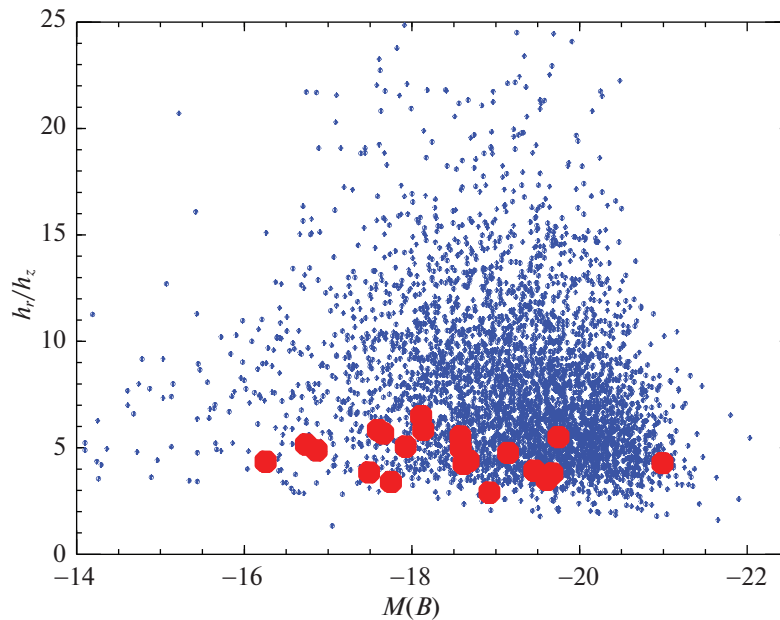
На рис. 6 проводится сравнение характеристик изображенных на рис. 5 галактик из HUDF с параметрами близких объектов на плоскостях абсолютная звездная величина галактики — вертикальный экспоненциальный масштаб (в кпк) и абсолютная звездная величина — радиальный масштаб (в кпк).

На рис. 6а видно, что далекие спиральные галактики, хотя и с большим разбросом, в целом следуют зависимости светимость — толщина звездного диска для объектов близкой области Вселенной. Для радиальных шкал (рис. 6б) ситуация выглядит по-другому: характеристики относительно слабых далеких галактик с  $M(B) \geq -18^m$  находятся в той же области, что у близких объектов, в то время как более яркие галактики демонстрируют относительно короткие звездные диски.

Чтобы проверить эту особенность, мы нанесли на плоскость  $M(B) — h_r$  характеристики 49 спиральных галактик с  $z = 0.7–1.3$  ( $\langle z \rangle = 0.92 \pm 0.14$ ) из работы Миллер и др. (2011) (открытые кружки на рис. 6б). Галактики из статьи Миллер и др. (2011) имеют произвольную (не с ребра)

<sup>1</sup> <http://www.sdss.org>





**Рис. 5.** Распределение галактик из HUDF на плоскости абсолютная звездная величина галактики  $M(B)$  — отношение радиального и вертикального масштабов звездных дисков в фильтре  $i_{775}$  (кружки). Точками показаны характеристики близких спиральных галактик в полосе  $g$  согласно Бизяеву и др. (2014).

ориентацию, и они были отобраны в поле GOODS Космического телескопа “Хаббл”. На рисунке хорошо видно, что далекие объекты из этой работы располагаются на плоскости  $M(B)$  —  $h_r$  ниже близких галактик и образуют с галактиками из HUDF единую последовательность, уклоняющуюся от последовательности для объектов на  $z \sim 0$ . Галактики из работы Миллер и др. (2011) в среднем ярче объектов нашей выборки (учет внутреннего поглощения не компенсирует различие светимостей), так что в целом результаты наших работ дополняют друг друга.

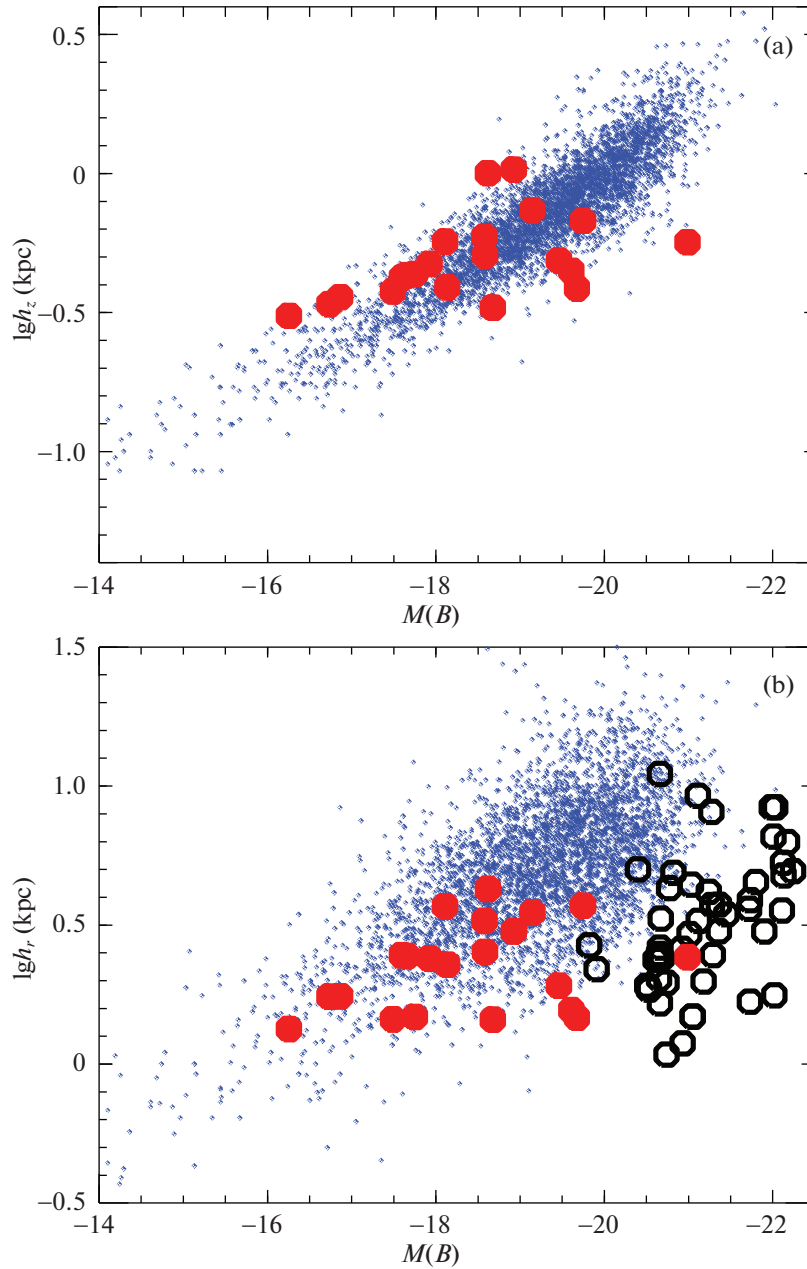
На рис. 5 и 6 мы сравниваем наблюдения далеких галактик в фильтре  $i_{775}$  с данными для близких галактик в фильтре  $g$  (эффективная длина волны фильтра  $\approx 4600 \text{ \AA}$ ). Это не вполне корректно, поскольку из-за космологического красного смещения у объектов на  $z \approx 1$  наблюдаемой полосе  $i_{775}$  соответствует область длин волн  $\lambda \approx 3500\text{--}4000 \text{ \AA}$  в системе покоя галактики. Вертикальная шкала дисков галактик слабо зависит от длины волны (см. ранее), поэтому для них отличие цветовых полос не играет большой роли. Радиальные экспоненциальные масштабы показывают зависимость от длины волны: значения  $h_r$  в среднем уменьшаются с ростом  $\lambda$ . С учетом этого эффекта отличие далеких и близких галактик на рис. 5 и 6 становится еще более выраженным.

Таким образом, результаты нашей работы в сочетании с данными Миллер и др. (2011) могут свидетельствовать в пользу дифференциальной эволюции радиальных размеров спиральных галактик при  $z \leq 1$ : объекты малой светимости не

показывают признаков эволюции, в то время как яркие спиральные галактики от  $z \sim 1$  к настоящей эпохе должны вырасти в 2–3 раза. С другой стороны, вертикальная шкала спиральных галактик не показывает признаков заметной эволюции при  $z \leq 1$  (рис. 6а). Следовательно, повышенная относительная толщина звездных дисков спиральных галактик на  $z \sim 1$  объясняется в первую очередь меньшими радиальными размерами их дисков.

Полученные результаты находятся в согласии с численными расчетами в рамках  $\Lambda$ CDM космологии. Например, в работе Брука и др. (2006) было показано, что на  $z \sim 1$  вертикальные шкалы звездных дисков уже близки к современным, а радиальные заметно короче. Количественное согласие результатов выглядит хорошим. Так, по данным табл. 2 работы Брука и др. (2006), спиральная галактика на  $z \sim 0.9$  с  $M(B) = -21^m.1$  (в положении “с ребра” она будет примерно на  $1^m$  слабее),  $h_r = 2.9$  кпк,  $h_z = 0.63$  кпк проэволюционирует к  $z = 0$  в галактику с  $M(B) = -19^m.7$ ,  $h_r = 4.1$  кпк и  $h_z = 0.65$  кпк. Таким образом, между  $z \sim 0.9$  и современной эпохой относительная толщина модельной галактики изменилась от  $h_r/h_z = 4.6$  до 6.6, причем это изменение произошло за счет роста галактики в радиальном направлении.

В работе Брукса и др. (2011) на основе численного моделирования было показано, что эволюция дисковых галактик зависит от их массы. Массивные спиральные галактики при  $z \leq 1$  в основном растут в радиальном направлении, у маломассивных изменение размеров выражено слабее, зато сильнее меняется светимость (см. табл. 3 в Брукс



**Рис. 6.** Распределение галактик из HUDF (заполненные кружки) на плоскостях  $M(B)$  — вертикальный масштаб диска (а),  $M(B)$  — радиальный масштаб диска (б). Значения масштабов относятся к полосе  $i_{775}$ . Открытые кружки — параметры далеких спиральных галактик из работы Миллер и др. (2011) (фильтр  $z_{850}$ ). Точками показаны характеристики близких спиральных галактик в полосе  $g$  согласно Бизяеву и др. (2014).

и др., 2011). Рост размеров спиральных галактик осуществляется за счет внешней аккреции вещества и поглощения спутников.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа изображений Сверхглубокого поля Космического телескопа “Хаббл” сформирована выборка из 58 кандидатов в видимые с ребра спиральные галактики на среднем красном смещении  $z \sim 1$ . Для всех галактик в фильтрах  $V_{606}$

и  $i_{775}$  был выполнен анализ двумерных распределений яркости и были определены радиальный и вертикальный экспоненциальные масштабы распределения яркости.

Основные результаты нашей работы следующие:

— Вертикальная шкала звездных дисков спиральных галактик не показывает существенной эволюции при  $z \leq 1$ .

— Относительная толщина дисков далеких галактик в среднем превышает толщину дисков близ-

ких спиральных галактик. Тонкие звездные диски на  $z \sim 1$ , по-видимому, очень редки.

— Получены указания в пользу дифференциальной эволюции экспоненциальных масштабов звездных дисков галактик: яркие спиральные галактики на  $z \sim 1$  выглядят укороченными по сравнению с близкими объектами, галактики малой светимости не показывают признаков эволюции.

Результаты работы основаны на небольшой выборке галактик и, несомненно, нуждаются в подтверждении на большем числе объектов. В целом, наши наблюдательные данные находятся в согласии с современными представлениями об эволюции дисковых подсистем галактик и они могут быть использованы для тестирования разных моделей эволюции спиральных галактик.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (грант 19-12-00145). Авторы благодарны А.В. Мосенкову за полезные замечания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беквит и др. (S.V.W. Beckwith, M. Stiavelli, A.M. Koekemoer, J.A.R. Caldwell, H.C. Ferguson, R. Hook, R.A. Lucas, L.E. Bergeron, et al.), *Astron. J.* **132**, 1729 (2006).
- Бертин, Арно (E. Bertin and S. Arnouts), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **117**, 393 (1996).
- Бизяев, Митронова (D. Bizyaev and S. Mitronova), *Astron. Astrophys.* **389**, 795 (2002).
- Бизяев и др. (D.V. Bizyaev, S.J. Kautsch, A.V. Mosenkov, V.P. Reshetnikov, N.Ya. Sotnikova, N.V. Yablokova, and R.W. Hillyer), *Astrophys. J.* **787**, id.24 (2014).
- Бизяев и др. (D.V. Bizyaev, S.J. Kautsch, N.Ya. Sotnikova, V.P. Reshetnikov, and A.V. Mosenkov), *MNRAS* **465**, 3784 (2017).
- Бикер и др. (J. Bicker, U. Fritze-v.Alvensleben, C.S. Moller, and K.J. Fricke), *Astron. Astrophys.* **413**, 37 (2004).
- Брук и др. (Ch.B. Brook, D. Kawata, H. Martel, B.K. Gibson, and J. Bailin) *Astrophys. J.* **639**, 126 (2006).
- Брукс и др. (A.M. Brooks, A.R. Solomon, F. Governato, J. McCleary, L.A. MacArthur, C.B.A. Brook, P. Jonsson, T.R. Quinn, et al.), *Astrophys. J.* **728**, 51 (2011).
- ван дер Круит, Сирл (P.C. van der Kruit, and L. Searl), *Astron. Astrophys.* **95**, 105 (1981).
- Де Гейтер и др. (G. De Geyter, M. Baes, P. Camps, J. Fritz, I. De Looze, Th.M. Hughes, S. Viaene, and G. Gentile), *MNRAS* **441**, 869 (2014).
- де Грис (R. de Grijs), *MNRAS* **299**, 595 (1998).
- Засов А.В., Макаров Д.И., Михайлова Е.А., Письма в Астрон. журн. **17**, 884 (1991) [A.V. Zasov et al., *Astron. Lett.* **17**, 374 (1991)].
- Инами и др. (H. Inami, R. Bacon, J. Brinchmann, J. Richard, T. Contini, S. Conseil, S. Hamer, M. Akhlaghi, et al.), *Astron. Astrophys.* **608**, A2 (2017).
- Ирвин (P. Erwin), *Astrophys. J.* **799**, id. 226 (2015).
- Кое и др. (D. Coe, N. Benitez, S.F. Sanchez, M. Jee, R. Bouwens, and H. Ford), *Astron. J.* **132**, 926 (2006).
- Крегел и др. (M. Kregel, P.C. van der Kruit, and R. de Grijs), *MNRAS* **334**, 646 (2002).
- Крист и др. (J.E. Krist, R.N. Hook, and F. Stoehr), *Proc. SPIE* **8127**, id. 81270J (2011).
- Макаров и др. (D.I. Makarov, N.A. Zaitseva, and D.V. Bizyaev), *MNRAS* **479**, 3373 (2018).
- Миллер и др. (S.H. Miller, K. Bundy, M. Sullivan, R.S. Ellis, and T. Treu), *Astrophys. J.* **741**, 115 (2011).
- Мосенков и др. (A.V. Mosenkov, N.Ya. Sotnikova, and V.P. Reshetnikov), *MNRAS* **401**, 559 (2010).
- Мосенков и др. (A.V. Mosenkov, F. Allaert, M. Baes, S. Bianchi, P. Camps, G. De Geyter, I. De Looze, J. Fritz, et al.), *Astron. Astrophys.* **592**, A71 (2016).
- Петерс и др. (P.C. Peters, G. de Geyter, P.C. van der Kruit, and K.C. Freeman), *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **464**, 48 (2017).
- Рафелски и др. (M. Rafelski, H.I. Teplitz, J.P. Gardner, D. Coe, N.A. Bond, A.M. Koekemoer, N. Grogin, P. Kurczynski, et al.), *Astron. J.* **150**, id. 31 (2015).
- Решетников и др. (V.P. Reshetnikov, R.-J. Dettmar, and F. Combes), *Astron. Astrophys.* **399**, 879 (2003).
- Сирианни и др. (M. Sirianni, M.J. Jee, N. Benitez, J.P. Blakeslee, A.R. Martel, G. Meurer, M. Clampin, G. De Marchi, et al.), *Publ. Astron. Soc. Pacif.* **117**, 1049 (2005).
- Шварцкопф, Деттмар (U. Schwarzkoepf and R.-J. Dettmar), *Astron. Astrophys.* **361**, 451 (2000).
- Талли и др. (R.B. Tully, M. J. Pierce, J.-Sh. Huang, W. Saunders, M.A.W. Verheijen, and P.L. Witchalls), *Astron. J.* **115**, 2264 (1998).
- Элмергин и др. (D.M. Elmegreen, B.G. Elmegreen, D.S. Rubin, and M.A. Schaffer), *Astrophys. J.* **631**, 85 (2005).
- Элмергин, Элмергин (B.G. Elmegreen and D.M. Elmegreen), *Astrophys. J.* **650**, 644 (2006).