

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 64

ФЕВРАЛЬ, 2021

ВЫПУСК 1

ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ ВИДИМЫХ С РЕБРА СПИРАЛЬНЫХ ГАЛАКТИК

В.П.РЕШЕТНИКОВ^{1,2}, П.А.УСАЧЕВ^{1,2}

Поступила 15 ноября 2020

Обсуждаются результаты фотометрического анализа видимых с ребра спиральных галактик в трех глубоких полях космического телескопа Хаббл (HDF-N, HDF-S, HUDF). Показано, что галактики на $z \approx 0.5$ демонстрируют меньшие значения радиальных экспоненциальных масштабов h_r звездных дисков по сравнению с близкими галактиками. Наблюдаемое изменение масштабов дисков галактик согласуется с законом $h_r \propto (1+z)^{-n}$, где $n \approx 1$. Получено указание на заметное уменьшение доли галактик с B/PS балджами от $z = 0$ к $z = 1$.

Ключевые слова: эволюция структуры: спиральные галактики

1. *Введение.* Фотометрическое изучение видимых с ребра (edge-on) спиральных галактик в окружающей нас области Вселенной ведется уже много лет (см., например, [1-4] и ссылки там же). Накоплен значительный наблюдательный материал о радиальной и вертикальной структуре звездных дисков, получены данные о характеристиках и распределении пыли в галактиках, о свойствах их темных гало (например, [5-7]). С другой стороны, характеристики далеких спиральных галактик, видимых в ориентации с ребра, изучены пока мало. В первую очередь это связано со сложностью их исследования - угловое разрешение наземных оптических телескопов не позволяет изучать вертикальное распределение яркости в таких объектах.

Эту проблему удается решить при использовании данных космического телескопа Хаббл (HST). В ряде работ было продемонстрировано, что угловое разрешение снимков HST ($\leq 0''.1$) дает возможность анализировать распределение яркости у видимых с ребра галактик на красном смещении $z \sim 1$ [8-11]. Исследование галактик в нескольких глубоких полях HST показало, что для далеких спиральных галактик характерна повышенная относительная толщина звездных дисков [8,11]. Кроме того, диски ярких галактик на $z \sim 1$ выглядят укороченными по сравнению с близкими объектами [11].

Целью нашей работы является совместный анализ данных о структуре видимых с ребра спиральных галактик в трех глубоких полях HST: Hubble Deep Field North (HDF-N), Hubble Deep Field South (HDF-S) и Hubble Ultra Deep Field (HUDF).

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

2. Выборка галактик. Наша выборка видимых с ребра галактик основана на опубликованных результатах двух работ. В первой работе были рассмотрены объекты в Северном и Южном глубоких полях HST (HDF-N и HDF-S) [8], во второй - галактики из Сверхглубокого поля HST (HUDF) [11]. В HDF-N и HDF-S галактики были отобраны на основе визуального просмотра оригинальных кадров (табл.1 и 2 в [8]). В HUDF предварительный отбор объектов был осуществлен с помощью пакета SExtractor [12], окончательная выборка была сформирована на основе фотометрического моделирования (табл.1 в [11]). Выборки из обеих работ относительно полны для больших и ярких $M(B) \leq -18^m$ галактик (см. обсуждение в оригинальных работах).

Из HUDF были взяты 22 галактики, которые согласно [11] с большой вероятностью видны в ориентации с ребра ($eon = 1, 2$) и их наблюдаемые распределения яркости хорошо описываются моделью видимого с ребра экспоненциального диска ($fit = 1, 2$). Из HDF-N и HDF-S были отобраны 15 галактик, имеющих экспоненциальное распределение яркости. Все галактики из итогового списка находятся на красном смещении $z < 1.2$.

Таким образом, изучаемая в настоящей работе итоговая выборка объектов состоит из 37 видимых с ребра галактик, для которых известны значения радиальных h_r и вертикальных h_z экспоненциальных масштабов их звездных дисков. Данные в разных полях были получены в близких цветовых полосах (F775W (средняя длина волн 775 нм) для HUDF, F814W (средняя длина волны 814 нм) для HDF-N и HDF-S) и в дальнейшем мы пренебрегаем небольшим различием этих фильтров.

На рис.1а показано распределение изучаемых галактик по z . Для большинства галактик (28 из 37) известны спектроскопические красные смещения, для 9 использовались фотометрические оценки z . Как видно на рисунке, основная часть галактик расположена на $z \sim 0.5$ (среднее значение $\langle z \rangle = 0.53 \pm 0.23$). Отметим, что эпоха, соответствующая $z = 0.5$, удалена от нашего времени примерно на 5 млрд. лет.

На рис.1б изображено распределение объектов выборки по абсолютной звездной величине в фильтре В, найденное с использованием k -поправки для галактик типа Sc согласно [13]. Изучаемые галактики являются относительно яркими: их наблюдаемые светимости составляют $\approx -19^m$. Если учесть поправку за внутреннее поглощение в видимых с ребра дисках (она может достигать значений $\approx 1^m - 1^m.5$), то светимости галактик становятся сравнимыми со светимостью Млечного Пути.

Средние значения экспоненциальных масштабов галактик составляют $\langle h_r \rangle = 2.73 \pm 1.03$ кпк и $\langle h_z \rangle = 0.53 \pm 0.23$ кпк. Эти значения типичны для ярких галактик, подобных Млечному Путю [5].

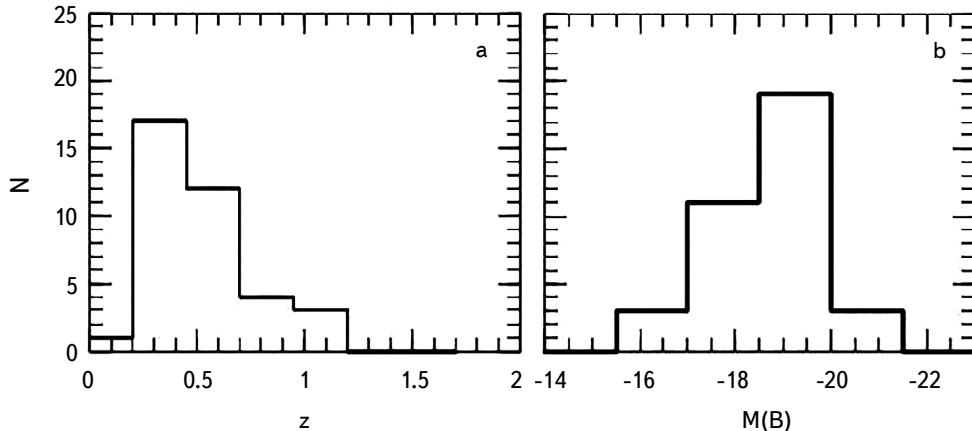


Рис.1. Распределение галактик по красному смещению (а) и по абсолютной звездной величине в фильтре $B - M(B)$ (б).

3. Результаты и обсуждение.

3.1. Отношение h_r/h_z . Распределения отношения h_r/h_z для близких и далеких галактик сравниваются на рис.2. Как видно на этом рисунке, у галактик из глубоких полей $h_r/h_z \leq 10$, в то время как галактики из обзора SDSS распределены более широко. Отметим, что на рис.2 мы сравниваем характеристики далеких галактик на длине волны $\lambda \approx 8000 \text{ \AA}$ с характеристиками близких объектов в фильтре g ($\lambda \approx 4600 \text{ \AA}$). С учетом космолог-

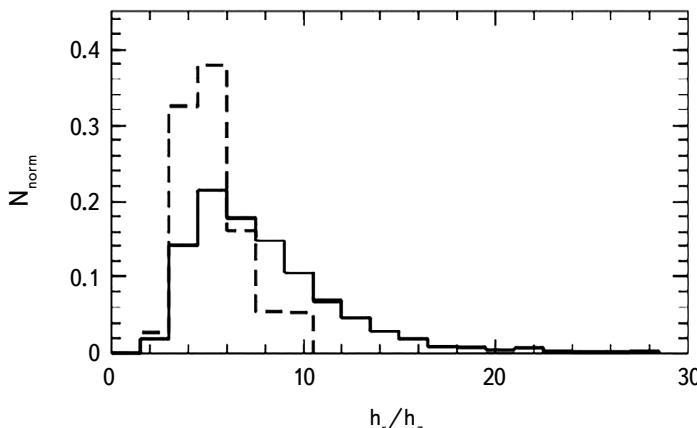


Рис.2. Нормированные распределения отношений масштабов дисков галактик h_r/h_z для выборки далеких галактик (штриховая линия) и для близких галактик из обзора SDSS в фильтре g (непрерывная линия) [5].

гического красного смещения, данные для галактик из глубоких полей соответствуют длине волны $\sim 8000 \text{ \AA}/1.53 = 5200 \text{ \AA}$, что не слишком сильно отличается от соответствующего диапазона для галактик на $z \approx 0$. Кроме того, экспоненциальные масштабы звездных дисков в близких спектральных диапазонах также близки. Например, согласно данным [14], среднее отношение радиальных шкал видимых с ребра спиральных галактик в фильтрах B и R составляет $\langle h_r(B)/h_r(R) \rangle = 1.11 \pm 0.07$. Следовательно, отличие спектральных диапазонов при сравнении характеристик галактик на $z \approx 0$ и $z \approx 0.5$ не играет заметной роли.

Для сравнения показанных на рис.2 эмпирических распределений мы использовали критерий Колмогорова-Смирнова. Оказалось, что гипотеза о том, что выборки далеких и близких галактик извлечены из одного и того же распределения по h_r/h_z отвергается на уровне 99.9%. С другой стороны, из данных [5] следует, что у 23% галактик на $z \approx 0$ отношение h_r/h_z превышает 10. Следовательно, вероятность случайного выбора 37 галактик с $h_r/h_z \leq 10$, как в нашей выборке далеких объектов, очень мала и составляет $(1 - 0.23)^{37} \approx 10^{-4}$. Таким образом, можно заключить, что звездные диски с $h_r/h_z > 10$ очень редки среди галактик на $z \approx 0.5$. Ранее аналогичный вывод по данным только для одного поля (HUDF) был сделан для галактик на $z \sim 1$ [11].

3.2. Радиальная структура галактик. На рис.3 сравниваются величины радиальных масштабов галактик на $z \approx 0.5$ с параметрами близких галактик. Как видно на рисунке, относительно слабые галактики с $M(B) \geq -18^m.5$ располагаются на этой плоскости примерно вдоль зависимости для близких объектов. Более яркие галактики демонстрируют укороченные звездные диски по сравнению с дисками объектов на $z \approx 0$. Примечательно, что это заключение подтверждается данными для разных глубоких полей.

Стрелками на рис.3 показаны примеры ожидаемой эволюции спиральных галактик по данным численных расчетов в рамках CDM модели формирования галактик [15,16]. Начало верхней стрелки соответствует средним характеристикам модельной галактики на $z = 0.9$, конец - на $z = 0$ (см. табл.2 в [15]). Нижняя стрелка (ее начало соответствует $z = 1$, конец - $z = 0$) демонстрирует изменение характеристик модели спиральной галактики "h986" согласно табл.3 в [16]. Как видно на рисунке, в процессе своей эволюции галактики должны расти в радиальном направлении. При этом наблюдаемое изменение светимости связано с более высоким темпом звездообразования в эпоху $z \geq 1$ [15].

Если принять, что экспоненциальный масштаб звездных дисков меняется с красным смещением по закону $h_r \propto (1+z)^{-n}$, то из наших данных можно оценить значение n , минимизирующее отклонение далеких галактик от средней

зависимости для близких объектов. Для галактик с $M(B) \leq -18^m$ получается значение $n = 1.22 \pm 0.36$, для более ярких галактик с $M(B) \leq -18^m.5$ $n = 1.53 \pm 0.39$. Приведенные выше оценки получены без учета возможной эволюции светимостей галактик. Учет умеренной эволюции (на $0^m.5 - 1^m$ между $z = 0$ и $z = 1$) уменьшает значение n до ≈ 1 . Эти значения находятся в согласии с оценками других авторов, изучавших изменение размеров галактик с z (например, [17]).

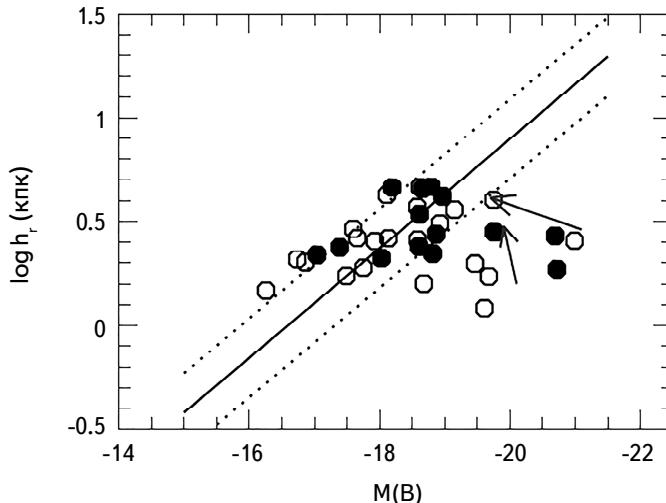


Рис.3. Распределение галактик из HUDF (открытые кружки), HDF-N и HDF-S (черные кружки) на плоскости $M(B)$ - $\log h_r$. Непрерывной прямой линией показана средняя зависимость для близких галактик в фильтре g , согласно [5], линии из точек иллюстрируют $\pm 2\sigma$ разброс этой зависимости. Стрелками изображена эволюция характеристик модельных галактик, согласно [15] (верхняя стрелка) и [16] (нижняя стрелка).

Что же касается вертикального масштаба распределения яркости h_z , то, согласно [11], он не показывает признаков существенной эволюции при $z < 1$.

3.3. Встречаемость X-структур. Одной из интересных особенностей видимых с ребра дисков галактик являются так называемые X-структуры, представляющие собой локальные уярчения внутри B/PS (boxy/peanut shaped) балджей, которые, в свою очередь, связаны с ориентированными с ребра барами (см., например, [18] и ссылки там же). B/PS балджи встречаются довольно часто - среди ярких близких галактик их доля может достигать $\sim 50\%$ [19]. С другой стороны, численные расчеты показывают, что с ростом z доля галактик с барами и, соответственно, с B/PS балджами, должна уменьшаться [20]. Наблюдательные данные, по-видимому, подтверждают это заключение - при $z \approx 1$ доля галактик с B/PS балджами в обзоре HST

COSMOS близка к нулю [21]. Рассмотрим, что можно сказать о встречаемости X-структур (и, соответственно, B/PS балджей) по выборке далеких галактик, видимых в ориентации с ребра.

Мы проанализировали изображения 58 видимых с ребра галактик в HUDF из работы [11]. Как оригинальные кадры галактик в фильтрах F606W и F775W, так и их разностные изображения (оригинальный кадр - фотометрическая модель) не показали признаков присутствия X-структур ни в одной из галактик. Разрешение кадров HUDF на $z \approx 1$ превышает 1 кпк, так что X-структуры, типичный размер которых достигает нескольких кпк (например, [22,23]), должны обнаруживаться.

Рассматриваемые галактики находятся на $z \approx 1$, их средняя наблюдаемая абсолютная звездная величина составляет $M(B) = -18^m.5$ [11]. С учетом поправки за внутреннее поглощение светимости галактик в положении "плашмя" будут находиться в диапазоне от -19^m до -20^m . Следовательно, при стандартных калибровках типичные звездные массы галактик этой выборки $M_* \sim 10^{10} M_\odot$. Для близких галактик с такой звездной массой доля B/PS балджей составляет примерно 20% [19]. Если принять, что среди галактик на $z=1$ B/PS балджи (и X-структуры) встречаются с такой же частотой, как и среди близких объектов, то вероятность не обнаружить ни одной такой структуры среди 58 галактик составляет $p \approx 2 \cdot 10^{-6}$. Если же предположить, что частота X-структур на $z=1$ равна 1%, то вероятность $p > 0.5$. Таким образом, данные о морфологии видимых с ребра галактик в HUDF свидетельствуют о заметном уменьшении доли галактик с B/PS балджами к $z=1$. Бары и B/PS балджи галактик формируются преимущественно при $z < 1$.

Ранее подобное заключение было сделано на основе анализа большой выборки видимых не с ребра галактик в обзоре HST COSMOS [21]. Для галактик в ориентации с ребра этот вывод сделан впервые.

4. Заключение. На основе анализа фотометрической структуры 37 видимых с ребра галактик в трех глубоких полях HST (HDF-N, HDF-S, HUDF) были получены следующие результаты:

- Обнаружены признаки эволюции радиальной структуры галактик: яркие спиральные галактики на $z \approx 0.5$ демонстрируют более короткие звездные диски по сравнению с близкими объектами, относительно слабые галактики с $M(B) \geq -18^m.5$ не показывают заметной эволюции.

- Галактики с тонкими звездными дисками с $h_r/h_z > 10$ на красном смещении $z \approx 0.5$ встречаются реже, чем в окружающей части Вселенной.

- Наблюдаемый темп изменения радиального экспоненциального масштаба дисков ярких галактик при $z \leq 0.5$ составляет $h_r \propto (1+z)^{-n}$, где $n \approx 1$.

Кроме того, детальный анализ изображений 58 видимых с ребра галактик

в HUDF привел к выводу о быстром падении доли спиральных галактик с B/PS балджами от современной эпохи к $z=1$.

Эти результаты получены на основе относительно небольшого числа объектов и, кроме того, они могут быть искажены сложно формализуемыми эффектами наблюдательной селекции. Дальнейшее изучение далеких спиральных галактик, видимых в ориентации с ребра, очень важно для понимания образования и эволюции окружающих нас спиральных галактик.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 19-02-00249 (исследование характеристик X-структур далеких галактик) и РНФ 19-12-00145 (изучение характеристик дисков, видимых с ребра).

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: v.reshetnikov@spbu.ru

² Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

EVOLUTION OF THE STRUCTURE OF EDGE-ON SPIRAL GALAXIES

V.P.RESHETNIKOV^{1,2}, P.A.USACHEV^{1,2}

The results of photometric analysis of edge-on spiral galaxies in the three deep fields of the Hubble Space Telescope (HDF-N, HDF-S, HUDF) are discussed. It is shown that galaxies at $z \approx 0.5$ demonstrate shortened stellar disks in comparison with nearby galaxies. The observed evolution of the exponential scale lengths is approximately consistent with the law $h_r \propto (1+z)^{-n}$, where $n \approx 1$. Evidence was obtained in favor of a noticeable decrease in the proportion of galaxies with B/PS bulges from $z=0$ to $z=1$.

Keywords: *structure evolution: spiral galaxies*

ЛИТЕРАТУРА

1. *P.C. van der Kruit, L.Searle*, Astron. Astrophys., **95**, 105, 1981.
2. *A.Barteldrees, R.-J.Dettmar*, Astron. Astrophys. Suppl., **103**, 475, 1994.
3. *V.Reshetnikov, F.Combes*, Astron. Astrophys., **324**, 80, 1997.

4. *R. de Grijs*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **299**, 595, 1998.
5. *D.V.Bizyaev, S.J.Kautsch, A.V.Mosenkov et al.*, Astrophys. J., **787**, 24, 2014.
6. *A.V.Mosenkov, F.Allaert, M.Baes et al.*, Astron. Astrophys., **592**, A71, 2016.
7. *J.C.O'Brien, K.C.Freeman, P.C. van der Kruit*, Astron. Astrophys., **515**, A62, 2010.
8. *V.P.Reshetnikov, R.-J.Dettmar, F.Combes*, Astron. Astrophys., **399**, 879, 2003.
9. *D.M.Elmegreen, B.G.Elmegreen, D.S.Rubin et al.*, Astrophys. J., **631**, 85, 2005.
10. *B.G.Elmegreen, D.M.Elmegreen*, Astrophys. J., **650**, 644, 2006.
11. *В.П.Решетников, П.А.Усачев, С.С.Савченко*, Письма в Астрон. ж., **45**, 607, 2019.
12. *E.Bertin, S.Arnouts*, Astron. Astrophys. Suppl., **117**, 393, 1996.
13. *J.Bicker, U.Fritze-v. Alvensleben, C.S.Möller et al.*, Astron. Astrophys., **413**, 37, 2004.
14. *P.Yoachim, J.J.Dalcanton*, Astron. J., **131**, 226, 2006.
15. *Ch.B.Brook, D.Kawata, H.Martel et al.*, Astrophys. J., **639**, 126, 2006.
16. *A.M.Brooks, A.R.Solomon, F.Governato et al.*, Astrophys. J., **725**, 51, 2011.
17. *T.Shibuya, M.Ouchi, Y.Harikane*, Astrophys. J. Suppl., **219**, 15, 2015.
18. *H.D.Parul, A.A.Smirnov, N.Ya.Sotnikova*, Astrophys. J., **895**, 12, 2020.
19. *P.Erwin, V.P.Debattista*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **468**, 2058, 2017.
20. *K.Kraljic, F.Bournaud, M.Martig*, Astrophys. J., **757**, 60, 2012.
21. *S.J.Kruk, P.Erwin, V.P.Debattista et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **490**, 4721, 2019.
22. *S.S.Savchenko, N.Ya.Sotnikova, A.V.Mosenkov et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **471**, 3261, 2017.
23. *В.П.Решетников, П.А.Тараканов, М.В.Костина*, Астрофизика, **63**, 21, 2020.