

ФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХ ГАЛАКТИК С Х-СТРУКТУРАМИ

В.П.РЕШЕТНИКОВ^{1,2}, П.А.ТАРАКАНОВ¹, М.В.КОСТИНА¹

Поступила 24 сентября 2019

На основе данных обзора SDSS выполнено исследование двух, видимых с ребра, галактик с Х-структурами (UGC 501 и UGC 12253). Оба объекта являются спиральными галактиками поздних морфологических типов с протяженными звездными дисками. Х-структуры в галактиках имеют разные размеры и форму. Обсуждается возможность того, что различие наблюдательных параметров Х-структур в UGC 501 и UGC 12253 связано с различием характеристик их подстилающих галактик (в первую очередь, с относительным вкладом темного гало).

Ключевые слова: *галактики: фотометрия: морфология: SDSS галактики*

1. Введение. Галактики с Х-структурами в последние годы привлекают все большее внимание. Историю их изучения обычно начинают с работы Бербиджей [1], в которой было впервые обращено внимание на крестообразную структуру в центральной области NGC 128. Впоследствии стало понятно, что видимые у некоторых галактик перекрещивающиеся образования (Х-структуры) являются локальными уячениями внутри так называемых ящико- или арахисо-подобных - boxy/peanut-shaped (B/PS) - балджей. Такие балджи не являются редкими исключениями, и встречаются у значительной части (~20%-45%) спиральных галактик (например, [2,3]). Признаки существования подобной структуры наблюдаются и в центральной части Млечного Пути ([4] и ссылки там же).

Образование Х-структур связывают с эволюцией баров галактик. Такая необычная морфология возникает при моделировании векового роста бара в вертикальном направлении, причем наиболее четко B/PS балджи заметны у галактик, видимых в ориентации "с ребра" по отношению к лучу зрения. В настоящее время существуют два основных сценария формирования Х-структур: они могут возникать за счет изгибающей неустойчивости бара или путем постепенного роста бара в вертикальном направлении за счет резонансного захвата отдельных звезд (например, [5,6]).

Многие вопросы, связанные с возникновением и эволюцией B/PS балджей, остаются невыясненными. Например, плохо известны наблюдательные характеристики Х-структур, диапазон изменения их параметров, а также связь

между их морфологией и характеристиками подстилающих галактик.

Эта статья посвящена изучению двух видимых с ребра спиральных галактик, в центральных областях которых наблюдаются выраженные X-образования (UGC 501 и UGC 12253). Характеристики В/PS балджей в этих галактиках заметно отличаются и поэтому основной целью статьи является поиск возможной связи между параметрами подстилающих галактик и X-структурами.

Все зависящие от расстояния параметры галактик рассчитаны для космологической модели с $H_0 = 70$ км/с/Мпк, $\Omega_m = 0.3$ и $\Omega_\Lambda = 0.7$.

2. Основные характеристики UGC 501 и UGC 12253. Обе исследуемые галактики видны в положении с ребра (см. рис.1 и 2) и являются спиральными галактиками поздних типов, в оптической структуре которых доминирует звездный диск. В табл.1 суммированы их основные наблюдательные характеристики по данным разных источников. Если ссылка не приведена, значение параметра получено в настоящей работе.

Абсолютная звездная величина галактик в фильтре r обзора SDSS¹ M_r и показатель цвета $g-r$ в табл.1 исправлены за поглощение в Млечном Пути и за влияние k -поправки, согласно [9,10]. Наблюдаемый диаметр галактик был оценен по их суммарным изображениям из обзора SDSS (DR14). Для получения этих изображений кадры галактик в фильтрах g , r , i и z были совмещены и сложены.

Далее в табл.1 приведены радиальный экспоненциальный масштаб диска h и вертикальный масштаб z_0 , соответствующий закону распределения яркости в вертикальном направлении $I(z) \propto \text{sech}^2(z/z_0)$ (оба масштаба найдены в

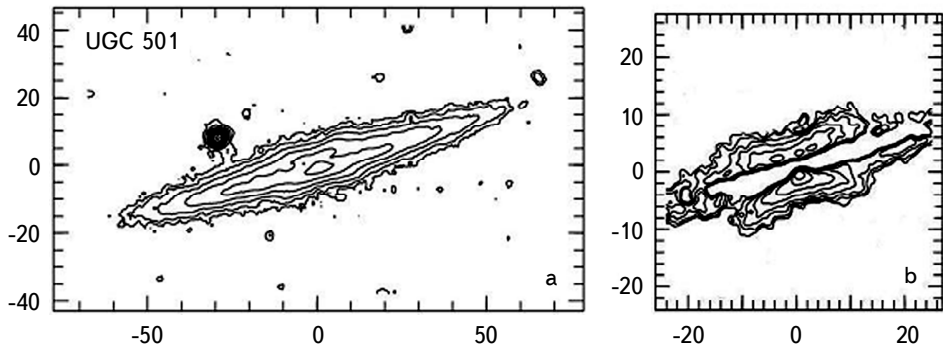


Рис.1. а) Карта изофот галактики UGC 501, построенная по суммарному $(g+r+i+z)$ изображению из обзора SDSS. Соседние изофоты отличаются на множитель 2. б) Карта изофот центральной области галактики после вычитания диска (см. текст). Соседние изофоты отличаются на множитель 1.5. На обоих рисунках север вверху, восток слева. По осям отложены угловые секунды.

¹ <http://www.sdss.org>

фильтре r). Для галактики UGC 12253 значения h и z_0 взяты из работы [8]. Для UGC 501 характеристики диска определены в настоящей работе с помощью программы *galfit* [11] по изображению галактики из обзора SDSS.

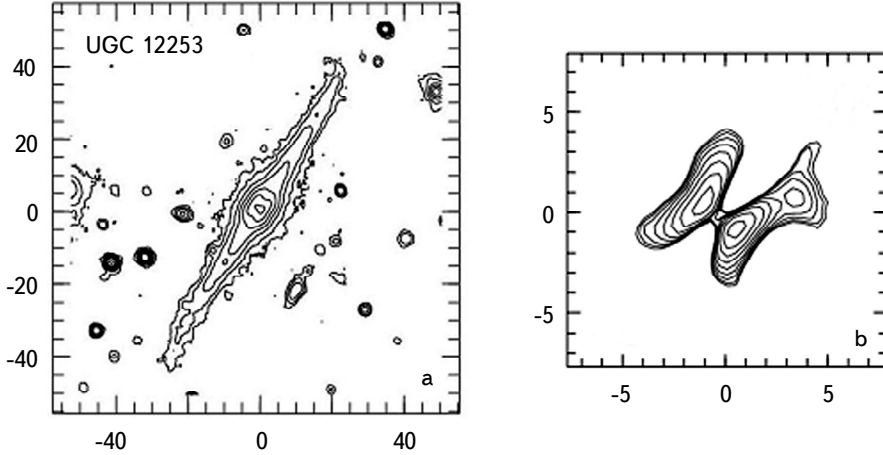


Рис.2. а) Карта изофот галактики UGC 12253, построенная по суммарному $(g+r+i+z)$ изображению из обзора SDSS. Соседние изофоты отличаются на множитель 2. б) Карта изофот центральной области галактики по данным обзора UKIDSS в фильтре Y после вычитания диска (см. текст). Соседние изофоты отличаются на множитель 1.5. На обоих рисунках север вверху, восток слева. По осям отложены угловые секунды.

Таблица 1

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ UGC 501 И UGC 12253

Характеристика	UGC 501	UGC 12253	Ссылки
Расстояние и масштаб	69 Мпк (0.324 кпк/")	108 Мпк (0.498 кпк/")	NED ²
Морфологический тип	Scd:, Sc	Sb, Sbc	NED
M_r	-20.14	-20.61	[7-8]
$g-r$	+0.86	+0.84	[7-8]
Диаметр	118" (38 кпк)	96" (48 кпк)	
h	14".1 (4.57 кпк)	12".7 (6.33 кпк)	[8]
z_0	4".1 (1.32 кпк)	2".8 (1.41 кпк)	[8]
V_m	176 км/с	231 км/с	HyperLeda ³ , [8]
M_*	$3.64 \times 10^{10} M_\odot$	$5.33 \times 10^{10} M_\odot$	
$M(\text{HI})$	$3.78 \times 10^9 M_\odot$	$2.16 \times 10^{10} M_\odot$	HyperLeda
M_t	$1.32 \times 10^{11} M_\odot$	$2.59 \times 10^{11} M_\odot$	

² NED (NASA/IPAC Extragalactic Database): <http://ned.ipac.caltech.edu/>

³ HyperLeda: <http://leda.univ-lyon1.fr/>

(Параметры UGC 501 в работе [7] получены в рамках другой фотометрической модели и нами не используются.) Результаты нашей работы находятся в хорошем согласии с опубликованными в каталоге [12].

Максимальная скорость вращения V_m галактики UGC 501 в табл.1 основана на анализе ширины профиля линии нейтрального водорода HI по данным разных авторов в базе данных HyperLeda. Для галактики UGC 12253 в [8] опубликована кривая вращения (см. рис.3 в [8]). Значение V_m в табл.1 соответствует последней точке наблюдаемой кривой вращения. Эта точка находится на расстоянии, примерно равном $4h$ от центра галактики.

В последних трех строках табл.1 приведены массы различных подсистем UGC 501 и UGC 1253 в солнечных массах ($M_\odot$). M_* - это масса звезд, оцененная по интегральной светимости галактик в фильтре r и по показателю цвета $g-r$, согласно приведенным в [13] калибровкам. Следует отметить, что для оценки M_* мы использовали наблюдаемые светимости и показатели цвета, искаженные внутренним поглощением в галактиках. Это означает, что величины массы звезд в табл.1 недооценены. Если принять, что в фильтре r внутреннее поглощение в дисках, видимых с ребра, галактик достигает 1^m (например, [14]) и что в положении пласмя галактики имеют показатель цвета $g-r=+0.54$ (средний показатель цвета для Sc галактики, согласно [15]), то звездные массы должны увеличиться примерно до $4.1 \cdot 10^{10} M_\odot$ для UGC 501 и до $6.3 \cdot 10^{10} M_\odot$ для UGC 12253.

Полная динамическая масса M_t в последней строке табл.1 найдена в предположении сферического распределения вещества и она относится к области в пределах $4h$ от центров галактик: $M_t = 4hV_m^2/G$. Для UGC 12253 значение V_m соответствует последней точке наблюдаемой кривой вращения. Масса UGC 501 оценена по наблюдаемой ширине профиля HI в предположении, что кривая вращения галактики остается плоской в пределах четырех экспоненциальных масштабов. Отметим, что оценка динамической массы этой галактики не слишком надежна, так как для нее нет опубликованной кривой вращения.

Как следует из табл.1, обе рассматриваемые галактики являются гигантскими спиральными галактиками: с учетом поправки за внутреннее поглощение, по светимости они сравнимы с Млечным Путем, а по линейным размерам превышают его (например, [16]). Обе галактики богаты газом, причем относительное содержание газа - $M(\text{HI})/M_*$ - у UGC 501 ниже среднего по сравнению с галактиками со сравнимой звездной массой, а у UGC 12253 - выше среднего (см. рис.3 в [17]).

Еще одно отличие галактик друг от друга состоит в относительной доле темного гало в пределах $4h$. Отношение динамической массы галактик к массе звезд - M_t/M_* - составляет 3.6 и 4.9 для UGC 501 и UGC 12253, соответственно.

С учетом того, что динамическая масса включает как массу звездной подсистемы, так и массу темного вещества, отсюда можно получить отношение массы темного гало к массе звезд: 2.6 для UGC 501 и 3.9 для UGC 12253. Таким образом, относительная масса темного гало UGC 12253 в 1.5 раза превышает массу темного гало UGC 501.

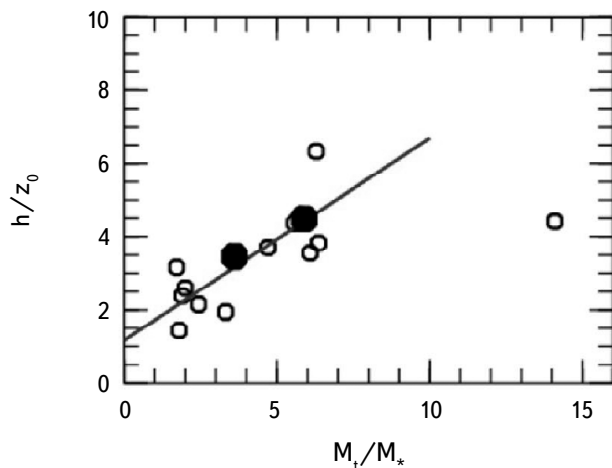


Рис.3. Зависимость между относительной толщиной звездных дисков в фильтре r и отношением динамической и звездной масс галактик. Черные кружки - UGC 501 и UGC 12253, открытые кружки - галактики из работы [8]. Прямой линией показана средняя зависимость, согласно [8].

На рис.3 показано положение характеристик изучаемых нами галактик на плоскости M_t/M_* - h/z_0 . На этом же рисунке изображены характеристики 12 видимых с ребра галактик из статьи [8]. Для UGC 12253 мы используем результаты данной работы. Хорошо видно, что UGC 501 и UGC 12253 удовлетворяют соотношению между вкладом темного гало и относительной толщиной звездного диска для ранее изученных спиральных галактик.

UGC 501 и UGC 12253 находятся в умеренно плотном пространственном

Таблица 2

ХАРАКТЕРИСТИКИ Х-СТРУКТУР В UGC 501 И UGC 12253

Характеристика	UGC 501	UGC 12253
l	4.2 ± 0.3 кпк	3.0 ± 0.2 кпк
l/h	0.92	0.47
α	$33^\circ \pm 3^\circ$	$43^\circ \pm 3^\circ$
Δz	2.4 ± 0.2 кпк	1.65 ± 0.2 кпк
$\Delta z / z_0$	1.8	1.2
$\Delta z / h$	0.5	0.3

окружении и входят в состав групп галактик [8,18]. Звездный диск UGC 12253 демонстрирует крупномасштабный изгиб своей плоскости [8].

3. *Параметры X-структур в UGC 501 и UGC 12253.* X-структуры наблюдаются на фоне ярких центральных областей галактик, они часто искажены полосами поглощения и поэтому их выделение является непростой задачей. В случае UGC 501 мы построили суммарное $(g+r+i+z)$ изображение по кадрам из обзора SDSS. Затем, с помощью пакета программ *galfit*, нашли характеристики диска галактики на суммарном изображении и вычли его из исходного. В результате этих операций в центре галактики отчетливо проступила крестообразная структура (см. правую часть рис.1). Ее большая ось искажена полосой поглощения, но вдали от плоскости галактики она хорошо видна.

X-структура в UGC 12253 более компактная и в фильтрах обзора SDSS малоконтрастная. Однако в более длинноволновой области она выделяется увереннее. На рис.2 (правая часть) приведены изофоты центральной области UGC 12253 в фильтре Y (его эффективная длина волны около 1 мкм) по данным обзора UKIDSS [19] после вычитания диска галактики. Как и в случае UGC 501, большая ось B/PS балджа искажена полосой поглощения, но с удалением от плоскости галактики становится заметно характерное искажение изофот из-за присутствия X-структуры.

Основные параметры X-структур UGC 501 и UGC 12253 приведены в табл.2. Они найдены по суммарным $(g+r+i+z)$ изображениям из обзора SDSS. Главные геометрические характеристики X-образований - это длина луча от центра галактики до последней задетектированной точки l и угол между большой осью структуры и лучом α (см. рис.1 в [8]). l/h - длина луча, выраженная в экспоненциальных масштабах диска галактики. Ошибки значений в табл.2 получены усреднением результатов по четырем лучам. Отметим, что для галактики UGC 501 найденные нами характеристики хорошо согласуются с результатами работы [8], в которой получено, что $l=4.10$ кпк и $\alpha = 32^\circ \pm 1^\circ$. Δz в табл.2 - это максимальное возвышение X-структуры над плоскостью галактики, а $\Delta z/z_0$ и $\Delta z/h$ - максимальное возвышение, выраженное в долях вертикального и радиального масштабов диска.

Данные табл.2 показывают, что X-структуры у рассмотренных нами галактик имеют разные абсолютные и относительные размеры. У более массивной галактики - UGC 12253 - X-структура выглядит более компактной и она меньше возвышается над плоскостью диска. Кроме того, угол раскрытия α у UGC 12253 больше, чем у UGC 501. Как было показано в предыдущем разделе статьи, самые существенные отличия галактик друг от друга - это разное относительное содержание HI и разная относительная масса темного гало.

К сожалению, влияние газовой подсистемы галактик на образование B/PS

балджей пока детально не изучалось. Влияние темного гало было недавно рассмотрено в серии численных расчетов в работе [20]. Согласно [20], у галактик с более массивными темными гало при прочих одинаковых параметрах формируются более сплюснутые Х-структуры с меньшим возвышением над плоскостью диска (рис.8 в [20]). Это качественно согласуется с нашими результатами для UGC 501 и UGC 12253.

С другой стороны, угол раскрытия α , в среднем, должен быть меньше у галактик с массивными гало, что противоречит нашим данным. Однако на величину угла α помимо гало могут влиять и другие факторы - например, эффект проекции (ориентация бара к лучу зрения) и возраст Х-структуры. Как показано в [20], возникающие Х-структуры имеют большие углы раскрытия ($\alpha \approx 35^\circ - 40^\circ$), затем в течение нескольких миллиардов лет они эволюционируют к значениям $\approx 30^\circ - 32^\circ$. Таким образом, Х-структура у галактики UGC 12253 может быть относительно молодой.

4. Заключение. Основные результаты нашей работы можно сформулировать следующим образом:

- На основе анализа кадров из обзора SDSS и литературных данных выполнено детальное исследование двух, видимых с ребра, галактик с В/PS балджами (UGC 501 и UGC 12253). Оба объекта являются гигантскими спиральными галактиками поздних морфологических типов. Галактики заметно различаются по содержанию газа и по вкладу темного гало в пределах их оптических дисков.

- Определены геометрические характеристики Х-структур в центрах обеих галактик. Х-структура у UGC 501 является более протяженной, сильнее возвышается над плоскостью звездного диска и имеет меньший угол раскрытия по сравнению с UGC 12253.

- Различие наблюдательных характеристик Х-структур в исследованных галактиках, вероятно, можно объяснить разным относительным вкладом темных гало и разным возрастом баров в них. Это заключение является сугубо предварительным, поскольку, как показывают численные расчеты, связь между наблюдаемыми параметрами В/PS балджей и окружающими их галактиками неоднозначна.

Для дальнейшего продвижения в вопросе изучения В/PS балджей и поиска связи между их характеристиками и параметрами подстилающих галактик требуется увеличение выборки таких объектов и совершенствование методов выделения Х-структур. Кроме того, необходимо проведение реалистических численных расчетов формирования и эволюции Х-структур для различных моделей галактик (в том числе, с учетом их газовых подсистем).

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 19-02-00249 (исследование

характеристик X-структур) и РНФ 19-12-00145 (изучение характеристик дисков видимых с ребра галактик).

Работа основана на публичных данных обзора SDSS. Финансирование SDSS-III осуществляется Фондом Альфреда П.Слоана, организациями-участниками Коллаборации SDSS, Национальным научным фондом и Департаментом энергетики США.

SDSS-III выполняется Консорциумом астрофизических исследований организаций-участников Коллаборации SDSS-III, включающей Аризонский университет, Бразильскую группу участников, Брукхейвенскую национальную лабораторию, Университет Карнеги-Меллон, Университет штата Флорида, Французскую группу участников, Немецкую группу участников, Гарвардский университет, Канарский институт астрофизики, группу участников Мичиган/Нотр-Дам/JINA, Университет Джона Хопкинса, Национальную лабораторию им. Лоуренса в Беркли, Институт астрофизики Макса Планка, Институт внеземной физики Макса Планка, Университет штата Нью-Мексико, Нью-Йоркский университет, Университет штата Огайо, Университет штата Пенсильвания, Портсмутский университет, Принстонский университет, Испанскую группу участников, Токийский университет, Университет Юты, Университет Вандербильта, Университет Вирджинии, Вашингтонский университет и Йельский университет.

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

² Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Крым, Россия

PHOTOMETRIC STUDY OF TWO GALAXIES WITH X-STRUCTURES

V.P.RESHETNIKOV^{1,2}, P.A.TARAKANOV¹, M.V.KOSTINA¹

Based on the SDSS survey data, two edge-on galaxies with X-structures (UGC 501 and UGC 12253) were studied. Both objects are spiral galaxies of late morphological types with extended stellar disks. X-structures in the galaxies have different sizes and shapes. The possibility is discussed that the difference in the observational parameters of X-structures in UGC 501 and UGC 12253 is due to the difference in the characteristics of their underlying galaxies (primarily, the relative contribution of the dark halo).

Keywords: *galaxies: photometry: morphology: SDSS galaxies*

ЛИТЕРАТУРА

1. *E.M.Burbidge, G.R.Burbidge*, *Astrophys. J.*, **130**, 20, 1959.
2. *R.Lütticke, R.-J.Dettmar, M.Pohlen*, *Astron. Astrophys. Suppl.*, **145**, 405, 2000.
3. *A.Yoshino, Ch.Yamauchi*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **446**, 3749, 2015.
4. *B.C.Ciambur, A.W.Graham, J.Bland-Hawthorn*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **471**, 3988, 2017.
5. *N.Raha, J.A.Sellwood, R.A.James et al.*, *Nature*, **352**, 411, 1991.
6. *A.C.Quillen*, *Astron. J.*, **124**, 722, 2002.
7. *S.S.Savchenko, N.Ya.Sotnikova, A.V.Mosenkov et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **471**, 3261, 2017.
8. *V.P.Reshetnikov, A.V.Mosenkov, S.S.Kotov et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **461**, 4233, 2016.
9. *E.F.Schlafly, D.P.Finkbeiner*, *Astrophys. J.*, **737**, 103, 2011.
10. *I.Chilingarian, A.-L.Melchior, I.Zolotukhin*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **405**, 1409, 2010.
11. *Ch.Y.Peng, L.C.Ho, Ch.D.Impey et al.*, *Astron. J.*, **139**, 2097, 2010.
12. *D.V.Byzaev, S.J.Kautsch, A.V.Mosenkov et al.*, *Astrophys. J.*, **787**, id. 24, 2014.
13. *E.F.Bell, D.H.McIntosh, N.Katz et al.*, *Astrophys. J. Suppl.*, **149**, 289, 2003.
14. *J.Cho, Ch.Park*, *Astrophys. J.*, **693**, 1045, 2009.
15. *M.Fukugita, O.Nakamura, S.Okamura et al.*, *Astron. J.*, **134**, 579, 2007.
16. *J.Bland-Hawthorn, O.Gerhard*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **54**, 529, 2016.
17. *C.Evoli, P.Salucci, A.Lapi et al.*, *Astrophys. J.*, **743**, id. 45, 2011.
18. *A.M.Garcia*, *Astron. Astrophys. Suppl.*, **100**, 47, 1993.
19. *A.Lawrence, S.J.Warren, O.Almaini et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **379**, 1599, 2007.
20. *A.A.Smirnov, N.Ya.Sotnikova*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **481**, 4058, 2018.