

ГАЛАКТИКИ С ПОЛЯРНЫМИ СТРУКТУРАМИ НА $z > 0.1$

В.П.РЕШЕТНИКОВ

Поступила 21 августа 2018

Приводится список из 21 галактики с полярными структурами (кольцами, дисками) на среднем красном смещении $z = 0.15$, составленный на основе данных обзора SDSS. Отобранные объекты являются яркими галактиками, сравнимыми по светимости и размерам с Млечным Путем. Показано, что по совокупности характеристик (интегральному показателю цвета, размеру полярных образований, углу между центральной галактикой и полярным кольцом) далекие объекты подобны близким галактикам этого типа. На обнаружение далеких галактик с полярными кольцами очень сильно влияет наблюдательная селекция, так что реальное число таких объектов в области обзора SDSS может многократно превосходить найденное нами.

Ключевые слова: *галактики: взаимодействие: пекулярные: морфология: SDSS галактики*

1. Введение. Галактики с полярными структурами, видимыми в оптическом диапазоне, – редкий и интересный класс объектов (см. [1,2] и ссылки там же). Такие объекты обычно состоят из центральной галактики и протяженного диска или кольца, вращающегося в околополярной плоскости родительской галактики. Полярные структуры, как правило, богаты газом и в них идет звездообразование, центральные объекты чаще всего являются галактиками типа S0.

Существование двух крупномасштабных морфологически и кинематически выделенных подсистем в одном объекте (традиционно их называют галактиками с полярными кольцами или ГПК [1]), является следствием образования ГПК в два этапа. Сначала формируется центральная галактика, затем, за счет слияния с другой галактикой или аккреции газа из межгалактической среды или из другой звездной системы, образуется полярная структура (например, [3-6]).

ГПК являются редкими объектами. В каталогах [1,2] насчитывается ~100 галактик, морфологически подобных "классическим" ГПК, таким, например, как NGC 4650A, A0136-801 и NGC 2685. Основная часть этих объектов пока не имеет кинематического подтверждения и их принадлежность к ГПК основывается лишь на необычном внешнем виде. Тем не менее, опыт спектральных наблюдений кандидатов в ГПК показывает, что их большая часть, действительно, является галактиками с полярными кольцами (например, [2,7]).

ГПК, как правило, обнаруживают в относительно близкой области Вселенной. В настоящее время известно лишь три кандидата в далекие ГПК, открытые в глубоких полях космического телескопа "Хаббл" [8,9]. Целью этой статьи является увеличение числа кандидатов в ГПК среди далеких (с красным смещением $z > 0.1$) галактик и их предварительное статистическое исследование.

2. Выборка галактик. За основу нашей выборки был взят каталог кандидатов в ГПК, отобранных из обзора SDSS¹ ([2] = SPRC). Из общего списка объектов SPRC с $z > 0.1$ были отброшены вероятные суперпозиции двух галактик (как на основе анализа оптических изображений, так и их спектров из SDSS [10]). В итоговую выборку вошли 18 галактик.

Объекты из SPRC были дополнены тремя галактиками, найденными нами на форумах проекта Galaxy Zoo². У одной из этих галактик есть спектроскопическое красное смещение ($z = 0.110$), у двух других в SDSS приведены лишь оценки фотометрических z . Для рассмотренных нами кандидатов в ГПК, у которых есть и спектроскопические и фотометрические z (19 объектов), мы нашли, что обе оценки практически совпадают: средняя разность красных смещений, найденных двумя способами, составляет лишь $+0.01 \pm 0.02$ (σ).

Таким образом, окончательная выборка кандидатов в далекие ГПК включает 21 галактику с средним красным смещением $z = 0.145 \pm 0.044$. Галактики - слабые (их средняя видимая звездная величина в фильтре r равна 17.5 ± 0.5) и небольшие - с характерным угловым размером $\sim 10''$.

Контрастные изображения всех рассматриваемых объектов приведены на рис.1. В табл.1 суммированы основные наблюдательные характеристики ГПК. В первом столбце таблицы приведен порядковый номер галактики (первые 18 объектов взяты из SPRC, последние 3 - из Galaxy Zoo), во втором указаны их названия по SPRC и SDSS. В столбцах 4-6, по данным SDSS DR14, приведены красные смещения (фотометрические оценки заключены в скобки), абсолютные звездные величины в фильтре r и показатели цвета галактик. Значения M_r^0 и $(g-r)_0$ исправлены за поглощение в нашей Галактике [11] и за влияние k -поправки [12]. В последнем столбце таблицы даны оценки больших осей полярных структур в килопарсеках (D). Оценки размеров получены по суммарным изображениям объектов в фильтрах g, r, i из обзора SDSS и их ошибки могут достигать нескольких килопарсеков. В работе [13] приведены измерения размеров центральных галактик и полярных образований для 4 галактик из табл.1. Согласие измерений, опубликованных в [13] с

¹ <http://www.sdss.org/>

² <http://www.galaxyzoo.org/>

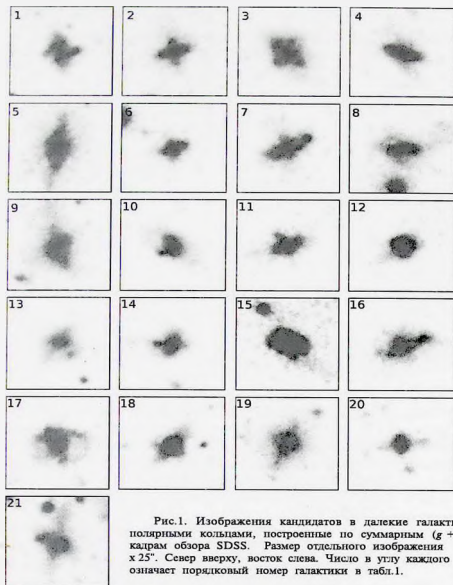


Рис.1. Изображения кандидатов в далекие галактики с полярными кольцами, построенные по суммарным ($g + r + i$) кадрам обзора SDSS. Размер отдельного изображения - $25'' \times 25''$. Север вверх, восток слева. Число в углу каждого кадра означает порядковый номер галактики в табл.1.

нашими, хорошее - средняя разность составляет лишь $-0''.6 \pm 1''.1$.

Все зависящие от расстояния параметры галактик рассчитаны для космологической модели с $H_0 = 73 \text{ км/с/Мпк}$, $\Omega_m = 0.27$ и $\Omega_\Lambda = 0.73$.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНДИДАТОВ В ДАЛЕКИЕ ГПК

N	Объект	z	M_r^1	$(g-r)_0$	D (кпк)
1	SPRC-9	0.145	-22.0	0.75	27
2	SPRC-19	0.105	-21.1	0.74	22
3	SPRC-44	0.113	-22.2	0.71	18
4	SPRC-46	0.128	-21.3	0.79	27
5	SPRC-80	0.109	-21.8	0.88	44
6	SPRC-86	0.162	-22.0	0.67	22
7	SPRC-87	0.123	-21.4	0.83	28
8	SPRC-91	0.211	-22.7	0.73	37
9	SPRC-92	0.192	-23.2	0.78	56
10	SPRC-96	0.116	-21.4	0.66	16
11	SPRC-99	0.169	-22.2	0.75	25
12	SPRC-113	0.149	-20.9	0.63	25
13	SPRC-114	0.111	-21.2	0.83	23
14	SPRC-137	0.112	-20.9	0.67	18
15	SPRC-158	0.116	-21.6	0.60	36
16	SPRC-159	0.151	-22.0	0.78	35
17	SPRC-175	0.191	-22.7	0.63	46
18	SPRC-177	0.280	-23.3	0.54	37
19	SDSS 081740.08+042952.3	0.110	-21.4	0.78	29
20	SDSS 140435.21+555536.8	(0.128)	-20.5	0.78	26
21	SDSS 175659.49+040143.3	(0.117)	-21.8	0.83	41

3. *Основные характеристики кандидатов в ГПК.* Галактики нашей выборки являются яркими (рис.2а) - среднее значение абсолютной звездной величины $M_r^0 = -21.8 \pm 0.8$. Эта светимость близка к светимости Млечного Пути, которая в этой цветовой полосе составляет $M_r^0 = -21.6$ [14].

На рис.2b изображена зависимость абсолютной звездной величины галактик выборки от красного смещения. На рисунке хорошо прослеживается наблюдательная селекция - среди более далеких кандидатов в ГПК мы видим лишь самые яркие объекты.

На рис.2с показано распределение галактик по интегральному показателю цвета. Это распределение является относительно узким со средним значением $(g-r)_0 = +0.73 \pm 0.09$, соответствующим галактикам типа S0 [15]. Примечательно, что цвета близких ГПК также согласуются с этим значением [16].

Полярные структуры имеют характерный диаметр $D \sim 30$ кпк (рис.2d) и, в среднем, в полтора раза превышают размеры центральных галактик. Размеры полярных образований у близких галактик несколько меньше и составляют ~ 20 кпк [13]. Различие размеров полярных колец/дисков у близких и далеких ГПК может объясняться тем, что в выборке галактик с $z > 0.1$ доминируют

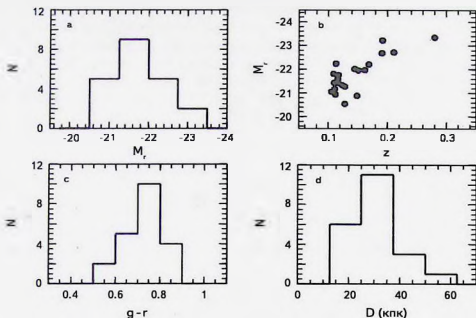


Рис.2. Распределение кассидатов в ГПК по абсолютной звездной величине в фильтре r (а); зависимость между абсолютной звездной величиной и красным смещением (б); распределение интегрального показателя цвета $g-r$ и диаметра полярной структуры - (с) и (d).

более яркие галактики, размеры внешних структур которых, в среднем, больше.

На рис.3 по данным табл.1 приведена зависимость между интегральной светимостью ГПК и диаметром ее полярной структуры. Как видно на рисунке, далекие ГПК в целом следуют зависимости "светимость-размер", установленной для нормальных близких галактик (не ГПК). Размеры полярных образований у галактик с $M_r^0 \approx -21$ близки к характерным значениям для ГПК в окружающей нас области Вселенной.

У большинства галактик внешние структуры расположены под большими углами к центральным галактикам (рис.1). По нашим предварительным измерениям средний угол между большими осями полярных структур и центральных галактик выборки составляет $77^\circ \pm 8^\circ$, что находится в согласии с данными для близких ГПК (например, [13,16]).

4. Статистика галактик с полярными структурами. В работе [19] по данным каталога [1] была построена функция светимости близких ГПК и найдена ее аппроксимация функцией Шехтера. Используя результаты

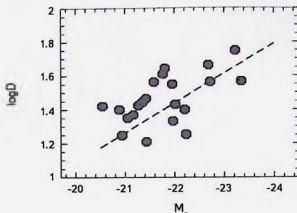


Рис.3. Зависимость между диаметром полярной структуры (в кпк) и светимостью кандидата в ГПК (черные кружки). Штриховой линией показано соотношение для нормальных галактик [17], пересчитанное из фильтра B в r согласно [18].

[19], оценим ожидаемое количество ГПК в интервале красных смещений от 0.10 до 0.18. Этот интервал был выбран потому, что в нем, согласно рис.2b, влияние наблюдательной селекции должно сказываться слабее, чем для всей выборки далеких ГПК.

В диапазоне $z = 0.10 - 0.18$ нами найдено 17 галактик с абсолютными звездными величинами от -20.5 до -22.2 (см. табл.1). Пространственная плотность близких ГПК в этом интервале абсолютных звездных величин по данным [19] составляет $n(z=0) \approx 5 \cdot 10^{-6} \text{ Мпк}^{-3}$ (эта оценка получена с учетом пересчета характеристической абсолютной звездной величины функции Шехтера из полосы B в r согласно [18]). Таким образом, в интервале $z = 0.10 - 0.18$ в обзоре SDSS при неизменной пространственной плотности ГПК ожидается найти $\sim 10^3$ галактик. Столь разительное несоответствие ожидаемого и наблюдаемого числа объектов свидетельствует об очень сильной наблюдательной селекции при отборе далеких ГПК. При более детальном изучении областей Вселенной на $z > 0.1$ должно быть обнаружено множество галактик с полярными структурами.

5. Заключение. На основе анализа каталога [2], основанного на обзоре SDSS, а также форумов проекта Galaxy Zoo, сформирована выборка из 21 кандидата в галактики с полярными кольцами на $z > 0.1$. Анализ изображений этих объектов показал, что они подобны более близким галактикам этого типа - они имеют сходные размеры и светимости, показатели цвета, углы наклонов - и в целом они, по-видимому, являются объектами той же природы. Определяющую роль при обнаружении далеких ГПК скорее всего

играет наблюдательная селекция и выделенные нами объекты представляют собой лишь незначительную долю таких галактик на $z \sim 0.1 - 0.2$.

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, Бруксгейвенскую 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.

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

GALAXIES WITH POLAR STRUCTURES AT $z > 0.1$

V.P.RESHETNIKOV

On the basis of the SDSS survey, a list of 21 galaxies with polar structures (rings, disks) is presented on the mean redshift $z \approx 0.15$. Selected objects are bright galaxies, comparable in luminosity and size with the Milky Way. It is shown that for the set of characteristics (integral color index, size of the polar structures, angle between the central galaxy and the polar ring), distant objects are similar to nearby galaxies of this type. The discovery of distant polar-ring galaxies is strongly influenced by observational selection, so the actual number of such objects in the region of the SDSS survey may many times exceed the one found by us.

Keywords: *galaxies: interactions: peculiar: morphology: SDSS galaxies*

ЛИТЕРАТУРА

1. *B.C.Whitmore, R.A.Lucas, D.B.McElroy et al.*, *Astron. J.*, **100**, 1489, 1990.
2. *A.V.Moiseev, K.I.Smirnova, A.A.Smirnova et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **418**, 244, 2011.
3. *K.Bekki*, *Astrophys. J.*, **490**, L37, 1997.
4. *V.Reshetnikov, N.Sotnikova*, *Astron. Astrophys.*, **325**, 933, 1997.
5. *F.Bournaud, F.Combes*, *Astron. Astrophys.*, **401**, 817, 2003.
6. *A.V.Maccio, B.Moore, J.Stadel*, *Astrophys. J.*, **636**, L25, 2006.
7. *A.Moiseev, S.Khoperskov, A.Khoperskov et al.*, *Baltic Astronomy*, **24**, 76, 2015.
8. *V.P.Reshetnikov*, *Astron. Astrophys.*, **321**, 749, 1997.
9. *В.П.Решетников, Р.-Ю.Деттмар*, *Письма в Астрон. ж.*, **33**, 255, 2007.
10. *A.Moiseev, O.Egorov, K.Smirnova*, *ASP Conference Series*, **486**, 71, 2014.
11. *E.F.Schlafly, D.P.Finkbeiner*, *Astrophys. J.*, **737**, 103, 2011.
12. *I.Chilingarian, A.-L.Melchior, I.Zolotukhin*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **405**, 1409, 2010.
13. *К.И.Смирнова, А.В.Мусеев*, *Астрофиз. Бюлл.*, **68**, 391, 2013.
14. *J.Bland-Hawthorn, O.Gerhard*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **54**, 529, 2016.
15. *M.Fukugita, O.Nakamura, S.Okamura et al.*, *Astron. J.*, **134**, 579, 2007.
16. *V.Reshetnikov, F.Combes*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **447**, 2287, 2015.
17. *S. van den Bergh*, *Astron. Astrophys.*, **490**, 97, 2008.
18. *D.O.Cook, D.A.Dale, B.D.Johnson et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **445**, 890, 2014.
19. *В.П.Решетников, М.Фаундэз-Абанс, М.Де Оливейра-Абанс*, *Письма в Астрон. ж.*, **37**, 194, 2011.