

УДК 524.74-75:523.12

## ПОЛЯРНЫ ЛИ ПОЛЯРНЫЕ КОЛЬЦА?

© 2013 К. И. Смирнова<sup>1\*</sup>, А. В. Моисеев<sup>2</sup><sup>1</sup>Уральский федеральный университет, Екатеринбург, 620002 Россия<sup>2</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 24 августа 2013 года; принята в печать 20 сентября 2013 года

Рассматриваются кандидаты в галактики с полярными кольцами, для которых имеются изображения в обзоре SDSS. В выборку 78 галактик вошли наиболее надежные кандидаты из каталогов SPRC и PRC, для части из которых уже имеются кинематические подтверждения. Анализируются распределения изучаемых объектов по углу между полярным кольцом и центральным диском и по оптическому диаметру внешних кольцевых структур. В подавляющем большинстве случаев внешние структуры лежат в плоскости, близкой (в пределах  $10^\circ$ – $20^\circ$ ) к полярной, что указывает на стабильность соответствующих орбит в гравитационном потенциале гало. Умеренно наклоненные внешние структуры наблюдаются лишь примерно у 6% объектов, что, видимо, говорит об их коротком времени жизни. Часто при такой нестабильной конфигурации полярное кольцо пересекает диск галактики, так как меньше его по диаметру. Показано, что внутренние полярные структуры и внешние крупномасштабные полярные кольца образуют единое семейство в распределении по диаметру, нормированному на оптический размер галактики. В то же время имеет место бимодальность этого распределения, так как число объектов с  $d_{\text{ring}} = (0.4\text{--}0.7) d_{\text{disk}}$  мало. Скорее всего, такое распределение размеров связано с тем, что устойчивость полярных орбит во внутренних областях галактик обеспечивается балджем или баром, а во внешних областях — сфероидальным (или трехосным) гало.

Ключевые слова: галактики: пекулярные—галактики: фотометрия

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В галактиках с полярными кольцами (ГПК) одновременно наблюдается вращение относительно двух осей: кроме центрального звёздного диска в перпендикулярной или сильно наклоненной к нему плоскости вращается протяженная звёздно-газовая структура, называемая полярным кольцом или полярным диском. До выхода нашей статьи в 2011 г. [1] практически все исследования таких галактик относились к объектам, представленным в каталоге Whitmore и др. [2]. Этот каталог (Polar Rings Catalog, PRC), созданный на основе изучения фотографических данных, разделен на четыре части и содержит 157 объектов. Но из них только шесть (“тип А”) были в тот момент кинематически подтверждены. К типу В (хорошие кандидаты) авторы отнесли 27 галактик. Основную же часть каталога составляли пекулярные объекты с теми или иными признаками взаимодействия с окружением, лишь возможно связанные с феноменом полярных колец.

Для того чтобы отнести галактику к классу ГПК, согласно [2] необходимо следующее:

- присутствие в галактике двух подсистем, вращающихся почти в ортогональных плоскостях и имеющих сопоставимые скорости вращения;
- обе кинематически выделенные подсистемы должны иметь совпадающие системные скорости, то есть представлять из себя объект с единым центром, а не случайную проекцию двух галактик на луч зрения, их фотометрические центры, очевидно, должны совпадать;
- полярная структура (кольцо или диск) должна быть сопоставима по размерам с центральной галактикой и выглядеть относительно плоской.

За последующие годы изучения объектов PRC только примерно в двух десятках случаев были получены кинематические подтверждения того, что эти галактики действительно относятся к ГПК. То есть методами оптической спектроскопии или радиоинтерферометрии в линии H I было доказано присутствие материи на полярных орбитах.

В 2011 г. нами [1] был опубликован каталог кандидатов в полярные кольца, состоящий из

\*E-mail: arashu@rambler.ru

275 кандидатов, отобранных по снимкам Слоановского цифрового обзора неба (SDSS DR7) в основном благодаря использованию данных проекта GalaxyZoo.<sup>1</sup> В этом каталоге (SDSS-based Polar Ring Catalogue, SPRC) мы также провели условное разделение объектов на четыре типа, основываясь исключительно на их оптической морфологии:

- лучшие кандидаты (70 галактик);
- хорошие кандидаты, включая возможные случайные проекции (115 галактик);
- родственные объекты, сильно изогнутые диски (53 галактики);
- кольца, близкие к положению “плашмя” (37 галактик).

В настоящий момент разработано несколько сценариев образования ГПК, все они так или иначе связаны со взаимодействием центральной галактики и ее окружения (см. [3, 4] и ссылки в них). Одним из сценариев является слияние двух галактик с взаимно ортогональными дисками, происходящее на относительно небольших взаимных скоростях. Расчеты показывают, что большая часть (около 3/4) полярных колец, скорее всего, образуются в результате захвата большой галактикой вещества богатого газом спутника, имеющего соответствующее направление орбитального момента вращения. Для этого требуется достаточно специфические начальные условия [3, 5]. Разумеется, сам захват газа может происходить при любой ориентации орбиты спутника-“донора.” Но если образующееся при этом газовое кольцо будет наклонено под небольшим углом к звездному диску галактики, то через несколько оборотов под действием гравитации диска кольцо за счет прецессии упадет в плоскость галактики. В то же время полярная (т. е. почти перпендикулярная) ориентация диска и кольца является стабильной, так что кольцо будет оставаться устойчивым в течение многих оборотов. Важную стабилизирующую роль здесь играет темное гало в том случае, если оно имеет сплюснутую или вытянутую форму.

В последнее время набирает популярность сценарий формирования некоторых полярных колец в процессе захвата газа из филаментов межгалактической среды (так называемая “холодная аккреция” [6–8]). Этим можно объяснить существование наиболее крупных полярных структур, в которых масса полярного компонента равна или превышает массу центральной галактики. Важно отметить, что

сама по себе холодная аккреция является закономерным этапом набора галактиками барионной массы. Но только в отдельных случаях удается заметить следы этого процесса.

На сегодняшний момент ГПК — одни из немногих объектов, позволяющих напрямую оценить форму темного гало благодаря возможности измерения кривой вращения в двух перпендикулярных плоскостях.

Для того чтобы понять, какой именно механизм привел к образованию ГПК в каждом конкретном случае, а также для решения вопроса об устойчивости полярных структур, полезно рассмотреть статистические распределения их основных параметров, таких как относительный размер и наклон к плоскости центрального диска. Действительно ли только ортогональные к диску орбиты являются долгоживущими? Насколько часто полярные кольца пересекаются со звездным диском основной галактики? Ранее статистика параметров полярных компонент в галактиках рассматривалась [9] на небольшой выборке 27 галактик PRC. Сейчас мы можем заметно увеличить число изучаемых объектов, используя достаточно однородный набор наблюдений — снимки SDSS. Этому и посвящена данная работа.

## 2. ВЫБОРКА КАНДИДАТОВ

Для изучения статистики параметров ГПК важно иметь максимально однородный исходный материал. В нашу выборку вошли 70 галактик SPRC, классифицированных в работе [1] как “лучшие кандидаты,” т.е. максимально похожие на классические ГПК. К ним мы добавили две галактики, отнесенные к “кольцам, ориентированным плашмя”: SPRC 241, SPRC 260, для которых уже получено кинематическое подтверждение принадлежности к ГПК [10]. Так же мы включили в выборку объекты из каталога PRC, для которых, с одной стороны, имеются кинематические подтверждения принадлежности к ГПК, а с другой — есть снимки SDSS/DR8. Таких галактик оказалось всего шесть. Итого, в выборку вошло 78 галактик, красные смещения которых находятся в интервале  $z = 0.003–0.17$ . Важно, что анализируемые снимки имеют сходную глубину по поверхностной яркости, так как использовался единый источник изображения SDSS.

## 3. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Для выделения структуры низкой поверхностной яркости кольца и галактики мы суммировали изображения в пяти фильтрах SDSS ( $u, r, i, z, g$ ).

<sup>1</sup>[www.galaxyzoo.org](http://www.galaxyzoo.org)

Поскольку изображения ГПК отличаются сложной формой, то применение стандартных автоматических алгоритмов подгонки формы изофот оказывается проблематичным. Поэтому мы вручную описывали эллипсами внешние изофоты центрального диска и полярного кольца, используя средства программы SAOImage DS9 (см. примеры на Рис. 1). Центр эллипсов фиксировался на ядре галактики. Измеряемые параметры: большая ( $a$ ) и малая ( $b$ ) полуоси эллипсов и позиционный угол большой оси PA. Мы пробовали также описывать и внутренние границы полярных колец, но уверенный результат получен менее чем для десятка галактик, поэтому анализ этих измерений не проводился. Для объекта SPRC 33 (NGC 4262), представляющего собой линзовидную галактику, окруженную широким газовым кольцом, в котором присутствует лишь небольшое количество звёзд, заметных в основном в УФ-диапазоне, параметры кольца и галактики брались из работы [11].

### 3.1. Углы наклона

Для определения угла наклона изучаемых структур к лучу зрения ( $i$ ) использовалась классическая формула оценки наклона сплюснутого сфероида по видимому отношению его осей в проекции на небесную сферу:

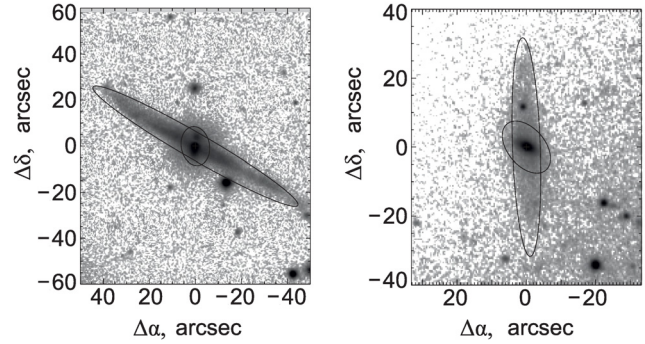
$$\cos^2 i = \frac{(b/a)^2 - q_0^2}{1 - q_0^2}, \quad (1)$$

где собственная сплюснутость сфероида для центральных галактик принималась равной  $q_0 = 0.20$  [12], а полярные структуры мы считали плоскими:  $q_0 = 0$ .

Зная для двух плоскостей только PA и  $i$ , измеренный по формуле (1), мы не можем однозначно определить угол между ними. Необходима дополнительная информация о том, какая сторона диска и кольца находится ближе/дальше к наблюдателю. Это возможно понять по распределению пылевых прожилок на изображении галактики, но в подавляющем большинстве изучаемых объектов их угловой размер слишком мал по сравнению с разрешением снимков SDSS. В общем случае, имеется два решения для возможного угла между компонентами кольца и галактики [13]. Ниже эти величины обозначены как  $\delta_1$  и  $\delta_2$ :

$$\cos \delta_{1,2} = \pm \cos(\text{PA}_0 - \text{PA}_1) \sin i_0 \sin i_1 + \cos i_0 \cos i_1. \quad (2)$$

Здесь  $\text{PA}_0$  — позиционный угол центральной галактики,  $\text{PA}_1$  — позиционный угол полярного кольца,  $i_0$  — угол наклона галактики к лучу зрения,  $i_1$  — угол наклона полярного кольца к лучу зрения. Результаты представлены в таблице.

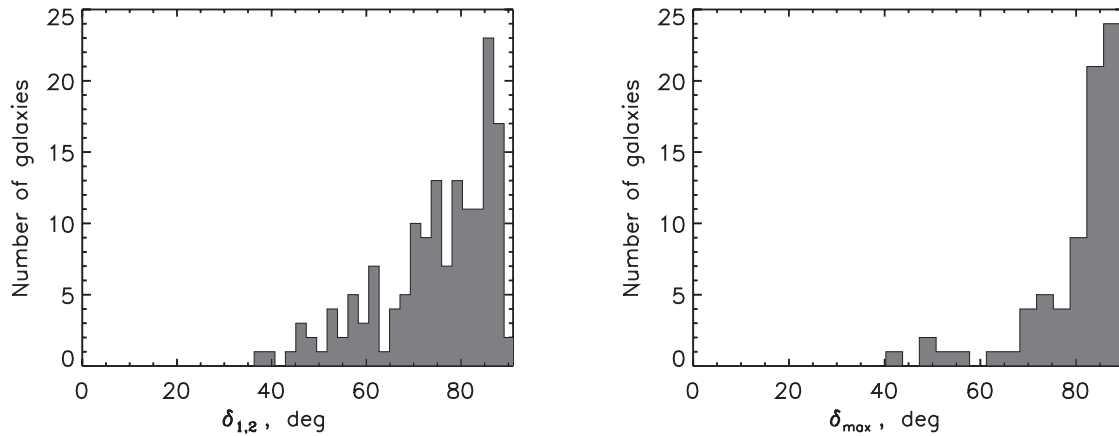


**Рис. 1.** Изображение галактик SPRC 42 (слева) и SPRC 50 (справа), сумма пяти фильтров из SDSS в логарифмической шкале интенсивностей. Эллипсами показаны принятые ориентации внешних областей диска и полярной структуры.

На Рис. 2 показаны распределения угла между внешним кольцом и диском для нашей выборки. На левой гистограмме приведено распределение для всех возможных значений  $\delta$  из (2). Несмотря на неопределенность в оценках  $\delta$ , внешние кольцевые структуры в большинстве оказываются ориентированы близко к полярной плоскости:  $\delta \geq 70^\circ$ . То есть полярная конфигурация в ГПК встречается значительно чаще, чем наклонная. Это согласуется с теоретическими работами, показывающими, что в случае осесимметричного (но не сферического) или трехосного распределения гравитационного потенциала в полярной плоскости существуют стабильные орбиты. В то же время орбиты в плоскости, заметно отличающейся от полярной, оказываются неустойчивыми: звездное кольцо разрушается под действием дифференциальной прецессии [14], а газовое кольцо достаточно быстро (за несколько оборотов) оседает в одну из выделенных плоскостей центральной галактики (см., к примеру, [15]). Разумеется, время жизни и сам характер эволюции наклонного кольца зависит от формы распределения потенциала ([16, 17] и ссылки в этих работах).

Если мы, в согласии с указанными теоретическими расчетами, примем, что из двух возможных значений  $\delta_1$  и  $\delta_2$  наиболее вероятным является более близкий к  $90^\circ$  угол, то распределение углов наклона колец к диску примет вид, показанный на Рис. 2 справа. Пик распределения становится заметно более узким, так что для 95% всех объектов выборки  $\delta > 70^\circ$ . Необходимо отметить два важных момента.

- Даже при таком “оптимистичном” допущении о реализации только случаев больших углов, все равно 6% выборки (пять объектов) составляют галактики с умеренно наклоненными структурами:  $\delta = 40\text{--}55^\circ$ . Возможно, что они не являются стабильными, и



**Рис. 2.** Гистограмма распределения углов наклона полярной структуры к плоскости галактики. Слева — все возможные решения по формуле (2). Справа — взяты только максимальные величины углов  $\delta_{1,2}$ .

мы просто застали их в процессе разрушения (оседания в плоскость диска). Ответ может дать подробное моделирование характеристик конкретно этих галактик.

- Точно полярная ориентация (в пределах  $5^\circ$  от плоскости, ортогональной диску) наблюдается только в 39 галактиках.

Разумеется, следует помнить о том, что расчет углов наклона по формуле (1) подразумевает, что

полярные структуры плоские и круглые. В то же время есть ряд указаний на то, что, во-первых, полярные кольца должны иметь слабую внутреннюю эллиптичность [18], а, во-вторых, структуры, уходящие от полярной плоскости, должны изгибаться [14], так что приписывать им единый угол наклона не всегда корректно. Тем не менее, мы считаем, что отмеченные выше статистические закономерности должны объясняться в рамках теоретических расчетов.

#### Параметры галактик

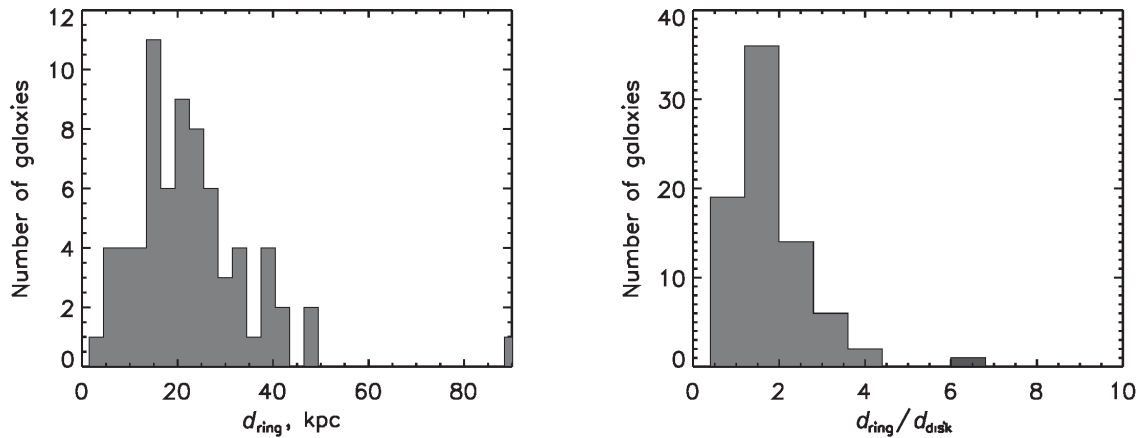
Name	Inner disk			Polar ring			$z$	$\delta_1$ , deg	$\delta_2$ , deg	$D_{\text{ring}}/D_{\text{disk}}$
	$a$ , arcsec	$b$ , arcsec	PA, deg	$a$ , arcsec	$b$ , arcsec	PA, deg				
SPRC 1	7.2	3.6	92	5.6	2.4	10	0.073	71	84	0.78
SPRC 2	10.7	7.5	17	19.8	5.9	85	0.035	62	86	1.85
SPRC 3	5.7	2.8	325	12.1	2.9	66	0.037	86	74	2.11
SPRC 4	9.1	3.7	122	9.5	4.0	27	0.043	85	77	1.04
SPRC 5	4.0	3.2	220	8.7	2.0	106	0.028	86	65	2.20
SPRC 6	4.8	3.2	29	6.1	2.8	149	0.019	87	50	1.28
SPRC 7	4.2	3.2	150	17.8	9.5	50	0.060	72	60	4.28
SPRC 8	5.2	2.8	130	7.6	2.4	27	—	88	69	1.46
SPRC 9	5.7	1.9	10	5.5	1.4	94	0.145	80	88	0.97
SPRC 10	5.7	1.8	320	6.9	1.0	40	0.042	78	82	1.21
SPRC 11	6.7	3.2	125	10.4	3.5	30	0.066	85	77	1.56
SPRC 12	4.0	2.3	135	6.3	2.0	37	0.063	86	73	1.60
SPRC 13	8.3	3.2	15	13.1	2.4	97	0.032	79	86	1.57

## Параметры галактик. (Продолжение)

Name	Inner disk			Polar ring			$z$	$\delta_1$ , deg	$\delta_2$ , deg	$D_{\text{ring}}/D_{\text{disk}}$
	$a$ , arcsec	$b$ , arcsec	PA, deg	$a$ , arcsec	$b$ , arcsec	PA, deg				
SPRC 14	8.7	5.2	130	17.8	5.9	35	0.032	83	75	2.05
SPRC 15	9.9	4.4	144	11.9	4.0	22	0.034	71	53	1.20
SPRC 16	5.5	2.5	119	10.7	2.4	48	0.060	67	78	1.93
SPRC 17	10.0	4.4	100	7.6	2.4	10	0.026	82	82	0.76
SPRC 18	4.2	2.8	45	5.5	2.6	150	0.082	82	61	1.33
SPRC 19	4.8	2.4	109	5.9	1.8	12	0.105	87	75	1.25
SPRC 20	5.1	4.0	0	17.0	1.6	97	0.074	89	81	3.34
SPRC 21	3.6	2.2	9	4.8	2.0	99	0.081	75	75	1.33
SPRC 22	3.4	2.6	70	7.3	2.0	335	0.160	81	75	2.18
SPRC 23	9.9	6.7	65	13.1	5.2	4	0.028	53	85	1.32
SPRC 24	8.3	7.1	80	17.8	5.7	340	0.047	79	68	2.14
SPRC 25	3.6	2.0	89	7.9	1.6	4	0.073	79	88	2.22
SPRC 26	3.8	2.4	177	6.7	1.2	99	—	74	86	1.79
SPRC 27	5.9	2.7	125	14.3	2.2	30	0.048	89	81	2.40
SPRC 28	6.0	3.2	60	5.4	2.0	320	0.077	87	70	0.90
SPRC 29	5.6	4.0	0	7.9	2.0	116	0.047	82	61	1.43
SPRC 30	3.8	2.2	30	3.8	1.6	130	0.075	84	68	1.00
SPRC 31	7.2	5.2	105	14.0	2.4	358	0.050	85	71	1.94
SPRC 32	5.3	3.0	5	4.8	1.3	103	0.035	88	75	0.89
SPRC 33	55.0	47.0	0	120.0	50.0	25	0.005	37	85	2.18
SPRC 34	5.3	3.0	343	9.9	1.6	73	0.081	85	85	1.85
SPRC 35	5.3	1.7	115	9.1	1.3	15	0.068	82	78	1.70
SPRC 36	5.9	2.4	15	4.4	1.6	115	—	88	73	0.73
SPRC 37	4.4	2.4	134	6.3	2.0	39	0.068	84	76	1.45
SPRC 38	11.1	4.8	115	15.8	5.9	12	0.039	87	70	1.43
SPRC 39	7.1	4.0	115	15.8	3.6	50	0.029	62	76	2.22
SPRC 40	47.5	13.1	105	26.9	5.9	57	0.004	46	53	0.57
SPRC 41	9.3	3.8	342	9.1	2.6	100	0.061	71	58	0.98
SPRC 42	8.5	6.1	10	51.5	5.6	60	0.023	58	67	6.04
SPRC 43	4.8	3.2	10	7.5	1.8	67	0.171	56	75	1.58
SPRC 44	5.9	2.4	49	5.2	2.6	320	0.113	79	80	0.87
SPRC 45	4.8	4.0	0	8.8	2.4	85	0.072	74	79	1.83
SPRC 46	4.9	2.0	72	4.8	1.6	7	0.128	60	75	0.96

## Параметры галактик. (Продолжение)

Name	Inner disk			Polar ring			$z$	$\delta_1$ , deg	$\delta_2$ , deg	$D_{\text{ring}}/D_{\text{disk}}$
	$a$ , arcsec	$b$ , arcsec	PA, deg	$a$ , arcsec	$b$ , arcsec	PA, deg				
SPRC 47	31.7	5.6	110	27.7	7.1	360	0.031	70	70	0.88
SPRC 48	8.7	5.2	23	13.9	3.6	123	0.056	89	73	1.59
SPRC 49	9.9	5.9	310	15.8	6.9	43	0.068	77	73	1.60
SPRC 50	8.7	5.3	40	31.7	4.0	2	0.078	45	56	3.64
SPRC 51	4.2	2.0	7	6.7	2.8	90	0.075	73	85	1.62
SPRC 52	21.6	4.6	80	15.8	4.0	146	0.015	65	67	0.73
SPRC 53	5.1	2.2	312	4.0	1.8	48	0.083	85	74	0.78
SPRC 54	5.3	4.3	45	14.6	2.2	334	0.039	71	85	2.74
SPRC 55	4.8	3.6	0	13.9	1.5	85	0.086	82	88	2.92
SPRC 56	13.2	11.6	120	16.0	5.6	338	0.055	86	48	1.21
SPRC 57	3.6	2.6	145	5.2	1.8	27	0.070	86	56	1.45
SPRC 58	7.6	7.2	103	24.0	3.2	332	—	85	70	3.16
SPRC 59	4.5	3.5	70	12.3	2.6	343	—	78	82	2.73
SPRC 60	3.4	3.2	135	9.9	2.4	55	0.078	73	80	2.94
SPRC 61	8.4	5.2	49	12.0	2.4	320	0.046	82	83	1.43
SPRC 62	2.6	2.4	45	5.2	1.7	45	—	48	86	2.00
SPRC 63	2.4	1.8	130	4.3	1.4	60	0.074	62	88	1.79
SPRC 64	3.1	2.2	350	5.2	1.6	101	—	87	62	1.67
SPRC 65	11.9	2.6	92	9.9	3.2	310	0.067	44	39	0.83
SPRC 66	8.8	4.4	33	9.2	2.8	117	0.087	76	86	1.05
SPRC 67	18.6	4.4	113	25.7	3.2	347	0.028	55	53	1.38
SPRC 68	15.8	4.8	30	7.9	4.8	115	—	78	86	0.50
SPRC 69	5.9	3.6	135	14.7	2.8	32	0.025	85	73	2.47
SPRC 70	5.2	2.4	100	9.1	3.0	13	0.069	79	84	1.77
SPRC 241	13.9	6.7	9	27.7	15.8	110	0.018	83	66	2.00
SPRC 260	16.6	7.9	82	27.7	15.8	15	0.021	57	87	1.67
PRCA3	60.0	32.0	38	46.0	18.0	110	0.003	63	87	0.77
PRCA4	14.3	7.9	133	43.6	4.4	53	0.023	78	84	3.05
PRCA6	15.8	7.9	125	49.5	7.9	17	0.018	78	69	3.13
PRCB9	15.8	10.7	5	21.4	5.9	69	0.020	60	82	1.35
PRCB17	26.0	10.0	135	32.0	6.0	24	0.004	74	66	1.23
PRCC13	122.8	39.2	40	277.2	59.4	352	0.003	46	54	2.26



**Рис. 3.** Распределения внешних диаметров полярных структур. Слева — линейный размер в кпк. Из общего распределения выделяется гигантское кольцо SPRC 50 диаметром около 90 кпк. Справа — диаметр колец нормирован на размер диска центральной галактики.

В целом, приведенные распределения по углу  $\delta$  похожи на Рис. 3 из более ранней работы Whitmore [9], где автор также делает вывод о том, что наблюдаемое распределение угла наклона кольца к диску объясняется предпочтительностью именно полярной пространственной ориентации. В то же время, анализируя в несколько раз большую выборку ГПК, мы не можем согласиться с выводом [9] о том, что отсутствие колец с умеренным наклоном (в наших терминах это  $\delta < 55^\circ$ ) объясняется исключительно эффектом селекции. С одной стороны, действительно, при визуальном поиске кандидатов в ГПК более заметными оказываются объекты, в которых оба компонента видны под большим углом к лучу зрения: среднее значение угла  $i_0$  в нашей выборке составляет  $56^\circ$ . А полярные структуры видны под еще большим углом: среднее значение  $i_1$  равно  $70^\circ$  при том, что только для восьми колец  $i_1 < 60^\circ$ . Однако даже если отбирать только объекты, видимые с ребра, то из (2) для  $i_0 \approx i_1 \approx 90^\circ$  получаем  $\cos \delta \approx \cos(\text{PA}_0 - \text{PA}_1)$ . Так что умеренно наклоненные кольца выделялись бы соответствующей разницей позиционных углов. Поэтому эффект селекции не может сделать наблюдаемые распределения  $\delta$  более плоскими, чем показано на Рис. 2.

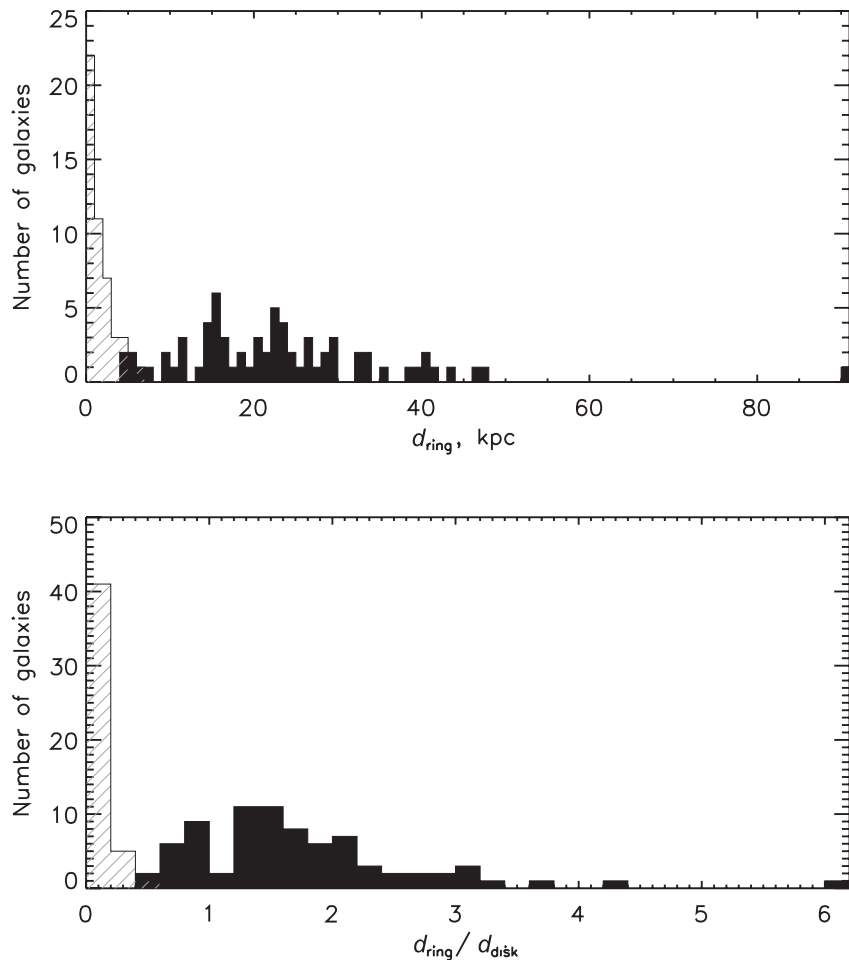
### 3.2. Линейные размеры

Расчет линейных диаметров проводился для  $H_0 = 71$  км/с/Мпк по известным красным смещениям галактик, приведенным в статье [1], где они, в свою очередь, были взяты из SDSS и NED. Рисунок 3 показывает гистограмму распределения внешних диаметров колец. Хотя разброс их величин довольно велик, почти все кольца меньше

40 кпк при среднем диаметре около 20 кпк. Важно отметить, что поскольку измерения проводились по оптическим снимкам, то речь идет только о звездных полярных структурах. В нейтральном газе размер внешних структур может оказаться заметно больше, при этом наклон к плоскости диска может меняться. Так, в галактике PRC A3 (NGC 2685) распределение HI согласуется со звездным полярным кольцом во внутренних областях, но на больших радиусах изгибается так, что вновь укладывается в плоскость основной галактики [19].

Из общего распределения заметно выделяется объект SPRC 50, изображение которого приведено на Рис. 1. Здесь центральная галактика окружена гигантским диском низкой поверхностной яркости. Спектр ядра в SDSS DR7 показывает абсорбционные особенности, характерные для галактики раннего типа с красным смещением  $z = 0.078$ , что соответствует масштабу 1.5 кпк/arcsec. Если полярный диск — не результат случайной проекции, то его диаметр достигает 90 кпк. Это сравнимо с размерами наиболее протяженных галактических дисков, известных на данный момент, таких как прототип галактик низкой поверхностной яркости Malin 1 (диаметр 90 кпк, согласно [20]) или кольцевая галактика UGC 7069 (115 кпк, согласно [21]). Само существование таких гигантских полярных структур является серьезным вызовом теориям формирования галактик, если, конечно, спектральные наблюдения подтвердят, что SPRC 50 — не случайная проекция, а реальная ГПК.

На Рис. 3 справа показано распределение внешних диаметров колец, нормированных на оптический диаметр галактики:  $d_{\text{ring}}/d_{\text{disk}}$ . Отметим, что измеряемые по нашей методике внешние



**Рис. 4.** Распределения полярных структур по диаметрам. Вверху — линейные размеры, внизу — нормировка на диаметр центрального диска. Черным на рисунке обозначены внешние структуры, штриховкой — внутренние кольца из статьи [22].

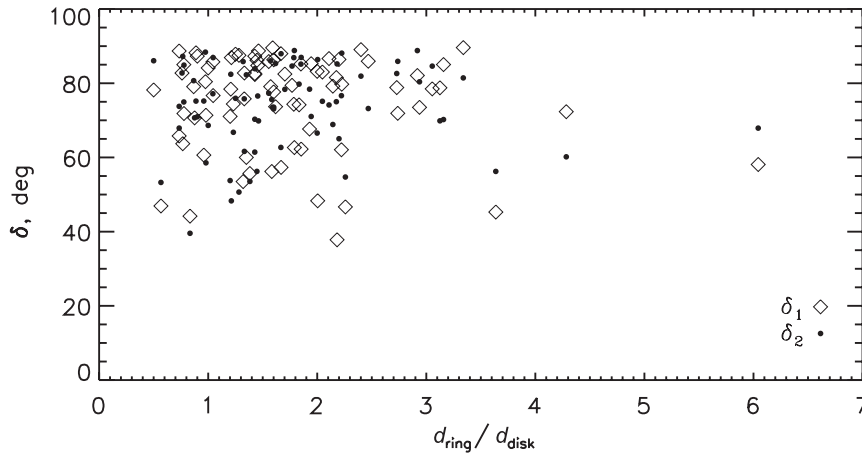
границы областей низкой яркости примерно соответствуют традиционному критерию размера диска по уровню 25 зв. величины с квадратной секунды дуги ( $D_{25}$ ). Для большинства галактик диаметр кольца не превышает трех–четырех диаметров диска при средней величине  $d_{\text{ring}}/d_{\text{disk}} \approx 1.7$ . В этом распределении есть галактика с необычно большим относительным размером кольца — SPRC 42. Ее изображение приведено на Рис. 1 справа. Здесь диаметр видимого с ребра полярного компонента со слегка изогнутыми внешними частями составляет около 47 кпк. Столь протяженную структуру, окружающую относительно небольшую линзовидную галактику, правильнее именовать “полярным диском.” Сейчас нами проводятся дополнительные наблюдения этого интересного объекта в оптическом и радио диапазонах.

В 22% выборки (17 галактик)  $d_{\text{ring}}/d_{\text{disk}} \leq 1$ . Здесь вся яркая часть полярного кольца враща-

ется, пересекая диск основной галактики. Понятно, что пространственная плотность звезд мала и прямые столкновения звездных компонентов не происходят. Но если в полярном кольце присутствует газ, то в нем могут формироваться ударные волны при прохождении через гравитационную яму звездного диска. А если во внутреннем диске есть собственный газ, то возможно и прямое столкновение газовых потоков. К сожалению, в литературе практически отсутствуют теоретические рассмотрения этого процесса, за исключением статьи [23]. Возможно, что именно такая картина — ударная ионизация газа на наклонных орбитах — наблюдается в NGC 7743. Это линзовидная галактика, в которой весь ионизованный газ на  $r = 1.5\text{--}5.4$  кпк находится в плоскости, наклоненной на  $34^\circ$  или  $77^\circ$  относительно звездного диска [24].

Интересно сравнить эти распределения с аналогичными для внутренних полярных колец и дисков, наблюдаемых в околоядерных областях ряда





**Рис. 5.** Зависимость углов наклона от диаметра внешних полярных структур, нормированного на размер галактики. Углы  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  обозначены разными символами.

близких галактик. На Рис. 4 к уже рассмотренным распределениям диаметров и относительных диаметров внешних полярных структур добавлены данные о 47 галактиках с подтвержденными внутренними полярными структурами из статьи [22]. Для внутренних полярных структур диаметр диска галактики принимался равным диаметру  $D_{25}$ , взятому из базы данных NED. Видно, что диаметры внутренних и внешних полярных структур образуют непрерывную последовательность — от сотни парсек до десятков килопарсек. По величине нормированного диаметра обе выборки соприкасаются на  $d_{\text{ring}}/d_{\text{disk}} \approx 0.5$ , так что галактика NGC 5014 (SPRC 40) входит в оба списка — внутренних структур и в каталог SPRC. В тоже время обращает на себя внимание относительный дефицит полярных структур “промежуточного размера” ( $d_{\text{ring}}/d_{\text{disk}} \approx 0.4–0.7$ ). Из выборки SDSS сюда попадает всего две галактики: SPRC 40 и SPRC 68.

Скорее всего, такое бимодальное распределение относительных размеров полярных структур связано с тем, что во всех рассматриваемых случаях стабильность полярных орбит обеспечивается сфероидальным или трехосным гравитационным потенциалом. Но если для устойчивости крупномасштабных структур важен гравитационный потенциал темного гало, то для внутренних колец и дисков доминирующую роль играет балдж (в том числе — трехосный) или центральная перемычка-бар. А в промежуточной зоне радиальных масштабов форма потенциала заметно отличается от сфероидальной/трехосной, так как здесь заметную роль играет плоский звездный диск. Поэтому полярные/наклонные орбиты перестают быть стабильными. Упомянутые в предыдущей главе удары

при пересечении диска веществом на полярных орбитах — проявление этого же эффекта. Видимо не случайно, что в SPRC 40 “полярная” структура промежуточного размера сильно наклонена к галактическому диску и, возможно, нестационарна.

На Рис. 5 показано распределение точек в плоскости ( $d_{\text{ring}}/d_{\text{disk}}$ ,  $\delta$ ). Действительно, хотя разброс наблюдаемых величин довольно велик, видно, что отклонение от полярной плоскости  $\delta = 90^\circ$  чаще наблюдаются для колец, пересекающих центральный диск:  $d_{\text{ring}}/d_{\text{disk}} < 1$ . Наблюдается также уход от полярной плоскости для наиболее крупных колец ( $d_{\text{ring}}/d_{\text{disk}} > 3.5$ ), что, видимо, связано с развитием изгибной неустойчивости при уменьшении плотности гало.

#### 4. ВЫВОДЫ

Рассмотрена выборка из 78 наиболее надежных кандидатов в ГПК, представленных в обзоре SDSS, часть из которых уже имеют кинематические подтверждения. Большинство внешних структур действительно полярные, т.е. наклонены на угол более  $70^\circ$  к плоскости центральной галактики. Показано, что распределение отношений размеров внешних полярных колец и околоядерных полярных дисков (внутренних колец) является бимодальным, с “провалом,” приходящимся на интервал  $0.4 < d_{\text{ring}}/d_{\text{disk}} < 0.7$ . Скорее всего, это вызвано тем, что полярные и наклонные структуры промежуточного размера оказываются короткоживущими. При этом стабильность внутренних полярных колец и дисков поддерживается гравитацией балджа, а внешних — гравитацией темного гало.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа проводилась при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-02-00416-а) и программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН ОФН-17 “Активные процессы в галактических и внегалактических объектах.” А. Моисеев благодарит за поддержку фонд некоммерческих программ “Династия.” В процессе работы над статьей мы использовали базу внегалактических данных NASA/IPAC (NED), управляемую Лабораторией реактивного движения Калифорнийского технологического института по контракту с NASA (США). В работе использовались публичные данные проекта SDSS, поддержанного Фондом Альфреда П. Слоана, институтами-участниками коллаборации SDSS, Национальным научным фондом и Министерством энергетики США.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. V. Moiseev, K. I. Smirnova, A. A. Smirnova, and V. P. Reshetnikov, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **418**, 244, (2011).
2. B. C. Whitmore, R. A. Lucas, D. B. McElroyet, et al., *Astronom. J.* **100**, 1489 (1990).
3. F. Bournaud and F. Combes, *Astronom. and Astrophys.* **401**, 817 (2003).
4. F. Combes, *EAS Pub. Ser.* **20**, 97 (2006).
5. V. Reshetnikov and N. Sotnikova, *Astronom. and Astrophys.* **325**, 933 (1997).
6. A. V. Maccio, B. Moore, and J. Stabel, *Astronom. J.* **636**, 25 (2006).
7. C. B. Brook and F. Governato, *Astronom. J.* **689**, 678 (2008).
8. M. Spavone, E. Iodice, M. Arnaboldi, et al., *Astronom. J.* **714**, 1081 (2010).
9. B. C. Whitmore, in *Warped Disks and Inclined Rings Around Galaxies*, Ed. by S. Casertano, P. D. Sackett, and F. H. Briggs (Cambridge University Press, 1991), p. 60.
10. S. Khoperskov, A. Moiseev, and A. Khoperskov, *Memorie della Societa Astronomica Italiana Suppl.* **25**, 51 (2013).
11. S. A. Khoperskov et al., submitted to *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*
12. E. Hubble, *Astrophys. J.* **64**, 321 (1926).
13. A. V. Moiseev, *Astrophysical Bulletin* **63**, 201 (2008).
14. L. S. Sparke, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **219**, 657 (1986).
15. A. Habe and S. Ikeuchi, *Astrophys. J.* **289**, 540 (1985).
16. R. F. Peletier and D. M. Christodoulou, *Astronom. J.* **105**, 1378 (1993).
17. M. Ideta, S. Hozumi, T. Tsuchiya, and M. Takizawa, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **311**, 733 (2000).
18. E. Iodice, F. Bournaud, F. Combes, et al., *Astrophys. J.* **585**, 730 (2003).
19. G. I. G. Józsa, *Astronom. and Astrophys.* **494**, 489 (2009).
20. G. D. Bothun, Ch. D. Impey, D. Malin, and J. R. Mould, *Astronom. J.* **94**, 23 (1987).
21. K. K. Ghosh and M. Mapelli, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **386**, L38 (2008).
22. A. V. Moiseev, *Astrophysical Bulletin* **67**, 147 (2012).
23. K. Wakamatsu, *Astronom. J.* **105**, 1745 (1993).
24. I. Yu. Katkov, A. V. Moiseev, and O. K. Sil'chenko, *Astrophys. J.* **740**, 83 (2011).

## Are Polar Rings Indeed Polar?

K. I. Smirnova, A. V. Moiseev

We have considered polar ring galaxy candidates, the images of which can be found in the SDSS survey. The sample of 78 galaxies includes the most reliable candidates from the SPRC and PRC catalogs, some of which already have kinematic confirmations. We analyze the distributions of studied objects by the angle between the polar ring and the central disk, and by the optical diameter of the outer ring structures. In the vast majority of cases, the outer structures lie in the plane close to polar (within  $10^\circ$ – $20^\circ$ ) which indicates the stability of the corresponding orbits in the gravitational potential of the halo. Moderately inclined outer structures are observed only in about 6% of objects which probably indicates their short lifetime. In such an unstable configuration, the polar ring would often cross the disk of the galaxy, being smaller than it in the diameter. We show that the inner polar structures and outer large-scale polar rings form a single family in the distribution of diameters normalized to the optical size of the galaxy. At the same time, this distribution is bimodal, as the number of objects with  $d_{\text{ring}} = (0.4\text{--}0.7) d_{\text{disk}}$  is small. Such a shape of size distribution is most likely due to the fact that the stability of polar orbits in the inner regions of galaxies is maintained by the bulge or the bar, while in the outer regions it is provided by the spheroidal (or triaxial) halo.

Keywords: *galaxies: peculiar—galaxies: photometry*