

УДК 524.74-42

ВНУТРЕННИЕ ПОЛЯРНЫЕ КОЛЬЦА И ДИСКИ: НАБЛЮДАЕМЫЕ СВОЙСТВА

© 2012 А. В. Моисеев*

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 13 февраля 2012 года; принята в печать 17 февраля 2012 года

По данным литературы составлен список галактик, во внутренних областях которых обнаружены полярные (или сильно наклоненные к основной галактической плоскости) диски и кольца. Список включает 47 галактик всех морфологических типов — от E до Igg. Рассматривается статистика известных из наблюдений параметров полярных структур. Радиус большинства из них не превышает 1.5 кпк. Они одинаково часто встречаются как в галактиках с перемычками, так и без них. В то же время, если галактика обладает баром (или трехосным балджем), это приводит к стабилизации полярного диска так, что его ось вращения, как правило, совпадает с большой осью бара. Более чем у 2/3 всех рассмотренных галактик заметны те или иные следы недавнего взаимодействия, что указывает на прямую связь внешнего окружения с наличием внутренней полярной структуры.

Ключевые слова: *галактики: взаимодействия—галактики: кинематика и динамика—галактики: пекулярные*

1. ВВЕДЕНИЕ

Обычно, когда говорят о присутствии в галактике подсистем, вращающихся во взаимноортогональных плоскостях, имеют в виду так называемые галактики с полярными кольцами (ГПК). Здесь центральная галактика (как правило, раннего типа — SO/E) окружена внешним кольцом или даже звездно-газовым диском, размером до нескольких десятков килопарсек, расположенным примерно перпендикулярно к галактической плоскости. Первые работы о внутренней кинематике ГПК датируются концом 70-х годов прошлого века, а их массовое изучение началось после публикации Whitmore и др. фотографического каталога кандидатов в ГПК [1]. Несмотря на недостаток детальной информации о динамике, эволюции и истории звездообразования в ГПК, основные ключевые вопросы можно считать решенными. В присутствии трехосного или сфероидального темного гало полярная ориентация является стабильной относительно дифференциальной прецессии, так что кольцо может совершить много оборотов вокруг центральной галактики не разрушаясь. Численные модели показывают, что ГПК являются результатом взаимодействия с внешней материей, момент вращения которой перпендикулярен оси вращения галактики. В качестве основных механизмов называют захват вещества

с галактики-донора, слияние двух ортогонально-ориентированных дисков, а для наиболее массивных и протяженных колец — аккреция газа из межгалактических филаментов (см. обзор и ссылки в работе [2]).

Несмотря на относительно редкую встречаемость среди близких галактик, феномен внешних полярных колец достаточно широко известен. В то же время, в литературе описаны случаи внутренних полярных колец и дисков, размер которых обычно составляют менее одного килопарсека. И этот феномен значительно менее известен, что может объясняться, в том числе, и меньшей “наглядностью” таких структур, как правило, незаметных на оптических изображениях галактик, в отличие от “классических” ГПК. Чтобы выделить внутренний полярный или наклонный диск на фоне яркого балджа, требуются достаточно большие усилия, прежде всего — получение детальной информации о движениях газовой и звездной компонент в центральных областях галактик.

Интересно, что внутренние полярные структуры (ВПС) были известны еще до того, как феномен ГПК получил признание и подтверждение. Так, при спектральных наблюдениях Sc-галактики NGC 3672 был обнаружен значительный градиент лучевых скоростей вдоль ее малой оси [3], что, по мнению авторов, указывало на то, что ось вращения околюядерного ($r < 350$ пк) газа составляет значительный угол с осью вращения

*E-mail: moisav@gmail.com

галактики. Предложенное альтернативное объяснение — сжатие газового диска в плоскости галактики — представляется менее убедительным. Позже, Беттони и др. [4], по результатам длинно-целевой спектроскопии галактики NGC 2217 показали, что внутри центрального килопарсека диск ионизованного газа изгибается так, что вращение происходит в плоскости, перпендикулярной звездному диску галактики, причем ось вращения этого полярного диска практически совпадает с большой осью звездного бара NGC 2217. В последующее десятилетие сходные кинематически выделенные структуры были обнаружены рядом авторов при детальном изучении внутренней кинематики других близких галактик ранних типов. Отметим, прежде всего, работы О. К. Сильченко с коллегами, выполненные на 6-м телескопе САО РАН с помощью панорамной спектроскопии [5–7], а также публикации группы из университета Падуи [8, 9]. Опубликованный в 2003 г. список галактик с подтвержденными ВПС содержал уже 17 объектов [10]. В последующее время разные группы представили довольно обширный наблюдательный материал, посвященный обнаружению и исследованию таких структур. Этому во много способствовал обзор кинематики и звездного населения близких галактик ранних типов, проводимый на 4.2-м телескопе WHT, а также исследование химически выделенных ядер галактик на 6-м телескопе САО РАН, выполняемые с помощью интегральных полевых спектрографов SAURON и MPFS соответственно. Показательна работа [11], в которой авторы отобрали для наблюдений с MPFS 8 галактик, у которых на оптических изображениях центральных областей отчетливо видны пылевые полосы, проецирующиеся на ядро, что свидетельствует в пользу присутствия здесь сильно наклоненных к лучу зрения газо-полевых дисков. Построенные поля скоростей ионизованного газа и звезд подтвердили существование внутренних полярных дисков или колец во всех объектах выборки. В работе [12] было показано, что в 50–60% ярких галактик без перемишек наблюдается градиент лучевой скорости вдоль малой оси, что частично может быть объяснено присутствием ВПС. В работе [13] мы кратко представили новый список из 37 галактик с ВПС. Несмотря на то, что число таких объектов даже превышает число кинематически подтвержденных внешних полярных колец, природа их остается неясной. До сих пор нет внятного самосогласованного сценария их формирования, вопросы устойчивости подобных структур не решены. Противоречивы взгляды на связь ВПС с барами галактик и их внешним окружением: наличием спутников, следов взаимодействия и т.д. ([10, 13]).

В данной статье мы представляем обновленный список галактик с внутренними полярными

кольцами и дисками, составленный на основании опубликованных в литературе данных, в том числе основанных и на наших наблюдениях на 6-м телескопе. Достаточно большое число включенных в него объектов позволило рассмотреть ряд статистических закономерностей в свойствах ВПС.

2. СОСТАВЛЕНИЕ СПИСКА

2.1. Критерии отбора

В Таб. 1 собраны основные параметры внутренних полярных структур, описанных в литературе. В колонках под соответствующими номерами представлены следующие данные.

- (1) — имя галактики.
- (2), (3) — морфологический тип согласно NED/RC3 и его цифровой код согласно базе данных HyperLeda¹, ($T = -2$ соответствует S0, $T = 0$ — S0a и т.д.). Для NGC 7468, которая явно не является эллиптической (как указано в LEDA), было принято $T = 9$, в согласии с [44].
- (4) — принятое расстояние (D) в Мпк, согласно HyperLeda.
- (5), (6) — внешний радиус полярной структуры в угловой и линейной мере (r). Во многих статьях авторы сами указывали этот размер. В остальных случаях оценка выполнялась нами на основании данных, приводимых в оригинальных статьях — графиков радиальных изменений позиционного угла кинематической оси (PA_{kin}) или опубликованных полей скоростей. Иногда задача упрощалась тем, что весь наблюдаемый в центре галактики ионизованный газ принадлежит полярной структуре. В этом случае вместо поиска радиуса, где меняется направление градиента лучевой скорости, было достаточно оценить размер области, занятой эмиссионными линиями газа (пример — NGC 4552 и NGC 5129 по данным обзора SAURON). Для некоторых галактик известен только нижний предел этого параметра, ограниченный полем зрения спектрографа.
- (7), (8) — параметры ориентации основного диска галактики: позиционный угол (PA_0) и наклон к лучу зрения (i_0) в градусах в большинстве случаев взяты из оригинальных статей, в остальных — согласно базе данных HyperLeda.
- (9) — позиционный угол большой оси бара (PA_{bar}), указанный в оригинальных статьях, в градусах. В некоторых случаях (NGC 2768, NGC 2841, NGC 6340, NGC 7217) речь идет о “трехосном балдже”, а не о контрастном баре. В

¹<http://leda.univ-lyon1.fr>

NGC 4548 указана ориентация внутренней трехосной структуры, а не внешнего бара (в согласии с [7]). В некоторых случаях авторы оригинальных работ подозревали “скрытую трехосность” внутренних областей по косвенным признакам, но не могли указать точный позиционный угол (например, NGC 3607 [33]).

(10) — большая ось околядерной структуры (PA_1) в градусах. Давалась авторами, либо оценивалась нами по приводимым ими графикам радиальных изменений $PA_{kin}(r)$. Не приводится для некоторых из галактик, данные о внутренней кинематике которых основаны только на длиннощелевой спектроскопии (NGC 4424, NGC 4698, NGC 4941) или для которых авторами строилась пространственная модель внутренней структуры (Agr 220, NGC 1068, NGC 2855, NGC 3227, NGC 7049). Для галактик NGC 3368 и NGC 4111 принятый параметр PA_1 заметно отличается от оценки по PA_{kin} и определялся по ориентации внутреннего пылевого кольца. Мы считаем, что здесь, в поле скоростей по лучу зрения, наблюдается суперпозиция двух газовых подсистем, либо наклонная структура нестационарна. Для NGC 5014 параметры ориентации определялись по SDSS-снимку, на котором заметно узкое голубое кольцо [37].

(11) — наклон внутренней структуры к лучу зрения (i_1), в градусах. Оценивался так же как и PA_1 , с теми же замечаниями по поводу отдельных галактик. К сожалению, во многих случаях оценить этот параметр не удастся, поэтому приводится либо предполагаемый диапазон значений, либо нижний предел, когда ясно, что внутренний диск заметно наклонен (NGC 3414, NGC 7742 и т.д.). Для NGC 2787 и NGC 2911 приводится наша оценка по ориентации пылевой структуры.

(12) — угол наклона Δi внутренней структуры к плоскости диска. Знаком * отмечены оценки из литературы, в остальных случаях он вычислялся нами (см. далее, раздел 3.4). Для NGC 1068 и NGC 3227 указано $\Delta i > 90$, это означает, что самые внутренние части околядерных газовых дисков изогнуты столь сильно, что орбиты вновь приближаются к основной плоскости галактики.

(13) — комментарий, указывающий на наблюдаемый состав структуры (H II — ионизованный газ, H I — нейтральный, CO — молекулярный, s — звезды) и на ее строение: w — сильный изгиб (warped), r — кольцо (ring), т.е. имеется дыра в центре.

(14) — ссылки на использованную литературу.

Всего в Таблице 1 перечислено 47 галактик, для которых имеются веские аргументы в поль-

зу того, что в их внутренних областях² заметная часть излучающей материи стационарно вращается в плоскости, сильно наклоненной к плоскости основного диска. Как правило, о такой динамической конфигурации напрямую говорят авторы статей, указанных в последней колонке Таб. 1. В случае остальных объектов мы считаем, что наличие полярных (или сильно наклоненных) орбит является наиболее разумным объяснением наблюдаемой околядерной кинематики. Для такого заключения необходимо иметь поле скоростей, полученное с достаточно высоким пространственным разрешением. Исторически первым методом был анализ нескольких спектральных разрезов с длинной щелью, более надежные результаты можно получить с помощью панорамной (3D, integral-field) спектроскопии в оптическом диапазоне, либо с помощью радиоинтерферометрии при наблюдениях в линиях молекулярного газа. Интересен пример галактики NGC 253, в которой обнаружена ВПС по наблюдениям в радиорекомбинационной линии H92 α [19].

В работе [21] терминами “кинематический разворот” (kinematic twist) и “кинематически выделенный компонент” (kinematically decoupled component) обозначены случаи заметного (более чем на 10°–20°) изменения PA_{kin} с ростом расстояния от центра в наблюдаемом поле лучевых скоростей. Отметим, что не всегда такое рассогласование должно быть связано с вращением по орбитам, лежащим вне плоскости диска галактики. Поворот PA_{kin} может также быть вызван движениями в плоскости галактики, если кроме вращения присутствуют еще и радиальные движения в гравитационном поле центрального бара или трехосного балджа. К счастью, сравнивая поле скоростей с результатами изофотного анализа изображений галактик, можно понять какой именно тип движений имеет место (см. обсуждение и ссылки в работе [25]). Кроме того, трехосный потенциал и наклонный диск должны по разному проявлять себя в распределении лучевых скоростей вдоль большой и малой осей галактики [10]. Однако само по себе отсутствие градиента лучевых скоростей вдоль малой оси не является достаточным критерием присутствия ВПС, поэтому в нашем списке отсутствуют многие кандидаты из работы [12]. С другой стороны, наша выборка включает большинство галактик раннего типа из обзора SAURON, для которых различие между PA_{kin} , определяемого по полям скоростей газа и звезд, превышает 30°. Исключение составили объекты, в которых диск ионизованного газа простирается за край поля зрения спектрографа,

²Под внутренними областями мы имеем в виду масштабы меньше или сравнимые с характерными размерами балджа или внешнего диска.

Таблица 1. Список галактик с внутренними полярными структурами

Name (1)	Type (2)	T (3)	D , Мпк (4)	r , arcsec (5)	r , кпк (6)	PA_0 , deg (7)	i_0 , deg (8)	$PA_{\text{бар}}$, deg (9)	PA_1 , deg (10)	i_1 , deg (11)	Δi , deg (12)	Comm. (13)	Ref (14)
Arp 220	S?	9.3	81.3	0.3	0.12	40	40	—	—	—	90*	CO, w	[14]
IC 1548	S0	-4.0	85.1	1.5	0.62	78	59	—	349	—	—	HII	[15]
IC 1689	S0?	-2.0	67.6	10	3.28	164	90	—	74	30	90	HII+s, r	[16]
M 31	SA(s)b	3.0	0.78	180	0.70	35	77	—	325	40	88	CO+HII, r	[17]
Mrk 33	Im pec?	9.9	24.2	12	1.41	116	59	—	163	47	39, 86	HII+s	[18]
Mrk 370	pec?	0.0	12.0	11	0.61	346	45	—	260	—	55-70*	HII, w	[18]
NGC 253	SAB(s)c	5.1	3.4	5	0.083	230	79	—	324	> 60	78-90	HII, r	[19]
NGC 474	SA0 ⁰ (s)	-2.0	32.7	> 10	> 1.65	330	26	—	256	—	—	HII, r?	[20, 21]
NGC 1068	(R)SA(rs)b	3.0	16.1	2	0.16	278	40	48	—	—	> 90*	CO, w	[22]
NGC 2217	(R)SB0 ⁺ (rs)	-0.6	20.7	3	0.30	6	21	111	20	—	90*	HII, w	[4]
NGC 2655	SAB0/a(s)	0.1	24.2	> 15	> 1.76	85	54	90	20	—	—	HI+HII, r	[11, 23, 24]
NGC 2681	(R')SAB0/a(rs)	0.4	13.2	5	0.32	148	25	25	90	—	—	HII+s	[25]
NGC 2732	S0	-2.0	32.4	5	0.78	67	90	—	351	30-70	77-83	HII	[11]
NGC 2768	E6?	-4.5	23.6	16	1.83	95	90	—	347	30-60	74-81	HII+CO	[11, 26, 27]
NGC 2787	SB0 ⁺ (r)	-1.0	7.5	6	0.22	109	62	149	72	50	32, 76	HII	[11]
NGC 2841	SA(r)b?	3.0	12.6	5	0.31	150	65	154	68	—	—	HII	[5, 28]
NGC 2855	(R)SA0/a(rs)	-0.2	26.5	4	0.51	117	42	—	—	—	73*	HII, w	[29]
NGC 2911	SA0(s)? pec	-2.0	47.0	4	0.91	140	56	—	63	75	71, 88	HII+s	[11]
NGC 3227	SAB(s)la pec	1.5	18.3	0.9	0.08	158	56	138	—	—	> 90*	CO, w	[30]
NGC 3368	SAB(rs)ab	2.2	13.7	3	0.20	135	48	125	35	—	—	HII	[25, 31]
NGC 3379	E1	-4.8	14.3	3	0.21	253	40	—	296	—	—	HII+s	[20, 21, 31]
NGC 3384	SB0 ⁻ (s)?	-2.7	13.7	5	0.33	55	57	132	226	—	—	s	[31]
NGC 3414	S0 pec	-2.0	25.2	9	1.10	179	52	—	68	> 60	56, 86	HII	[11]

Таблица 1. (Продолжение)

Name (1)	Type (2)	T (3)	D , Мпк (4)	r , arcsec (5)	r , кпк (6)	PA_0 , deg (7)	i_0 , deg (8)	PA_{bar} , deg (9)	PA_1 , deg (10)	i_1 , deg (11)	Δi , deg (12)	Comm. (13)	Ref (14)
NGC 3599	SA0?	-2.0	20.3	> 7	0.69	47	28	-	335-290	-	40-60*	НII, w, r	[32]
NGC 3607	SA0 ⁰ (s)?	-3.2	22.8	2	0.22	300	34	-	320	-	-	НII	[33]
NGC 3608	E2	-4.8	22.9	4	0.44	255	47	-	195	-	-	НII	[33]
NGC 3626	(R)SA0 ⁺ (rs)	-0.9	20.0	4	0.39	341	32	-	190	-	58, 87*	НII	[32]
NGC 4100	(R')SA(rs)bc	4.1	19.7	12	1.14	346	73	-	358	60	25, 55*	НII	[34]
NGC 4111	SA0 ⁺ (r)?	-1.3	14.9	> 8	> 0.59	150	84	-	60	-	84-90	НII	[11]
NGC 4233	S0 ⁰	-2.0	35.1	7	1.19	176	87	200	76	90	-80	НII	[11]
NGC 4424	SB(s)a?	1.0	16.8	3	0.21	95	63	-	-	-	-	НII	[35]
NGC 4548	SB(rs)b	3.1	15.6	3	0.23	145	37	110	236	-	-	НII	[7]
NGC 4552	E0-1	-4.6	15.6	5	0.38	110	14	-	32	-	-	НII	[20], [21]
NGC 4579	SAB(rs)b	2.9	23.6	18	2.06	96	39	58	154	-	-	НII	[23]
NGC 4672	SA(s)a pec	1.1	45.7	6	1.32	46	90	-	134	-	88-90	s	[8, 9]
NGC 4698	SA(s)ab	1.7	16.1	5	0.39	170	74	-	-	-	-	НII+s	[8]
NGC 4941	(R)SAB(r)ab?	2.1	21.2	2	0.21	15	37	0	-	-	-	НII	[35]
NGC 5014	Sa?	1.4	19.5	22	2.08	100	81	-	47	80	52-56	НI, r	[36, 37]
NGC 5198	E1-2?	-4.8	39.3	4	0.76	14	49	-	32	-	-	НII+s	[20, 21]
NGC 5850	SB(r)b	3.1	38.7	6	1.13	335	37	115	35	-	-	НII	[25]
NGC 6340	SA0/a(s)	0.4	22.4	12	1.30	70	20	85	330	40-60	40, 65*	НII, w	[38, 39]
NGC 7049	SA0 ⁰ (s)	-1.9	29.9	5	0.73	58	60	-	-	-	89*	НII	[29]
NGC 7217	(R)SA(r)ab	2.5	16.7	3	0.24	268	30	60	329	-	-	НII+s	[6, 40, 41]
NGC 7280	SAB0 ⁺ (r)	-1.3	28.2	2	0.27	258	52	60	9	> 80	68-80	НII	[42, 43]
NGC 7468	E3? pec	9.0	31.8	6	0.92	180	45	-	120	60	49, 87	НII	[44]
NGC 7742	SA(r)b	2.8	24.7		0.36	128	9	-	130	> 35	> 26	НII	[40]
UGC 5600	S0?	-1.8	44.7	10	2.17	182	50	-	260	60	65, 80*	НII, w, r	[45, 46]

очевидно, являясь внутренней частью полярных структур, наблюдаемых в нейтральном водороде далеко за пределами звездного диска галактики. Это относится к NGC 2685 — прототипу классических ГПК и галактике с внешним УФ-кольцом NGC 4262 ([47], см. также карту распределения HI в работе [48]).

Кроме возмущающего действия трехосного потенциала, резкое изменение направления градиента лучевой скорости может быть вызвано и радиальными потоками газа, обусловленными центральной вспышкой звездообразования или джетом из активного ядра. Так, Soccato et al. [12], основываясь на данных щелевой спектроскопии предположили существование ВПС в NGC 6810, однако последующие исследования показали, что здесь центральная кинематика газа определяется сверхветром от вспышки звездообразования [49]. По сходной причине мы исключили из рассмотрения ряд известных галактик с ионизационными конусами, в которых движения ионизованного газа в области центрального килопарсека, скорее всего, вызваны активностью ядра, несмотря на то, что ряд авторов находят здесь наклонные диски (Mrk 3 — [50], NGC 5252 — [51] и т.д.).

Отметим, что само по себе наличие разворота PA_{kin} не является строго обязательным. К примеру, в NGC 3607 и NGC 7742, видимых практически плашмя, кинематические позиционные углы для внешних и внутренних областей почти совпадают ($PA_1 \approx PA_0$). Однако наблюдаемая в центре амплитуда лучевых скоростей газа столь велика, что наиболее разумное объяснение этому — вращение диска, сильно наклоненного к лучу зрения. Интересен случай эллиптической галактики NGC 5198, где, судя по представленным в работах [20, 21] полям скоростей, присутствуют две полярные структуры — внутренняя звездная ($r < 2''$) и более протяженная газовая ($r < 5''$), не совпадающие друг с другом. Причем позиционный угол газового диска почти совпадает с PA_{kin} внешних областей звездного поля скоростей, но выглядит противоречащим относительно него. Но так как наблюдаемая амплитуда кривой вращения газа очень велика, он явно находится вне основной плоскости звездного сфероида, в которой вращается более внешний газ.

2.2. Галактики, не вошедшие в список

При составлении списка мы старались просмотреть максимально возможное число наблюдательных работ, посвященных этой теме. К сожалению, далеко не всегда о присутствии полярной структуры говорится в аннотациях и выводах статей. Поэтому мы заранее извиняемся перед

авторами работ, которые мы, возможно, пропустили. В то же время в нашу выборку не включены некоторые известные кандидаты на наличие ВПС. Кроме уже перечисленных галактик с протяженными полярными дисками и активными ядрами с конусами ионизации, это объекты, для которых, на наш взгляд, недостаточно информации или она слишком противоречива. К ним относятся: упомянутая во Введении NGC 3672 (галактика, в которой впервые предположили существование ВПС), а также большинство остальных галактик с градиентом лучевой скорости вдоль малой оси из списка работы [12]; известное по данным SAURON/OASIS кинематически выделенное ядро в NGC 4150 [52]; NGC 7332, в которой хотя и есть указания на наличие наклонного диска [43], но поле скоростей имеет весьма иррегулярный вид; NGC 524, в которой заподозрили полярный диск [38], но новые данные обнаруживают здесь более сложную структуру, состоящую из двух противоречащих дисков [53]; NGC 3367, в которой, по данным [54], наблюдается разворот внутренних изовелл на поле лучевых скоростей, но интерпретация затруднена; M83, в которой по морфологии пылевых полос предположили наличие ВПС [55], но это не подтвердили последующие исследования околярной кинематики.

В недавней работе [56] приводятся сведения о кинематических параметрах в галактиках ранних типов в рамках обзоров ATLAS^{3D}. В их списках обнаруживается еще дюжина галактик, в которых различие позиционных углов, измеряемых по полям скоростей газа и звезд, превышает 40° – 50° . Однако мы не можем быть уверены, что речь идет именно о внутренних полярных дисках, так как авторы не приводят ни зависимостей $PA_{\text{kin}}(r)$, ни полей скоростей ионизованного газа. Также вне нашего рассмотрения оказываются объекты в которых PA_{kin} совпадает с фотометрической большой осью во внутренних областях, и с малой — во внешних (NGC 4365, NGC 4406 и др.), что, скорее всего, связано с трехосностью этих эллиптических галактик (см. обзор [57]).

3. СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

3.1. Общие замечания

Составленный список подтверждает точку зрения о том, что внутренние полярные структуры — весьма распространенный феномен [12]. Действительно, число известных нам галактик, содержащих ВПС, в полтора раза превосходит общее количество галактик с кинематически подтвержденными внешними полярными кольцами (~ 30 объектов, см. [37]). При этом, в отличие от “классических”

ГПК, среди ВПС детальным наблюдениям пока доступны только относительно близкие объекты: подавляющее большинство галактик из Таб. 1 лежит от нас на расстоянии менее 30–40 Мпк, включая три, принадлежащих Местному Обьему ($D < 10$ Мпк). И если, имея в виду ГПК, корректно говорить о кольцах, пусть и достаточно широких, то при рассмотрении ВПС, как правило (в 39 из 47, т.е. в 83% случаев), речь идет о геометрических дисках, в которых внутренний диаметр незначителен в сравнении с внешним. К сожалению, для выяснения их детального строения пока не хватает наблюдательных данных с высоким пространственным разрешением. Как следует из Таб. 1, в основном встречаются только газовые диски и кольца, в списке всего одна галактика (NGC 3384) с чисто звездным полярным диском, еще 6 структур отмечены как звездно-газовые. Здесь работает эффект селекции, так как методически значительно проще выделить эмиссионные линии ионизованного или молекулярного газа, чем разделить наблюдаемый по лучу зрения абсорбционный спектр на звезды, принадлежащие балджу, полярному диску и основному диску галактики. Очевидно, что многие из описанных ВПС реально являются звездно-газовыми, просто заметить кинематическое проявление звезд проблематично. Например, выделяемый по своим кинематическим свойствам звездный полярный диск в NGC 7217 заметно компактнее, чем газовый [40]. Ионизация газа в ВПС может (хотя бы частично) объясняться идуцием в них звездообразованием.

3.2. Размеры

На Рис. 1 приведена гистограмма распределения размеров внутренних полярных структур. Видно, что по отношению к ним справедливо использование термина “центральный килопарсек”: средний медианный радиус составляет ~ 600 пк, 85% всех ВПС имеет размер менее 1.5 кпк. Такая компактность скорее всего связана с тем, что для устойчивого существования полярных орбит, относительно основного диска, необходим стабилизирующий фактор — сфероидальный или трехосный потенциал. Для классических ГПК это гравитационный потенциал темного гало, а для внутренних структур — потенциал балджа или бара (см. далее раздел 3.5). Это может объяснять практически полное отсутствие известных полярных структур промежуточного размера, с $r = 2\text{--}10$ кпк. По-видимому, на этих масштабах дифференциальная прецессия, возникающая под воздействием гравитационного потенциала звездного диска, приводит к катастрофически быстрому уменьшению наклона орбит и их “выпадению в диск”. Отметим, что даже у ВПС в IC 1689 — самой большой в нашем

списке — радиус меньше, чем эффективный радиус балджа ($r_e = 4$ кпк по данным [58]). Возможно, что именно такая картина сейчас наблюдается в NGC 7743 — линзовидной галактике, в которой весь ионизованный газ на $r = 1.5\text{--}5.4$ кпк находится в плоскости, наклоненной на 34° или 77° относительно звездного диска [59].

Провал в распределении для $r < 200$ пк, очевидно, вызван ограниченным пространственным разрешением большинства наблюдений, так как этот масштаб на $D = 30$ Мпк соответствует угловому размеру около $2''$.

3.3. Морфологические типы

Известно, что внешние полярные кольца наблюдаются, как правило, вокруг галактик ранних типов — E/S0 [60, 61]. Одно из объяснений этого в том, что в этих галактиках собственные внутренние запасы газа невелики, так что газовые облака на полярных орбитах не испытывают столкновения с газом в основной галактической плоскости. Насколько это верно для внутренних полярных структур? Оценки, выполненные Soccato и др. [12] показали, что градиент лучевых скоростей газа вдоль малых осей галактик наблюдается преимущественно в галактиках S0 и спиральных ранних типов, что, возможно, указывает на связь этого феномена с присутствием мощного балджа. Однако сами авторы отмечали, что далеко не всегда градиенты скорости вдоль малой оси вызваны вращением в полярной плоскости.

Если же рассмотреть только галактики с подтвержденными ВПС, то распределение по морфологическим типам оказывается более широким (Рис. 1, справа). Медианное среднее здесь $T = 0$, т.е. только половина всех галактик относится к типу S0a и более ранним. А почти треть из них — объекты типа Sb и более поздние, включая даже несколько галактик Sm и Irr, в которых балдж обычно мал. Отметим, что реальное число галактик поздних типов должно быть занижено эффектом селекции, так как массовые обзоры кинематики околоядерных областей с приборами MPFS и SAURON были нацелены прежде всего на галактики E/S0. Таким образом, можно предварительно заключить, что для существования околоядерного полярного или наклонного диска морфологический тип галактики оказывается менее существенным, чем для ГПК. По-видимому, эффект столкновения газа на полярных орбитах с газом основного диска не является критичным при образовании этих структур. Возможно, что формирующийся внутренний полярный диск успевает предварительно “расчистить” область центрального килопарсека. Во всяком случае, известны примеры сильно изогнутых ВПС, когда газ вблизи ядра вращается

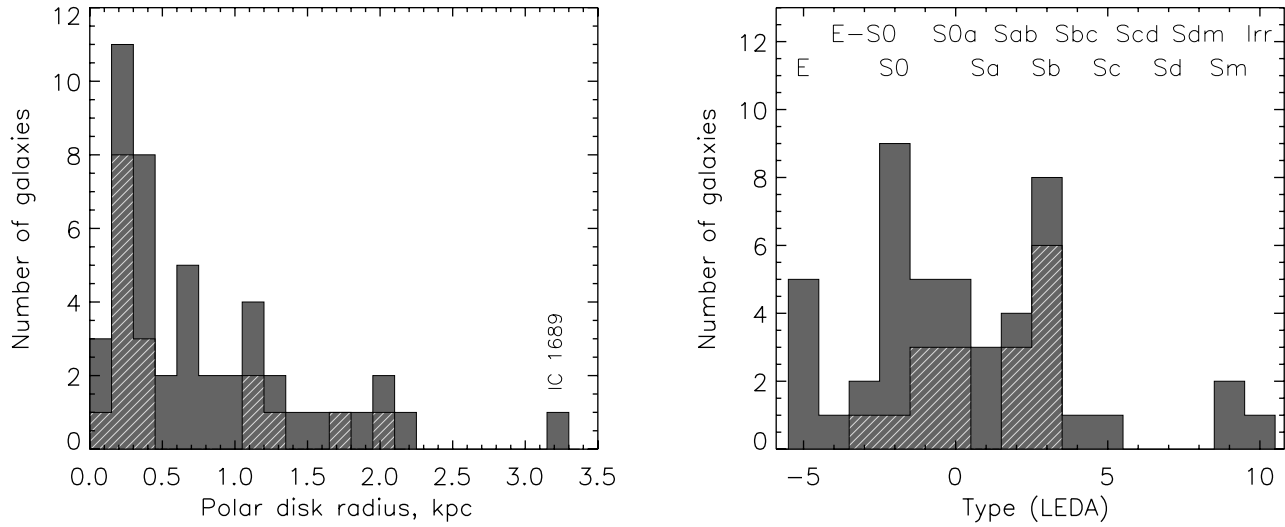


Рис. 1. Гистограммы распределения внутренних полярных структур по размерам (слева) и морфологическим типам галактики (справа). Серым цветом показаны все галактики, штриховкой — только с барами и трехосными балджами.

в полярной плоскости, а с ростом расстояний от центра орбиты укладываются в плоскость галактики (см. следующий раздел 3.4). Возможно, что в некоторых случаях на наклонные орбиты переходит газ из основной плоскости галактики под действием гравитационного потенциала перемычки (раздел 3.5). Заметим, однако, что гистограммы на Рис. 1 не показывают каких-либо достоверных отличий в распределении галактик с перемычками.

3.4. Наклонный или полярный?

Употребляя термин “полярный” по отношению к ВПС, следует помнить о том, что далеко не всегда удается точно измерить наклон плоскости внутреннего диска к внешнему. Легко показать ([62]), что этот угол Δi выражается соотношением:

$$\cos \Delta i = \pm \cos(PA_0 - PA_1) \sin i_0 \sin i_1 + \cos i_0 \cos i_1. \quad (1)$$

Чаще всего известны только параметры ориентации внешнего диска (PA_0 , i_0) и направление большой оси внутренней структуры PA_1 . Но чтобы в рамках модели кругового вращения определить по наблюдаемой кинематике угол наклона i_1 орбит к лучу зрения, требуется детальное поле скоростей с большим числом независимых точек. Кроме того, устойчивое решение обычно удается получить только для заметного наклона диска к лучу зрения ($i_1 > 30-40^\circ$). Исключение — случай чисто

полярного диска в галактике, видимой с ребра ($PA_0 = PA_1 + 90^\circ$, $i_0 = 90^\circ$). Неопределенность со знаком в первом слагаемом в (1) вызвана тем, что PA и i не полностью характеризуют положение плоскости относительно наблюдателя — требуется еще знать направление момента вращения, т.е. какая сторона диска — ближняя, а какая — дальняя. Поэтому для ряда галактик с $i_0 < 90^\circ$ в Таблице 1 даны оба возможных варианта решения (1). Одно из немногих исключений — полярное кольцо в Туманности Андромеды (M31). Его относительно большой угловой размер позволил авторам работы [17] точно понять, как именно оно ориентированно относительно диска галактики.

Оценить Δi удалось для 27 объектов, что чуть больше половины всей выборки. Показанные на Рис. 2 гистограммы очень напоминают распределение по этому же параметру внешних полярных колец из работы [60]. Несмотря на вышеописанную неопределенность с оценкой Δi , внутренние наклонные структуры в своем большинстве оказываются действительно полярными, т.е. перпендикулярными к внешнему диску галактик. Так, $\Delta i > 70^\circ$ в 23 из 27 (т.е. 85%) случаев.

С другой стороны, даже если из двух решений для Δi отбирать вариант наиболее близкий к 90° (Рис. 2, справа), все равно существуют ВПС, расположенные под более умеренным углом Δi равным $50^\circ-60^\circ$: NGC 3599, NGC 5014 и NGC 6340. Такие структуры вряд ли будут устойчивыми: они должны достаточно быстро сваливаться в галактическую плоскость под действием дифференциальной прецессии. Косвенным указанием на это

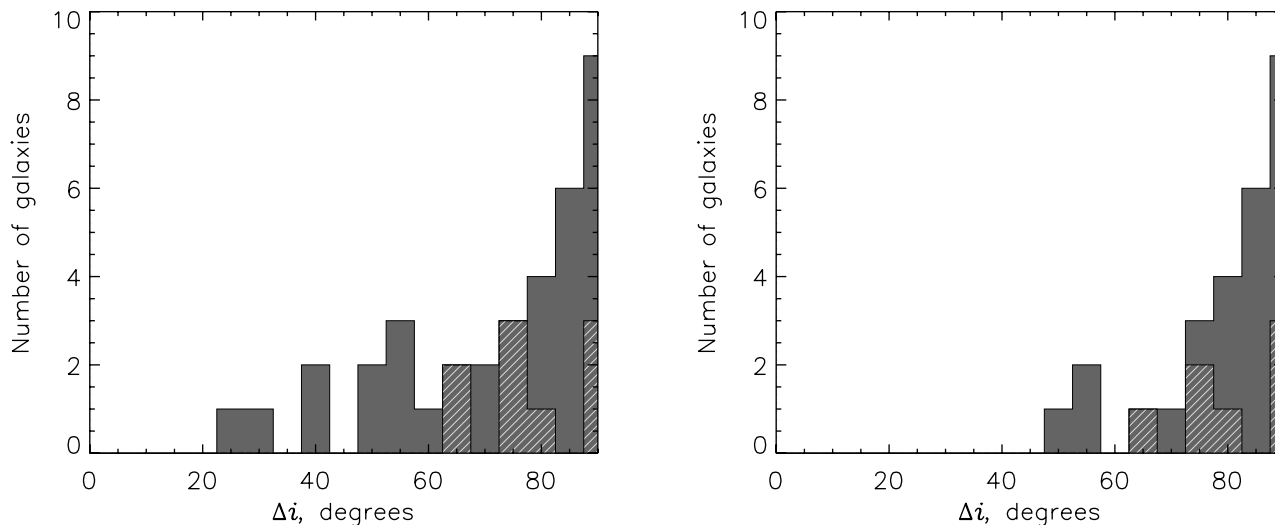


Рис. 2. Распределения по углу наклона внутренних колец и дисков к основному диску галактики. Слева — весь возможный диапазон решений для Δi из (1), справа — в случае двух решений — бралось большее. Серым цветом показаны все галактики, штриховкой — только с барами и трехосными балджами.

является наблюдаемый изгиб газовых дисков в NGC 3599 и NGC 6340. Отметим, что похожие изгибы (warр) обнаруживаются еще в семи галактиках выборки. Во многих случаях авторам удается построить детальную пространственную модель такого изогнутого диска, воспроизводящую не только кинематику, но и распределения яркости ионизованного (NGC 2855 и NGC 7049) или молекулярного (Aрр 220, NGC 1068, NGC 3227) газа (см. ссылки в Таблице 1).

3.5. Бары и трехосные балджи

Связь внутренних полярных структур с неосесимметричным гравитационным потенциалом широко обсуждается в литературе, начиная с работы [4], впервые описывающей случай околюядерного полярного диска в галактике с перемычкой NGC 2217, ориентированный практически перпендикулярно к большой оси бара. В дальнейшем сходное расположение ВПС было обнаружено и во многих других галактиках с перемычками, перечисленными в Таблице 1. Многократно отмечалось, что такое расположение полярного диска вдоль наименьшего сечения бара — т.е. в одной из главных плоскостей трехосного потенциала — должно быть устойчивым. Причем вместо крупномасштабного бара достаточно, если в галактике присутствует несферический (трехосный) балдж [10, 28, 38].

На Рис. 3 мы приводим распределение всех галактик нашей выборки по углу $\Delta\psi$ между большой осью неосесимметричной звездной структуры

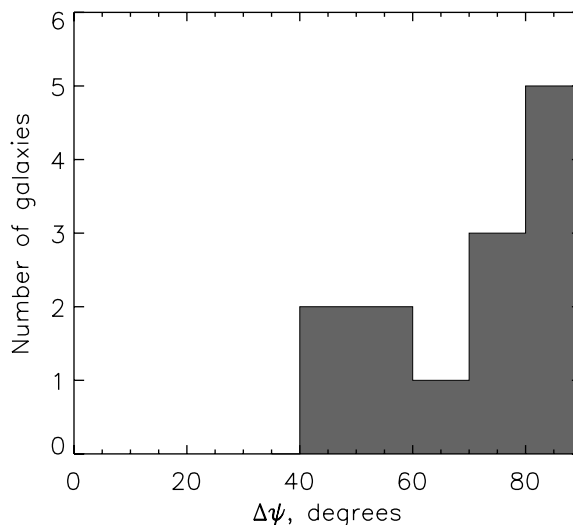


Рис. 3. Распределения по углу между большой осью полярного диска и бара (трехосного балджа).

(бара или трехосного балджа) и большой осью ВПС (в проекции на галактическую плоскость):

$$\Delta\psi = \arctan \frac{\sin(PA_{\text{bar}} - PA_0) \cos i_0}{\cos(PA_{\text{bar}} - PA_0)} - \arctan \frac{\sin(PA_1 - PA_0) \cos i_0}{\cos(PA_1 - PA_0)}. \quad (2)$$

Несмотря на относительно небольшую статистику, хорошо видна тенденция полярных структур выстраиваться ортогонально большой оси бара ($\Delta\psi = 90^\circ$). Пока в литературе отсутствуют детальные расчеты процесса формирования таких внутренних дисков, скажем, в результате захвата внешних газовых облаков с соответствующим направлением момента вращения. Обычно в статьях используют звездно-динамическую аналогию с полярными или изогнутыми дисками, наблюдаемыми в глобальном трехосном потенциале эллиптических галактик (см. обсуждение в [10, 11]). Во всяком случае, скорее всего именно трехосность потенциала отвечает за стабилизацию внутренних полярных дисков в околоядерных областях эллиптических галактик (NGC 3608, NGC 4552 и др.). Кроме сценария с захватом газовых облаков с соответствующим орбитальным моментом, часто цитируют работы [55] и [63]. В первой из них высказывалось предположение об образовании внутреннего полярного диска в результате воздействия гравитационного потенциала бара на изогнутый газовый диск галактики. Это приводит к потере углового момента в азимутальной и сохранении его в полярной плоскости. В работе [63] Фридли и Бенц с помощью трехмерной численной модели показали, что если часть газа в диске галактики изначально вращалась в противоположном направлении относительно всего остального диска, то в процессе вековой (секулярной) эволюции бара газовые облака занимают стабильные орбиты, сильно наклоненные к плоскости галактики. В многочисленных работах О. К. Сильченко с коллегами неоднократно подчеркивались случаи одновременного наблюдения полярного диска во внутренних областях галактик и противовращения газ-звезды или звезды-звезды — во внешних. Такая особенность обнаруживается в 9 галактиках нашего списка (см. следующий раздел). “Затравоженный” противовращающийся компонент скорее всего является результатом поглощения карликового спутника. Отметим, однако, два момента. Во-первых, в моделировании Фридли и Бенц диск получается не полярный, а наклоненный примерно под 45° к плоскости галактики. Во-вторых, предложенные механизмы явно не могут быть основным способом формирования полярных дисков, так как в этом случае следует ожидать повышенное число баров в галактиках с ВПС. Однако на 40 дисковых галактик (тип S0 и более поздний) из нашей выборки приходится только 17 с подтвержденными барами или трехосными балджами³, что составляет

$43 \pm 8\%$ или $33 \pm 7\%$, если не учитывать несферичные балджи⁴. Это хорошо согласуется с известной частотой встречаемости баров среди близких галактик, которая составляет около 45% [64].

Таким образом, мы должны заключить, что хотя бары и влияют на ориентацию полярных дисков, само по себе наличие трехосного потенциала не является абсолютно необходимым для существования ВПС. Конечно, в галактиках может иметься некоторая внутренняя трехосность, малозаметная для стороннего наблюдателя (см., например, обсуждение этого вопроса в [33]). Тем не менее, околоядерные области обычно выглядят более симметричными, чем внешние, не только в галактиках без баров, но и в галактиках с перемычками (внутри Линдбладовских резонансов бара). В статье [32] мы показываем, что NGC 3599 и NGC 3626 обладают внутренней “овальной дисторсией диска”, которая может указывать на когда-то существовавшие бары, разрушенные в процессе секулярной эволюции или под влиянием внешнего воздействия. Но вряд ли такой сценарий годится для большинства остальных галактик без перемычек.

3.6. Внешнее окружение

Еще один часто обсуждаемый вопрос — это связь ВПС с внешним окружением галактик и процессами их взаимодействия. По аналогии с внешними полярными кольцами естественно ожидать, что и околоядерные полярные структуры могут формироваться в результате захвата материи (газовых облаков или карликового спутника) с орбитальным моментом, ортогональным моменту вращения диска галактики. Обычно при таком обсуждении рассматривались индивидуальные случаи, когда либо есть явные следы недавнего взаимодействия, либо наоборот — галактика изолирована и выглядит невозмущенной внешним воздействием. Примерами явной связи ВПС с окружением могут служить: NGC 2655 [24], где полярный диск ионизованного газа является внутренней частью сильно изогнутого протяженного диска нейтрального водорода с явными приливными структурами во внешних областях, низко контрастные оболочки (ripples) на оптических снимках NGC 474 [65] и NGC 6340 [39, 66], наличие двух кинематических компонент HI с разным законом вращения в NGC 3414 [67].

в ближнем ИК-диапазоне, оптимальном для поиска баров). Такой подход представляется нам более корректным, чем использование морфологической классификации из RC3/NED.

⁴Здесь и далее в качестве ошибки указана дисперсия биномиального распределения.

³В Таблице 1 угол $PA_{\text{бар}}$ указан для всех галактик, где нам удалось найти упоминание о наличии внутренней трехосной структуры. В основном мы ориентировались на работы, посвященные детальному анализу морфологии галактик (в том числе с использованием изображений

Таблица 2. Признаки воздействия окружения

Name (1)	Optical (2)	HI (3)	counter-rotation (4)	Name (1)	Optical (2)	HI (3)	counter-rotation (4)
Arp 220	[65]			NGC 3414		[67]	[11]
IC 1548			[15]	NGC 3607		[48]	
IC 1689	[58]			NGC 3608		[48]	[76]
M 31	[68]	[69]		NGC 3626			[77]
Mrk 33		[70]		NGC 4111		[78]	
NGC 253	[71]		[19]	NGC 4424	[79]	[80]	
NGC 474	[65]			NGC 4672	[81]		
NGC 2655	[24]	[24]		NGC 4698		[82]	
NGC 2681	[72]			NGC 5014		[36]	
NGC 2768		[67]		NGC 5850	[83]		
NGC 2787		[73]		NGC 6340	[39, 66]		
NGC 2841			[28]	NGC 7217			[84]
NGC 2855	[74]			NGC 7280			[42]
NGC 3227	[65]			NGC 7468	[85]		
NGC 3368		[75]		NGC 7742			[40]
NGC 3379		[75]		UGC 5600	[46]		
NGC 3384		[75]					

Примером комплексного подхода к проблеме является свежая работа, посвященная статистике различий в кинематике газа и звезд в обзоре ATLAS^{3D} [56], выполненном с помощью панорамного спектрографа SAURON. Но, во-первых, эти результаты касаются только галактик ранних типов, а во-вторых, как мы уже отмечали выше, далеко не каждый случай “кинематического рассогласования” (kinematic misalignment) свидетельствует о вращении на полярных или наклонных орбитах.

В Таб. 2 собраны сведения о тех галактиках нашей выборки, для которых имеются доказательства недавнего (на шкале менее 1–2 млрд. лет) взаимодействия. В столбце (1) дано имя галактики, в (2) — ссылки на работы, указывающие на взаимодействие с компаньоном или на поглощение спутника по данным оптической фотометрии, в (3) — указание на приливные структуры или близкие облака, наблюдаемые в HI, в (4) — указание на наличие противовращающихся компонент в диске галактики. Всего подобные свидетельства удалось собрать для 33 галактик, что составляет $70 \pm 7\%$ всей выборки ВПС. Такая высокая доля галактик

с признаками недавнего взаимодействия позволяет нам заключить, что именно эффекты внешнего окружения играют основную роль при формировании внутренних полярных колец и дисков.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Составлен список галактик, во внутренних областях которых обнаружены полярные (или сильно наклоненные к основной галактической плоскости) диски и кольца. Интересно отметить, что более половины (60%) описанных структур были обнаружены или подтверждены в результате наблюдений на 6-м телескопе САО РАН с помощью панорамного спектрографа MPFS или прибора SCORPIO в режиме сканирующего интерферометра Фабри-Перо. По результатам изучения статистических свойств различных параметров, характеризующих эти внутренние структуры, мы можем сделать следующие выводы.

1. Звездно-газовые полярные диски и кольца встречаются в центральных областях галактик всех морфологических типов.

2. Подавляющее большинство внутренних полярных структур имеют радиус менее 1.5 кпк. Возможно, что это ограничение связано со стабилизирующей ролью балджа.
3. Самые внутренние области этих структур, как правило, расположены в полярной плоскости, с ростом расстояния от ядра часто наблюдается изгиб — приближение орбит к плоскости галактики.
4. Внутренние полярные структуры одинаково часто встречаются как в галактиках с перемычками, так и без них. В то же время, если галактика обладает баром (или трехосным балджем), то это приводит к стабилизации полярного диска так, что его ось вращения совпадает с большой осью бара.
5. У 70% галактик с внутренними полярными структурами заметны те или иные следы недавнего взаимодействия, что указывает на ведущую роль внешнего окружения в формировании этих пекулярных структур.

Пока сложно оценить частоту встречаемости околоядерных полярных дисков, так как наша выборка составлена из очень разнородных источников. Можно лишь утверждать, что поскольку число таких галактик в полтора раза превосходит число кинематически подтвержденных ГПК, а расположены они в среднем значительно ближе, то их доля среди достаточно ярких галактик должна заметно превышать известные оценки встречаемости ГПК [1, 61] и составлять не менее 3–5%. Возможно, что тщательный анализ кинематики всех галактик из обзора ATLAS^{3D}, а не только ранних типов (как в работе [56]), позволит значительно точнее оценить долю галактик с ВПС.

В отличие от внешних протяженных полярных колец, основные этапы формирования которых удается воспроизвести в численных моделях (см. примеры и ссылки в [2, 86]), для внутренних структур такое моделирование пока не проводилось. Однако представленная статистика свойств ВПС указывает на то, что, как и классические ГПК, подавляющее большинство внутренних полярных колец и дисков сформировалось в результате захвата материи из внешнего окружения галактик. Более того, в недавней работе [41] авторы, используя сетку моделей базы данных GalMer, продемонстрировали, что в результате взаимодействия гигантской S0-галактики с богатым газом карликовым спутником, в области балджа образуется кольцо звездообразования, сильно наклоненное к плоскости галактики. Отношение масс компаньонов

1 : 10, т.е. речь идет о так называемом “малом слиянии”. Требуются специфические условия взаимодействия — спутник должен изначально находиться на орбите с обратным (ретроградным) движением, в то время как плоскости дисков обоих компаньонов должны быть почти ортогональны. Мы надеемся, что развитие подобных моделей позволит в дальнейшем лучше понять процесс формирования ВПС в конкретных галактиках и воспроизвести их наблюдаемые параметры.

Нас не должно смущать отсутствие заметных свидетельств недавнего взаимодействия у примерно 1/3 галактик списка. Во-первых, не для всех галактик имеются достаточно глубокие оптические изображения и распределения HI. Во-вторых, возможно, что по прошествии некоторого времени после взаимодействия с карликовым компаньоном наличие материи на полярных орбитах во внутренней области галактики может оказаться единственным свидетельством этого события. Поэтому актуально провести исследование устойчивости внутренних полярных орбит в реальном гравитационном поле галактик, включающем вклад диска, балджа, бара и гало. Интересно, верно ли наше предварительное предположение об отсутствии устойчивых структур промежуточного размера между областью центрального килопарсека и внешней границей звездного диска (раздел 3.2).

В принципе, в отдельных случаях возможно сформировать ВПС и без взаимодействия с окружением. Так, в работах [22, 30] показано, что компактные (~100 пк) диски молекулярного газа в околоядерных областях NGC 1068 и NGC 3227 могли сильно изогнуться под воздействием ионизационного конуса и радиационного давления от активного ядра. Но этот сценарий явно не подходит для большинства галактик с более протяженными полярными дисками и кольцами.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа проводилась при финансовой поддержке фонда некоммерческих программ “Династия” и Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракты 14.740.11.0800, 16.552.11.7028, 16.518.11.7073). В процессе работы над статьей мы использовали базу внегалактических данных НАСА/ИПАК (NED), управляемую Лабораторией реактивного движения Калифорнийского технологического института по контракту с Национальным Управлением Аэронавтики и Космонавтики (США). Автор благодарит рецензента — О. К. Сильченко за полезные замечания, а также А. А. и П. А. Смирновых за помощь в работе над текстом статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B. C. Whitmore, R. A. Lucas, D. B. McElroyet, et al., *Astronom. J.* **100**, 1489 (1990).
2. F. Combes, *EAS Publications Series* **20**, 97 (2006).
3. V. C. Rubin, N. Thonnard, and W. K. Jr. Ford, *Astrophys. J.* **217**, 1L (1977).
4. D. Bettoni, C. Fasano, and G. Galletta, *Astronom. J.* **99**, 1789 (1990).
5. O. K. Sil'chenko, V. V. Vlasyuk, and A. N. Burenkov, *Astronom. and Astrophys.* **326**, 941 (1997).
6. O. K. Sil'chenko and V. L. Afanasiev, *Astronom. and Astrophys.* **364**, 479 (2000).
7. O. K. Sil'chenko, *Astron. Lett.* **28**, 207 (2002).
8. F. Bertola and E. M. Corsini, *ASP Conf. Ser.* **197**, 115 (2000).
9. A. Pizzella, F. Bertola, M. C. Sarzi, et al., *MmSAI* **72**, 797 (2001).
10. E. M. Corsini, A. Pizzella, L. Coccatto, and F. Bertola, *Astronom. and Astrophys.* **408**, 873 (2003).
11. O. K. Sil'chenko and V. L. Afanasiev, *Astronom. J.* **127**, 2641 (2004).
12. L. Coccatto, E. M. Corsini, A. Pizzella, et al., *Astronom. and Astrophys.* **416**, 507 (2004).
13. A. Moiseev, O. Sil'chenko, and I. Katkov, *AIP Conf. Proc.* **1240**, 251 (2010).
14. A. Eckart and D. Downes, *Astrophys. J.* **551**, 730 (2001).
15. O. K. Sil'chenko and V. L. Afanasiev, *Astron. Rep.* **52**, 875 (2008).
16. V. A. Hagen-Thorn and V. P. Reshetnikov, *Astronom. and Astrophys.* **319**, 430 (1995).
17. A.-L. Melchior and F. Combes, *Astronom. and Astrophys.* **536**, 52 (2011).
18. A. Moiseev, *EAS Publications Series* **48**, 115 (2011).
19. K. R. Anantharamaiah and W. M. Goss, *Astrophys. J.* **466**, L13 (1996).
20. M. Sarzi, J. Falcón-Barroso, R. L. Davies, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **366**, 1151 (2006).
21. D. Krajnović, R. Bacon, M. Cappellari, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **390**, 93 (2008).
22. E. Schinnerer, A. Eckart, L. J. Tacconi, et al., *Astrophys. J.* **533**, 850 (2000).
23. G. Dumas, C. G. Mundell, E. Emsellem, and N. M. Nagar, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **379**, 1249 (2007).
24. L. S. Sparke, G. van Moorsel, P. Erwin, and E. M. H. Wehner, *Astronom. J.* **135**, 99 (2008).
25. A. V. Moiseev, J. R. Valdés, and V. H. Chavushyan, *Astronom. and Astrophys.* **421**, 433 (2004).
26. J. W. Fried and G. D. Illingworth, *Astronom. J.* **107**, 992 (1994).
27. A. F. Crocker, M. Bureau, L. M. Young, and F. Combes, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **386**, 1811 (2008).
28. V. L. Afanasiev and O. K. Sil'chenko, *Astronom. J.* **117**, 1725 (1999).
29. L. Coccatto, E. M. Corsini, A. Pizzella, and F. Bertola, *Astronom. and Astrophys.* **465**, 777 (2007).
30. E. Schinnerer, A. Eckart, and L. J. Tacconi, *Astrophys. J.* **533**, 826 (2000).
31. O. K. Sil'chenko, A. V. Moiseev, V. L. Afanasiev, et al., *Astrophys. J.* **591**, 185 (2003).
32. O. K. Sil'chenko, A. V. Moiseev, and A. P. Shulga, *Astronom. J.* **140**, 1462 (2010).
33. V. L. Afanasiev and O. K. Sil'chenko, *Astronomical & Astrophysical Transactions* **26**, 311 (2007).
34. A. M. Fridman, V. L. Afanasiev, S. N. Dodonov, et al., *Astronom. and Astrophys.* **430**, 67 (2005).
35. L. Coccatto, E. M. Corsini, A. Pizzella, and F. Bertola, *Astronom. and Astrophys.* **440**, 107 (2005).
36. E. Noordermeer, J. M. van der Hulst, R. Sancisi, et al., *Astronom. and Astrophys.* **442**, 137 (2005).
37. A. V. Moiseev, K. I. Smirnova, A. A. Smirnova, and V. P. Reshetnikov, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **418**, 244, (2011).
38. O. K. Sil'chenko, *Astronom. J.* **120**, 741 (2000).
39. I. V. Chilingarian, A. P. Novikova, V. Cayatte, et al., *Astronom. and Astrophys.* **504**, 389 (2009).
40. O. K. Sil'chenko and A. V. Moiseev, *Astronom. J.* **131**, 1336 (2006).
41. O. K. Sil'chenko, I. V. Chilingarian, N. Ya. Sotnikova, and V. L. Afanasiev, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **414**, 3645 (2011).
42. V. L. Afanasiev and O. K. Sil'chenko, *Astronom. J.* **119**, 126 (2000).
43. O. K. Sil'chenko, *Astron. Lett.* **31**, 227 (2005).
44. L. V. Shalyapina, A. V. Moiseev, V. A. Yakovleva, et al., *Astron. Lett.* **30**, 583 (2004).
45. L. V. Shalyapina, A. V. Moiseev, and V. A. Yakovleva, *Astron. Lett.* **28**, 443 (2002).
46. L. V. Shalyapina, O. A. Merkulova, V. A. Yakovleva, and E. V. Volkov, *Astron. Lett.* **33**, 520 (2007).
47. D. Bettoni, L. M. Buson, and G. Galletta, *Astronom. and Astrophys.* **519**, 72 (2010).
48. T. Oosterloo, R. Morganti, A. Crocker et al, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **409**, 500 (2010).
49. R. G. Sharp and J. Bland-Hawthorn, *Astrophys. J.* **711**, 818 (2010).
50. V. L. Afanasiev, O. K. Sil'chenko, *Astrofiz. Issled. (Izvestiya SAO)* **33**, 88 (1991).
51. J. A. Morse, G. Cecil, A. S. Wilson, and Z. I. Tsvetanov, *Astrophys. J.* **505**, 159 (1998).
52. R. M. McDermid, E. Emsellem, K. L. Shapiro, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **373**, 906 (2006).
53. I. Katkov, I. Chilingarian, O. Sil'chenko, et al., *Baltic Astronomy* **20**, 453 (2011).
54. R. F. Gabbasov, P. Repetto, and M. Rosado, *Astrophys. J.* **702**, 392 (2009).
55. Y. Sofue and K. Wakamatsu, *Astronom. J.* **107**, 1018 (1994).
56. T. A. Davis, K. Alatalo, M. Sarzi, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **417**, 882 (2011).
57. T. de Zeeuw and M. Franx, *Annual Review Astronom. and Astrophys.* **29**, 239 (1991).
58. V. P. Reshetnikov, V. A. Hagen-Thorn, and V. A. Yakovleva, *Astronom. and Astrophys.* **303**, 398 (1995).
59. I. Yu. Katkov, A. V. Moiseev, and O. K. Sil'chenko, *Astrophys. J.* **740**, 83 (2011).

60. 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.
61. V. P. Reshetnikov, M. Faúndez-Abans, and M. de Oliveira-Abans, *Astron. Lett.* **37**, 171 (2011).
62. A. V. Moiseev, *Astrophysical Bulletin* **63**, 201 (2008).
63. D. Friedli and W. Benz, *Astronom. and Astrophys.* **268**, 65 (1993).
64. J. A. L. Aguerri, J. Méndez-Abreu, and E. M. Corsini, *Astronom. and Astrophys.* **495**, 491 (2009).
65. H. Arp, *Astrophys. J. Suppl.* **14**, 1 (1966).
66. A. V. Zasov, A. V. Moiseev, A. V. Khoperskov, and E. A. Sidorova, *Astron. Rep.* **52**, 79 (2008).
67. R. Morganti, P. T. de Zeeuw, T. A. Oosterloo, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **371**, 157 (2006).
68. R. Ibata, S. Chapman, and A. M. N. Ferguson, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **351**, 117 (2004).
69. R. Braun, D. A. Thilker, R. A. M. Walterbos, and E. Corbelli, *Astrophys. J.* **695**, 937 (2009).
70. H. Bravo-Alfaro, E. Brinks, A. J. Baker, et al., *Astronom. J.* **127**, 264 (2004).
71. T. J. Davidge, *Astrophys. J.* **725**, 1342 (2010).
72. M. Cappellari, F. Bertola, D. Burstein, et al., *Astrophys. J.* **551**, 197 (2001).
73. G. S. Shostak, *Astronom. and Astrophys.* **175**, 4 (1987).
74. E. M. Corsini, A. Pizzella, and F. Bertola, *Astronom. and Astrophys.* **382**, 488 (2002).
75. S. E. Schneider, *Astrophys. J.* **343**, 94 (1989).
76. R. Jedrzejewski and P. L. Schechter, *Astrophys. J.* **330**, L87 (1988).
77. R. Ciri, D. Bettoni, and G. Galletta, *Nature* **375**, 661 (1995).
78. P. Serra, T. Oosterloo, R. Morganti, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* (in press); arXiv:1111.4241v1 (2012).
79. J. R. Cortés, J. D. P. Kenney, and E. Hardy, *Astronom. J.* **131**, 747 (2006).
80. A. Chung, J. van Gorkom, J. D. P. Kenney, and B. Vollmer, *Astrophys. J.* **659**, L115 (2007).
81. R. de Grijs and R. F. Peletier, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **313**, 800 (2000).
82. A. Chung, J. H. van Gorkom, J. D. P. Kenney, et al., *Astronom. J.* **138**, 1741 (2009).
83. J. Higdon, R. Buta, and G. B. Purcel, *Astronom. J.* **115**, 80 (1998).
84. M. R. Merrifield and K. Kuijken, *Astrophys. J.* **432**, 575 (1994).
85. E. A. Evstigneeva, *Astrophysics* **43**, 381 (2000).
86. F. Bournaud and F. Combes, *Astronom. and Astrophys.* **401**, 817 (2003).

INNER POLAR RINGS AND DISKS: OBSERVED PROPERTIES

A. V. Moiseev

A list of galaxies with inner regions revealing polar (or strongly inclined to the main galactic plane) disks and rings is compiled from the literature data. The list contains 47 galaxies of all morphological types, from E to Irr. We consider the statistics of the parameters of polar structures known from observations. The radii of the majority of them do not exceed 1.5 kpc. The polar structures are equally common in barred and unbarred galaxies. At the same time, if a galaxy has a bar (or a triaxial bulge), this leads to the polar disk stabilization, so that its axis of rotation usually coincides with the major axis of the bar. More than two thirds of all considered galaxies reveal one or another sign of recent interaction or merging. This fact indicates a direct relation between the external environment and the presence of an inner polar structure.

Keywords: *galaxies: interactions—galaxies: kinematics and dynamics—galaxies: peculiar*