

УДК 524.7

ПРИРОДА ЧИСТО ЗВЕЗДНЫХ КОЛЕЦ В ЛИНЗОВИДНЫХ ГАЛАКТИКАХ

© 2020 г. О. К. Сильченко^{1, *}

¹ *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия*

**E-mail: olga@sai.msu.su*

Поступила в редакцию 14.07.2020 г.

После доработки 11.08.2020 г.

Принята к публикации 15.08.2020 г.

В работе исследовано происхождение нескольких колец в линзовидных галактиках, в которых отсутствуют признаки текущего или недавнего звездообразования (эмиссионные линии и сигнал в ультрафиолетовом диапазоне спектра). Измерены параметры звездного населения – средний возраст и отношение магния к железу, проанализированы структурные особенности. Сделан вывод, что во всех галактиках кольца имеют разную историю формирования и разную природу: только для двух из четырех колец резонансное происхождение, связанное с динамикой центральной триаксиальной структуры (баром), представляется предпочтительным.

DOI: 10.31857/S0004629920120130

1. ВВЕДЕНИЕ

Внешние кольцевые структуры изначально фигурировали в описании S0-галактик как признаки морфологического типа. В своем знаменитом обзоре 1959 г. [1] Жерар де Вокулер писал, ссылаясь на Хаббла, что есть две группы S0-галактик: галактики с гладкими линзами, и те, что имеют в “оболочке” (т.е. в диске) темную зону и кольцо. Современные фотометрические обзоры подтверждают, что примерно половина всех линзовидных галактик ближней Вселенной обладает внешним звездным кольцом [2]. Среди дисковых галактик поздних типов эта доля заметно меньше [2]. Объяснив, как образуются кольцевые структуры в линзовидных галактиках, мы могли бы конкретизировать динамические механизмы, которые определяют формирование этого морфологического типа галактик.

Между тем, идей о происхождении колец в галактиках пока слишком много. Можно выделить три типа предлагаемых механизмов, которые, весьма вероятно, могут работать все и быть ответственными за происхождение колец в разных галактиках [3]. Изначально больше всего повезло идее о том, что кольца формируются на радиусах, соответствующих резонансам вращения баров (триаксиальных структур) в галактиках, из-за накопления газа на этих радиусах. Эта идея сразу была обоснована целым рядом успешных моделей, например [4], и в дальнейшем подкреплялась наблюдательной статистикой размеров колец и баров [5, 6]. Однако параллельно развивался и сценарий формирования кольцевых структур в

дисках галактик за счет вертикального прохождения спутника через диск, так называемые импактные сценарии [7, 8]. Хотя с самого начала было ясно, что вероятность такого столкновения существенно меньше, чем доля галактик с внешними кольцами в ближней Вселенной [9]. Объединяет резонансные и импактные сценарии тот факт, что изначально в кольцо собирается собственный газ диска галактики, а уже потом в процессе стимулированного звездообразования из этого газа формируются звездные кольца. Впрочем, построить количественную модель формирования долгоживущего звездного кольца в рамках как резонансного [10], так и импактного [11] сценария как раз и не получалось. В ходе развития наблюдательных исследований линзовидных галактик со временем стало ясно, что в значительной доле S0 газовый компонент вращается не так, как звездный [12, 13]; особенно в разреженном окружении около половины газовых дисков S0 имеют спины, развернутые относительно спинов звездных дисков на более, чем 90 градусов (контрвращающиеся газовые диски) [14]. Значит, кольцевые *газовые* структуры в S0 галактиках в половине случаев не могут иметь ни резонансное, ни импактное происхождение, а могут быть образованы только аккрецией газа извне, либо из другой галактики, либо вообще из космологических филаментов крупномасштабной структуры Вселенной.

Существование аккреционных внешних колец в галактиках впервые предположили Бута и Комб [15], и мы в последнее время нашли немало при-

Таблица 1. Глобальные параметры исследуемых галактик

Галактика	NGC 108	NGC 4659	NGC 5057	NGC 7548
Морфологический тип (NED) ¹	(R)SB(r)0+	S0/a	S0	(R)SAB(r)0 ⁰
R_{25} , " (RC3) ²	61	52	40	32
R_{25} , кпк (NED+RC3)	17.8	4.3	16.1	16.1
Абсолютная зв. вел. в полосе H (NED)	-24.4	-21.7	-23.6	-24.9
V_r , км/с (NED)	4737	480	5882	7989
Расстояние до галактики, Мпк (NED)	60	17(Virgo)	83	104
$\lg M(\text{HI}), M_{\odot}$	9.4 ³	<7.19 ⁴	—	8.95 ⁵
$(u-r)_0$ (SDSS/DR9)	2.73	2.28	2.69	2.75

Примечание. ¹NASA/IPAC Extragalactic Database, <http://ned.ipac.caltech.edu>.

²Third Reference Catalogue of Bright Galaxies [21].

³[22], введена поправка за другое принятое расстояние до галактики.

⁴[23].

⁵[24].

меров таких структур, которые однозначно связаны чаще всего с поглощением вещества малого спутника, богатого газом (см., напр., [16, 17]). В этих случаях газовые кольца галактик наследуют орбитальный момент спутника; они будут лежать в плоскости звездного диска тогда и только тогда, когда поглощен спутник, изначально вращавшийся по орбите, копланарной хозяйскому диску.

Если мы видим в линзовидной галактике внешнее газовое кольцо и звездообразование в нем, мы можем по кинематике и морфологии кольца оценить вероятность того или иного сценария его происхождения. Однако в немалом проценте случаев внешние кольца линзовидных галактик не показывают присутствия теплого, $T \sim 10^4$ К, газа и текущего звездообразования и состоят из старых звезд [18]. В отличие от газовых колец, чисто звездные кольца в дисках галактик не имеют такой богатой истории их исследования. Как уже упоминалось выше, имеются трудности с построением динамических сценариев формирования долгоживущих звездных колец. В данной статье мы подойдем с другой стороны и рассмотрим наблюдательные свойства звездного населения внешних колец четырех линзовидных галактик, с целью оценить возраст их формирования и соответственно возможность приложения одного из трех известных сценариев к оформлению именно такой морфологии этих конкретных галактик.

2. ВЫБОРКА

В ходе спектрального исследования звездообразования в кольцах линзовидных галактик мы наткнулись на четыре случая, когда спектры не показывают присутствия в кольцевых структурах эмиссионных линий, т.е. там нет не только текущего звездообразования, но и ионизованного газа вообще. Список этих галактик, вместе с некоторыми их глобальными свойствами, представ-

лен в табл. 1. Сразу можем заметить, что отсутствие теплого, $T \sim 10^4$ К, газа во внешних кольцах не означает, что в галактиках вовсе нет газа: в NGC 108 и NGC 7548 зарегистрировано огромное, для галактик ранних типов, количество нейтрального водорода. В абсолютном выражении масса нейтрального водорода 10^9 или 2.5×10^9 масс Солнца — это на верхнем пределе зависимости массы газа от абсолютной звездной величины в ближнем инфракрасном диапазоне [19]; а в популярном выражении $M(\text{HI})/L_B$, равном -1.3 для NGC 108 и -1.85 для NGC 7548, только одна галактика в выборке сравнения [20] ярче -21 в полосе B (диапазон голубых абсолютных звездных величин для NGC 108 и NGC 7548) имеет больший показатель. В этих же двух галактиках на самом деле есть, кроме внешних, еще и внутренние кольца, и вот во внутренних кольцах газовая эмиссия наблюдается. Изображения галактик, взятые из публичных данных (архив изображений Legacy Survey), приведены на рис. 1.

Вообще, даже по такой маленькой выборке, как наша, видно, что свойства линзовидных галактик с чисто звездными внешними кольцами весьма разнообразны. Среди них есть как гигантские галактики, вроде NGC 7548, так и почти карликовые, NGC 4659; у некоторых очевидно присутствие бара, как у NGC 108, у большинства оно неочевидно, а у NGC 5057 бара точно нет. На рис. 1 картинки расположены попарно: у NGC 4659 и NGC 7548 кольца погружены в гладкие диски (как мы увидим дальше, в гладкие экспоненциальные звездные диски высокой поверхностной яркости); а у NGC 108 и NGC 5057 кольца как бы отделены от основного тела галактики теми самыми “темными зонами”, о которых говорил Хаббл. Единственное свойство, которое является общим для всех четырех галактик, то, что они все располагаются в окружении средней плотности: либо в раз-



Рис. 1. Изображения исследуемых галактик в комбинированных цветах; взяты из публичного архива данных <http://legacysurvey.org>. Слева NGC 108 (вверху), NGC 5057 (внизу); справа NGC 4659 (вверху), NGC 7548 (внизу).

реженных группах с преобладанием соседей поздних морфологических типов, либо, в случае NGC 4659, на далекой периферии скопления Virgo.

3. НАБЛЮДЕНИЯ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

Спектральные наблюдения галактик были проведены в прямом фокусе 6-метрового телескопа БТА САО РАН с редуктором SCORPIO [25] для NGC 108 и NGC 7548 и со SCORPIO-2 [26] для NGC 4659 и NGC 5057. Все наблюдения проводились в моде длинной щели. Щель шириной 1" ориентировалась вдоль большой оси каждой из галактик. Поле зрения редуктора (полная длина щели) покрывало 6.1 минут дуги, что позволяло использовать спектры с краев щели для вычитания фона ночного неба. Масштаб вдоль щели составлял 0.36"/рх. При наблюдениях со SCORPIO мы использовали призму VPHG2300G с разрешением 2.2 Å для зеленой области спектра и призму VPHG1200R для красной области спектра (где мы контролировали отсутствие эмиссионных линий). При наблюдениях со SCORPIO-2 формат

приемника, 2k × 4k, и призма VPHG1200@540 позволяли за одну экспозицию получать полный спектральный диапазон в оптике, 3800–7200 Å, с разрешением около 5 Å. Детали всех экспозиций приведены в табл. 2.

Свойства звездных населений на разных расстояниях от центра мы изучали с помощью Ликских индексов [27]. В зеленом спектральном диапазоне были измерены индексы H β , Mgb, а также два индекса железа, Fe5270 и Fe5335, из которых мы сконструировали $\langle \text{Fe} \rangle = (\text{Fe } 5270 + \text{Fe } 5335)/2$. Возраст звездного населения определялся сопоставлением индекса H β и индекса металличности, [MgFe] $\equiv (\text{Mgb}/\langle \text{Fe} \rangle)^{1/2}$; на диаграммах “H β \leftrightarrow \leftrightarrow [MgFe]” удастся снять вырождение эффектов возраста и металличности звездного населения и определить оба параметра одновременно.

Для анализа структуры галактик и выделения крупномасштабных компонентов мы использовали публичные данные проекта SDSS/DR9 [28]. Мы проанализировали изображения в фильтре r , где у наших галактик максимальное отношение

Таблица 2. Спектральные наблюдения галактик с длинной щелью

NGC	Дата	T_{exp} , мин	Диапазон, Å	РА (щели)	$FWHM_{*}$, "
NGC 108	06.10.2015	15 × 4	5700–7400	160°	2.6
NGC 108	05.10.2016	20 × 5	4800–5570	160°	2.0
NGC 4659	25.03.2015	15 × 4	3800–7200	173°	1.3
NGC 5057	03.04.2014	15 × 7	3800–7200	2°	3.0
NGC 7548	04.10.2015	20 × 3	5700–7400	15°	2.4
NGC 7548	06.10.2015	20 × 7	4800–5570	15°	2.4

сигнал/шум. При масштабе обзора SDSS 0.396'' на пиксель, ширина инструментального контура ($FWHM$ изображений звезд) около 1.2''–1.5''. Далее в ходе изофотного анализа мы одновременно определяли позиционный угол большой оси и эллиптичность изофот, меняющиеся вдоль радиуса, и строили профиль поверхностной яркости, усредненной в эллиптических кольцах, соответствующих форме изофот на данном радиусе. На каком-то внешнем радиусе, где изофотный анализ уже точно выходил в область доминирования крупномасштабного звездного диска (эллиптичность изофот выходила на плато), мы фиксировали параметры изофот, и далее по радиусу осредняли поверхностную яркость именно в таких, фиксированных по форме, эллиптических апертурах, соответствующих проекции круглого тонкого диска галактики на картинную плоскость. Таким образом, нам удавалось протянуть профили азимутально осредненной поверхностной яркости довольно далеко, за пределы тех радиусов звездных дисков R_{25} , что указаны в табл. 1.

4. СТРУКТУРА ДИСКОВ. КОЛЬЦА

Будем исходить из нашего первого впечатления, возникшего при разглядывании рис. 1, и рассмотрим отдельно структуру галактик с отделенными кольцами (рис. 2) и с кольцами, погруженными в (экспоненциальный) звездный диск (рис. 3).

Галактика NGC 108 (рис. 2, левая часть) обладает ярко выраженным баром, конец которого порождает максимум эллиптичности изофот на $R \approx 25''$. Внутреннее кольцо, с радиусом около 30'', или около 9 кпк, непосредственно окружает бар. Это классическое резонансное кольцо, и поскольку оно сформировалось в галактике с большим количеством газа (см. табл. 1), в нем идет звездообразование: оно прекрасно видно на изображении в ультрафиолете, полученном космическим телескопом GALEX, а также выделяется голубым цветом на карте $(g-r)$ (рис. 4, слева сверху). А вот внешнее кольцо, на радиусе около 60'' (≥ 17 кпк), при тоже повышенной эллиптичности изофот, вытянутое примерно перпендикулярно бару, не видно в ультрафиолете, не выделяется голубым цветом, и не показывает в спектре эмисси-

онных линий. Очевидно, во внешнем кольце NGC 108 текущего звездообразования нет.

Галактика NGC 5057 (рис. 2, справа), напротив, совершенно точно не имеет бара: центральная часть, $R < 18''$ (< 7 кпк), где профиль поверхностной яркости имеет квазиэкспоненциальную форму и вероятно соответствует диску, демонстрирует почти круглые изофоты. Хотя присутствие внутреннего кольца, на $R \approx 10''$ (4 кпк), и здесь угадывается, и оно даже голубое в западной своей части (рис. 4, левое нижнее изображение). Про газ в NGC 5057 ничего не известно, ультрафиолет слаб. Что касается внешнего, отделенного кольца, на $R > 25''$ (> 10 кпк), то оно широкое, красное, $(g-r)_0 = 0.83$, и не имеет в спектре эмиссионных линий. По сравнению с внешним кольцом NGC 108, оно выглядит более широким и массивным.

Для двух галактик, где кольца погружены в обычные экспоненциальные звездные диски, результаты изофотного анализа представлены на рис. 3. Карликовая линзовидная галактика NGC 4659 уже анализировалась в статье [2] в рамках проекта S4G [29]. В [2] отмечены детали структуры, которые видны и на нашем рис. 3: минибар радиусом 8'' (650 пк) и кольцо на радиусе 31'' (2.5 кпк). Поскольку газа в галактике совсем нет, не удивительно, что ни одна из структур не выделяется по цвету (рис. 4). В NGC 7548 звездный диск двухъярусный, III типа по Эрвину [30, 31], и колец в галактике тоже два: внутреннее, радиусом около 10'' (5 кпк), разграничивает балдж и диск, и в нем есть эмиссионные линии. Если балдж у галактики хотя бы слабо триаксиальный, то это кольцо может располагаться на резонансе и накапливать в себе газ, которого у NGC 7548 довольно много. Зато внешнее кольцо, на радиусе 25'' (12.5 кпк), погруженное во внутренний сегмент крупномасштабного звездного диска, красного цвета, $(g-r)_0 = 0.98$, и не имеет эмиссионных линий. Для обеих галактик мы вписали экспоненциальный закон в участки профиля поверхностной яркости диска до и после кольца (на рис. 3 эти законы показаны штриховой линией). У NGC 4659 экспоненциальный масштаб диска 14.5'' (1.2 кпк), а у NGC 7548 экспоненци-

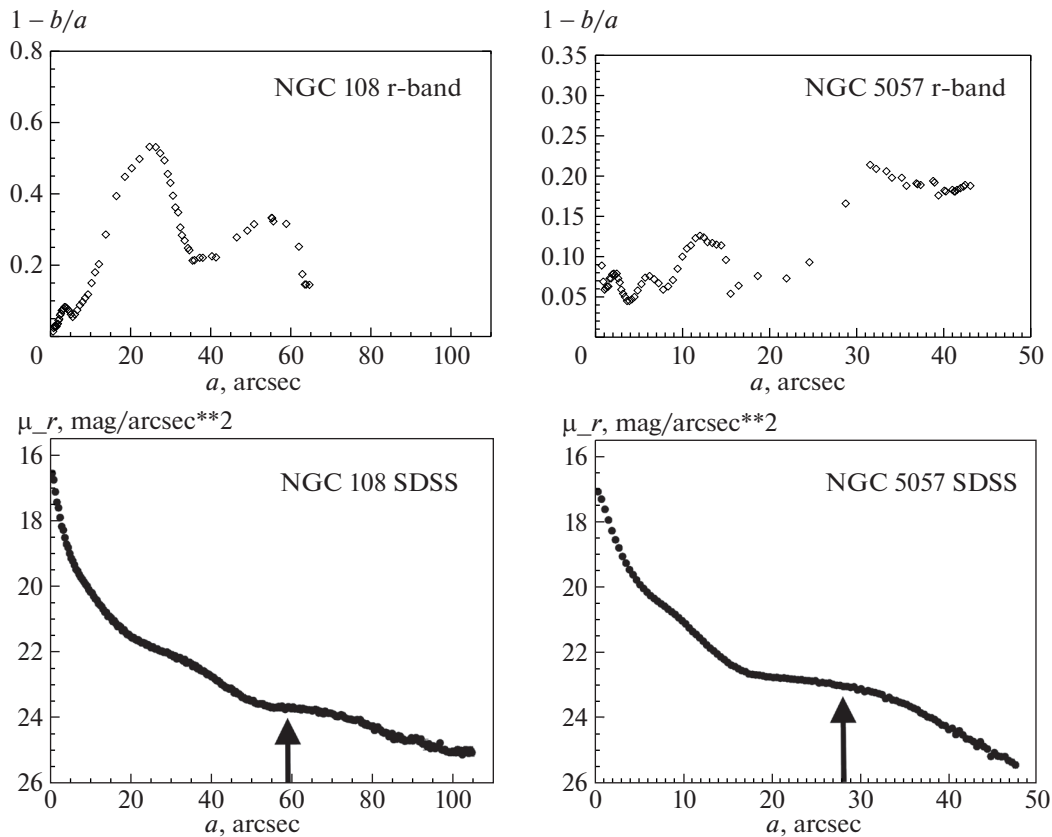


Рис. 2. Результаты фотометрического анализа для галактик с отделенными кольцами; слева – результаты для NGC 108, справа – для NGC 5057. В каждой паре рисунков на верхней панели показана радиальная зависимость эллиптичности изофот, на нижней – азимутально осредненный профиль поверхностной яркости. Большими черными стрелками на профилях яркости указано положение колец, визуально выделяемых на рис. 1.

альные масштабы внутреннего и внешнего диска равны 11.15" и 13.9" (соответственно 6 и 7 кпк).

5. СВОЙСТВА ЗВЕЗДНОГО НАСЕЛЕНИЯ

На рис. 5 представлены диаграммы “индекс ↔ индекс”, которые позволяют определить интегральные (осредненные со светимостью звезд) характеристики звездного населения. Слева представлены диаграммы для крупномасштабных звездных дисков галактик, а справа – для колец, выделенных по профилям поверхностной яркости на рис. 2 и 3; для NGC 4659 и NGC 7548 Ликские индексы колец исправлены за вклад подстилающих экспоненциальных дисков. В верхнем ряду – диаграммы “Mgb ↔ ⟨Fe⟩”, позволяющие оценить отношение обилий магния и железа в звездах, а в нижнем ряду – “Hβ ↔ [MgFe]”, позволяющие определить средние возраст и металличность звезд. Модели, рассчитанные методом эволюционного синтеза интегрального спектра звездного населения в предположении одной короткой вспышки звездообразования (так называемые SSP-модели, Simple Stellar Population), взяты из работы [32]. На тех же диаграммах нанесены и несколько шаровых скоплений из центральной

области нашей Галактики, взятые из [33], для эмпирической обрисовки последовательности старшего возраста, $T \approx 10\text{--}14$ млрд. лет, в сторону низких металличностей. Мы использовали это эмпирическое дополнение к моделям, потому что сравнение моделей [32] с наблюдательными данными для шаровых скоплений показывает, что модели плохо описывают звездные населения с металличностью от -0.8 до -0.4 dex.

Отношение магния к железу в звездном населении характеризует длительность основной эпохи звездообразования [34]. Из-за того, что магний, как все альфа-элементы, синтезируется в короткоживущих массивных звездах и выбрасывается в межзвездную среду во вспышках сверхновых II типа, а железо в больших количествах синтезируется при взрывах сверхновых типа Ia, предшественниками которых являются долгоживущие белые карлики в двойных системах, все вспышки звездообразования, закончившиеся до массового появления сверхновых типа Ia, порождают звездные населения с повышенным, в 2–3 раза относительно солнечного, отношением содержания магния к железу. Что же мы видим на верхних графиках рис. 5? Крупномасштабные

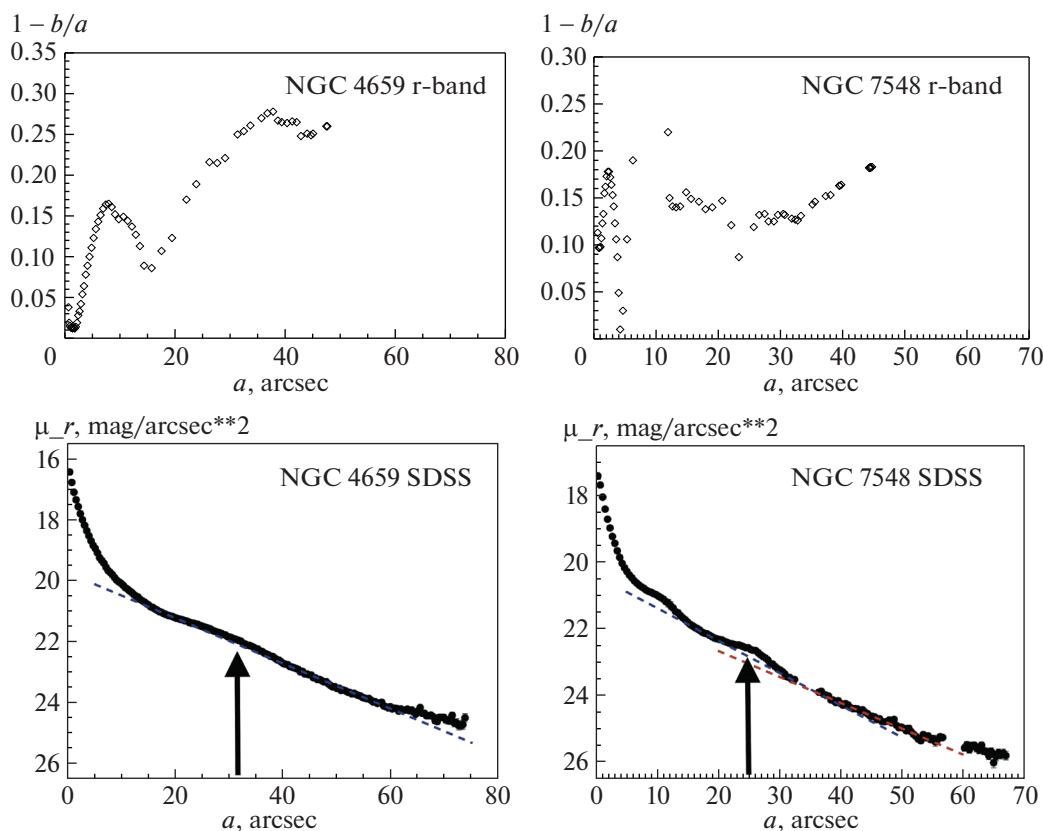


Рис. 3. Результаты фотометрического анализа для галактик с погруженными в диск кольцами; слева — результаты для NGC 4659, справа — для NGC 7548. В каждой паре рисунков на верхней панели показана радиальная зависимость эллиптичности изофот, на нижней — азимутально осредненный профиль поверхностной яркости. В радиальном интервале, где доминирующий вклад в поверхностную яркость дает диск, в профили вписан экспоненциальный закон; у NGC 7548 диск принадлежит III типу (“antitruncated”), поэтому в его профиль поверхностной яркости вписаны две экспоненты. Однако исследуемое красное кольцо в обеих галактиках погружено во внутренний сегмент диска. Параметры вписанных экспоненциальных законов: для NGC 4659 $\mu_r = 19.7 + 1.086R''/14.44''$, для NGC 7548 внутренний диск $\mu_r = 20.4 + 1.086R''/11.15''$ и внешний диск $\mu_r = 21.1 + 1.086R''/13.9''$. Большими черными стрелками на профилях яркости указано положение колец, визуально выделяемых на рис. 1.

звездные диски наших галактик в основном имеют строго солнечное отношение магния к железу, только в самой массивной из наших галактик, NGC 7548, оно где-то на 0.1 dex выше. Это означает, что хотя сейчас в дисках этих линзовидных галактик звездообразование не идет, когда-то оно шло, и было продолжительным, не менее 2–3 млрд. лет. А вот кольца демонстрируют весьма пеструю картину. Во внешнем отделенном кольце NGC 5057 эпоха формирования его звездного компонента была очень короткой, заведомо короче 1 млрд. лет. В другом отделенном кольце, принадлежащем NGC 108, выделяющейся в нашей выборке огромным количеством нейтрального водорода, наоборот, звездообразование было продолжительным и закончилось совсем недавно: средний возраст звезд кольца NGC 108, как демонстрирует нижний правый график рис. 5, всего около 1 млрд. лет. А вот два кольца, погруженных в диски высокой поверхностной яркости, дружно демонстрируют *пониженное* отношение магния к железу. Это довольно редкий

феномен для гигантских дисковых галактик; зато он встречается в маломассивных неправильных галактиках и интерпретируется как свидетельство того, что звездообразование шло редкими дискретными вспышками, с интервалами между ними около 2–3 млрд. лет [35].

Нижний ряд графиков рис. 5 позволяет определить средний возраст и металличность звездного населения. Мы видим, что все четыре диска наших линзовидных галактик старые, старше 12 млрд. лет. А вот металличности у них разные, и можно заметить, что металличность связана с поверхностной яркостью: самый слабый диск, в NGC 108, имеет среднюю металличность звезд, на порядок ниже солнечной, а вот диски высокой поверхностной яркости в NGC 4659 и NGC 7548 демонстрируют металличность, лишь немного уступающую солнечной, от -0.1 до -0.2 dex. Это так называемый “локальный” или “разрешенный” аналог известной зависимости для галактик “масса \leftrightarrow металличность”. Характеристики ко-

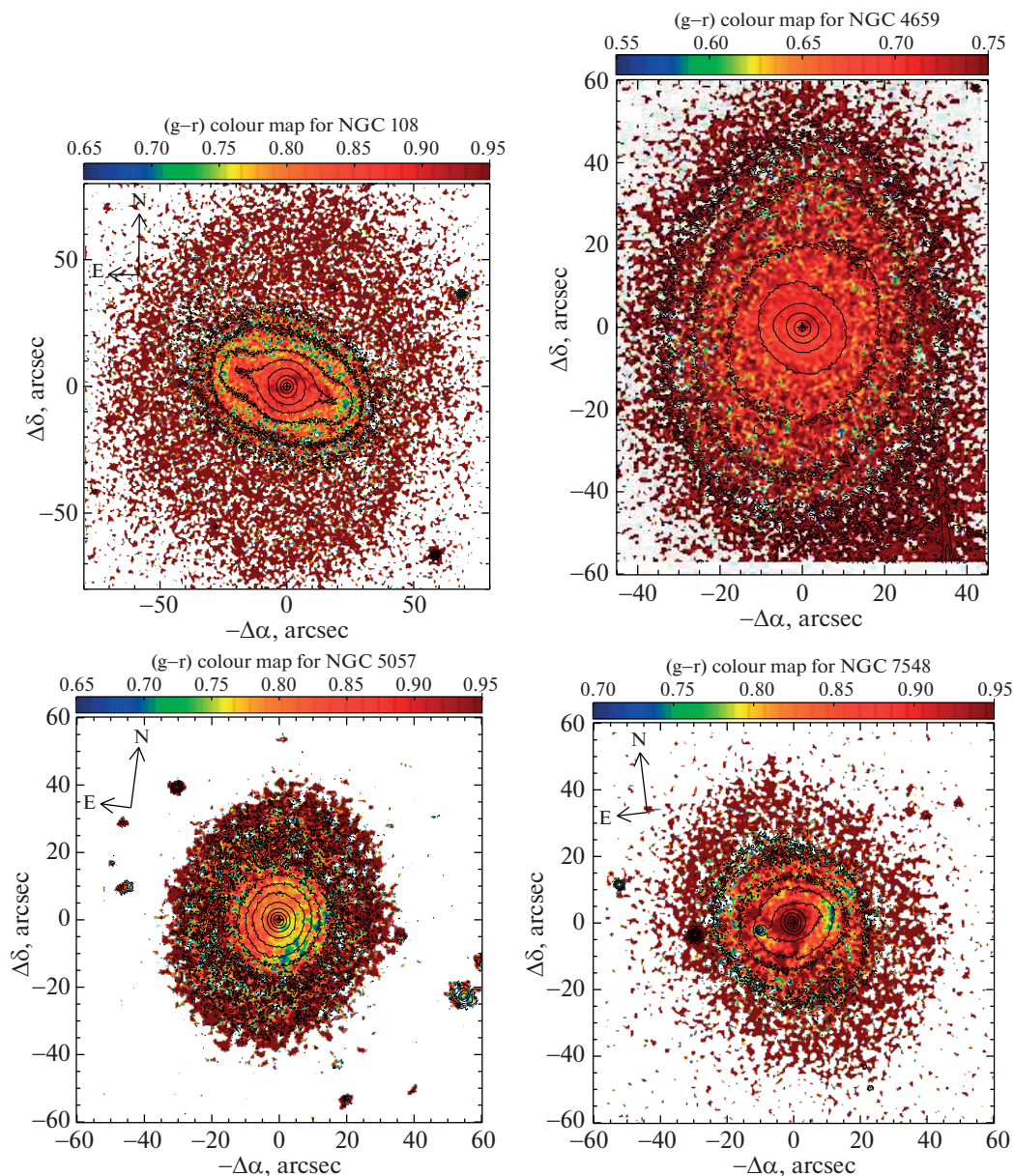


Рис. 4. Карты цвета $g - r$ для исследуемых галактик по данным SDSS.

лец, так же, как и их истории звездообразования, показывают хаотический разброс. Молодое, с металличностью, превышающей солнечную, кольцо в NGC 108, в котором совсем недавно еще шло звездообразование, контрастирует с таким же внешним, отделенным, масштабным кольцом в NGC 5057, где очень старый возраст звездного населения и очень низкая металличность, $[Z/H] < -0.4$, что, впрочем, не противоречит приведенному выше выводу о формировании этого кольца в одной короткой вспышке звездообразования. Погруженные в диски кольца NGC 4659 и NGC 7548 примерно одинаково бедны металлами, $[Z/H] \approx -0.4$, но вот возраст у них разный: 5 млрд. лет у первой и >12 млрд. лет у второй. Тут мы мо-

жем спекулировать на разном окружении этих галактик: вероятно, как раз 5 млрд. лет назад NGC 4659 начала входить в скопление Virgo, что могло спровоцировать последнюю вспышку звездообразования в кольце; а потом галактика просто лишилась газа и больше уже не могла образовывать новые звезды. NGC 7548 — массивная центральная галактика в группе, и в ее жизни таких драматических событий последние 10 млрд. лет очевидно не случилось. Газ в ней до сих пор довольно много.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хотя внешние кольцевые структуры являются частым атрибутом и как бы визитной карточкой линзовидных галактик, природа их, по всей веро-

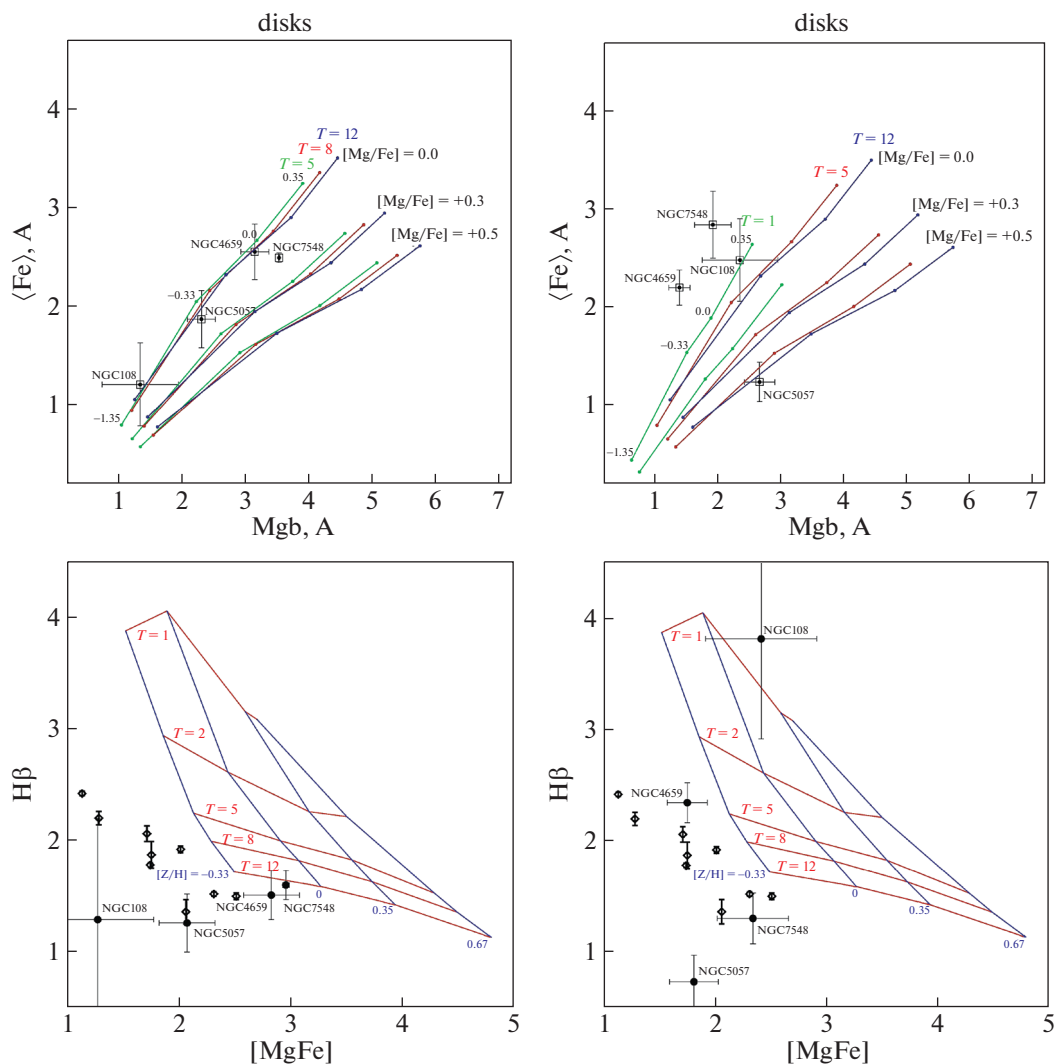


Рис. 5. Диаграммы “индекс ↔ индекс”, позволяющие определить средние параметры звездных населений: отношение обилий магния и железа в звездах $[Mg/Fe]$, полные металличности $[Z/H]$ и возраст T для дисков рядом с кольцами (слева) и отдельно для колец (справа). Ликские индексы для колец NGC 4659 и NGC 7548 исправлены за вклад подстилающих экспоненциальных дисков, в предположении, что диски под кольцами имеют индексы, как на левых графиках. Наблюдаемые Ликские индексы для структурных компонентов исследуемых галактик сравниваются с моделями простых звездных населений из [32] (сплошные линии). Кроме моделей, для сравнения на диаграммы “ $H\beta \leftrightarrow [Mg/Fe]$ ” также нанесены ромбами измерения для шаровых скоплений нашей Галактики, имеющих возраст больше 11 млрд. лет и металличности в интервале от -0.4 до -1.3 по данным [33].

ятности, может быть весьма разнообразна. В нашей крайне маленькой выборке из 4 объектов все четыре кольца, выбранные по признаку отсутствия текущего звездообразования, оказались на самом деле с разными историями формирования.

У NGC 108 очень много газа, и, вероятно, до самого последнего миллиарда лет во внешнем кольце шло звездообразование. Поскольку галактика обладает явно выраженным баром, внешнее кольцо может просто обозначать радиус внешнего Линдбладовского резонанса этого бара, на котором газ скапливается и питает формирование новых звезд. Отношение радиуса внешнего кольца и радиуса бара почти точно двойка, что согласно [36]

как раз и характерно для внешнего Линдбладовского резонанса. Загадкой остается только причина остановки звездообразования 1 млрд. лет назад.

В NGC 5057, напротив, бара нет, и кольцо, вероятно, не является резонансным. В нем была только одна, очень давняя вспышка звездообразования. Возможно, она была связана с взаимодействием: в 150 кпк (в проекции) от NGC 5057 находится гигантская спиральная галактика NGC 5056, которая при орбитальном сближении могла снабдить NGC 5057 газом для короткой вспышки звездообразования во внешней области.

В низкоконтрастных кольцах NGC 4659 и NGC 7548, погруженных в экспоненциальные

звездные диски, было несколько вспышек звездообразования. Но если в NGC 4659 эти события закончились всего несколько млрд. лет назад, вероятно, из-за лишения галактики газа, то в NGC 7548 весь комплекс вспышек, скорее всего, только две вспышки, уложился в первые 3–4 млрд. лет жизни галактики. В NGC 7548 система колец может быть резонансной, поскольку отношение радиусов внутреннего и внешнего кольца около 2.5; согласно статистике [5], это значение попадает в типичный интервал отношений радиусов внутреннего и внешнего кольца, связанных с резонансами крупномасштабных баров. А вот в NGC 4659 отношение радиуса кольца к радиусу бара – четверка, и это уже не резонансный случай.

Таким образом, наши результаты о разнообразных историях звездообразования во внешних кольцах линзовидных галактик с разнообразной структурой – с баром и без бара – похоже подтверждают гипотезу о том, что линзовидные галактики как тип имеют несколько каналов (сценариев) формирования своей на первый взгляд довольно простой крупномасштабной структуры.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит сотрудников Специальной астрофизической обсерватории РАН, поддерживавших спектральные наблюдения галактик с красными кольцами: А.Н. Буренкова, А.В. Моисеева, Д.В. Опарина, В.Л. Афанасьева, Р.И. Уклеина. В качестве источника фотометрических данных использовались публичные архивы проекта SDSS-III (<http://www.sdss3.org>), поддержанного Фондом А.П. Слоана, институтами-участниками коллаборации SDSS, Национальным научным фондом и Министерством энергетики США. При анализе данных мы использовали Базу внегалактических данных НАСА/ИПАК (NED), управляемую Лабораторией реактивного движения Калифорнийского технологического института по контракту с Национальным управлением аэронавтики и космических исследований (США). Для иллюстраций изображений галактик использовались возможности публичного сервиса Legacy Survey (<http://legacysurvey.org>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Наблюдения на 6-метровом телескопе БТА САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (включая соглашение No 05.619.21.0016, УИП RFME-FI61919X0016). Исследование выполнено за счет гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-02-00094).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *G. de Vaucouleurs*, Handbuch der Physik **53**, 275 (1959).
2. *S. Comerón, H. Salo, E. Laurikainen, J. H. Knapen, et al.*, Astron. and Astrophys. **562**, id. A121 (2014).
3. *Б. А. Воронцов-Вельяминов*, Письма в Астрон. журн. **2**, 204 (1976).
4. *M. P. Schwarz*, Astrophys. J. **247**, 77 (1981).

5. *E. Athanassoula, A. Bosma, M. Crézé, and M. P. Schwarz*, Astron. and Astrophys. **107**, 101 (1982).
6. *R. Buta*, Astrophys. J. Suppl. **61**, 609 (1986).
7. *J. C. Theys and E. A. Spiegel*, Astrophys. J. **212**, 616 (1977).
8. *J. M. A. Few and B. F. Madore*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **222**, 673 (1986).
9. *В. А. Досталь, В. Г. Метлов*, Астрон. журн. **56**, 3 (1979).
10. *E. Athanassoula and A. Bosma*, Ann. Rev. Astron. Astrophys. **23**, 147 (1985).
11. *M. Mapelli, B. Moore, E. Ripamonti, L. Mayer, M. Colpi, and L. Giordano*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **383**, 1223 (2008).
12. *K. Kuijken, D. Fisher, and M. R. Merrifield*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **283**, 543 (1996).
13. *T. A. Davis, K. Alatalo, M. Sarzi, M. Bureau, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **417**, 882 (2011).
14. *I. Yu. Katkov, A. Yu. Kniazev, and O. K. Sil'chenko*, Astron. J. **150**, id. 24 (2015).
15. *R. Buta and F. Combes*, Fundam. Cosmic Phys. **17**, 95 (1996).
16. *I. Proshina, O. Sil'chenko, and A. Moiseev*, Astron. and Astrophys. **634**, id. A102 (2020).
17. *O. Sil'chenko and A. Moiseev*, Astron. and Astrophys. **638**, id. L10 (2020).
18. *J. S. Gallagher and A. Wirth*, Astrophys. J. **241**, 567 (1980).
19. *P. Serra, T. Oosterloo, R. Morganti, K. Alatalo, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **422**, 1835 (2012).
20. *T. Ashley, P. M. Marcum, M. Alpaslan, M. N. Fanelli, and J. D. Frost*, Astron. J. **157**, id. 158 (2019).
21. *G. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, H. G. Corwin, Jr., R. J. Buta, G. Paturel, and P. Fouqué*, Third Reference Catalogue of Bright Galaxies. Volume I: Explanations and References (New York: Springer, 1991).
22. *M. P. Haynes, R. Giovanelli, A. M. Martin, K. M. Hess, et al.*, Astron. J. **142**, id. 170 (2011).
23. *G. Gavazzi, M. Fumagalli, M. Fossati, V. Galardo, F. Grossetti, A. Boselli, R. Giovanelli, and M. P. Haynes*, Astron. and Astrophys. **553**, id. A89 (2013).
24. *L. H. Wei, S. J. Kannappan, S. N. Vogel, and A. J. Baker*, Astrophys. J. **708**, 841 (2010).
25. *В. Л. Афанасьев, А. В. Моисеев*, Письма в Астрон. журн. **31**, 214 (2005).
26. *V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev*, Baltic Astronomy **20**, 363 (2011).
27. *G. Worthey, S. M. Faber, J. J. Gonzalez, and D. Burstein*, Astrophys. J. Suppl. **94**, 687 (1994).
28. *C. P. Ahn, R. Alexandroff, C. Allende Prieto, S. F. Anderson, et al.*, Astrophys. J. Suppl. **203**, id. 21 (2012).
29. *K. Sheth, M. Regan, J. L. Hinz, A. Gil de Paz, et al.*, Publ. Astron. Soc. Pacific **122**, 1397 (2010).
30. *P. Erwin, J. E. Beckman, and M. Pohlen*, **626**, L81 (2005).
31. *M. Pohlen and I. Trujillo*, Astron. and Astrophys. **454**, 759 (2006).
32. *D. Thomas, C. Maraston, and R. Bender*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **339**, 897 (2003).
33. *H.-S. Kim, J. Cho, R. M. Sharples, A. Vazdekis, M. A. Beasley, and S.-J. Yoon*, Astrophys. J. Suppl. **227**, id. 24 (2016).
34. *F. Matteucci and L. Greggio*, Astron. and Astrophys. **154**, 279 (1986).
35. *G. Gilmore and R. F. G. Wyse*, Astrophys. J. **367**, L55 (1991).
36. *R. Buta*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **470**, 3819 (2017).