

УДК 524.7-54

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ В ЛИНЗОВИДНЫХ ГАЛАКТИКАХ С КАРТИРОВЩИКОМ MaNGaL

© 2023 О. К. Сильченко^{1*}, А. В. Моисеев^{2**},
Д. В. Опарин^{2***}, Е. А. Малеева^{1****}, И. С. Прошина^{1*****}

¹Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 20 апреля 2023 года; после доработки 9 июня 2023 года; принята к публикации 3 июля 2023 года

Представлены результаты исследования колец звездообразования в шести линзовидных галактиках, полученные методом узкополосной фотометрии в эмиссионных линиях $H\alpha$ и $[N II]\lambda 6583$ с помощью перестраиваемого картировщика MaNGaL на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ. Механизм возбуждения газа, оцененный по отношению потоков линий $H\alpha$ и $[N II]\lambda 6583$, оказался неоднороден вдоль кольца: у трех внешних колец наблюдаются узкие сегменты позиционных углов, в которых в кольце доминируют ударные волны. Поскольку природа колец, скорее всего, аккреционная, локализация ударного возбуждения во внешних кольцах указывает на направление прихода внешнего газового потока. События звездообразования в кольцах, вероятно, достаточно кратковременны и эффективны: в основном мы наблюдаем однородную субсолнечную металличность газа, близкую к уровню локального насыщения химической эволюции газа в процессе звездообразования, и переключения локализации очагов звездообразования на шкале времени около 100 млн лет. В NGC 932 мы застали самое начало процесса аккреции внешнего газа: его еще мало в галактике, а металличность газа в кольце звездообразования еще не вышла на насыщение.

Ключевые слова: галактики: раннего типа — галактики: эволюция — галактики: звездообразование

1. ВВЕДЕНИЕ

Морфологический тип линзовидных, или S0, галактик был введен Эдвином Хабблом в его «камертонную» схему в 1936 году (Hubble, 1936) как гипотетический переходный тип между эллиптическими и спиральными галактиками. Однако по мере накопления данных о галактиках выяснилось, что этот тип галактик вполне реален и в ближней Вселенной является даже более многочисленным, чем эллиптические галактики: согласно обзору АРМ, линзовидными классифицированы 15% всех галактик ближней Вселенной, против 3–5% эллиптических (Naim et al., 1995). Так что, если в каких-то обзорах презентуется полная по объему выборка галактик ранних типов — как, например, в обзоре ATLAS-3D (Cappellari et al., 2011), — можно быть уверенным, что эта выборка как минимум на три четверти состоит из линзовидных галактик.

Между тем объединять в один класс эллиптические и линзовидные галактики абсолютно неправильно: они имеют совершенно разную структуру и динамику и, как следствие, совершенно разное происхождение и разную эволюцию. Линзовидные галактики, как правило, состоят из двух крупных структурных компонент: балджей и дисков, и в смысле структуры ничем не отличаются от галактик спиральных (Laurikainen et al., 2010). Различие между спиральными и линзовидными галактиками, по определению, — в отсутствии спиральных ветвей в дисках; это, в частности, предполагает и отсутствие многочисленных областей звездообразования в дисках. Опираясь на это сходство и на это различие, астрономы-внегалактики довольно рано выдвинули идею, что линзовидные галактики — это бывшие спиральные, в дисках которых прекратилось звездообразование, а звездообразование могло естественным образом прекратиться, если из диска удалили газ; причем для удаления газа предлагался целый набор возможных механизмов (Gunn and Gott, 1972; Larson et al., 1980). Однако по мере накопления наблюдательных данных выяснилось, что все не так просто: в дисках

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

**E-mail: moisav@gmail.com

***E-mail: doparin2@gmail.com

****E-mail: e_maleeva@mail.ru

*****E-mail: ipro@sai.msu.ru

линзовидных галактик довольно часто присутствует заметное количество газа, а в нем иногда (не всегда) идет и звездообразование, хотя на порядок более слабое, чем в галактиках спиральных.

1.1. Холодный газ в линзовидных галактиках

После того как прошла первая волна радиообзоров близких галактик в линии 21 см, Wardle and Knapp (1986) собрали статистику по нескольким сотням дисковых галактик ранних типов, зарегистрированным — или незарегистрированным — в этой линии излучения нейтрального водорода, и сравнили со статистикой по эллиптическим галактикам, собранной ими же ранее. У них получилось, что, в то время как излучение в линии 21 см демонстрируют все 100% спиральных галактик поздних типов, среди S0/a доля детектированных в линии 21 см составляет 42% и среди S0 — 24%; среди эллиптических галактик ближней Вселенной эта доля не превышает 15%. Был сделан вывод, что между S0 и S0/a имеются существенные различия: если S0/a ничем не отличаются от ранних спиралей Sa, то S0 ближе к эллиптическим. В действительности различие между S0 и S0/a, найденное Wardle and Knapp (1986), — это чистый эффект выборки. Если посмотреть на их рис. 1, показывающий распределение исследуемых галактик по удалению от нас, то там есть резкий пик на 12–20 Мпк — только для S0 и E, для S0/a его нет — это скопление Virgo. То есть на самом деле они увидели эффект подавления содержания газа в дисковых галактиках в плотном окружении, а вовсе не разницу между S0 и S0/a. Но сам факт, что до четверти всех линзовидных галактик (и до половины линзовидных галактик вне скоплений) содержат заметное количество холодного газа, оказался очень ценным открытием. В этой же работе, на основе скорее интуитивного осмысления данных, прозвучал и вывод о полностью внешнем происхождении нейтрального водорода в галактиках ранних типов, включая линзовидные. Тогда еще верили, что газ в дисках спиральных галактик — реликтовый, оставшийся в галактиках от начального протогалактического облака.

Радиообзоры продолжались, наблюдения эмиссионных линий холодного газа становились все глубже, и в начале 2000-х годов Сэйдж и Уэлч (Welch and Sage, 2003; Sage and Welch, 2006) предприняли новую попытку собрать данные по доле галактик ранних типов, содержащих отдельно атомарный водород (обзоры в линии 21 см) и отдельно молекулярный газ (обзоры в линии CO 2.3 мм). Для линзовидных галактик вне скоплений получилось в конце концов, что почти 60% из них хорошо регистрируются в радиообзорах,

имея от 10^7 до 10^{10} солнечных масс холодного газа (Welch et al., 2010). В рамках уже упоминавшегося обзора полной по объему выборки близких галактик ранних типов ATLAS-3D была получена доля имеющих нейтральный водород галактик вне скопления Virgo — около 40% (Serra et al., 2012). Morganti et al. (2006) для небольшой выборки из 12 массивных галактик ранних типов получили 70% задетектированных в 21 см.

Итак, многие линзовидные галактики имеют газа не меньше, чем спиральные такой же массы (Catinella et al., 2018; Janowiecki et al., 2020). Почему же в богатых газом линзовидных галактиках звездообразование идет только в половине всех случаев (Pogge and Eskridge, 1993), и при этом, как правило, на полпорядка или на порядок слабее, чем в спиральных галактиках с такими же параметрами (Janowiecki et al., 2020)? На этот счет высказывалась и обосновывалась пока только одна широко принятая гипотеза: для развития гравитационной неустойчивости в газовых дисках линзовидных галактик не хватает объемной плотности газа. Oosterloo et al. (2007), картируя на радиоинтерферометре ATCA 30 богатых газом линзовидных галактик южного неба, в большинстве из них обнаружили крайне протяженные газовые диски, диаметром до 100 кпк. Понятно, что если такую же, как в спиральной галактике, массу нейтрального водорода распределить в протяженном диске линзовидной галактики по большей площади, то плотность газа на квадратный парсек будет меньше. В парадигме начала звездообразования путем развития гравитационной неустойчивости в газе это важно — и может сработать в качестве порогового эффекта.

1.2. Звездообразование в линзовидных галактиках

Pogge and Eskridge (1987; 1993) подняли вопрос о звездообразовании в дисках богатых газом S0-галактик сразу после появления компиляции Wardle and Knapp (1986): они составили выборку S0s на основе этой компиляции и наблюдали их в узком фильтре, центрированном на эмиссионную линию H α — самый популярный на тот момент индикатор текущего звездообразования в галактиках. Области звездообразования были обнаружены примерно в половине богатых газом S0, и в большинстве случаев они были организованы не в спиральные рукава, а в кольцевые структуры разного диаметра — как во внутренние кольца, так и во внешние, иногда размером со звездный диск галактики. Именно Pogge and Eskridge (1993) впервые выразили мысль, что в S0 галактиках старт и протекание звездообразования не связаны напрямую с количеством газа и с развитием гравитационной неустойчивости в этом газе, а скорее

управляются некими «пороговыми эффектами, кинематическими по происхождению».

Новый толчок исследованиям звездообразования в линзовидных галактиках дал ультрафиолетовый космический телескоп GALEX: в 2007 году вышел специальный номер *Astrophysical Journal Supplement Series* с результатами, в частности, обзора ближней Вселенной в двух фильтрах, центрированных на 1500 Å и на 2300 Å. Картирование в далеком ультрафиолете показало, что 20% линзовидных галактик обладают протяженными молодыми дисками, часто с кольцевым усилением яркости (Thilker et al., 2007). Вообще, открытие огромных ультрафиолетовых дисков — так называемых XUV-дисков, превышающих по размерам диски из старых звезд, видимые в оптическом диапазоне, — стало одним из самых ярких открытий GALEX. Holwerda et al. (2012), сопоставляя морфологию и размеры ультрафиолетовых дисков и дисков нейтрального водорода в одних и тех же галактиках, пришли к выводу, что XUV-диски являются следствием недавнего прихода внешнего холодного газа в галактики с последующим началом слабого звездообразования в них. Собственно, к 2012 году уже восторжествовала парадигма, что все дисковые галактики эволюционируют за счет постоянного притока холодного газа извне. Однако морфологический тип имеет значение! Lemonias et al. (2011) оценили статистику встречаемости XUV-дисков по данным GALEX в галактиках ближней Вселенной, и оказалось, что XUV-диски «предпочитают» массивные галактики ранних типов: если в целом по выборке, без различия морфологического типа и массы, доля галактик, имеющих XUV-диски, достигает 14%, то среди галактик «красной последовательности» ($NUV - r > 5$) их 41%, а среди массивных, $\lg M_* > 10$, галактик «зеленой долины» ($3 < NUV - r < 5$) — 25%. Получается своего рода парадокс: чем ниже интегральные темпы звездообразования в дисковой галактике, тем с большей вероятностью она демонстрирует слабое звездообразование во внешних областях. Что касается колец звездообразования, то их распространенность в линзовидных галактиках подтверждалась и другими наблюдательными обзорами, например обзором ультрафиолетовых изображений галактик ранних типов с космического телескопа им. Хаббла в работе Salim et al. (2012).

С осуществлением новых глубоких и обширных обзоров галактик на радиотелескопе Аресибо, ALFALFA и xGASS, стало возможным вернуться на ином уровне к сопоставлению количества газа и темпов звездообразования в галактиках. И снова оказалось, в подтверждение идеям Поджа и Эскриджа, что типичным для богатых газом линзовидных галактик являются подавленные, до

порядка величины, темпы звездообразования. Специально обратившиеся к галактикам ранних типов в обзоре xGASS Janowiecki et al. (2020) констатировали, что «многие галактики зеленой долины» имеют огромные газовые резервуары при пониженных темпах звездообразования, и, соответственно, темпы звездообразования в них понизились не потому, что газ кончился. Эти же галактики показывают «тренд» иметь большие отношения ультрафиолетового диаметра к оптическому, то есть продолжают — и будут еще долго продолжать — формировать молодые звезды во внешних областях. Что именно привело к такому неэффективному звездообразованию, сконцентрированному на периферии галактики, еще предстоит выяснить.

Мы занялись исследованием звездообразования в линзовидных галактиках, используя новые уникальные возможности картировщика в узких линиях MaNGaL, работающего сейчас в фокусе Нэсмита 2.5-м телескопа Кавказской горной обсерватории Государственного астрономического института имени П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (КГО ГАИШ МГУ).

2. НАБЛЮДЕНИЯ С MaNGaL

Небольшая выборка галактик, для которых уже получены и проанализированы результаты с MaNGaL, представлена в таблице 1. Это дисковые галактики ранних типов — в основном с формальной классификацией S0 или S0/a, но даже если они классифицируются как Sa, все равно визуальный анализ их изображений не выявляет классической спиральной структуры в дисках, только кольца. Несмотря на присутствие колец, часто выделяющихся и голубым цветом, большинство галактик не имеет бара — ярко выраженный бар есть только у NGC 3945. Это позволяет нам надеяться, что кольца в данных галактиках, скорее всего, имеют аккреционную природу, а не резонансную. Все они богаты газом — зарегистрированные в линии 21 см массы нейтрального водорода находятся в интервале от $7 \times 10^8 M_\odot$ до $6 \times 10^9 M_\odot$. Голубые кольца и большое количество газа явились для нас основанием для поиска звездообразования в этих линзовидных галактиках. Впрочем, в многоволновых обзорах интегральных характеристик галактик (например, GALEX + WISE, Leroy et al. (2019)) в этих галактиках уже измерялись интегральные темпы звездообразования чуть ниже или около одной солнечной массы в год, так что наши ожидания основывались на имеющихся в литературе фактах.

Мы провели наблюдения на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ (Shatsky et al., 2020) с новым прибором — картировщиком узких эмиссионных линий MaNGaL (Mapper of Narrow Galaxy

Таблица 1. Глобальные параметры исследуемых галактик

Параметр	Галактика						Ссылки
	NGC 160	NGC 473	NGC 932	NGC 3945	NGC 4324	UGC 36	
Тип	(R)SA0 ⁺	SAB(r)0/a:	SAa	(R)SB(rs)0 ⁺	SA(r)0 ⁺	SA(r)a:	NED ^a или LEDA ^b
R_{25} , угл. сек.	88.5	52	57	158	83	40	RC3 ^c , LEDA
V_r , км с ⁻¹	5256	2131	4079	1281	1667	6291	NED
Расстояние, Мпк	82.8	34.0	55.9	23.2	24.2	94.6	EDD ^d
$u - r^*$	2.67	2.06	2.73	3.03	2.59	2.61	SDSS ^e
M_B	-21.1	-19.6	-20.7	-20.1	-19.1	-20.8	LEDA
$\lg M(\text{HI}), M_\odot$	9.79	9.20	9.09	8.85 ^f	9.10	9.64	EDD, ALFALFA ^g
$\lg M_*, M_\odot^{**}$	11.14	10.30	10.98	10.76	10.42	10.97	Leroy et al. (2019)
$\lg SFR, M_\odot \text{ год}^{-1}^{**}$	-0.04	-0.28	-0.14	-0.58	-0.53	+0.14	Leroy et al. (2019)

Примечания: * с поправкой за пыль в Галактике; ** с поправкой за принятое расстояние. Ссылки: ^a NASA/IPAC Extragalactic Database — <http://ned.ipac.caltech.edu>; ^b Lyon-Meudon Extragalactic Database — <http://leda.univ-lyon1.fr> (Makarov et al., 2014); ^c Third Reference Catalogue of Bright Galaxies (de Vaucouleurs et al., 1991); ^d The Extragalactic Distance Database — <http://edd.ifa.hawaii.edu> (Courtois et al., 2009); ^e SDSS/DR12 — <http://skyserver.sdss.org/dr12> (Alam et al., 2015); ^f ATLAS-3D (Serra et al., 2012); ^g The Arecibo Legacy Fast ALFA Survey — <http://egg.astro.cornell.edu/index.php/>.

Lines, (Moiseev et al., 2020)). MaNGaL является фотометром с перестраиваемым фильтром на основе сканирующего интерферометра Фабри–Перо низкого порядка, с шириной инструментального контура ($FWHM$) 13 Å. Эта примечательно узкая полоса пропускания картировщика позволяет разделять в наблюдениях близкие эмиссионные линии $\text{H}\alpha$ и $[\text{N II}]\lambda 6583$ — то, что обычно недоступно для узкополосной фотометрии с типичной полосой пропускания фильтра 50–100 Å. Для нашей задачи это преимущество MaNGaL критически важно, поскольку именно эмиссионная линия $\text{H}\alpha$ является индикатором темпа звездообразования, а отношение интенсивностей линий $[\text{N II}]\lambda 6583$ и $\text{H}\alpha$ позволяет выделить эмиссионные области, возбуждаемые конкретно молодыми звездами. Детектором на MaNGaL служит низкошумящая ПЗС-камера iKon-M934 форматом 1024 × 1024 пикселя. Масштаб составляет 0".33/пиксель. Во время наблюдений последовательно выполнялись короткие накопления изображений при настройке полосы фильтра на эмиссионные линии $\text{H}\alpha$ и $[\text{N II}]\lambda 6583$ (с учетом средней скорости галактики и гелиоцентрической поправки) и на континуум, смещенный как в голубую, так и в красную сторону от линий. Такие серии достаточно коротких экспозиций (150–300 с) позволяют усреднить вклад от вариаций атмосферной прозрачности и качества изображений и получить карты в линиях и в континууме с одинаковым качеством изображений. Журнал наблюдений для пяти галактик представлен в таблице 2; подробное опи-

сание наблюдений и анализа данных для NGC 4324 опубликовано нами ранее (Proshina et al., 2022).

Обработка данных MaNGaL методически аналогична работе с обычными прямыми снимками в узких фильтрах и описана в статье Moiseev et al. (2020). После вычитания континуума мы получили карты полного поля галактик в эмиссионных линиях $\text{H}\alpha$ и $[\text{N II}]\lambda 6583$. Карты в линии $\text{H}\alpha$ показаны на рис. 1. Такое картирование позволило не только изучить морфологию ионизованного газа, но и оценить отношения сильных эмиссионных линий в областях звездообразования по всему диску; с помощью этих измерений можно ограничить механизм возбуждения ионизованного газа и определить содержание кислорода в газе там, где он возбуждается молодыми звездами. При вычислении отношения близких эмиссионных линий $\text{H}\alpha$ и $[\text{N II}]\lambda 6583$ вводилась поправка за вклад крыльев соседней линии по калибровке, описанной Moiseev et al. (2020).

На рис. 1 у всех исследованных линзовидных галактик обнаружались кольцевые структуры, наполненные компактными эмиссионными областями, очень похожими на комплексы звездообразования.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Возбуждение и металличность ионизованного газа в кольцах звездообразования

Ионизованный газ, излучающий в эмиссионных линиях, может возбуждаться разными механизмами: радиационно — жестким ультрафиолетовым

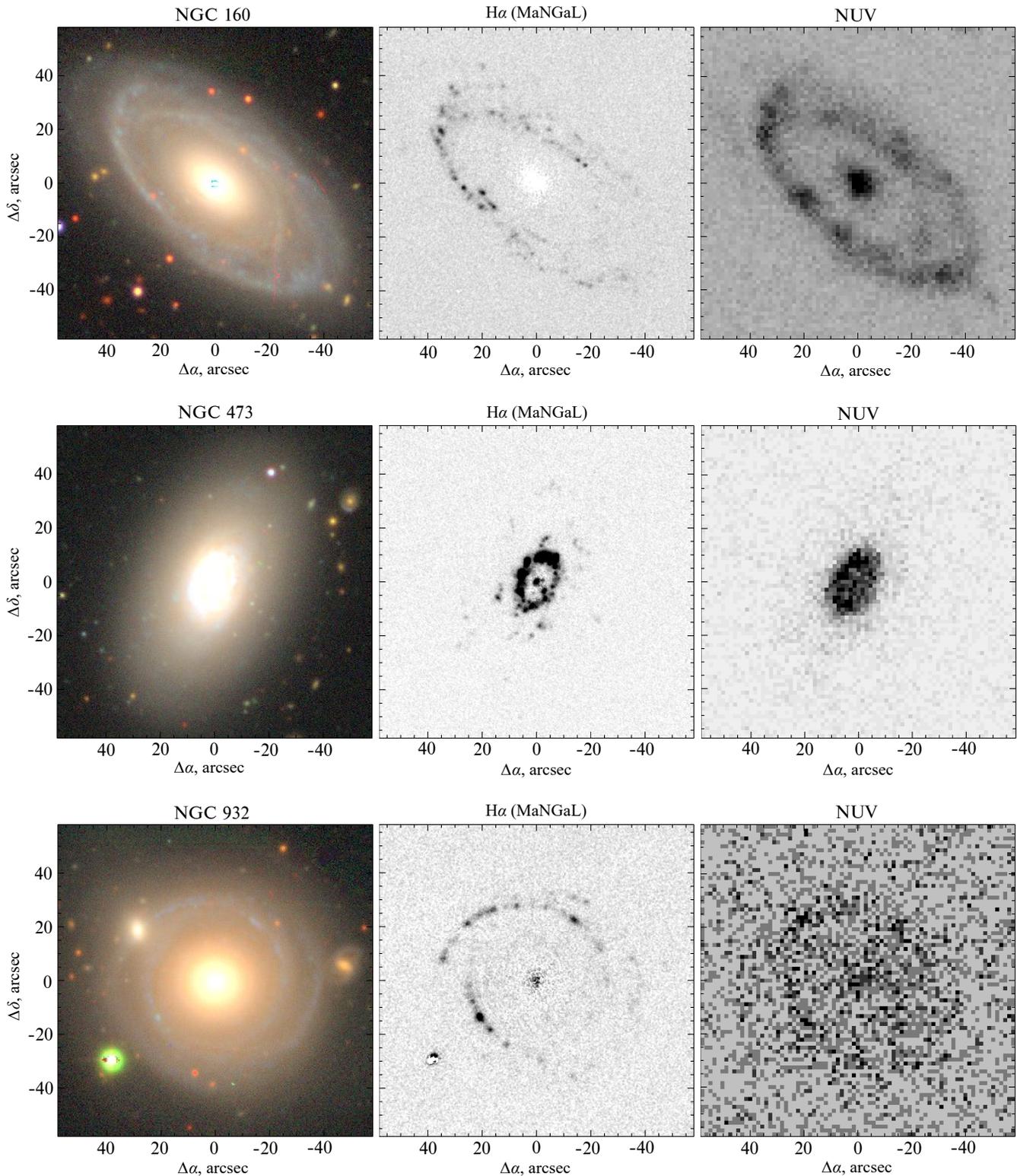


Рис. 1. Изображения галактик выборки, сверху вниз: NGC 160, NGC 473 и NGC 932. Левая панель — оптическое изображение DECaLS (Dey et al., 2019), средняя — карты в эмиссионной линии H α , правая — карты ультрафиолетового излучения в полосе NUV по данным космического телескопа GALEX.

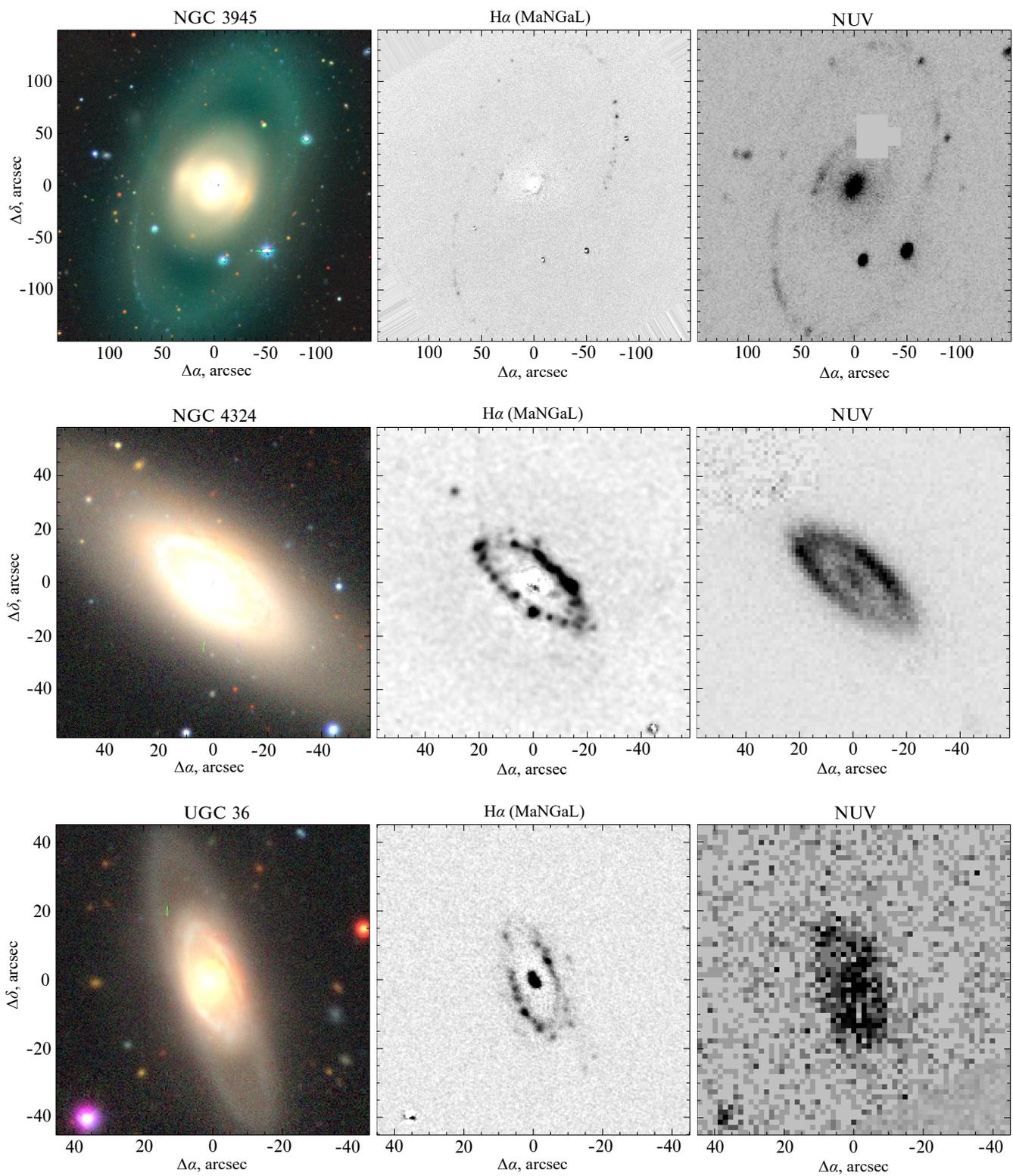


Рис. 1. (Продолжение). Галактики NGC 3945, NGC 4324 и UGC 36.

Таблица 2. Фотометрические наблюдения с MaNGaL

Галактика	Дата	ΣT_{exp} , мин	Центр пропускания эталона	$FWHM_{*}$, угл. сек.
NGC 160	2022/10/18	70	H α	1.0
NGC 160	2022/10/18	130	[N II] λ 6583	1.0
NGC 160	2022/10/18	60	red continuum	1.0
NGC 473	2021/11/09	20	H α	1.2
NGC 473	2021/11/09	40	[N II] λ 6583	1.2
NGC 473	2021/11/09	40	red continuum	1.2
NGC 932	2022/10/29	22	H α	1.2
NGC 932	2022/10/29	38	[N II] λ 6583	1.2
NGC 932	2022/10/29	17	red continuum	1.2
NGC 3945	2022/03/30	30	H α	1.7
NGC 3945	2022/03/30	60	[N II] λ 6583	1.2
NGC 3945	2022/03/30	30	red continuum	1.7
UGC 36	2021/11/06	40	H α	1.2
UGC 36	2021/11/06	70	[N II] λ 6583	1.2
UGC 36	2021/11/06	30	red continuum	1.2

излучением с разнообразной формой спектра — или ударными волнами. Для каждого механизма возбуждения существует типичный для него — и зависящий от физических параметров самого механизма и окружающей среды — «рисунок» соотношений интенсивности эмиссионных линий разных элементов в разной степени ионизации. В 1981 году Болдуином, Филиппсом и Терлевичем была предложена диаграмма, названная по первым буквам их фамилий ВРТ-диаграммой, на которой можно было «развести» разные механизмы возбуждения газа, сопоставляя отношение линии высокого возбуждения [O III] λ 5007 к близлежащей водородной линии H β и отношение линии низкого возбуждения, например [N II] λ 6583 или [S II] λ (6717 + 6731), к соседней линии водорода H α (Baldwin et al., 1981). Сейчас эта диаграмма широко используется, в первую очередь, для выделения эмиссионных областей, возбуждаемых излучением молодых массивных звезд, — тех самых областей, по интенсивности эмиссии H α от которых можно оценить темпы текущего звездообразования в локальной области галактики. А по линиям азота или кислорода можно оценить металличность газа, если мы знаем механизм его возбуждения — потому что эмиссионные спектры хорошо моделируются, и модельные соотношения линий калибруются относительно физических параметров среды.

Для наших данных, включающих карты галактик в эмиссиях H α и [N II] λ 6583, очень полезны модельные расчеты Kewley et al. (2006), позволяю-

щие на ВРТ-диаграмме отделить области, возбужденные молодыми звездами, по критерию:

$$\lg([\text{O III}] \lambda 5007 / \text{H}\beta) < \frac{0.61}{N2 - 0.05} + 1.3,$$

где $N2 \equiv \lg([\text{N II}] \lambda 6583 / \text{H}\alpha)$. При типичном отношении $\lg([\text{O III}] \lambda 5007 / \text{H}\beta) = -0.2$ в кольцах линзовидных галактик (Sil'chenko et al., 2019) этот критерий превращается в ограничение на отношение интенсивности линии азота к H α : $N2 < -0.36$. Собственно, на картинке, представляющей собой частное от деления карты в линии азота на карту в линии водорода, можно выделить области звездообразования глазом — как, например, на рис. 2. Мы выделили на карте H α каждой из галактик компактные эмиссионные области в кольце — у каждой галактики их оказалось несколько десятков — и для каждой области рассчитали отношение $N2$. Гистограммы распределений эмиссионных областей по этому параметру для каждой галактики представлены на рис. 3.

Большинство компактных эмиссионных областей в кольцах большей части галактик оказались возбуждены молодыми звездами. Распределение этих областей по параметру $N2$ на рис. 3 в четырех галактиках из шести похоже на гауссианы с шириной, вероятно, характеризующей индивидуальные ошибки определения параметра. Мы постарались отделить именно эти комплексы, поставив на гистограммах рис. 3 порог вблизи значения $N2 < -0.15$ (который соответствует вышеприведенному критерию Kewley et al. (2006) плюс

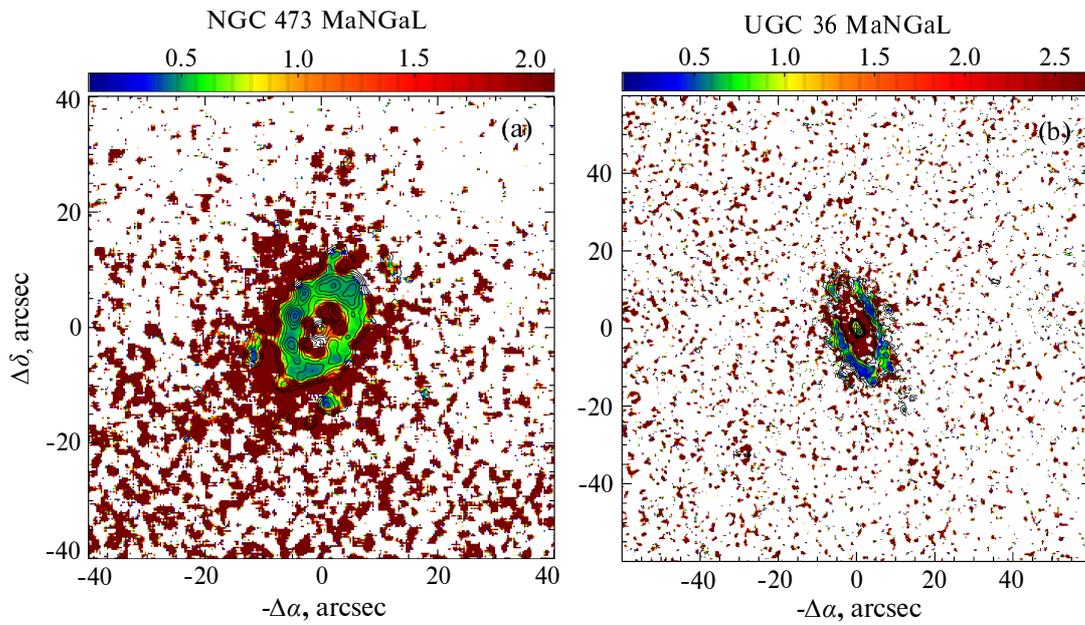


Рис. 2. Карты отношений потоков эмиссионных линий $[N II] \lambda 6583$ к $H\alpha$ для NGC 473 (a) и UGC 36 (b) по данным MaNGaL. Области, в которых линия азота минимум в два раза слабее $H\alpha$ ($\lg([N II] \lambda 6583/H\alpha) \equiv N2 < -0.3$), — синего цвета на карте — содержат газ, ионизованный молодыми звездами.

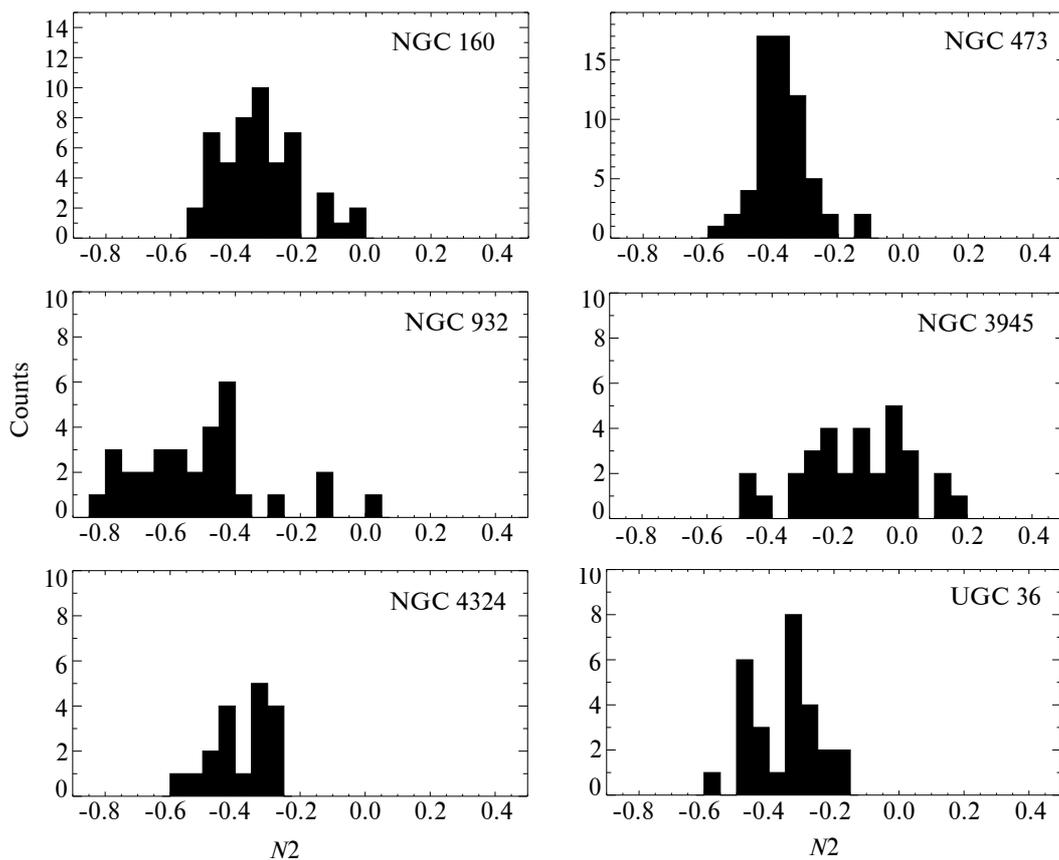


Рис. 3. Распределения логарифмов отношений потоков эмиссионных линий $[N II] \lambda 6583$ и $H\alpha$ в кольцевых структурах галактик NGC 160, NGC 473, NGC 932, NGC 3945, NGC 4324 и UGC 36.

Таблица 3. Параметры колец звездообразования исследуемых галактик: 1 и 2 — радиусы кольца эмиссионных областей в секундах дуги и в килопарсеках для принятых расстояний до галактик (см. таблицу 1) соответственно; 3 — число компактных эмиссионных областей, которые были измерены на картах MaNGaL в каждом кольце; 4 — диапазон индивидуальных статистических ошибок параметра $N2 \equiv \lg([\text{N II}]\lambda 6583/\text{H}\alpha)$; 5 — средняя статистическая ошибка для индивидуальных оценок $N2$ в каждом кольце; 6 — дисперсия гауссианы, вписанной в распределения $N2$ в каждом кольце (рис. 3); 7 — медианные значения $N2$ для каждого кольца, совпадающие с положением максимума вписанной гауссианы; 8 — оценка обилия кислорода в газе по данному медианному $N2$

N	Параметры	Галактика					
		NGC 160	NGC 473	NGC 932	NGC 3945	NGC 4324	UGC 36
1	R_{ring} , угл. сек.	48	12	26	148	23	18
2	R_{ring} , кпк	19.3	2.0	7.0	16.5	2.7	8.2
3	Число областей	50	62	31	31	18	27
4	Диапазон ошибок $N2$, dex	0.20–0.82	0.05–0.77	0.10–0.82	0.22–0.76	0.07–0.50	0.11–0.54
5	Средняя ошибка $N2$, dex	0.43	0.21	0.39	0.53	0.27	0.29
6	σ_{gauss} , dex	0.10	0.06	—	—	0.10	0.12
7	$\langle N2 \rangle$, dex	–0.35	–0.38	–0.55	–0.13	–0.35	–0.34
8	$12 + \lg(\text{O}/\text{H})^*$	8.70	8.68	8.59	8.64	8.70	8.71
	$12 + \lg(\text{O}/\text{H})^{**}$	8.58	8.57	8.49	8.53	8.58	8.59

Примечание. Согласно калибровке * Pettini and Pagel (2004); ** Marino et al. (2013).

средняя индивидуальная ошибка определения $N2$ из таблицы 3, например, для NGC 473). В распределения рис. 3 были вписаны гауссианы, параметры которых тоже приводятся в таблице 3. Также для этих распределений мы рассчитали медианные значения индикатора $N2$ для каждой галактики, и эти медианные значения совпали с центрами вписанных в распределения гауссиан с точностью 0.01. Только для NGC 3945 мы отсечки по $N2$ делать не стали — там большинство всех областей показывает $N2 > -0.1$, и лишь несколько областей в северной части кольца могут иметь $N2$, совместимые с предположением о возбуждении молодыми звездами; именно по этим областям и определена металличность газа, приведенная в таблице 3 для NGC 3945. Для NGC 932 также распределение параметра $N2$ выглядит несколько шире, чем статистический разброс около одного типичного значения. Для четырех галактик медианные оценки индикатора $N2$ оказались однородными и заключенными в узком интервале значений от –0.34 до –0.38 (см. таблицу 3), что соответствует примерно солнечной металличности по калибровке $N2$ от Pettini and Pagel (2004) (солнечное обилие кислорода, согласно Asplund et al. (2009), равно 8.69) или чуть ниже, согласно калибровке Marino et al. (2013). Галактика NGC 932 отличается в сторону более низкой металличности: у нее $\langle N2 \rangle = -0.55$, или $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 8.49 - 8.59$. А у NGC 3945 в среднем по кольцу $\langle N2 \rangle = -0.13$, что говорит о доминировании ударного возбуждения на большей части кольца. Металличность для NGC 3945, которая

внесена в таблицу 3, рассчитана по двум исключениям — самым ярким эмиссионным областям звездообразования северо-западного сегмента галактики, показывающим самое точное значение индикатора $N2$ в этой галактике: $N2 = -0.42 \pm 0.25$ и $N2 = -0.50 \pm 0.22$. Результаты измерений $N2$ и эквивалентных ширин эмиссии $EW(\text{H}\alpha)$ для всех проанализированных областей даны в таблице 4.

Таблица 4. Параметры областей звездообразования

ID	RA, deg J2000.0	Dec, deg J2000.0	$N2$	$EW(\text{H}\alpha)$, Å
NGC 160				
1	9.02303	23.97014	-0.38 ± 0.43	2.1 ± 0.9
2	9.02075	23.96813	-0.40 ± 0.50	1.9 ± 0.9
3	9.02667	23.96805	-0.35 ± 0.36	3.0 ± 1.1
4	9.02634	23.96727	-0.38 ± 0.35	3.3 ± 1.2
5	9.02768	23.96527	-0.50 ± 0.31	4.1 ± 1.2
6	9.02659	23.96458	-0.29 ± 0.39	2.7 ± 1.1
7	9.02516	23.96502	-0.40 ± 0.38	3.0 ± 1.1
8	9.02212	23.96527	-0.44 ± 0.36	3.3 ± 1.2
9	9.02075	23.96441	-0.30 ± 0.49	2.1 ± 1.1
10	9.01872	23.96482	-0.32 ± 0.41	2.5 ± 1.1
11	9.01796	23.96391	-0.45 ± 0.44	2.6 ± 1.1
12	9.01820	23.96491	-0.27 ± 0.52	1.9 ± 1.1
13	9.01568	23.96332	-0.31 ± 0.57	1.8 ± 1.0
14	9.02786	23.96341	-0.52 ± 0.19	6.7 ± 1.4
15	9.02844	23.96224	-0.47 ± 0.26	4.9 ± 1.3
16	9.01814	23.96382	-0.49 ± 0.41	2.9 ± 1.1

Таблица 4. (Продолжение)

ID	RA, deg J2000.0	Dec, deg J2000.0	N_2	$EW(H\alpha), \text{Å}$
17	9.02829	23.96241	-0.49 ± 0.25	5.0 ± 1.3
18	9.02795	23.96163	-0.39 ± 0.35	3.2 ± 1.1
19	9.02765	23.96088	-0.39 ± 0.38	3.0 ± 1.1
20	9.02674	23.95910	-0.43 ± 0.36	3.2 ± 1.1
21	9.02631	23.95843	-0.50 ± 0.28	4.5 ± 1.3
22	9.02522	23.95740	-0.38 ± 0.21	5.5 ± 1.3
23	9.02458	23.95651	-0.47 ± 0.34	3.4 ± 1.1
24	9.02328	23.95546	-0.47 ± 0.25	4.8 ± 1.2
25	9.02194	23.95546	-0.43 ± 0.24	4.9 ± 1.2
26	9.02158	23.95348	-0.35 ± 0.68	1.6 ± 1.1
27	9.02027	23.95176	-0.25 ± 0.44	2.0 ± 1.0
28	9.01969	23.95240	-0.32 ± 0.34	3.1 ± 1.1
29	9.01918	23.95171	-0.29 ± 0.54	1.9 ± 1.1
30	9.01842	23.95154	-0.30 ± 0.57	1.8 ± 1.1
31	9.01708	23.95226	-0.21 ± 0.63	1.5 ± 1.0
32	9.01620	23.95179	-0.14 ± 0.55	1.6 ± 1.0
33	9.01906	23.95046	-0.32 ± 0.65	1.6 ± 1.1
34	9.01842	23.94998	-0.35 ± 0.68	1.6 ± 1.1
35	9.01751	23.95048	-0.22 ± 0.47	2.0 ± 1.1
36	9.01644	23.94887	-0.30 ± 0.56	1.8 ± 1.1
37	9.01386	23.94857	-0.23 ± 0.56	1.7 ± 1.1
38	9.01204	23.94746	-0.15 ± 0.37	2.4 ± 1.1
39	9.01095	23.94718	-0.07 ± 0.39	2.2 ± 1.1
40	9.00982	23.94773	-0.13 ± 0.39	2.1 ± 1.0
41	9.00712	23.94801	-0.03 ± 0.36	2.3 ± 1.1
42	9.00672	23.95843	-0.22 ± 0.55	1.6 ± 0.9
43	9.00903	23.95990	-0.21 ± 0.65	1.4 ± 1.0
44	9.01158	23.96065	-0.03 ± 0.82	1.0 ± 1.0
45	9.01237	23.96040	-0.35 ± 0.30	3.6 ± 1.1
46	9.01246	23.96276	-0.31 ± 0.48	2.2 ± 1.1
47	9.01553	23.96224	-0.25 ± 0.49	1.9 ± 1.0
48	9.01155	23.95985	-0.34 ± 0.35	3.0 ± 1.1
49	9.02886	23.96352	-0.35 ± 0.45	2.4 ± 1.1
50	9.02328	23.95690	-0.53 ± 0.20	6.3 ± 1.3

NGC 473

1	19.98356	16.54304	-0.55 ± 0.17	23.6 ± 6.4
2	19.98333	16.54409	-0.39 ± 0.30	10.5 ± 4.3
3	19.98228	16.53887	-0.11 ± 0.52	6.5 ± 5.1
4	19.98156	16.54540	-0.42 ± 0.09	19.0 ± 2.7
5	19.98159	16.53934	-0.25 ± 0.54	5.6 ± 3.9
6	19.98161	16.54120	-0.33 ± 0.29	7.4 ± 2.7
7	19.98144	16.54220	-0.38 ± 0.18	9.5 ± 2.3
8	19.98161	16.54301	-0.28 ± 0.20	6.7 ± 1.8
9	19.98164	16.54367	-0.41 ± 0.10	16.6 ± 2.4
10	19.98153	16.54451	-0.41 ± 0.13	11.1 ± 1.9

Таблица 4. (Продолжение)

ID	RA, deg J2000.0	Dec, deg J2000.0	N_2	$EW(H\alpha), \text{Å}$
11	19.98150	16.54501	-0.39 ± 0.08	18.9 ± 2.5
12	19.98025	16.54256	-0.40 ± 0.17	7.5 ± 1.6
13	19.98034	16.54592	-0.36 ± 0.14	7.9 ± 1.4
14	19.97985	16.54617	-0.24 ± 0.24	3.8 ± 1.1
15	19.97967	16.54673	-0.31 ± 0.14	8.1 ± 1.5
16	19.97915	16.54276	-0.34 ± 0.18	6.5 ± 1.5
17	19.97886	16.54848	-0.43 ± 0.23	10.8 ± 3.2
18	19.97880	16.54803	-0.40 ± 0.14	13.4 ± 2.8
19	19.97880	16.54739	-0.41 ± 0.05	35.2 ± 3.5
20	19.97863	16.54381	-0.27 ± 0.13	7.0 ± 1.2
21	19.97860	16.54678	-0.39 ± 0.09	15.0 ± 2.1
22	19.97845	16.54734	-0.42 ± 0.05	38.0 ± 3.8
23	19.97828	16.54789	-0.40 ± 0.11	18.3 ± 3.2
24	19.97880	16.54739	-0.41 ± 0.05	35.2 ± 3.5
25	19.97863	16.54381	-0.27 ± 0.13	7.0 ± 1.2
26	19.97860	16.54678	-0.39 ± 0.09	15.0 ± 2.1
27	19.97845	16.54734	-0.42 ± 0.05	38.0 ± 3.8
28	19.97828	16.54789	-0.40 ± 0.11	18.3 ± 3.2
29	19.97820	16.54934	-0.40 ± 0.23	12.9 ± 4.2
30	19.97825	16.54659	-0.39 ± 0.09	15.4 ± 2.2
31	19.97822	16.54262	-0.40 ± 0.16	9.6 ± 2.0
32	19.97793	16.54331	-0.34 ± 0.17	8.2 ± 1.8
33	19.97808	16.54617	-0.34 ± 0.21	6.0 ± 1.6
34	19.97825	16.54659	-0.39 ± 0.09	15.4 ± 2.2
35	19.97822	16.54262	-0.40 ± 0.16	9.6 ± 2.0
36	19.97793	16.54331	-0.34 ± 0.17	8.2 ± 1.8
37	19.97808	16.54617	-0.34 ± 0.21	6.0 ± 1.6
38	19.97767	16.54417	-0.33 ± 0.15	9.3 ± 1.9
39	19.97761	16.54773	-0.41 ± 0.11	20.8 ± 3.7
40	19.97735	16.54559	-0.32 ± 0.15	9.9 ± 2.1
41	19.97753	16.54659	-0.40 ± 0.07	28.3 ± 3.5
42	19.97706	16.54703	-0.41 ± 0.07	30.8 ± 4.4
43	19.97695	16.54637	-0.37 ± 0.17	12.0 ± 2.8
44	19.97700	16.54490	-0.33 ± 0.19	9.1 ± 2.4
45	19.97665	16.54587	-0.31 ± 0.23	8.5 ± 2.7
46	19.97654	16.54301	-0.12 ± 0.77	2.8 ± 2.8
47	19.97524	16.54889	-0.35 ± 0.35	11.0 ± 5.6
48	19.97463	16.54806	-0.49 ± 0.56	9.1 ± 6.0
49	19.97459	16.54615	-0.22 ± 0.53	6.7 ± 5.0
50	19.97271	16.54065	-0.44 ± 0.64	22.0 ± 24.7
51	19.98040	16.54692	-0.47 ± 0.06	28.6 ± 2.9
52	19.98057	16.54645	-0.43 ± 0.06	23.7 ± 2.5
53	19.97924	16.54728	-0.39 ± 0.06	26.6 ± 2.9
54	19.97741	16.54712	-0.43 ± 0.05	44.5 ± 5.0
55	19.98086	16.54279	-0.41 ± 0.15	8.8 ± 1.7

Таблица 4. (Продолжение)

ID	RA, deg J2000.0	Dec, deg J2000.0	N_2	$EW(H\alpha), \text{\AA}$
56	19.98069	16.54170	-0.41 ± 0.13	13.7 ± 2.5
57	19.97990	16.54215	-0.46 ± 0.12	12.8 ± 1.9
58	19.97857	16.54290	-0.45 ± 0.12	12.0 ± 1.9
59	19.97999	16.53912	-0.52 ± 0.40	9.9 ± 4.7
60	19.97915	16.54015	-0.54 ± 0.21	14.6 ± 4.1
61	19.98203	16.55050	-0.30 ± 0.69	8.0 ± 7.4
62	19.98709	16.54107	-0.49 ± 0.65	13.5 ± 11.8
NGC 932				
1	36.98839	20.33488	-0.77 ± 0.26	22.8 ± 11.4
2	36.98812	20.33552	-0.49 ± 0.32	14.3 ± 8.4
3	36.98569	20.33851	-0.52 ± 0.20	12.6 ± 4.5
4	36.98439	20.33943	-0.64 ± 0.29	14.8 ± 7.2
5	36.98350	20.33971	-0.75 ± 0.30	16.2 ± 7.8
6	36.98285	20.33999	-0.72 ± 0.22	21.5 ± 9.2
7	36.98146	20.34032	-0.40 ± 0.47	7.9 ± 5.8
8	36.98021	20.34029	-0.58 ± 0.26	16.9 ± 8.2
9	36.97683	20.34021	-0.48 ± 0.38	11.1 ± 7.0
10	36.97387	20.34124	-0.28 ± 0.32	15.0 ± 11.0
11	36.97247	20.34076	-0.41 ± 0.31	20.3 ± 15.6
12	36.97485	20.33949	-0.43 ± 0.42	9.9 ± 6.7
13	36.97372	20.33885	-0.61 ± 0.16	26.4 ± 9.8
14	36.97236	20.33793	-0.64 ± 0.62	7.2 ± 5.4
15	36.97096	20.33562	-0.49 ± 0.41	8.9 ± 5.4
16	36.97025	20.33265	-0.43 ± 0.55	6.3 ± 4.7
17	36.97197	20.32887	-0.40 ± 0.69	4.6 ± 4.0
18	36.97757	20.32412	-0.48 ± 0.45	9.3 ± 6.3
19	36.98136	20.32576	-0.59 ± 0.30	14.0 ± 7.0
20	36.98320	20.32740	-0.67 ± 0.20	20.3 ± 7.9
21	36.98427	20.32871	-0.68 ± 0.10	47.0 ± 13.8
22	36.98468	20.32968	-0.81 ± 0.37	11.4 ± 5.5
23	36.98507	20.33032	-0.76 ± 0.27	15.6 ± 6.8
24	36.98537	20.33099	-0.75 ± 0.38	11.6 ± 5.9
25	36.98557	20.33196	-0.53 ± 0.34	11.3 ± 6.2
26	36.97407	20.32237	-0.59 ± 0.57	10.0 ± 8.4
27	36.96752	20.32957	-0.43 ± 0.65	8.1 ± 8.1
28	36.96669	20.33148	-0.11 ± 0.82	4.4 ± 6.1
29	36.96628	20.33210	0.00 ± 0.59	7.3 ± 9.2
30	36.96681	20.33418	-0.13 ± 0.60	7.4 ± 8.5
31	36.96746	20.33482	-0.38 ± 0.39	13.5 ± 10.6
NGC 3945				
1	178.33182	60.63738	0.11 ± 0.48	23.9 ± 15.0
2	178.33905	60.63948	0.02 ± 0.49	42.1 ± 25.3
3	178.34722	60.64681	0.16 ± 0.26	32.0 ± 11.4
4	178.34934	60.64918	0.11 ± 0.33	37.0 ± 16.2
5	178.34925	60.65018	-0.03 ± 0.46	35.0 ± 19.2

Таблица 4. (Продолжение)

ID	RA, deg J2000.0	Dec, deg J2000.0	N_2	$EW(H\alpha), \text{\AA}$
6	178.34922	60.65108	-0.03 ± 0.62	35.8 ± 26.2
7	178.34956	60.65266	-0.04 ± 0.49	32.6 ± 18.7
8	178.34967	60.65958	0.01 ± 0.60	27.2 ± 20.0
9	178.34967	60.66456	-0.05 ± 0.73	19.2 ± 16.3
10	178.34889	60.66640	-0.11 ± 0.67	18.7 ± 13.9
11	178.34853	60.66761	-0.15 ± 0.49	28.1 ± 14.7
12	178.32745	60.67447	-0.03 ± 0.63	3.6 ± 2.7
13	178.32445	60.67743	-0.06 ± 0.67	2.0 ± 1.6
14	178.32423	60.67844	-0.12 ± 0.53	2.9 ± 1.7
15	178.30942	60.68739	-0.15 ± 0.73	5.2 ± 4.1
16	178.34244	60.67676	-0.11 ± 0.70	26.3 ± 20.4
17	178.34526	60.68392	-0.28 ± 0.52	49.1 ± 24.3
18	178.32551	60.70356	-0.29 ± 0.57	56.8 ± 30.3
19	178.31828	60.70888	-0.49 ± 0.55	50.7 ± 21.9
20	178.26268	60.69782	-0.42 ± 0.25	89.2 ± 19.1
21	178.26173	60.69399	-0.50 ± 0.22	86.5 ± 15.6
22	178.26233	60.69189	-0.35 ± 0.70	22.5 ± 14.1
23	178.26233	60.68859	0.01 ± 0.76	19.7 ± 18.2
24	178.26194	60.68594	-0.22 ± 0.68	28.9 ± 19.8
25	178.26358	60.68541	-0.34 ± 0.40	44.0 ± 15.8
26	178.26279	60.68199	-0.24 ± 0.43	50.9 ± 22.1
27	178.26508	60.68168	-0.27 ± 0.47	48.6 ± 22.1
28	178.26416	60.68080	-0.17 ± 0.56	52.1 ± 30.9
29	178.26507	60.67756	-0.09 ± 0.50	45.8 ± 25.8
30	178.26868	60.67630	-0.21 ± 0.49	46.9 ± 23.3
31	178.26782	60.67493	-0.23 ± 0.35	45.4 ± 16.0
NGC 4324				
1	185.76983	5.24665	-0.31 ± 0.18	4.6 ± 1.0
2	185.77041	5.24769	-0.34 ± 0.23	3.4 ± 0.9
3	185.77093	5.24888	-0.34 ± 0.33	2.2 ± 0.8
4	185.77160	5.24979	-0.29 ± 0.31	2.0 ± 0.7
5	185.77252	5.25093	-0.28 ± 0.39	1.4 ± 0.6
6	185.77387	5.25174	-0.58 ± 0.47	1.3 ± 0.5
7	185.77570	5.25351	-0.50 ± 0.19	3.5 ± 0.7
8	185.77749	5.25409	-0.49 ± 0.51	1.4 ± 0.7
9	185.77904	5.25462	-0.41 ± 0.35	2.2 ± 0.8
10	185.78055	5.25505	-0.29 ± 0.26	3.3 ± 1.0
11	185.78109	5.25425	-0.32 ± 0.30	2.8 ± 1.0
12	185.78031	5.25250	-0.36 ± 0.22	3.6 ± 0.9
13	185.77978	5.25068	-0.53 ± 0.07	12.3 ± 1.2
14	185.77887	5.24973	-0.43 ± 0.15	4.9 ± 0.8
15	185.77756	5.24883	-0.45 ± 0.20	3.3 ± 0.7
16	185.77642	5.24747	-0.42 ± 0.18	3.9 ± 0.8
17	185.77506	5.24687	-0.32 ± 0.29	2.1 ± 0.7
18	185.77382	5.24630	-0.27 ± 0.26	2.4 ± 0.8

Таблица 4. (Продолжение)

ID	RA, deg J2000.0	Dec, deg J2000.0	N_2	$EW(H\alpha)$, Å
UGC 36				
1	1.31024	6.77556	-0.29 ± 0.20	7.1 ± 2.4
2	1.31010	6.77672	-0.20 ± 0.51	3.0 ± 2.1
3	1.30979	6.77464	-0.24 ± 0.43	2.4 ± 1.3
4	1.30971	6.77222	-0.31 ± 0.20	4.3 ± 1.2
5	1.30937	6.77128	-0.41 ± 0.19	4.4 ± 1.1
6	1.30931	6.76770	-0.47 ± 0.45	6.7 ± 4.2
7	1.30920	6.77036	-0.42 ± 0.18	4.9 ± 1.2
8	1.30853	6.76925	-0.44 ± 0.11	9.5 ± 1.7
9	1.30791	6.76861	-0.49 ± 0.20	6.1 ± 1.6
10	1.30791	6.77611	-0.18 ± 0.31	4.3 ± 2.1
11	1.30752	6.77503	-0.33 ± 0.19	5.9 ± 1.6
12	1.30729	6.76795	-0.55 ± 0.15	10.1 ± 2.3
13	1.30676	6.77359	-0.47 ± 0.12	9.4 ± 1.8
14	1.30670	6.77439	-0.34 ± 0.20	6.6 ± 2.0
15	1.30642	6.77264	-0.26 ± 0.20	4.0 ± 1.2
16	1.30603	6.77181	-0.30 ± 0.26	3.9 ± 1.4
17	1.30606	6.76942	-0.31 ± 0.39	2.8 ± 1.4
18	1.30625	6.76720	-0.48 ± 0.24	7.2 ± 2.4
19	1.30575	6.77125	-0.31 ± 0.25	4.5 ± 1.6
20	1.30558	6.76803	-0.31 ± 0.42	3.4 ± 1.9
21	1.30522	6.77073	-0.32 ± 0.48	3.2 ± 1.9
22	1.30499	6.77006	-0.30 ± 0.31	5.4 ± 2.5
23	1.30522	6.76948	-0.33 ± 0.25	6.7 ± 2.5
24	1.30491	6.76831	-0.45 ± 0.25	8.9 ± 3.4
25	1.30494	6.77364	-0.46 ± 0.32	12.2 ± 6.8
26	1.30440	6.76962	-0.19 ± 0.54	4.3 ± 3.6
27	1.30362	6.76478	-0.39 ± 0.48	10.3 ± 8.5

Однако, несмотря на то, что большая часть эмиссионных областей в кольцах — это области текущего звездообразования, в которых газ возбуждается молодыми звездами, в некоторых галактиках оказалось по несколько областей с признаками доминирования ударного возбуждения. На гистограммах рис. 3 они стоят особняком от основной массы областей. Особенно в тех галактиках, где эмиссионные области концентрируются к внешнему кольцу, области с ударным возбуждением группируются и выделяют сегмент кольца, где доминирующее возбуждение газа не связано с зонами Стремгrena. Рассмотрим это явление индивидуально в каждой галактике.

NGC 160. Здесь четыре области с переходным типом возбуждения, $-0.15 < N_2 < -0.03$, концентрируются в юго-западном окончании кольца и описывают дугу раствором около 19° градусов на расстоянии $44''$, или 18 кпк, от центра галактики.

Еще пара областей ударного возбуждения видна во внутренней области галактики к югу и к западу от ядра. Именно на юго-западном окончании кольца эмиссионные области выглядят куда более диффузными, чем на северном. Pogge and Eskridge (1993), картировавшие эту галактику в узком фильтре, включавшем обе эмиссионные линии, $H\alpha$ и $[N II] \lambda 6583$, тоже рисовали картинку с пониженной яркостью эмиссии на южном — юго-западном сегменте кольца.

NGC 473. У этой галактики нет областей ударного возбуждения в кольце — возможно, потому, что кольцо внутреннее, радиусом всего 2 кпк. Зато есть пара диффузных областей с ударным возбуждением сразу за пределами кольца.

NGC 932. У этой галактики области ударного возбуждения, с $N_2 > -0.10$, — строго на запад от ядра. Причем ударное возбуждение наблюдается в конусе раствором 15° в более внешнем по отношению к кольцу квазирукаве на радиусе $40''$. Более того, в том же направлении на расстоянии $48''$ от центра NGC 932 можно заметить отдельное очень диффузное в эмиссионных линиях облако — возможно, карликовый спутник. Не является ли это направление на запад направлением прихода внешнего газа, провзаимодействовавшего с собственным газом галактики?

UGC 36. В этой галактике областей ударного возбуждения не обнаружено.

NGC 3945. Эта галактика — довольно близкая к нам, поэтому внешнее кольцо с эмиссионными сгустками — очень большое в угловой мере, с радиусом $2'5$ (16.5 кпк). Эмиссионные области распределены вдоль внешнего кольца неравномерно, с заметной концентрацией в юго-восточном и северо-западном сегментах, и полным их отсутствием в юго-западной части кольца. При этом у юго-восточного и северо-западного сегментов кольца разное возбуждение эмиссионных областей. Области в юго-восточном сегменте, в конусе раствором почти 50° , выглядят более диффузными, чем северные области звездообразования, и имеют N_2 больше нуля, у самых ярких областей — $N_2 = +0.16 \pm 0.26$ и $N_2 = +0.11 \pm 0.33$, что означает доминирование ударного возбуждения (Kewley et al., 2006). Еще одна область с таким же высоким N_2 находится во внутреннем кольце галактики — заведомо резонансом — на восточном конце бара.

3.2. Развитие процесса звездообразования в кольцах в пространстве и во времени

Индикаторы звездообразования, характеризующие различные наблюдательные проявления молодых (массивных) звезд, такие как эмиссия зоны Стремгrena, ультрафиолетовый поток от горячих звезд, голубой цвет, тоже от заметного присутствия

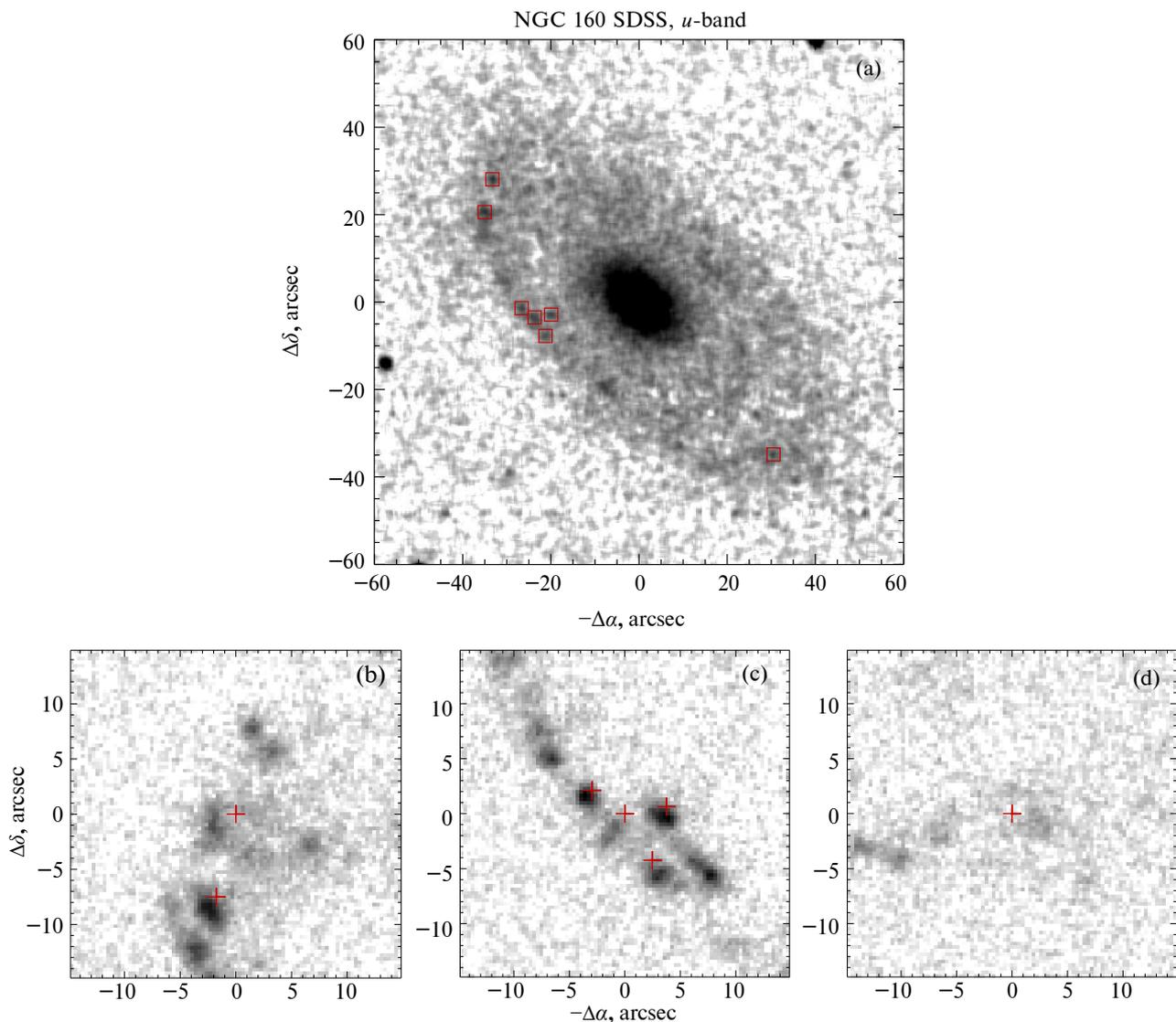


Рис. 4. Сравнение положений областей звездообразования, видимых в полосе фильтра *u* и в эмиссионной линии $H\alpha$, в кольце NGC 160. На панели (a) показана карта в фильтре *u* по данным SDSS, красными прямоугольниками выделены области, для которых на панелях (b)–(d) показаны в большем масштабе распределения эмиссии $H\alpha$. Положения сгустков на карте в фильтре *u* обозначены на увеличенных фрагментах красными крестами.

массивных горячих звезд, на самом деле в количественном отношении характеризуют темпы звездообразования на разных временных масштабах. Зоны Стремгrena образуются вокруг звезд массивнее $8 M_{\odot}$, которые живут всего порядка 10 млн лет, поэтому эмиссионные линии $H\alpha$ характеризуют текущие (мгновенные) темпы звездообразования. С другой стороны, в ультрафиолетовом диапазоне излучают и поздние *B*-звезды, поэтому ультрафиолетовый поток характеризует темпы звездообразования на временной шкале порядка 10^8 лет, и чем больше центральная длина волны ультрафиолетового фильтра, тем больше временной масштаб измеряемых темпов звездообразования: для фильтра FUV/GALEX (1500 \AA) это 100 млн лет,

для фильтра NUV/GALEX (2300 \AA) — 200 млн лет (Kennicutt and Evans, 2012), а для фильтра *u* это уже шкала, близкая к 1 млрд лет. Поэтому так интересно оказалось обнаружить, что области звездообразования, видимые в эмиссии $H\alpha$ и видимые в фильтре *u* в кольце галактики NGC 4324, иногда пространственно не совпадают друг с другом (Proshina et al., 2022). В цитируемой выше статье мы высказали идею локального стимулирования начала звездообразования между комплексами, яркими в *u*, путем, например, раздувания вокруг старых комплексов оболочек, поджимающих газ.

В выборке колец звездообразования, представляемых в данной статье, нашлись и еще аналогичные случаи несовпадения локализации областей

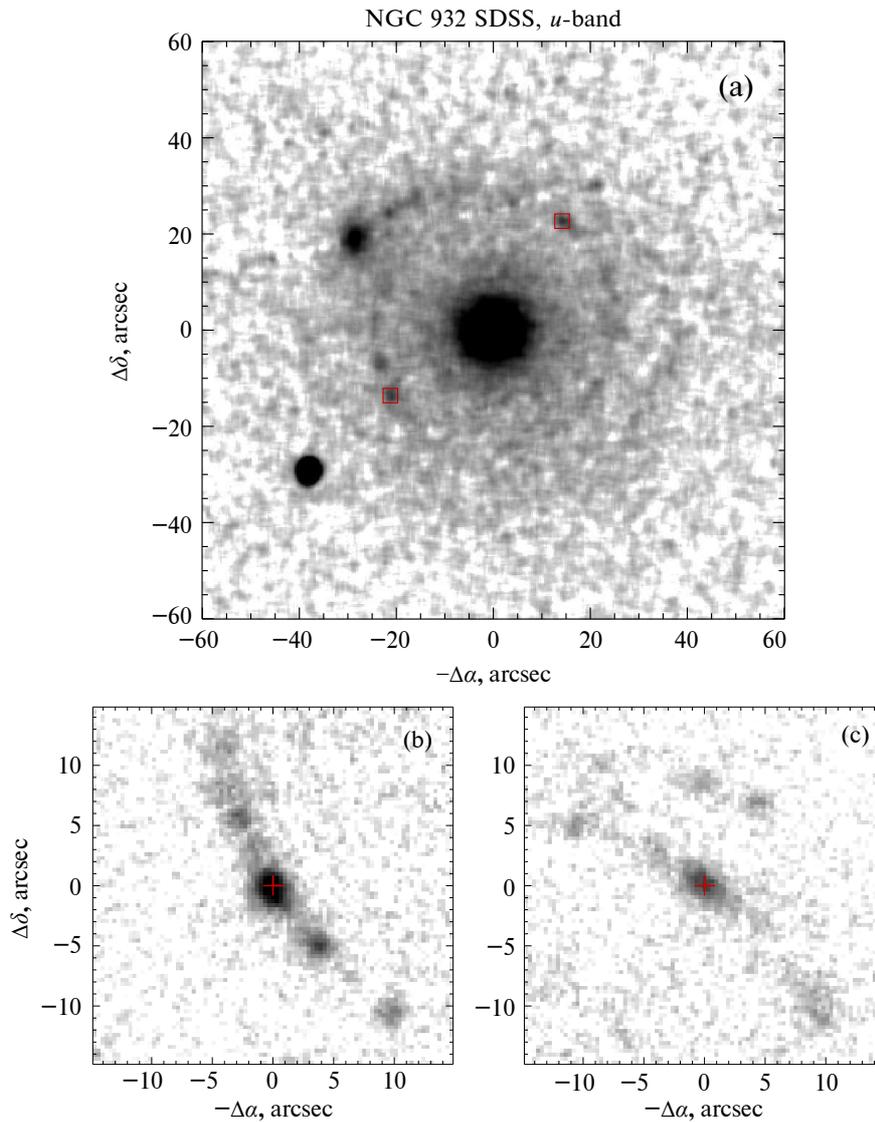


Рис. 5. То же, что на рис. 4, но в кольце NGC 932.

звздообразования, ярких в $H\alpha$ и в u . На рис. 4 представлено сравнение положения областей звездообразования на карте в u и на карте $H\alpha$ для некоторых участков кольца NGC 160 (рисунки 4b–4d). Мы видим явные сдвиги между сгустками в u и в $H\alpha$. В некоторых случаях — на северном (рисунок 4b) и на южном (рисунок 4d) окончании кольца — при известной доле воображения можно увидеть миникольца эмиссии $H\alpha$ вокруг положения комплексов в u . Отметим, что такая картина наблюдается при последовательном стимулировании звездообразования в карликовых галактиках (см., к примеру, рис. 1 в статье Egorov et al. (2017)).

Наиболее очевидная оболочка в $H\alpha$ принадлежит южному окончанию кольца, и именно здесь газ в кольце NGC 160 частично возбужден ударом (см. предыдущий раздел).

С другой стороны, есть и противоположные примеры. Так, в NGC 932 (рис. 5) положения областей звездообразования на карте в u и на карте $H\alpha$ совпадают. Мы полагаем, что тот или иной рисунок взаимного расположения u - и $H\alpha$ -сгустков может быть связан с давностью начала звездообразования в кольце. Судя по всему, звездообразование в кольцевых структурах — локальный быстротекущий процесс, с временным масштабом не более нескольких сотен миллионов лет (Proshina et al., 2019). Тогда, если звездообразование началось совсем недавно, в пределах немногих десятков миллионов лет, области звездообразования в u и в $H\alpha$ будут совпадать. А вот если после начала звездообразования прошло несколько сотен миллионов лет, мы уже можем иметь комплексы, видимые в u , звездообразование в которых на данный момент затухло, и они больше не излучают в $H\alpha$. А

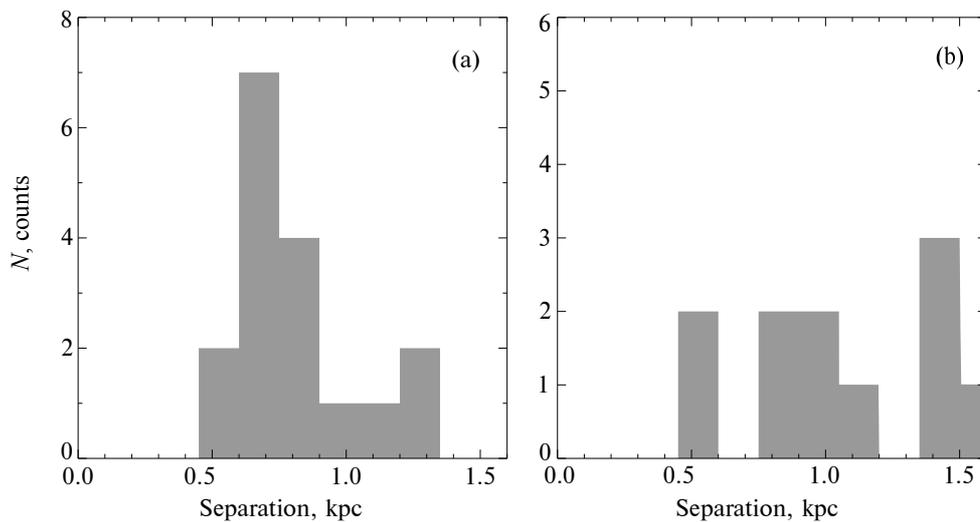


Рис. 6. Гистограмма распределения расстояний между соседними компактными областями эмиссии $H\alpha$ (a) и в широкополосном ультрафиолетовом фильтре u (b) для галактики NGC 4324.

области с текущим, недавно стимулированным по соседству звездообразованием ярки в $H\alpha$, но еще не успели «нарастить» молодое звездное население, яркое в u .

Именно мгновенный характер областей звездообразования, видимых в $H\alpha$, при малых временных масштабах развития процесса, приводит к тому, что на картах эмиссии мы отмечаем регулярно распределенные вдоль колец сгустки — области звездообразования. Характерные расстояния между ними связаны с пространственным масштабом локальной гравитационной неустойчивости. Например, расстояния между соседними областями звездообразования (сгустками $H\alpha$) в кольце NGC 4324 строго группируются к значению 700 пк (рис. 6a), расстояние в 1.3 кпк — это, очевидно, удвоенный характерный масштаб в случае «пропущенных» сгустков. Если же мы переходим к индикаторам звездообразования, характеризующим «усредненное» на шкале сотен миллионов лет звездообразование, то из-за локального затухания и стимулирования процесса с теми же характерными временами мы получаем размазанную картину. Характерные масштабы в пространственном распределении сгустков в полосе u исчезают (рис. 6b), и в целом ультрафиолетовые кольца выглядят куда более однородными, чем кольца в эмиссии $H\alpha$ (рис. 1).

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

4.1. Место колец звездообразования в структуре галактик и их происхождение

Происхождение колец звездообразования в дисках обычно связывают с резонансами баров:

особенно для внешних колец часто предполагается, что из-за характерных форм орбит на внешнем линдбладовском резонансе бара газ там накапливается, соответственно уплотняется и начинает формировать молодые звезды (Byrd et al., 1998; Schwarz, 1981). Однако в нашей маленькой выборке у пяти галактик из шести бара нет. В дополнение к их морфологической классификации (таблица 1) мы представляем изофотный анализ для NGC 160, NGC 473, NGC 932 и UGC 36 на рис. 7 (изофотный анализ для NGC 4324 приведен Proshina et al., 2019): у галактик отсутствует разворот большой оси изофот и/или локальный максимум эллиптичности вблизи центра. Остается предположить аккреционную природу колец (Buita and Combes, 1996), связанную с недавним приобретением большого количества холодного газа извне, тем более что в некоторых случаях, например в NGC 932, мы напрямую видим возможное направление прихода газа и его потенциальный источник.

Тем не менее все кольца в нашей небольшой выборке занимают весьма разное место в структуре галактики. На рис. 8 представлены профили поверхностной яркости, в основном в широкополосном фильтре r , который хотя и включает в диапазон эмиссию $H\alpha$, но в наших скромных по темпам звездообразования галактиках характеризует скорее распределение поверхностной плотности старых звезд. Только для NGC 4324 и NGC 3945 профили поверхностной яркости представлены в фильтре g . Те кольца, которые мы увидели в эмиссии $H\alpha$, — или похожие на них, — можно заметить в распределении поверхностной плотности звезд. Опишем коротко каждый из случаев, сравнивая положение звездного кольца с кольцом в эмиссии $H\alpha$ (радиусы которых даны в таблице 3).

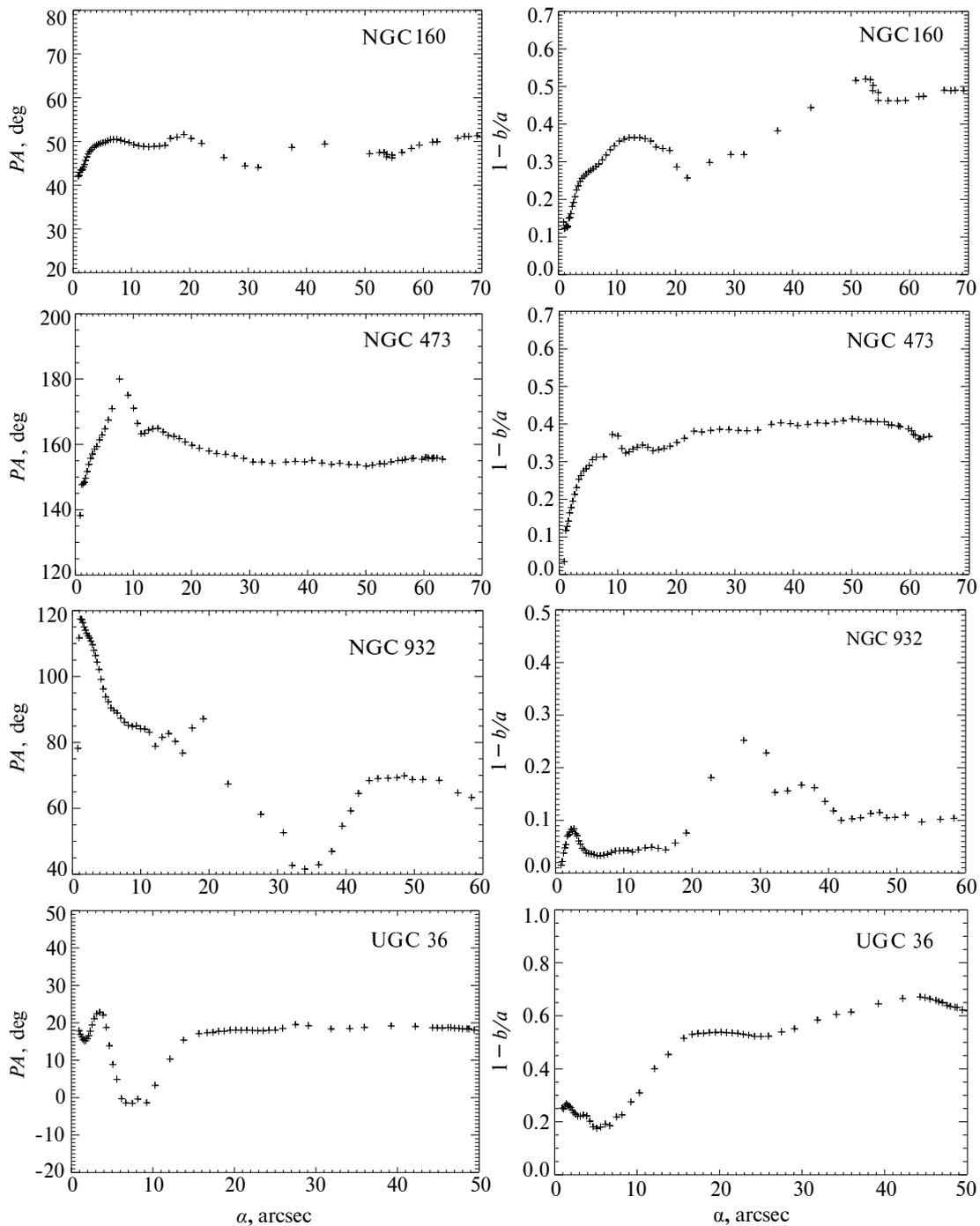


Рис. 7. Изотопный анализ изображений четырех галактик в полосе r по данным DECaLS.

NGC 160. Звездное кольцо — широкое и симметричное, располагается примерно на том же радиусе, $R = 47''$, что и кольцо эмиссионных областей (которое, впрочем, тоже «распушается» и раздваивается на некоторых азимутах). Мы вписали в профиль одну экспоненту, «выкусив» предварительно кольцо в диапазоне радиусов $25''-70''$, и получили зависимость

$\mu_r = 20.5 + 1.086R''/21''^3$. Отметим, что если проигнорировать широкое звездное кольцо, то профиль поверхностной яркости галактики можно ошибочно классифицировать как профиль типа II, «обрезанный» (Méndez-Abreu et al., 2017).

NGC 473. Обладает протяженным экспоненциальным диском, $\mu_r = 19.8 + 1.086R''/14''^5$, который начинает доминировать с радиуса примерно

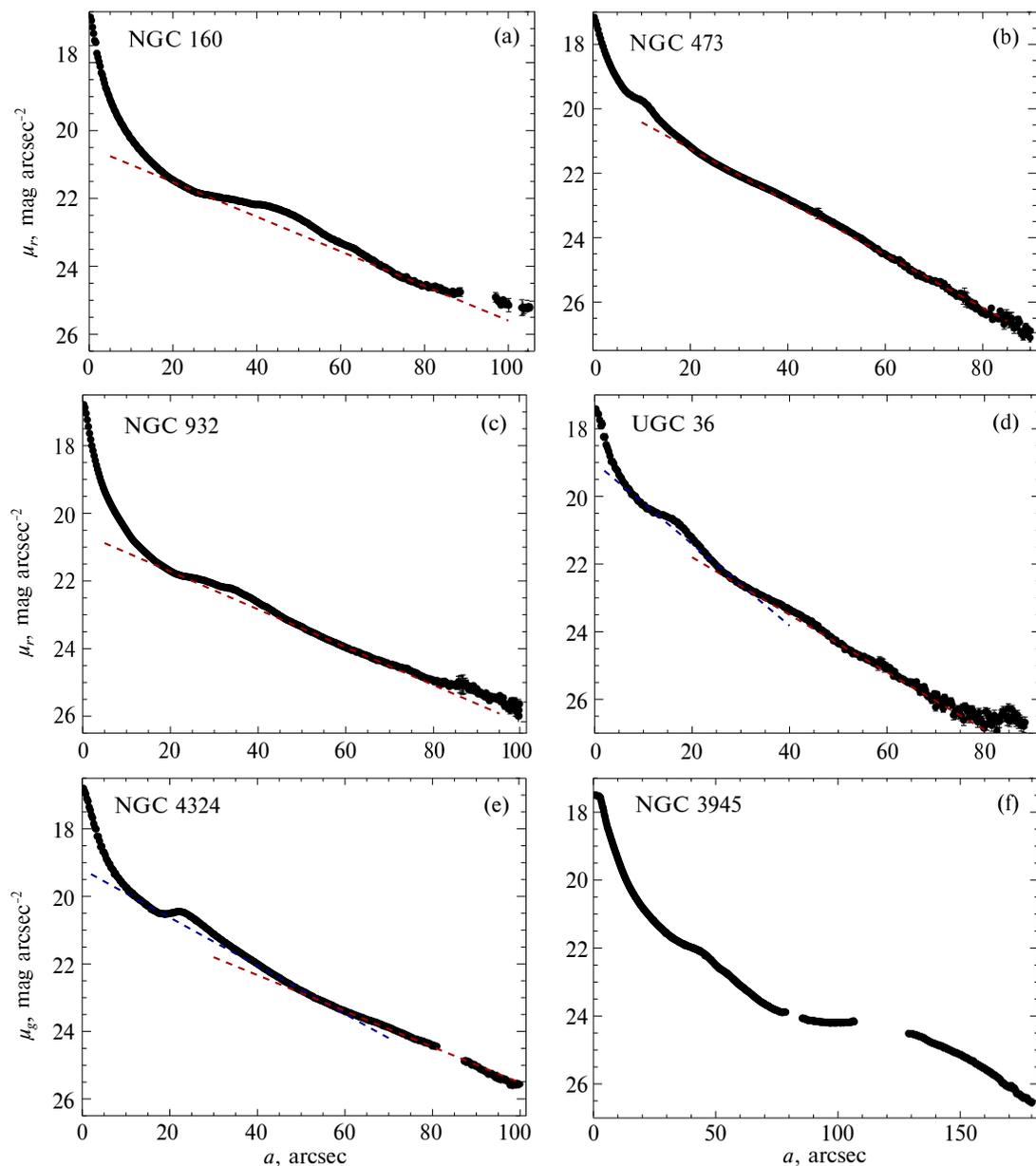


Рис. 8. Азимутально усредненные профили поверхностной яркости в широкополосном фильтре r для галактик NGC 160), NGC 473, NGC 932 и UGC 36, а также азимутально усредненные профили поверхностной яркости в широкополосном фильтре g для галактик NGC 4324 и NGC 3945, по данным DECaLS. Для диапазонов радиусов, в которых доминируют звездные диски, показаны экспоненциальные приближения профилей поверхностной яркости.

$20''$ (3.3 кпк). Малоcontrastное кольцо располагается ближе к центру, чем радиус доминирования диска, но его положение согласуется с положением кольца эмиссионных областей.

NGC 932. Профиль поверхностной яркости этой галактики похож на профиль поверхностной яркости NGC 160: тоже заметный балдж, тоже протяженный экспоненциальный диск, $\mu_r = 20.6 + 1.086R''/19''.4$, тоже широкое звездное кольцо, погруженное в диск — только оно еще менее контрастное, чем у NGC 160. Радиус

эмиссионного кольца, отмеченный в таблице 3, $26''$ (7 кпк), чуть меньше, чем радиус звездного кольца, $36''$ (9.8 кпк), однако с учетом внешних квазиспиралей в эмиссии, отходящих от кольца, получится примерное согласие радиусов.

UGC 36. В этой галактике, как и в NGC 473, кольцо ближе к центру, чем радиус начала доминирования главного звездного диска, $28''$ (12.8 кпк), экспоненциальный профиль которого описывается законом $\mu_r = 20.3 + 1.086R''/14''$. Однако, учитывая большой линейный размер галактики и то, что

эллиптичность изофот выходит на плато значительно ближе к центру, где-то на $R = 15''$, можно предположить, что существует еще внутренний сегмент диска, $\mu_r = 19.0 + 1.086R''/9''$, посередине которого и локализуется как звездное, так и эмиссионное кольцо.

NGC 4324. У этой галактики — классическое внутреннее кольцо, с крутым внутренним обрывом и пологим внешним краем. Полный профиль поверхностной яркости этой галактики можно описать двухярусным профилем типа III, с внешним сегментом на $R > 50''$ $\mu_g = 20.2 + 1.086R''/20''$ и с внутренним сегментом, содержащим кольцо, $\mu_g = 19.2 + 1.086R''/15''$.

NGC 3945. Эта галактика имеет сложный профиль поверхностной яркости (рис. 8). Она неоднократно исследовалась методами поверхностной фотометрии, и все исследователи отмечали ее многокомпонентность. Например, Laurikainen et al. (2011), кроме диска, бара/линзы и балджа, отмечали внешнее кольцо на $R = 121''$, внутреннее кольцо/край внутренней линзы на $R = 46''$ и ядерное кольцо/ядерную линзу на $R = 11''$. Laine et al. (2014) классифицировали профиль поверхностной яркости NGC 3945 как профиль II типа с переломом на $R = 133''$. Но является ли деталь на радиусе $120''$ – $133''$ внешним широким звездным кольцом или переломом на «обрезанном» профиле поверхностной яркости, в любом случае эта деталь расположена ближе к центру, чем кольцо звездообразования (таблица 3).

Если сравнивать радиус бара и кольца у NGC 3945, то, взяв оценку радиуса бара у Erwin (2005), получаем отношение $R_{\text{ring}}/R_{\text{bar}} = 3.8$. Это существенно превышает радиус резонансных колец на внешнем линдбладовском резонансе, которые согласно Vuta (2017) должны иметь $R_{\text{ring}}/R_{\text{bar}} = 1.5$ – 2.0 . То есть и в NGC 3945, единственной галактике нашей выборки, имеющей бар, внешнее кольцо — аккреционное (у нее есть еще внутреннее кольцо вокруг бара, вот оно — резонансное). У пяти других галактик выборки бара нет вовсе.

Радиусы аккреционных колец должны определяться орбитальным моментом аккрецируемого газа — то есть по отношению к внутренним структурным параметрам галактик радиус кольца может быть произвольным. Это предсказание подходит к широкому разнообразию положения колец звездообразования в нашей небольшой выборке галактик. Кольца в эмиссии в основном совпадают по положению с кольцами в континууме, которые, впрочем, малоконтрастны (рис. 8). В некоторых немногочисленных случаях эмиссионное кольцо дальше от центра, чем звездное (NGC 3945 и, возможно, NGC 932). Внешние кольца у четырех

галактик погружены в диски где-то посередине экспоненциальных участков, внутренние кольца у NGC 473 и NGC 4324 визуально находятся на границе доминирования балджа и диска.

4.2. Положение S0-галактик с кольцами звездообразования на масштабных зависимостях

У галактик есть так называемые масштабные зависимости, которые статистически связывают совершенно разные их физические характеристики — причем как интегральные характеристики галактик, так и локальные, относящиеся к участкам дисков. В частности, масштабные соотношения есть и для темпов звездообразования: изучая положение галактики на этих масштабных соотношениях, мы можем сделать вывод, насколько «нормальны» темпы звездообразования в данной галактике с учетом других ее параметров. Одной из первых была установлена зависимость темпов звездообразования от количества газа в галактике (или локально — зависимость плотности темпов звездообразования от поверхностной плотности газа в какой-то области галактики), и это совершенно понятно, учитывая, что молодые звезды образуются именно из газа; зависимость назвали законом Кенниката—Шмидта (Schmidt, 1959; Kennicutt, 1998; Bigiel et al., 2008). Затем, уже в эпоху массовых обзоров галактик, была открыта прямая пропорциональная зависимость между звездной массой галактики и ее интегральными темпами звездообразования — эту зависимость назвали «главной последовательностью» (Brinchmann et al., 2004; Noeske et al., 2007; Gruppioni et al., 2013). Вот существование «главной последовательности» уже не было заранее очевидно и предсказано: то, что поделив звездную массу на темпы звездообразования, мы получаем, как правило, время формирования звездного компонента, сравнимое с хаббловским, позволяет сделать глобальный вывод, что галактики — подавляющее большинство — образуют звезды в стационарном плавном режиме на протяжении всей своей жизни. Этот вывод был неожиданным на фоне космологической концепции, согласно которой галактики должны на протяжении своей жизни сливаться друг с другом при случайных встречах и испытывать при этом короткие вспышки звездообразования. Выяснилось, что слияния не играют роли в истории звездообразования большинства дисковых галактик. А что играет? Собственно, из этого и родилась идея определяющей роли плавной постоянной аккреции холодного внешнего газа в диски спиральных галактик, составляющих население главной последовательности.

Недавно был закончен большой обзор содержания нейтрального водорода в галактиках ближайшей Вселенной на огромном радиотелескопе Аресибо,

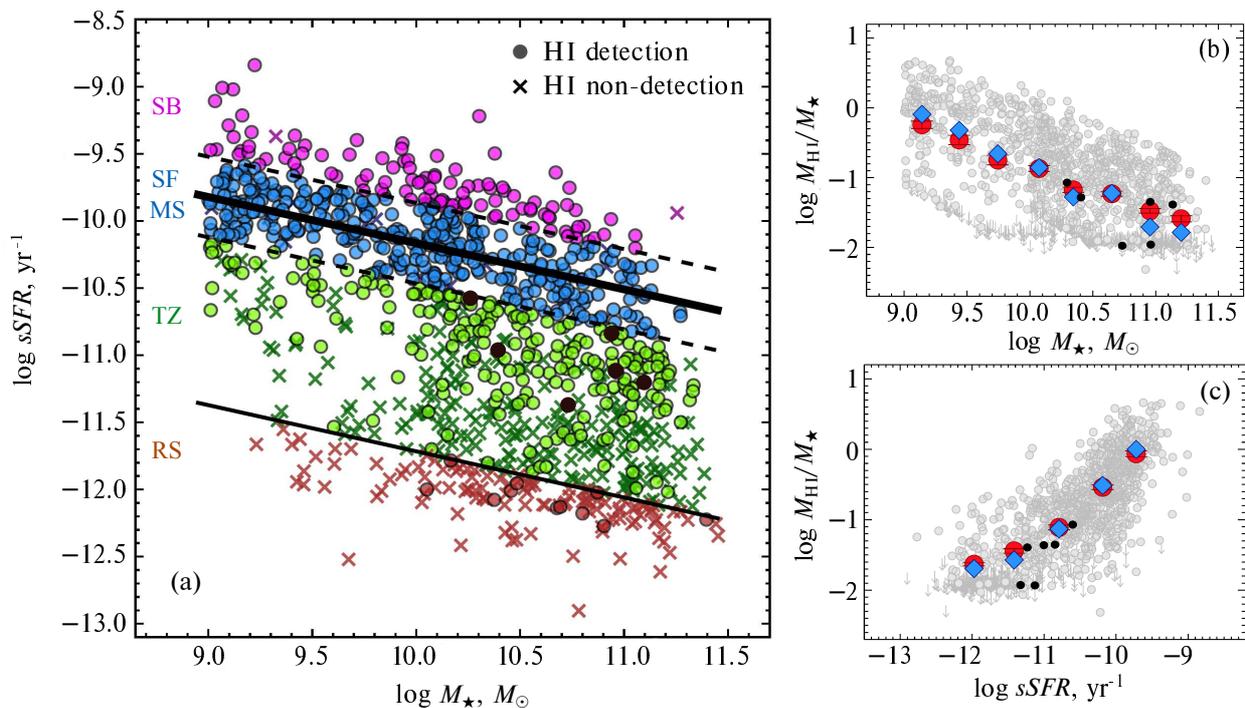


Рис. 9. Положение интегральных характеристик исследуемых S0 галактик (черные кружки) на масштабных соотношениях для дисковых галактик ближней Вселенной, установленных в рамках обзора xGASS (Catinella et al., 2018; Janowiecki et al., 2020). На панели (а) представлена «главная последовательность» темпов звездообразования галактик, помеченная буквами MS и синим цветом. Зеленые значки относятся к «зеленой долине» (обозначена буквами TZ, Transition Zone), где у галактик притуплено звездообразование. На панелях (b) и (c) маленькие значки (индивидуальные галактики) и крупные значки (красные — взвешенные средние, голубые — медианные значения, в бинах по параметрам) характеризуют относительное содержание нейтрального водорода в галактиках в зависимости от их звездной массы и удельных темпов звездообразования.

ALFALFA, и последнее десятилетие идет активный анализ его результатов. В частности, были обновлены основные масштабные соотношения, связанные с содержанием газа в галактиках (Catinella et al., 2018). Мы оценили «нормальность» галактик нашей выборки, нанеся их положения на масштабные зависимости, построенные по результатам комбинированных данных обзора xGASS: содержание газа — по данным ALFALFA, темпы звездообразования — по ультрафиолету космического телескопа GALEX, звездные массы — по данным обзора SDSS. (Сама аббревиатура xGASS так и расшифровывается: eXtended GALEX Arecibo SDSS Survey). Результаты этой оценки представлены на рис. 9. Видно, что при нормальном для своих звездных масс содержании газа, галактики нашей выборки попадают заметно ниже главной последовательности; то есть звездообразование в них подавлено. Однако вряд ли их положение в «зеленой долине» говорит о переходе с главной последовательности в «красную» зону. Скорее, они, приобретая холодный газ, движутся снизу вверх в направлении на главную последовательность, хотя могут и не дойти до нее.

Если сравнивать положения наших галак-

тик относительно главной последовательности, обновленной по результатам обзора xGASS (Janowiecki et al., 2020), то получается, что NGC 473 и NGC 4324 лежат на границе главной последовательности и зеленой долины (рис. 9а), а остальные — ниже. Интересно, что именно NGC 473 и NGC 4324 не имеют областей ударного возбуждения в своих кольцах, и именно у них кольца — внутренние. Можно предположить, что наличие локального ударного разогрева газа во внешних кольцах, где собственно приходящий извне газовый поток и присоединяется к диску галактики, может локально же и подавлять темпы звездообразования. Если попытаться ответить на давний вопрос, не связано ли глобально подавленное звездообразование в линзовидных галактиках с пониженным содержанием газа, то рис. 9 говорит о том, что нет — в четырех галактиках из шести содержание нейтрального водорода нормальное для их звездной массы.

Отклоняются вниз от медианной последовательности (рис. 9b,c) только NGC 932 и NGC 3945. У первой из них и металличность газа, оцененная нами, меньше типичной металличности колец звездообразования линзовидных галактик (Sil'chenko

et al., 2019), что может свидетельствовать о совсем недавнем приходе газа и начале звездообразования в кольце: и газа галактика еще не успела достаточно набрать, и металличность в ионизованном молодыми звездами газе еще не поднялась до квазисолнечной. Современные модели химической эволюции учитывают постоянный приток внешнего мало-металлического газа и возможный отток газа, нагретого звездообразованием — «галактического ветра». Эти «открытые» модели демонстрируют, что металличность газа, в котором образуются и эволюционируют массивные звезды, сначала, после старта звездообразования, растет очень быстро; но потом, после того, как масса вновь сформировавшихся звезд сравняется с массой оставшегося газа, она выходит на плато, близкое по уровню к солнечной металличности (Zahid et al., 2014; Ascasibar et al., 2015). Поскольку в кольцах звездообразования характерные времена экспоненциального затухания темпов звездообразования короткие, порядка нескольких сотен миллионов лет (Proshina et al., 2019), процесс химической эволюции в них локально очень быстро выходит на насыщение. Именно этим мы и объясняем то, что в большинстве исследованных нами колец звездообразования в линзовидных галактиках металличность газа практически всегда одна и та же, -0.15 dex (Sil'chenko et al., 2019). А, например, в маломассивных спиральных и карликовых неправильных галактиках наоборот, именно в областях интенсивного звездообразования металличность газа понижена по отношению к окружающей галактике (Mappucci et al., 2010; Sánchez Almeida et al., 2015), поскольку там характерные экспоненциальные времена затухания звездообразования сравнимы с хаббловским.

Что касается NGC 3945, то это совсем особый случай: ее среднее отношение эмиссии $[N II] \lambda 6583$ к $H\alpha$ говорит о вкладе ударной волны в ионизацию по всему кольцу, да и то, что кольцо находится практически за пределами старого звездного диска, ставит звездообразование в нем в особые условия.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы исследовали небольшую выборку линзовидных галактик, богатых газом, принадлежащих «зеленой долине», и обнаружили в них кольца звездообразования. Методом узкополосной фотометрии с помощью перестраиваемого картировщика MaNGA на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ мы получили изображения галактик в эмиссионных линиях $H\alpha$ и $[N II] \lambda 6583$ и посчитали отношения потоков линий в разных локализациях вдоль колец. Механизм возбуждения газа, оцененный по отношению потоков линий $H\alpha$ и $[N II] \lambda 6583$, оказался неоднороден: у трех внешних колец наблюдаются узкие сегменты позиционных углов, в которых в кольце доминируют ударные волны. Поскольку

природа колец скорее всего аккреционная — галактики не имеют баров, а NGC 3945, у которой бар есть, демонстрирует кольцо звездообразования слишком далеко от центра, — локализация ударного возбуждения во внешних кольцах указывает на направление прихода внешнего газового потока. Компактные вспышки звездообразования в кольцах вероятно достаточно кратковременны и эффективны: в основном мы наблюдаем однородную субсолнечную металличность газа, близкую к уровню локального насыщения химической эволюции газа в процессе звездообразования. Несовпадения положения областей звездообразования в линиях, в ультрафиолетовом и оптическом диапазонах в NGC 160 и NGC 4324 говорит о переключении локализации очагов звездообразования на застали времени около 100 млн лет. В NGC 932 мы застали самое начало процесса аккреции внешнего газа: его еще мало накопилось в галактике, а металличность газа в кольце звездообразования еще не достигла уровня насыщения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим рецензента, Семена Ароновича Пустильника, за внимательное прочтение рукописи и конструктивные замечания, позволившие ее улучшить. В работе мы пользовались данными базы внегалактических данных NED (NASA/IPAC), которая управляется Лабораторией реактивного движения и Калифорнийским технологическим институтом, по контракту с НАСА. Наши результаты опираются на публичные данные космического телескопа GALEX (NASA Galaxy Evolution Explorer), управлявшимся Калифорнийским технологическим институтом по контракту с НАСА номер NAS5-98034. Данные GALEX взяты из публичного архива MAST (Mikulski Archive for Space Telescopes), который поддерживается космическим офисом НАСА по гранту NNX13AC07G и другим грантам. Также мы использовали данные обзора SDSS-III (<http://www.sdss3.org/>), который поддержан Фондом Альфреда П. Слоана и ассоциацией университетов. Данные оптической фотометрии предоставлены сервисом Legacy Survey (<https://www.legacysurvey.org/>) по результатам обзора DECaLS. DECaLS включает данные, полученные на телескопе Blanco, Межамериканская Обсерватория Серро-Тололо NSF's NOIRLab. NOIRLab управляется Ассоциацией университетов для исследований в астрономии (AURA) по кооперативному соглашению с Национальным научным фондом США. Обработка и анализ данных обзора DECaLS поддерживаются NOIRLab и Национальной лабораторией Лоуренса Беркли (LBNL).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Наблюдения и анализ данных выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-12-00080.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. Alam, F. D. Albareti, C. Allende Prieto, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **219** (1), article id. 12 (2015).
2. Y. Ascasibar, M. Gavilán, N. Pinto, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **448** (3), 2126 (2015).
3. M. Asplund, N. Grevesse, A. J. Sauval, and P. Scott, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **47** (1), 481 (2009).
4. J. A. Baldwin, M. M. Phillips, and R. Terlevich, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **93**, 5 (1981).
5. F. Bigiel, A. Leroy, F. Walter, et al., *Astron. J.* **136** (6), 2846 (2008).
6. J. Brinchmann, S. Charlot, S. D. M. White, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **351** (4), 1151 (2004).
7. R. Buta and F. Combes, *Fundamentals of Cosmic Physics* **17**, 95 (1996).
8. R. J. Buta, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **470** (4), 3819 (2017).
9. G. G. Byrd, D. Ousley, and C. dalla Piazza, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **298** (1), 78 (1998).
10. M. Cappellari, E. Emsellem, D. Krajnović, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **413** (2), 813 (2011).
11. B. Catinella, A. Saintonge, S. Janowiecki, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **476** (1), 875 (2018).
12. H. M. Courtois, R. B. Tully, J. R. Fisher, et al., *Astron. J.* **138** (6), 1938 (2009).
13. G. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, J. Corwin, Herold G., et al., *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies* (Springer, New York, 1991).
14. A. Dey, D. J. Schlegel, D. Lang, et al., *Astron. J.* **157** (5), article id. 168 (2019).
15. O. V. Egorov, T. A. Lozinskaya, A. V. Moiseev, and Y. A. Shchekinov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **464** (2), 1833 (2017).
16. P. Erwin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **364** (1), 283 (2005).
17. C. Gruppioni, F. Pozzi, G. Rodighiero, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **432** (1), 23 (2013).
18. J. E. Gunn and I. Gott, *J. Richard, Astrophys. J.* **176**, 1 (1972).
19. B. W. Holwerda, N. Pirzkal, and J. S. Heiner, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **427** (4), 3159 (2012).
20. E. P. Hubble, *Realm of the Nebulae* (New Haven: Yale University Press, 1936).
21. S. Janowiecki, B. Catinella, L. Cortese, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **493** (2), 1982 (2020).
22. J. Kennicutt, Robert C., *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **36**, 189 (1998).
23. R. C. Kennicutt and N. J. Evans, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **50**, 531 (2012).
24. L. J. Kewley, B. Groves, G. Kauffmann, and T. Heckman, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **372** (3), 961 (2006).
25. J. Laine, E. Laurikainen, H. Salo, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **441** (3), 1992 (2014).
26. R. B. Larson, B. M. Tinsley, and C. N. Caldwell, *Astrophys. J.* **237**, 692 (1980).
27. E. Laurikainen, H. Salo, R. Buta, and J. H. Knapen, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **418** (3), 1452 (2011).
28. E. Laurikainen, H. Salo, R. Buta, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **405** (2), 1089 (2010).
29. J. J. LEMONIAS, D. Schiminovich, D. Thilker, et al., *Astrophys. J.* **733** (2), article id. 74 (2011).
30. A. K. Leroy, K. M. Sandstrom, D. Lang, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **244** (2), article id. 24 (2019).
31. D. Makarov, P. Prugniel, N. Terekhova, et al., *Astron. and Astrophys.* **570**, id. A13 (2014).
32. F. Mannucci, G. Cresci, R. Maiolino, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **408** (4), 2115 (2010).
33. R. A. Marino, F. F. Rosales-Ortega, S. F. Sánchez, et al., *Astron. and Astrophys.* **559**, id. A114 (2013).
34. J. Méndez-Abreu, T. Ruiz-Lara, L. Sánchez-Menguiano, et al., *Astron. and Astrophys.* **598**, id. A32 (2017).
35. A. Moiseev, A. Perepelitsyn, and D. Oparin, *Experimental Astronomy* **50** (2-3), 199 (2020).
36. R. Morganti, P. T. de Zeeuw, T. A. Oosterloo, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **371** (1), 157 (2006).
37. A. Naim, O. Lahav, R. J. Buta, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **274** (4), 1107 (1995).
38. K. G. Noeske, B. J. Weiner, S. M. Faber, et al., *Astrophys. J.* **660** (1), L43 (2007).
39. T. A. Oosterloo, R. Morganti, E. M. Sadler, et al., *Astron. and Astrophys.* **465** (3), 787 (2007).
40. M. Pettini and B. E. J. Pagel, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **348** (3), L59 (2004).
41. R. W. Pogge and P. B. Eskridge, *Astron. J.* **93**, 291 (1987).
42. R. W. Pogge and P. B. Eskridge, *Astron. J.* **106**, 1405 (1993).
43. I. S. Proshina, A. Y. Kniazev, and O. K. Sil'chenko, *Astron. J.* **158** (1), article id. 5 (2019).
44. I. S. Proshina, A. V. Moiseev, and O. K. Sil'chenko, *Astronomy Letters* **48** (3), 139 (2022).
45. L. J. Sage and G. A. Welch, *Astrophys. J.* **644** (2), 850 (2006).
46. S. Salim, J. J. Fang, R. M. Rich, et al., *Astrophys. J.* **755** (2), article id. 105 (2012).
47. J. Sánchez Almeida, B. G. Elmegreen, C. Muñoz-Tuñón, et al., *Astrophys. J.* **810** (2), article id. L15 (2015).
48. M. Schmidt, *Astrophys. J.* **129**, 243 (1959).
49. M. P. Schwarz, *Astrophys. J.* **247**, 77 (1981).
50. P. Serra, T. Oosterloo, R. Morganti, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **422** (3), 1835 (2012).

51. N. Shatsky, A. Belinski, A. Dodin, et al., in *Proc. All-Russian Conf. on Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, Nizhny Arkhyz, Russia, 2020*, Ed. by I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, and D. O. Kudryavtsev, pp. 127-132 (IP Reshenilenko P.A., Pyatigorsk, 2020).
52. O. K. Sil'chenko, A. V. Moiseev, and O. V. Egorov, *Astrophys. J. Suppl.* **244** (1), article id. 6 (2019).
53. D. A. Thilker, L. Bianchi, G. Meurer, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **173** (2), 538 (2007).
54. M. Wardle and G. R. Knapp, *Astron. J.* **91**, 23 (1986).
55. G. A. Welch and L. J. Sage, *Astrophys. J.* **584** (1), 260 (2003).
56. G. A. Welch, L. J. Sage, and L. M. Young, *Astrophys. J.* **725** (1), 100 (2010).
57. H. J. Zahid, G. I. Dima, R.-P. Kudritzki, et al., *Astrophys. J.* **791** (2), article id. 130 (2014).

Star Formation in Lenticular Galaxies with MaNGaL

O. K. Sil'chenko¹, A. V. Moiseev^{1,2}, D. V. Oparin², E. A. Maleeva¹, and I. S. Proshina¹

¹Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

²Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhny Arkhyz 369167, Russia

We present results of studying star-forming rings in six lenticular galaxies obtained with the narrow-band photometry in the H α and [N II] λ 6583 emission lines using the MaNGaL tunable-filter mapper at the 2.5-m telescope of CMO of SAI MSU. The gas excitation mechanism estimated from the relation of the H α and [N II] λ 6583 line fluxes occurred to be inhomogeneous along the ring: three outer rings have narrow segments of position angles, in which shocks waves dominate in the ring. Since the nature of the rings is most likely accretionary, the location of shock excitation in the outer rings indicates the direction of arrival of the external gas flow. Star formation events in the rings are probably quite short and effective: we mainly observe homogeneous sub-solar metallicity of the gas close to the level of local saturation of the gas chemical evolution in the star formation process and switching of the localization of the star-forming sites on a time scale of about 100 Myr. In NGC 932, we have caught the very beginning of the external gas accretion: there is still little of it in the galaxy, and the metallicity of the gas in the star-forming ring has not yet reached saturation.

Keywords: *galaxies: early-type—galaxies: evolution—galaxies: star formation*