

МОЛОДЫЕ ЗВЕЗДООБРАЗУЮЩИЕ КОМПЛЕКСЫ В КОЛЬЦЕ S0 ГАЛАКТИКИ NGC 4324

© 2022 г. И. С. Прошина^{1*}, А. В. Моисеев^{2,1}, О. К. Сильченко^{1**}

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

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

Поступила в редакцию 27.12.2021 г.

После доработки 28.12.2021 г.; принята к публикации 28.12.2021 г.

Представлены результаты исследования областей звездообразования в линзовидной галактике NGC 4324. В ходе комплексного анализа многоволновых наблюдательных данных — узкополосных изображений в эмиссионных линиях, полученных на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ, архивных изображений в фотометрических широких полосах обзоров SDSS, космических телескопов GALEX и WISE — нами обнаружены молодые звездообразующие комплексы (сгустки), расположенные во внутреннем кольце линзовидной галактики NGC 4324, и установлен регулярный характер их распределения вдоль кольца, который тем не менее меняется со временем (с возрастом областей звездообразования). Мы предлагаем несколько возможных вариантов эволюционного пути линзовидной галактики NGC 4324, из которых наиболее вероятным является поглощение богатых газом спутников или гигантских облаков (так называемый малый мерджинг).

Ключевые слова: диски галактик, структура галактик, эволюция галактик.

DOI: 10.31857/S0320010822020048

ВВЕДЕНИЕ

Линзовидные галактики по определению этого морфологического типа обычно считаются дисковыми галактиками без звездообразования. Причиной отсутствия звездообразования в дисках линзовидных галактик опять же традиционно называют дефицит газа в этих галактиках раннего типа. Однако более глубокие обзоры в линиях радиодиапазона недавно показали, что на самом деле в линзовидных галактиках довольно часто есть холодный газ, как нейтральный водород (Сэйдж, Уэлч, 2006; Серра и др., 2012), так и молекулярный газ (Уэлч, Сэйдж, 2003; Уэлч и др., 2010), который может служить топливом для звездообразования. При этом звездообразование, наблюдающееся в некоторых линзовидных галактиках, богатых газом, обычно концентрируется к кольцевым структурам (Подж, Эскридж, 1993; Салим и др., 2012) и, вероятно, имеет другой триггер и несколько иную физику, чем звездообразование в рукавах спиральных галактик. Есть указания на то, что звездообразование в кольцах намного более

эффективно, чем звездообразование в спиральных рукавах (Корменди, Кенникатт, 2004).

Исследуемая в данной работе близкая галактика раннего типа NGC 4324 примечательна ярким голубым кольцом (рис. 1), погруженным в крупномасштабный звездный диск, типичный для линзовидных галактик — красноватого цвета и без структурных деталей, кроме кольца. Голубой цвет кольца указывает на текущее или недавнее звездообразование в нем. Галактика NGC 4324 вошла в состав выборки проекта ATLAS-3D (Каппеллари и др., 2011) и исследовалась методами панорамной спектроскопии. Также есть и фотометрические обзоры, включавшие NGC 4324. В атласе ARRAKIS (Комерон и др., 2014), где собраны кольцевые структуры, заметные в полосах 3.6 и 4.5 мкм, она классифицирована как галактика с внутренним кольцом (L)SA(r)0+. На изображении, оставшемся после вычитания модели галактики, построенной по параметрам, полученным в ходе декомпозиции изображения из обзора S4G (Шет и др., 2010), приведенном в ARRAKIS, угадывается бар, хотя в каталоге из выделенных особенностей указано только кольцо. Но в базе данных HyperLEDA также отмечено наличие бара в этой галактике. По данным этой базы, исследуемая галактика яв-

* Электронный адрес: ii.pro@mail.ru

** Электронный адрес: olga@sai.msu.su

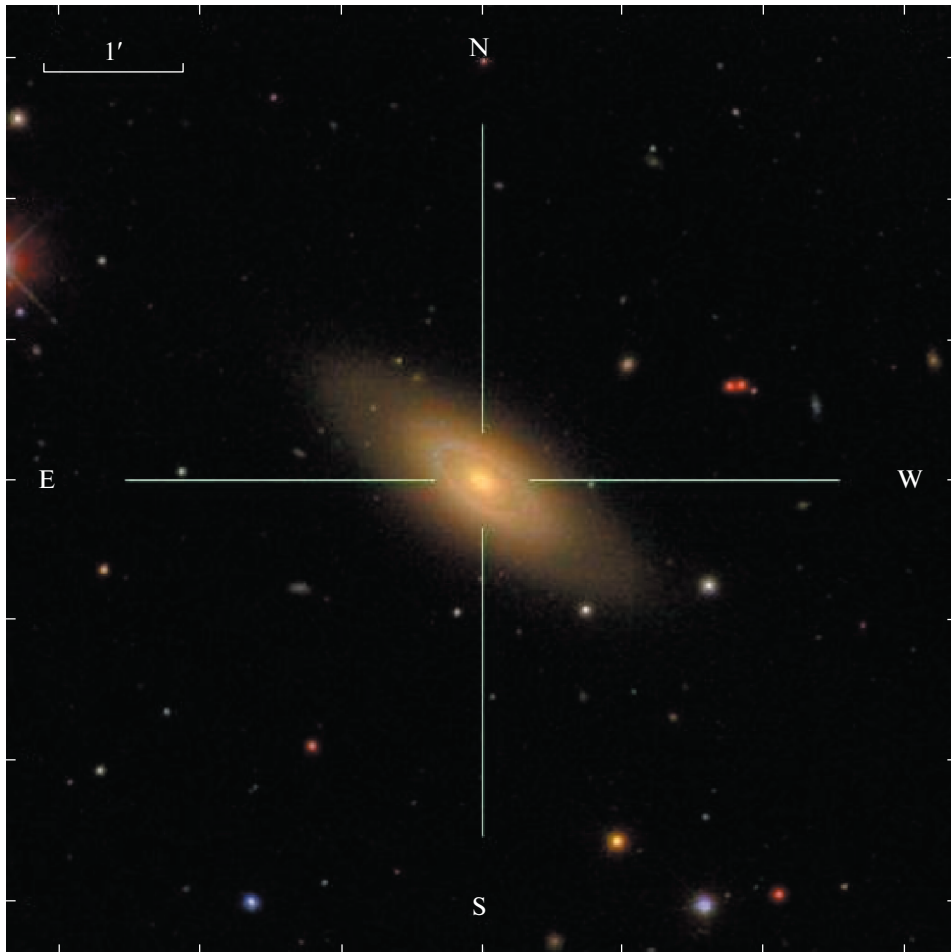


Рис. 1. Изображение NGC 4324 в комбинированных цветах из обзора SDSS, релиз номер 9 (Ан и др., 2012).

ляется членом группы NGC 4303 (Гарсиа, 1993). Основные характеристики исследуемой галактики приведены в табл. 1.

Любопытно то, что в этой галактике раннего типа присутствует газ. Так, в статье проекта ATLAS-3D Янг и др. (2011) приведена оценка массы молекулярного водорода: $\log M_{\text{H}_2} = 7.69 \pm 0.05$. А в детальном исследовании молекулярного газа в рамках того же проекта (Алатало и др., 2013) показаны карты распределения CO-эмиссии и ее кинематики: молекулярный водород сосредоточен в кольце, повторяющем по морфологии и кинематике кольцо, видимое в оптическом диапазоне, и его распределение совпадает со звездным кольцом и кольцом ионизованного газа. Масса молекулярного водорода в этой статье оценивается как $\log M_{\text{H}_2} = 7.97 \pm 0.02$. О совпадении морфологии и вращения молекулярного и ионизованного газа и звездного диска (в окрестностях кольца) говорят полученные в ATLAS-3D (Крайнович и др., 2011; Дэвис и др., 2011а) совпадающие значения кинематических позиционных углов линии узлов

звездного диска $\phi_{\text{star}} = 238^\circ \pm 1^\circ$, молекулярного $\phi_{\text{mol}} = 232.0^\circ \pm 1.8^\circ$ и ионизованного газа $\phi_{\text{ion}} = 239.0^\circ \pm 6.8^\circ$. В статье Дэвиса и др. (2011b) показан нормализованный профиль поверхностной яркости эмиссии молекулярного газа с максимумом на радиусе $20''$ — практически на радиусе звездного кольца, учитывая худшее пространственное разрешение наблюдений в CO.

Наиболее ранние оценки массы нейтрального водорода приведены в статьях Крама и Солпитера (1979) и Джованарди и др. (1983); они составляют $6 \times 10^8 M_\odot$ и $5.1 \times 10^8 M_\odot$ соответственно. Согласно работе Кортеше и Хьюис (2009), в исследуемой галактике содержится $6.76 \times 10^8 M_\odot$ нейтрального водорода. Что касается распределения нейтрального водорода в галактике, то в статье Дюпри и Шнайдера (1996) сообщается, что нейтральный водород детектируется на расстояниях до двух оптических радиусов, т.е. он распределен по диску, а не сосредоточен только в кольце, что согласуется с картой “положение—скорость”, приведенной в статье Хофмана и др. (1989).

Таблица 1. Основные характеристики галактики NGC 4324

Галактика	NGC 4324
Морфологический тип (NED ¹)	SA(r)0 ⁺
R_{25} , '' (RC3 ²)	83
B_T^0 (LEDA ³)	12.27 ^m
M_H (NED)	-23.43 ^m
$(B - V)_e$ (LEDA)	0.92 ^m
PA_{phot} (NED)	52°
Наклон i_{phot} (NED)	63°
V_r , км/с (NED)	1667 ± 3
Расстояние ⁴ , Мпк	26.2
M_B	-19.82 ^m
Линейный масштаб	127 пк/''

¹ NASA/IPAC Extragalactic Database.

² Third Reference Catalogue of Bright Galaxies, де Вокулер и др. (1991).

³ Lyon-Meudon Extragalactic Database.

⁴ Cosmicflow-2, Талли и др. (2013).

Неудивительно, что при таком количестве газа, при том что 50–100 млн солнечных масс H_2 сосредоточено в узком диапазоне по радиусу, в кольце галактики NGC 4324 образуются молодые звезды. Галактика NGC 4324 уже исследовалась нами спектрально: это были наблюдения с длинной щелью на телескопе SALT Южно-африканской обсерватории (Прошина и др., 2019) и наблюдения со сканирующим интерферометром Фабри–Перо на 6-м телескопе БТА (Сильченко и др., 2019). Наше предыдущее исследование (Прошина и др., 2019) показало наличие ярких эмиссионных линий в спектре этой галактики и неоднородность расположения очагов звездообразования вдоль щели; максимум интенсивности эмиссии $H\alpha$ приходится на кольцо на расстоянии 23'' от центра. Кольцо галактики также отлично видно в ультрафиолете в данных обзора космического телескопа GALEX (Букен и др., 2018). Мы решили исследовать характер звездообразования в кольце NGC 4324, сочетая данные GALEX и наши собственные панорамные узкополосные фотометрические наблюдения галактики в эмиссии ионизованного газа $H\alpha$, которая характеризует темпы текущего звездообразования на временной шкале до 10 млн

лет. В следующем разделе мы описываем наши наблюдения, далее перечисляем наши результаты по характеристикам областей звездообразования в кольце и представляем обсуждение результатов и выводы.

НАБЛЮДЕНИЯ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

Мы решили получить полные изображения галактики NGC 4324 в узких фотометрических полосах, центрированных на эмиссионные линии $H\alpha$ и $[NII]\lambda 6583$, с помощью прибора MaNGaL — картировщика с перестраиваемым фильтром. Подробное описание прибора приведено в статье Моисеева и др. (2020). Малая ширина полосы пропускания перестраиваемого фильтра, $\sim 13 \text{ \AA}$, позволяет получить отдельно изображение в каждой эмиссионной линии, что, в свою очередь, позволяет сравнить потоки в этих линиях и на основе диагностических диаграмм определить механизмы возбуждения газа. Наблюдения проводились 17 апреля 2018 г. на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории (Шатский и др., 2020). Суммарное время экспозиций составило для изображения в линии $H\alpha$ 1500 с, для изображения в линии $[NII]\lambda 6583$ — 3000 с, для изображения в соседнем с линиями красном континууме — 1500 с. Масштаб всех изображений — 0.66 секунд на пиксель (биннинг 2×2), качество изображений позволило построить карты с пространственным разрешением 1.5 сек. дуги. Методика вычитания из узкополосных данных MaNGaL изображений в континууме для получения “чистых” изображений в эмиссионных линиях, включая калибровку наблюдаемых потоков в энергетические единицы и коррекцию изображений за перекрывающиеся из-за конечного спектрального разрешения прибора крылья близких эмиссионных линий, описана нами в статье Сильченко и др. (2020).

Кроме того, для более полного анализа процесса звездообразования мы использовали взятые из публичного архива MAST (Mikulski Archive for Space Telescopes) ультрафиолетовые (УФ) изображения исследуемой галактики, полученные космическим телескопом GALEX, а также оптические изображения из обзора SDSS DR9 (Ан и др., 2012) и изображение в полосе W4 на 22 мкм, полученное космическим телескопом WISE, взятое нами из публичного инфракрасного научного архива NASA/IPAC. В табл. 2 приведены обозначения программы наблюдений, даты наблюдений и времена экспозиций используемых нами УФ-изображений.

На картах интенсивности эмиссионных линий $H\alpha$ и $[NII]\lambda 6583$ с вычтенным континуумом (рис. 2) отчетливо видны компактные области излучения в кольце — сгустки. Характерный размер сгустков оказался равным примерно 4'' или 0.5 кпк.

Таблица 2. Протокол УФ-наблюдений галактики NGC 4324

Полоса	Идентификатор программы	Дата наблюдений	Экспозиция, с
FUV	AIS 228 0001 sg28	31.03.2004	106.5
NUV	AIS 228 0001 sg27	31.03.2004	200
NUV	MISGCSN1 13360 0229	01.04.2011	1739.7
NUV	G16 001033 GUVICS033	18.03.2010	1668.2

Таблица 3. Характеристики сгустков эмиссии в кольце NGC 4324

№	Поток в $H\alpha$, эрг/с/см ²	$\Sigma(H\alpha)$, эрг/с/кпк ²	EW ($H\alpha$), Å	$\log \frac{[NII]\lambda 6583}{H\alpha}$	$12 + \log(O/H)$	
					Петтини, Пэйджел (2004)	Марино и др. (2013)
1	3.60E-15	1.69E+39	7.87 ± 0.20	-0.30 ± 0.01	—	—
2	2.74E-15	1.32E+39	5.23 ± 0.20	-0.32 ± 0.01	—	—
3	1.94E-15	1.05E+39	2.62 ± 0.20	-0.35 ± 0.01	—	—
4	2.17E-15	1.16E+39	2.08 ± 0.14	-0.31 ± 0.01	—	—
5	1.99E-15	1.09E+39	1.62 ± 0.10	-0.31 ± 0.01	—	—
6	2.66E-15	1.36E+39	1.85 ± 0.11	-0.54 ± 0.01	—	—
7	5.34E-15	2.41E+39	5.13 ± 0.10	-0.49 ± 0.01	8.62	8.51
8	1.87E-15	1.00E+39	2.60 ± 0.10	-0.49 ± 0.01	—	—
9	2.20E-15	1.10E+39	5.63 ± 0.15	-0.42 ± 0.01	8.66	8.55
10	2.05E-15	0.96E+39	8.82 ± 0.20	-0.32 ± 0.01	—	—
11	2.18E-15	1.04E+39	8.63 ± 0.20	-0.41 ± 0.01	8.67	8.55
12	2.99E-15	1.43E+39	7.69 ± 0.20	-0.40 ± 0.01	—	—
13	1.44E-14	5.97E+39	30.6 ± 0.2	-0.54 ± 0.005	8.59	8.49
14	4.07E-15	1.91E+39	6.59 ± 0.16	-0.41 ± 0.01	8.67	8.55
15	3.94E-15	1.91E+39	4.58 ± 0.10	-0.42 ± 0.01	8.66	8.55
16	4.66E-15	2.14E+39	5.93 ± 0.20	-0.43 ± 0.01	8.65	8.54
17	1.89E-15	1.05E+39	2.57 ± 0.10	-0.32 ± 0.01	—	—
18	2.58E-15	1.30E+39	3.69 ± 0.15	-0.22 ± 0.01	—	—

В апертурах такого размера и суммировался поток в эмиссии. На рис. 2 (верхний ряд) показаны изображения галактики в узких эмиссионных линиях $H\alpha$ и $[NII]\lambda 6583$ с нанесенными на них апертурами, центрированными на сгустки и пронумерованными вдоль кольца. Эти же апертуры были наложены на УФ-изображения в FUV и NUV полосах и на изображение WISE/W4. В обозначенных апертурах были измерены потоки. Для УФ-изображений перевод условных потоков в звездные величины осуществлялся с использованием калибровочных уравнений из статьи Моррисис и др. (2007). Полученные звездные величины были скорректированы

за поглощение пылью в нашей Галактике с использованием данных по показателям фотометрического поглощения из базы NED ($A_B = 0.087$). За поглощение в самой галактике ультрафиолетовые потоки исправлялись с помощью оценок инфракрасного излучения пыли по данным WISE.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Диагностика возбуждения газа

В табл. 3 приведены измеренные потоки в эмиссионных линиях и оценки металличности для газа областей, где мы детектируем доминирующий

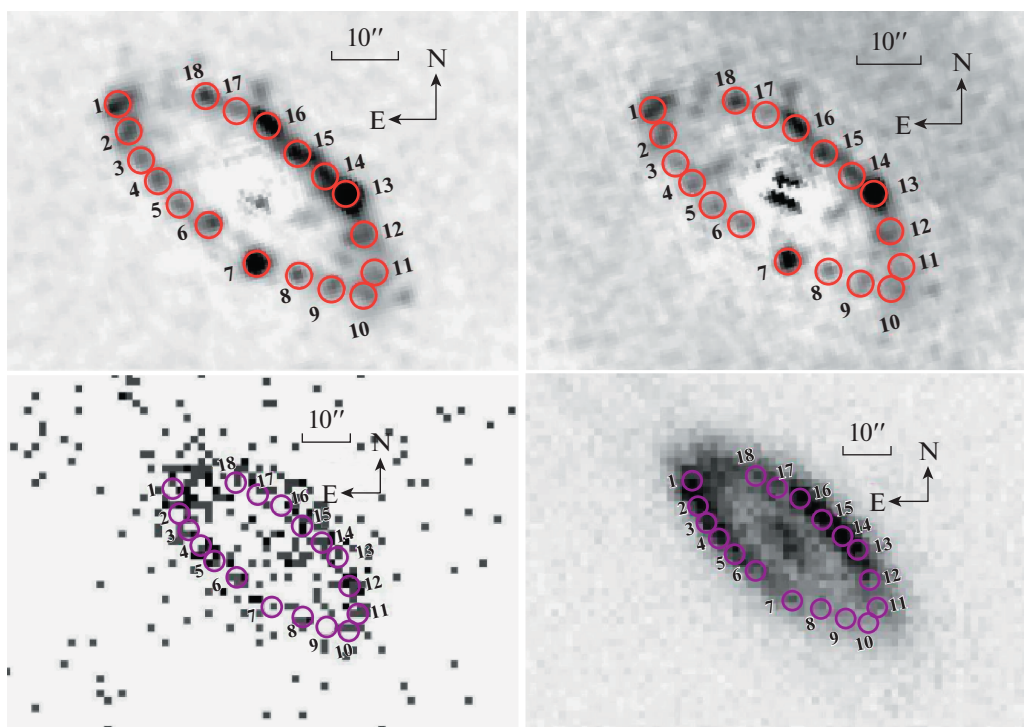


Рис. 2. Изображение кольца NGC 4324: верхний ряд — данные MaNGA, изображения в узких эмиссионных линиях $H\alpha$ (слева) и $[NII]\lambda 6583$ (справа), нижний ряд — данные GALEX в полосах FUV (1500 \AA) и NUV (2300 \AA).

вклад звездообразования в возбуждение газа. Отношение эмиссионных линий $[NII]\lambda 6583/H\alpha$ поправлено за перекрытие крыльев линий в полосе MaNGA, согласно калибровке Моисеева и др. (2020).

Есть несколько критериев, по которым можно определить механизм возбуждения газа. Первый критерий — это предложенные в статье Болдуин и др. (1981) диагностические диаграммы, так называемые BPT-диаграммы, позволяющие на основе отношений интенсивностей эмиссионных линий разделить механизмы возбуждения газа ударными волнами или активными ядрами от возбуждения жестким ультрафиолетовым излучением молодых ОВ-звезд. Основываясь на модельных расчетах этих диаграмм из работы Кьюли и др. (2006), мы приняли пороговое значение $\log([NII]\lambda 6583/H\alpha) = -0.41$, ниже которого можно считать, что газ возбужден исключительно излучением молодых звезд. При этом мы принимаем $\log([OIII]\lambda 5007/H\beta) = 0.10$ в кольце, согласно результатам измерения длиннощелевого спектра NGC 4324 в нашей работе, в статье Прошиной и др. (2019). Другой критерий, предложенный в работе Жанг и др. (2017), связан с поверхностной плотностью эмиссионного потока $H\alpha$, при котором излучение считается порожденным ионизацией газа излучением молодых звезд: $\Sigma(H\alpha) > 10^{39} \text{ эрг/с/кпк}^2$. Еще один

критерий выделения областей звездообразования связан с эквивалентной шириной эмиссионной линии $H\alpha$. Так, в работах Бинетта и др. (1994) и Сид Фернандеса и др. (2011) предложено пороговое значение $EW(H\alpha) = 3 \text{ \AA}$; значения ниже 3 \AA считаются характерными для областей диффузного ионизованного газа (так называемых DIG-областей). Однако в работе Ласерда и др. (2018) предлагается другое пороговое значение $EW(H\alpha) = 14 \text{ \AA}$. Неоднозначность этого критерия обусловлена тем, что в случае проецирования областей звездообразования на яркую подложку (например, когда области звездообразования располагаются недалеко от балджа галактики) необходимо учитывать вклад этой подложки, что понижает достоверность отнесения измеренных эквивалентных ширин эмиссионных линий именно к выделенной области излучения газа. В нашем случае кольцо NGC 4324 является внутренним, с радиусом около 3 кпк, поэтому необходим учет вклада подстилающего звездного населения галактики, что нами и было сделано. И для уверенного отождествления областей (сгустков) с областями текущего звездообразования мы применяем все три критерия.

Именно для сгустков, где газ возбужден молодыми звездами, мы оценили металличность газа по отношению потоков в эмиссионных линиях $[NII]\lambda 6583$ и $H\alpha$, используя для сравнения две

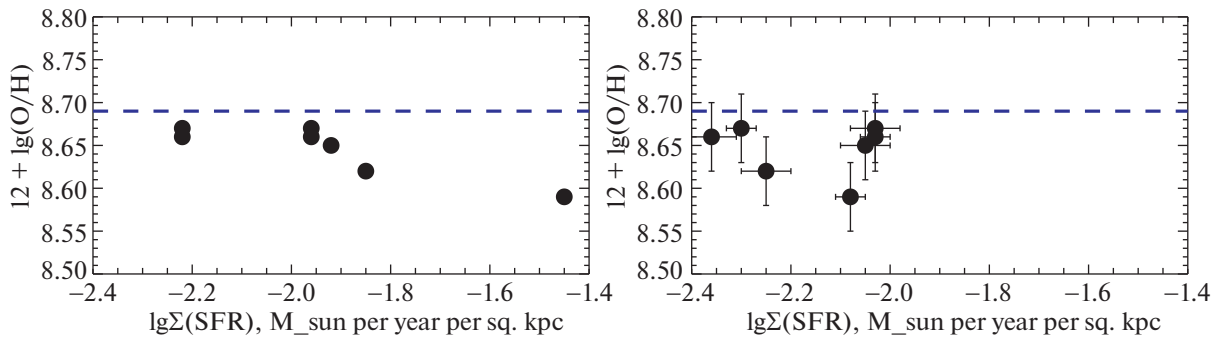


Рис. 3. (Анти-)корреляция металличности газа в сгустках с локальными темпами звездообразования: слева — корреляция обилия кислорода в газе, согласно калибровке Петтини и Пэйджела (2004), с мгновенными темпами звездообразования, справа — металличность против темпов звездообразования, осредненных на временной шкале 200 млн лет (по ультрафиолетовому потоку в NUV). Горизонтальная штриховая линия на обоих графиках показывает солнечную металличность.

калибровки из работ Петтини и Пэйджела (2004) и Марино и др. (2013). На рис. 3 показано, как меняется металличность газа от сгустка к сгустку в зависимости от темпов звездообразования. При рассмотрении 'мгновенного' темпа звездообразования, определенного по потоку в эмиссии $H\alpha$, эта зависимость для темпов звездообразования выше $10^{-2} M_{\odot} \text{ год}^{-1} \text{ кпк}^{-2}$ носит обратный характер. При осреднении темпов звездообразования на шкале сотен млн лет, с использованием ультрафиолетового индикатора NUV, такая антикорреляция замыкается. Вероятно, это объясняется короткой длительностью локальных вспышек звездообразования: по мере продвижения химической эволюции в сгустке газ локально исчерпывается, а металличность газа выходит на насыщение (Аскасибар и др., 2015). Солнечная металличность является конечным пунктом химической эволюции: металличность газа выходит на плато вблизи солнечного значения, когда локально плотность молодого звездного населения начинает превышать плотность газа (Аскасибар и др., 2015). Заметим, что сгустки с низким темпом звездообразования на рис. 3 не ложатся на продолжение указанной зависимости. Скорее всего, причина в том, что на самом деле эмиссия в них во многом обусловлена ударными процессами, и эти сгустки были отнесены к звездообразующим формально, поскольку значение поверхностной плотности $H\alpha$ -потока в них лишь немногим превосходит критическое значение $10^{39} \text{ эрг с}^{-1} \text{ кпк}^{-2}$, предложенное в работе Жанг и др. (2017).

Оценка темпов звездообразования

Используемые для построения этой зависимости (рис. 3) темпы звездообразования были рассчитаны по потокам, измеренным нами по карте MaNGaL в эмиссионной линии $H\alpha$, с помощью

калибровочных уравнений из обзора Кенниката и Эванса (2012) и с учетом поглощения пылью в исследуемой галактике; для исправления за пылью использовали изображение галактики, полученное космическим телескопом WISE в полосе W4 (22 мкм) из открытого архива NASA/IPAC. Эмиссия $H\alpha$ является индикатором звездообразования на короткой временной шкале, не превышающей 10 млн лет. В том же обзоре Кенниката и Эванса (2012) приведены калибровки и для расчета темпов звездообразования по потокам, измеренным в УФ-диапазоне, которые являются индикаторами темпов звездообразования на более длинных временных шкалах — от 100 до 200 млн лет. Мы провели эти расчеты, используя изображения NGC 4324 из данных космического телескопа GALEX в FUV- и NUV-диапазонах (также учитывая поглощение ультрафиолета пылью в исследуемой галактике, используя изображение WISE в полосе W4). Оценки темпов звездообразования, полученные в NUV-диапазоне по трем наблюдательным программам — AIS, MIS и GI, — хорошо согласуются между собой; наличие трех независимых измерений в полосе NUV позволяет как вычислить средние значения, так и оценить погрешности полученных величин темпов звездообразования. Очень любопытным получается график изменения логарифмов плотностей темпов звездообразования вдоль кольца NGC 4324 (рис. 4): там, где сейчас наблюдается интенсивное звездообразование по потоку в эмиссионной линии $H\alpha$ (сгустки 7 и 13), наблюдается пониженное значение поверхностной плотности темпа звездообразования, полученное по потоку в FUV. Согласно замечанию Кальцетти (2013), это характерно для более короткой временной шкалы, когда звездообразование длится на данный момент не более 2 млн лет. В этом случае расчет, проведенный по УФ-потокам по калибровкам Кенниката

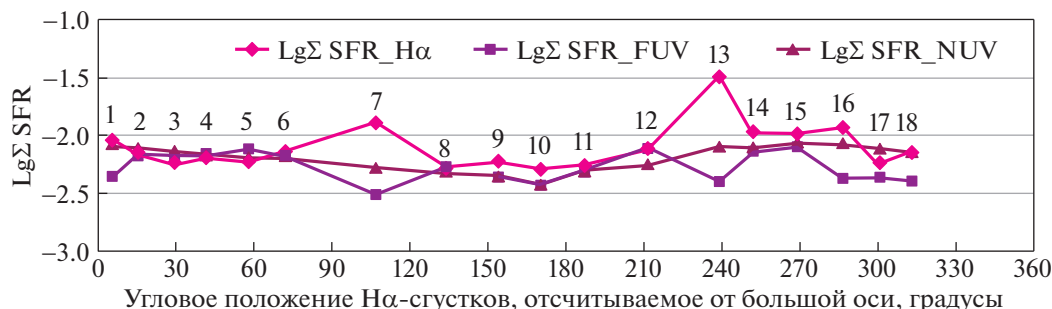


Рис. 4. Изменение плотности темпов звездообразования вдоль кольца.

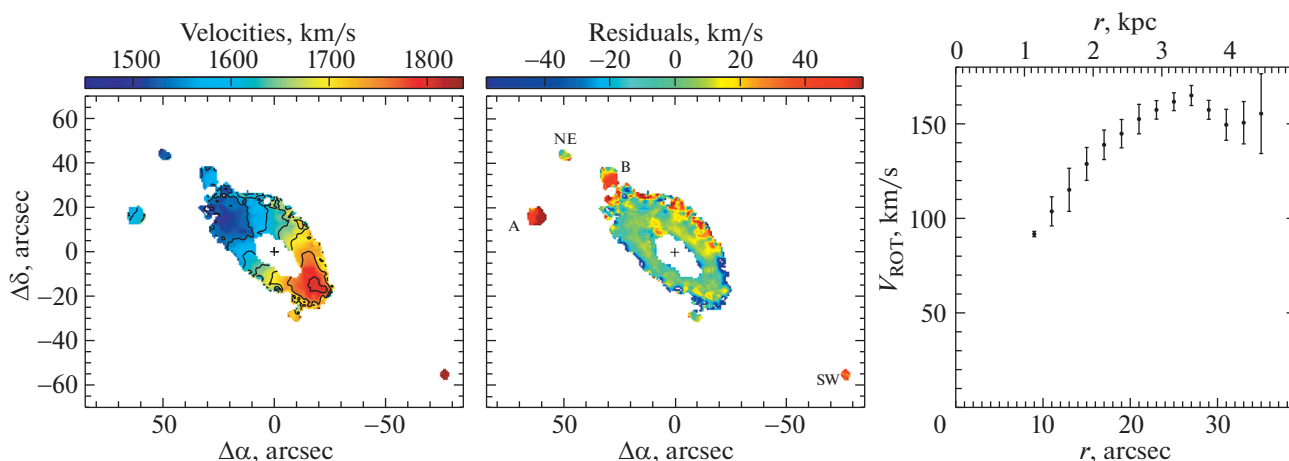


Рис. 5. Кинематика ионизованного газа по данным наблюдений на 6-м телескопе в эмиссионной линии $H\alpha$. Слева направо: поле наблюдаемых лучевых скоростей, поле остаточных скоростей (после вычитания модели кругового вращения), принятая кривая вращения.

и Эванса (2012), необходимо умножить на фактор 3.45. Таким образом, мы приходим к выводу, что вспышки в этих сгустках начались совсем недавно (в пределах 10 млн лет). Звезды, которые могли образоваться во время предыдущей вспышки (около 200 млн лет назад) и вносить вклад в FUV-светимость, уже взорвались, либо их максимум светимости сместился в NUV, что приводит к наблюдаемому провалу в FUV (сгустки 7, 13, 16, 17, 18, 1). Стоит отметить, что кривая, отслеживающая темпы звездообразования, вычисленные по потоку в NUV, почти горизонтальна, — поэтому средний темп звездообразования по кольцу лучше определять именно по данным NUV. Можно предположить, что звездообразование началось сперва в сгустках 2–3–4; затем 5–6, 14–15, 8–12. Потом 16–17–18–1, далее в сгустке 7, и в сгустке 13 — самая недавно начавшаяся вспышка (вполне возможно, повторная, спустя пару сотен млн лет после предыдущей).

Ориентация газового диска NGC 4324 по полю скоростей вращения ионизованного газа

В нашей статье Сильченко и др. (2019) были представлены, среди выборки из 18 линзовидных галактик, данные панорамной спектроскопии NGC 4324 в эмиссионной линии $H\alpha$, полученные со сканирующим интерферометром Фабри–Перо. Сейчас более детальный анализ данных, представленный на рис. 5, показал, что газ в основном участвует в круговом вращении в плоскости, наклоненной к нашему лучу зрения под углом $65^\circ \pm 3^\circ$, с линией узлов, ориентированной на небе под углом $PA = 265^\circ \pm 3^\circ$ (радиальный интервал для анализа — $10''$ – $35''$). Такой угол наклона в принципе не противоречит углу наклона, оцененному из изофотного анализа для внутреннего диска галактики (Прошина и др., 2019), 63° , как и должно быть при круговом вращении газа в основной плоскости звездного диска. Однако во внешних областях диска и в ближайших окрестностях галактики видны эмиссионные сгустки, скорости

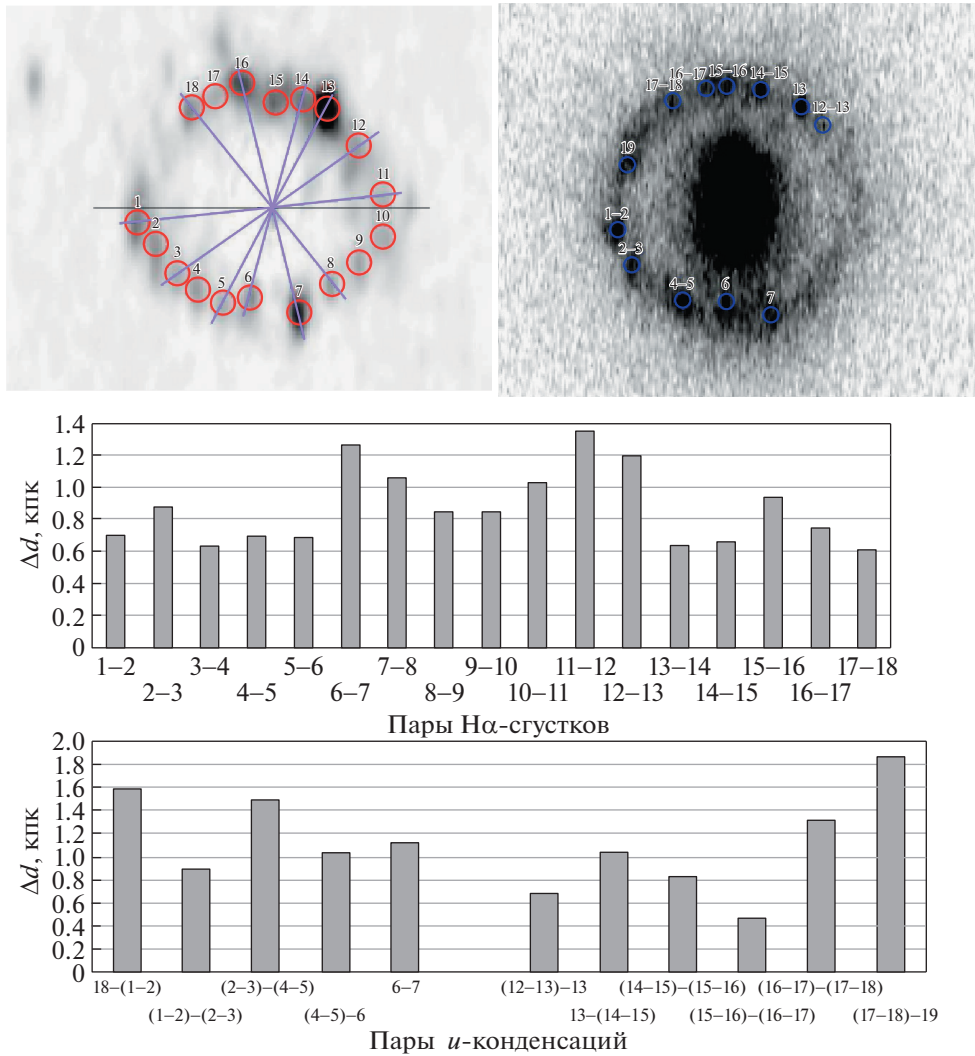


Рис. 6. Структура кольца в эмиссии H α (слева) и в фильтре u (справа): сверху — депроецированное изображение кольца, внизу — расстояния между соседними сгустками в эмиссии H α и в фильтре u .

которых значительно, до 70 км/с, отличаются от модели экстраполированного кругового вращения с плоской кривой $V(R)$. Далее в Дискуссии мы будем использовать эти данные для обоснования гипотезы внешней аккреции газа на NGC 4324.

Регулярность распределения сгустков вдоль кольца

Для оценки характерных расстояний между сгустками в эмиссии H α и между молодыми звездными комплексами, видимыми в u -полосе, мы депроецировали изображение галактики в эмиссионной линии H α , полученное с MaNGA L'ом, и SDSS-изображение в полосе u . Для этого мы развернули исходные изображения на угол 53 градуса, чтобы расположить линию узлов горизонтально, и затем растянули в вертикальном

направлении, приняв угол наклона $i = 65^\circ$, в соответствии с кинематическим углом наклона, полученным анализом двумерного поля скоростей ионизованного газа, измеренного с интерферометром Фабри–Перо. Мы применили одни и те же углы для обоих изображений, поскольку наблюдаемый нами ионизованный газ располагается в той же плоскости, что и звезды, — на это указывает согласованная кинематика газа и звезд, полученная нами в результате спектроскопических наблюдений с длинной щелью (Прошина и др., 2019). На рис. 6 показаны депроецированные изображения галактики NGC 4324 в эмиссионной линии H α и в u -полосе и расстояния между центрами соседних сгустков, выделенных по этим изображениям. На депроецированном изображении в H α хорошо видно, что исследуемое газовое кольцо является внутренне эллиптическим, что характерно

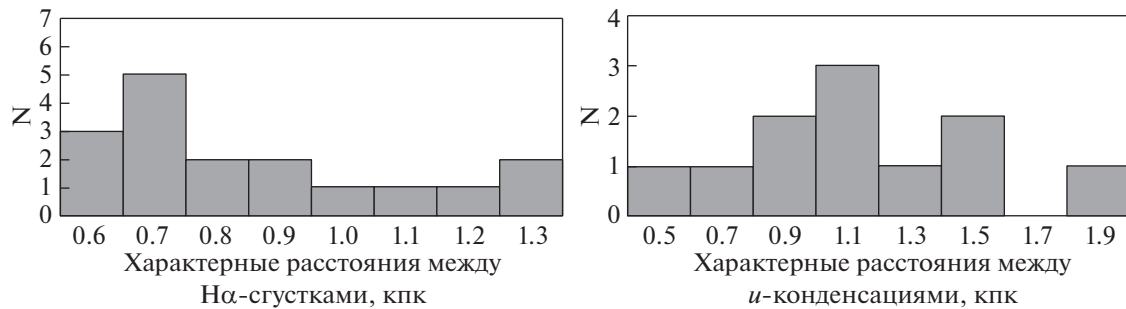


Рис. 7. Гистограммы распределения расстояний между соседними сгустками: слева — $H\alpha$, справа — в фильтре u .

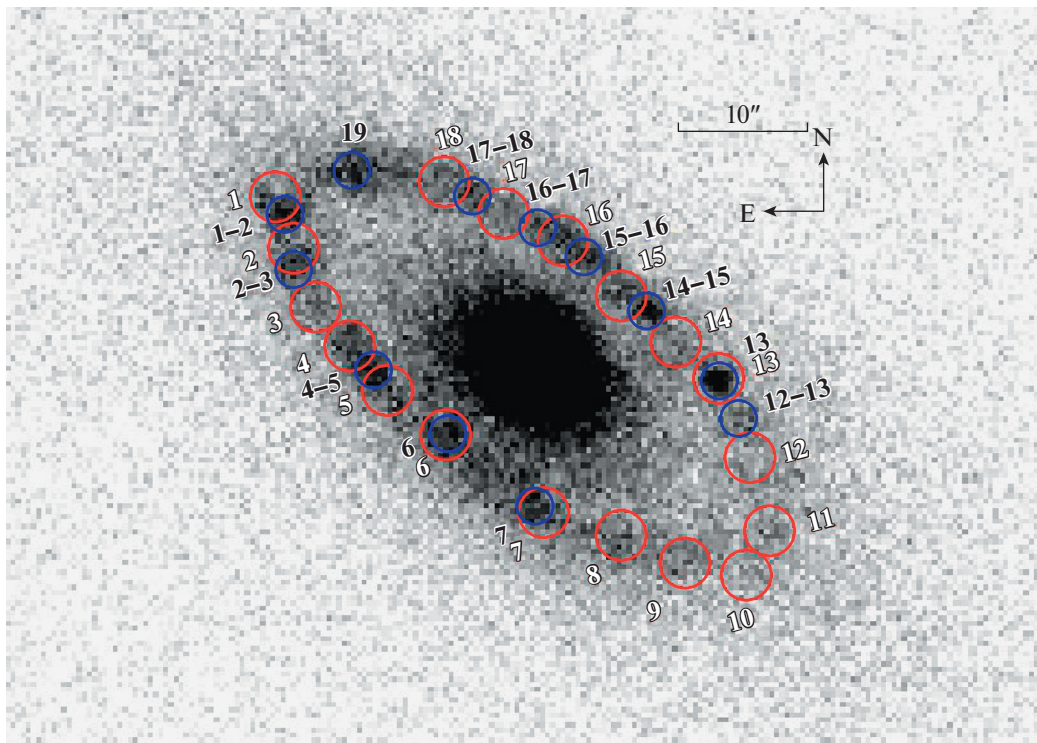


Рис. 8. Сравнение расположения областей звездообразования, видимых в эмиссии $H\alpha$ (красные кружки), и молодых звездных комплексов, видимых в фильтре u (синие кружки); карта в эмиссии $H\alpha$ построена по нашим данным MaNGaL, карта в широкополосном фильтре u — по данным SDSS/DR9.

для резонансных колец (Бута, 1995). Причем резонансные кольца преимущественно вытянуты перпендикулярно бару — так называемый тип R1. Интересное проявление симметрии заключается в том, что локализация областей звездообразования в кольце — попарная, через пологорота галактики (на рис. 6, левый, эти пары соединены отрезками прямой). Не является ли это проявлением динамического воздействия бара на сжатие газа в кольце и на начало звездообразования в сгустках? На рис. 7 представлены гистограммы распределения числа сгустков по расстояниям между ними. Для изображения, фиксирующего только что начавшееся звездообразование (карта

в эмиссионной линии $H\alpha$), расстояния между сгустками группируются к одному значению, 0.65–0.7 кпк; второй максимум гистограммы (вблизи 1.3 кпк), вероятно, соответствует удвоенному характерному разделению, или “пропущенному” сгустку. На карте в фильтре u , соответствующем более “старым” областям звездообразования, эта регулярность исчезает.

На рис. 8 и рис. 9 показаны SDSS-изображения галактики в u -, g - и r - полосах, с наложенными на них положениями сгустков, выделенных по изображению в u -полосе (обозначены синими апертурами) и выделенными по изображению в линии $H\alpha$ (обозначены красными апертурами).

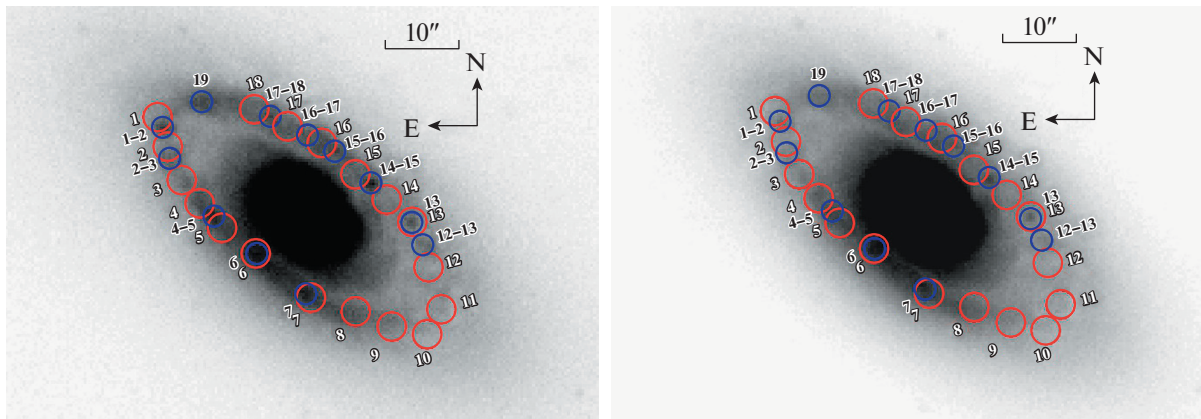


Рис. 9. Наложение на карты NGC 4324 в фильтрах g (слева) и r (справа) локализаций областей звездообразования, видимых в эмиссии $H\alpha$ (красные кружки), и молодых звездных комплексов, видимых в фильтре u (синие кружки).

Сгустки, видимые в u -полосе, по сути, являются уже сформированными комплексами звездных скоплений. Видно, что на картах в $H\alpha$ и в u -полосе совпали только сгустки 6, 7 и 13. Многие звездные комплексы, яркие в континууме, видны в промежутках *между* сгустками $H\alpha$: например, 1–2, 4–5, 12–13, 14–15, 15–16, 16–17, 17–18; или на некотором смещении от них, например, комплекс 2–3. А комплекс 19, аналога которому нет на узкополосных изображениях в линиях $H\alpha$ и $[NII]\lambda 6583$, отчетливо виден на изображениях в обоих голубых широких фильтрах u и g . Вспомним, что найденное нами выше наиболее характерное расстояние между сгустками $H\alpha$ равняется 0.7 кпк, а характерное расстояние между комплексами, наблюдаемыми в u -полосе, составляет 1.05 и 1.5 кпк (рис. 7). Все это вместе взятое указывает на индуцированное звездообразование, происходящее при столкновении стенок гигантских HI-оболочек вокруг молодых звездных комплексов (Ефремов, Эльмегрин, 1998; Егоров и др., 2015). Поскольку характерное расстояние между сгустками разное для разных длин волн, а “видимость” областей звездообразования в разных длинах волн связана с их возрастом (самые молодые хорошо видны в эмиссии $H\alpha$, средний возраст — в ультрафиолете, а к возрасту 1–2 млрд лет мы видим комплексы яркими в u и g), то имеет место распространение звездообразования вдоль кольца, приводящее к изменению характерных расстояний между комплексами звездообразования со временем, что и демонстрируют гистограммы на рис. 7. Аналогичную гистограмму для областей звездообразования среднего возраста мы не можем предъявить, поскольку наблюдения космического телескопа GALEX в полосе NUV имели пространственное разрешение $6''$, что превышает размеры сгустков и соизмеримо с ожидаемыми расстояниями между ними в ультрафиолете;

таким образом, в данных GALEX структура кольца звездообразования замыка.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Ранее регулярное расположение областей звездообразования уже отмечалось в линейных структурах дисковых галактик. Оно характерно, например, для приливных хвостов взаимодействующих галактик (Сотникова, Решетников, 1998). Также оно встречается в рукавах спиральных галактик (Ефремов, 2010; Гусев, Ефремов, 2013; Эльмегрин и др., 2018). Так, в работе Ефремова (2010) сообщается о звездных комплексах размером 0.6 кпк, располагающихся в виде цепочки вдоль северо-западного рукава Туманности Андромеды с характерным разделением 1.1 кпк, что, по мнению автора, связано с кратной регулярностью расположения силовых линий магнитного поля. В работе Гусева и Ефремова (2013) при исследовании регулярных цепочек из звездообразующих комплексов в спиральной галактике типа “grand design” NGC 628 выявлены характерные расстояния между комплексами, кратные минимальному расстоянию 0.4 кпк. В работе Эльмегрин и др. (2018) в запыленной спиральной галактике M 100 обнаружена регулярность расположения инфракрасных сгустков вдоль филаментов с характерным расстоянием 0.41 кпк. В недавней статье Гусева и Шимановской (2020) была отмечена подобная регулярность расположения областей звездообразования в резонансном кольце спиральной галактики с баром NGC 6217 с характерным расстоянием между звездными комплексами 0.7 кпк. В той же статье сообщается, что это первый случай наблюдения регулярности расположения областей звездообразования в кольцевых структурах. Теперь мы видим, что тот случай не уникальный. Кольцо в NGC 4324 тоже может быть резонансным: хотя

крупномасштабного бара в галактике не видно, но результаты изофотного анализа (Прошина и др., 2019), в частности, скачок эллиптичности изофот на радиусе $13''$ – $15''$, указывают на триаксиальную структуру центральной части галактики, вытянутую примерно по малой оси изофот. Регулярность расположения комплексов звездообразования в кольце NGC 4324 свидетельствует о том, что физические механизмы звездообразования на локальных масштабах одинаковы в спиральных и в линзовидных галактиках, а различия проступают, когда мы переходим к анализу крупномасштабных структур: в спиральных галактиках основное звездообразование происходит в спиральных волнах плотности, в то время как в богатых газом линзовидных галактиках оно организовано в кольцевые структуры (Подж, Эскридж, 1993; Салим и др., 2012).

Поскольку нами определено диагностируется текущее и недавно прошедшее звездообразование в кольце линзовидной галактики, и характерный размер сгустков равен $4''$ или 0.5 кпк, вероятно, мы можем отождествить этот размер с масштабом неоднородностей при развитии гравитационной неустойчивости, ведущей к звездообразованию. Представляется интересным оценить значение критической поверхностной плотности газа и сравнить ее с наблюдаемой величиной. Из теоретических расчетов (Леду, 1951) получается, что неустойчивыми являются возмущения с длинами волн

$$\lambda_{\text{crit}} = \frac{2\pi^2 G \Sigma_{\text{gas}}}{\kappa^2}, \quad (1)$$

где κ — эпициклическая частота. По рассчитанной нами кривой вращения ионизованного газа (рис. 5), которая в силу столкновительной природы газовой подсистемы близка к круговой скорости потенциала галактики, мы видим, что вплоть до внешнего края кольца, $\sim 27''$, галактика вращается твердотельно. В рамках предположения о твердотельном вращении, в кольце получаем $\kappa \approx 1.7 \times 10^{-15} \text{ с}^{-1}$. Тогда из формулы (1), принимая $\lambda_{\text{crit}} = 0.5$ кпк, получаем $\Sigma_{\text{gas}}^{\text{crit}} = 16 M_{\odot}/\text{пк}^2$. Теперь вычислим наблюдаемую поверхностную плотность молекулярного газа в кольце, принимая, согласно работе Алатало и др. (2013), что радиальная протяженность кольца не превышает 10 сек. дуги и $\log M_{\text{H}_2} = 7.97 \pm 0.02$:

$$\Sigma_{\text{gas}}^{\text{obs}} = \frac{M_{\text{H}_2}}{\pi(R^2 - r^2)} \approx 4.3$$

M_{\odot} на пк^2 .

Поскольку наблюдаемая поверхностная плотность газа по расчетам получается меньше, чем критическое значение, а звездообразование в кольце мы все же наблюдаем, то, значит, во-первых,

в кольце помимо молекулярного газа есть нейтральный водород, который мы не учитывали при расчете из-за недостатка информации о его количественном содержании именно в кольце, и, во-вторых, действуют дополнительные факторы, приводящие к гравитационной неустойчивости и началу звездообразования. Одним из дополнительных факторов может быть так называемый обратный эффект (feedback) от областей звездообразования — поджатие газа расширяющимися от областей звездообразования гигантскими газовыми оболочками. Интересно также, что части кольца, где сгустки эмиссии ионизованного газа показывают возбуждение молодыми звездами, по своей азимутальной позиции близки к концам овальной структуры (рис. 10) — такая конфигурация может ассоциироваться с так называемыми анзаэ (ansae), областями повышенной яркости на концах бара. Хотя в исследовании Мартинес-Вальпуэста и др. (2007) указано, что в анзаэ крайне редко фиксируется текущее звездообразование, но, например, в NGC 4151, которая, как и NGC 4324, не имеет бара, но имеет овал в центре, анзаэ демонстрируют голубой цвет и $\text{H}\alpha$ эмиссию.

Мы можем оценить массу звездных комплексов, используя SDSS-изображения в u - и g -полосах, а также калибровочное уравнение и коэффициенты к нему из статьи Белла и др. (2003). Поскольку кольцо является внутренним, то необходимо при апертурной фотометрии областей звездообразования учесть вклад подстилающего диска. Так, скопление (сгусток) номер 13 является, на наш взгляд, наиболее подходящим объектом для оценки массы описанным выше образом, поскольку это скопление является наиболее молодым и компактным, как было видно из вышеприведенного анализа. Мы измерили потоки в u - и g -полосах, перевели их в звездные величины, скорректировали за поглощение в нашей Галактике, используя величины поглощений, приведенные в базе данных NED для фотометрических полос системы SDSS: $A_u = 0.102$, $A_g = 0.08$. Для сгустка номер 13 получился цвет ($u - g$) = 0.19. Далее по табл. 7 из статьи Белла и др. (2003) определяем коэффициенты для уравнения и находим, что отношение $M/L_g = 0.75$, и масса молодого звездного комплекса составляет примерно $7 \times 10^6 M_{\odot}$. Еще несколько самых крупных сгустков — номер 7, 1–2, 14–15 — также имеют звездную массу порядка $10^7 M_{\odot}$. Такая масса звездных комплексов согласуется с их размером 0.5 кпк в рамках рассмотрения гравитационной неустойчивости газа (Кови, 1981).

Открытым остается вопрос о происхождении газа, наблюдаемого в кольце этой галактики: является ли он газом, возвращенным проэволюционировавшими звездами этой галактики, или он имеет

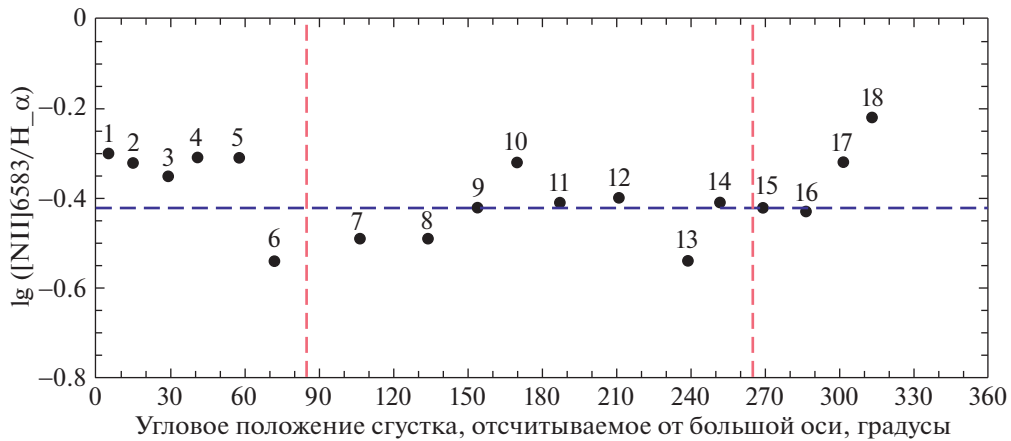


Рис. 10. Распределение отношения потоков в эмиссионных линиях [NII]λ6583 и H α по азимуту вдоль кольца. Характерная ошибка логарифма отношения потоков — 0.01. Угол, указанный на оси абсцисс, отсчитывается от большой оси изофот, северо-восточное окончание, против часовой стрелки. Горизонтальная штриховая линия разграничивает чисто фотоионизационное возбуждение газа (снизу от линии) от возбуждения с примесью ударных волн. Вертикальными пунктирами показана вероятная ориентация триаксиальной структуры в центре галактики.

аккреционное (внешнее) происхождение. Согласованная кинематика звездной и газовой компонент говорит в пользу первого предположения. Механизмы переноса проэволюционировавшего газа из центра галактики на периферию рассматриваются в работе Мариначи и др. (2010). Что касается взаимодействия с окружением, в статье Моралеса и др. (2018), посвященной поиску приливных признаков у близких галактик, галактика NGC 4324 отнесена к числу тех, в которых такие признаки не обнаружены. Но есть и другой вариант аккреции — малые слияния. Если богатые газом спутники галактики имели сонаправленный с ее вращением орбитальный спин и их падение происходило в плоскости звездного диска NGC 4324, то такой характер движения спутников мог привести к накоплению газа в диске исследуемой галактики и без каких-либо видимых признаков взаимодействия. Натекающий таким образом газ аккумулируется в кольце, имеющем резонансную природу, связанную с вращением триаксиальной структуры в центре галактики (на наличие которого указывают косвенные свидетельства, перечисленные нами выше). Более того, дополнительный анализ карты лучевых скоростей газа в линии H α из работы Сильченко и др. (2019), представленный нами выше, показывает наличие областей НII, расположенных на удалении от кольца и вращающихся в той же плоскости и со скоростями, более или менее соответствующими вращению галактики на этих радиусах. Наше спектроскопическое исследование с длинной щелью (Прошина и др., 2019) показало всплески эмиссии в линиях H α и [NII] на больших расстояниях от центра, до 12 кпк, причем скорости газа лежат на “плато”, т.е. совпадают со скоростью основного диска галактики. В то же время наблюдаются и

отличия от модели кругового вращения плоского диска для трех из четырех внешних областей НII, не лежащих на большой оси изофот — на линии узлов диска (рис. 5, средний). Это, скорее всего, указывает на некоторый наклон внешних орбит газовых облаков — изгиб (warp) газового диска, вероятно, связанный с захватом вещества из плоскости, не совсем точно компланарной звездному диску. Из внешних областей H α , область A (рис. 5) видна и в континууме на голубых изображениях галактики из SDSS, с абсолютной звездной величиной $M_g = -9.6$; она, вероятно, является иррегулярным, богатым газом спутником NGC 4324. Отношение линий азота и H α , по нашим данным MaNGA, позволяет оценить обилие кислорода в газе: с калибровками Петтини и Пэйджел (2004) и Марино и др. (2013), эта оценка равна $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8.44 \pm 0.04$, т.е. вдвое ниже солнечной и ниже оценок для внешних NE и SW областей НII, принадлежащих диску галактики (~ 8.56).

Все эти наблюдательные свидетельства подтверждают гипотезу о возможной подпитке газом диска линзовидной галактики за счет падения богатых газом спутников и/или гигантских облаков. Причем такой сонаправленный характер аккреции спутников способствует звездообразованию в аккрецированном газе, как ранее отмечалось в статье Сильченко и др. (2019). В кольце, вследствие гравитационной неустойчивости, формируются сгустки, в которых начинается звездообразование. Последующими инициаторами звездообразования в газовом кольце уже являются ударные волны от эволюционирующих комплексов массивных ОВ-звезд — первых сформировавшихся скоплений молодых звезд в газовых сгустках.

Кроме того, инициатором очередной вспышки звездообразования может служить падение спутника или гигантского облака газа на диск галактики. Таким образом, наблюдаемая нами цепочка “газовых сгустков—звездных комплексов” является цепочкой распространения звездообразования как в пространстве — в кольце, — так и во времени. Для прояснения вопроса о происхождении газа необходимо детальное картирование NGC 4324 в линии 21 см нейтрального водорода как для самой галактики, так и для ее окрестностей.

Исследование колец звездообразования в S0 галактиках поддерживалось грантом Российского фонда фундаментальных исследований (проект №18-02-00094). О.К. Сильченко также благодарит за поддержку Междисциплинарную научно-образовательную Школу МГУ “Фундаментальные и прикладные исследования космоса”. В работе мы пользовались данными Базы внегалактических данных NED (NASA/IPAC), которая управляется Лабораторией реактивного движения и Калифорнийским технологическим институтом по контракту с НАСА, и данными Лион-Медонской базы HyperLEDA. Также мы привлекали для нашего анализа данные космических телескопов GALEX и WISE. Данные миссии NASA GALEX были взяты из Архива Микульски для космических телескопов (MAST). Данные космического телескопа WISE, использованные нами, были взяты из Архива инфракрасной науки NASA/IPAC, который управляется Лабораторией реактивного движения Калифорнийского технологического института по контракту с Национальной Администрацией аэронавтики и космоса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алатало и др. (K. Alatalo, T.A. Davis, M. Bureau, L.M. Young, L. Blitz, A.F. Crocker, E. Bayet, M. Bois, et al.), *MNRAS* **432**, 1796 (2013).
- Ан и др. (C.P. Ahn, R. Alexandroff, C. Allende Prieto, S.F. Anderson, T. Anderton, B.H. Andrews, E. Aubourg, S. Bailey, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **203**, A12 (2012).
- Аскасибар и др. (Y. Ascasibar, M. Gavilán, M. Pinto, J. Casado, F. Rosales-Ortega, and A.I. Diaz), *MNRAS* **448**, 2126 (2015).
- Белл и др. (E.F. Bell, D.H. McIntosh, N. Katz, and M.D. Weinberg), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **149**, 289 (2003).
- Бинетт и др. (L. Binette, C.G. Magris, G. Stasińska, and A.G. Bruzual), *Astron. Astrophys.* **292**, 13 (1994).
- Болдуин и др. (J.A. Baldwin, M.M. Phillips, and R. Terlevich), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **93**, 5 (1981).
- Букен и др. (A.Y.K. Bouquin, A. Gil de Paz, J.C. Munoz Mateos, S. Boissier, K. Sheth, D. Zaritsky, R.F. Peletier, J.H. Knapen, and J. Gallego), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **234**, A18 (2018).
- Бута (R. Buta), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **96**, 39 (1995).
- Гарсиа (A.M. Garcia), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **100**, 47 (1993).
- Гусев, Ефремов (A.S. Gusev and Yu.N. Efremov), *MNRAS* **434**, 313 (2013).
- Гусев, Шимановская (A.S. Gusev and E.V. Shimanovskaya), *Astron. Astrophys.* **640**, L7 (2020).
- де Вокулер и др. (G. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, H.G. Corwin, Jr., et al.), *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies. Volume I: Explanations and References* (New York: Springer, 1991).
- Джованарди и др. (C. Giovanardi, G. Helou, E.E. Salpeter, and N. Krumm), *Astrophys. J.* **267**, 35 (1983).
- Дэвис и др. (T.A. Davis, M. Bureau, L.M. Young, K. Alatalo, L. Blitz, M. Cappellari, N. Scott, et al.), *MNRAS* **414**, 968 (2011a).
- Дэвис и др. (T.A. Davis, K. Alatalo, M. Sarzi, M. Bureau, L.M. Young, L. Blitz, P. Serra, A.F. Crocker, et al.), *MNRAS* **417**, 882 (2011b).
- Дэвис и др. (T.A. Davis, K. Alatalo, M. Bureau, M. Cappellari, N. Scott, L.M. Young, L. Blitz, et al.), *MNRAS* **429**, 534 (2013).
- Дюпри, Шнайдер (K. Duprie and S. Schneider), *Astron. J.* **112**, 937 (1996).
- Егоров и др. (O.V. Egorov, T.A. Lozinskaya, and A.V. Moiseev), *Astron. Astrophys. Trans.* **29**, 17 (2015).
- Ефремов (Yu.N. Efremov), *MNRAS* **405**, 1531 (2010).
- Ефремов, Эльмегрин (Yu.N. Efremov and B.G. Elmegreen), *MNRAS* **299**, 643 (1998).
- Жанг и др. (K. Zhang, R. Yan, K. Bundy, M. Bershad, L.M. Haffner, R. Walterbos, R. Maiolino, Ch. Tremonti, et al.), *MNRAS* **466**, 3217 (2017).
- Кальцетти (D. Calzetti), *Secular Evolution of Galaxies* (Ed. J. Falcon-Barroso, J.H. Knapen, Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, p. 419, 2013).
- Каппеллари и др. (M. Cappellari, E. Emsellem, D. Krajnovic, R.M. McDermid, N. Scott, G.A. Verdoes Kleijn, L.M. Young, K. Alatalo, et al.), *MNRAS* **413**, 813 (2011).
- Кенникат, Эванс (R.C. Kennicutt Jr. and N.J. Evans II), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **50**, 531 (2012).
- Кови (L.L. Cowie), *Astrophys. J.*, **245**, 66 (1981).
- Комерон и др. (S. Comerón, H. Salo, E. Laurikainen, J.H. Knapen, R.J. Buta, M. Herrera-Endoqui, J. Laine, B.W. Holwerda, et al.), *Astron. Astrophys.* **562**, A121 (2014).
- Корменди, Кенникат (J. Kormendy and R.C. Kennicutt Jr.), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **42**, 603 (2004).
- Кортесе, Хьюис (L. Cortese and T.M. Hughes), *MNRAS* **400**, 1225 (2009).

29. Крайнович и др. (D. Krajnović, E. Emsellem, M. Cappellari, K. Alatalo, L. Blitz, M. Bois, F. Bournaud, M. Bureau, et al.), *MNRAS* **414**, 2923 (2011).
30. Крам, Солпитер (N. Krumm and E.E. Salpeter), *Astrophys. J.* **228**, 64 (1979).
31. Кьюли и др. (L.J. Kewley, B. Groves, R. Kauffmann, and T. Heckman), *MNRAS* **372**, 961 (2006).
32. Ласерда и др. (E.A.D. Lacerda, R. Cid Fernandes, G.S. Couto, G. Stasinska, R. Garcia-Benito, N. Vale Asari, E. Perez, R.M. Gonzalez Delgado, S.F. Sanchez, and A.L. de Amorim), *MNRAS* **474**, 3727 (2018).
33. Леду (P. Ledoux), *Annales d'Astrophysique* **14**, 438 (1951).
34. Мариначи и др. (F. Marinacci, J. Binney, F. Fraternali, C. Nipoti, L. Ciotti, and P. Londrillo), *MNRAS* **404**, 1464 (2010).
35. Марино и др. (R.A. Marino, F.F. Rosales-Ortega, S.F. Sánchez, A. Gil de Paz, J. Vilchez, D. Miralles-Caballero, C. Kehrig, E. Perez-Montero, et al.), *Astron. Astrophys.* **559**, A114 (2013).
36. Мартинес-Вальпуэста и др. (I. Martinez-Valpuesta, J.H. Knapen, and R. Buta), *Astron. J.* **134**, 1863 (2007).
37. Моисеев и др. (A. Moiseev, A. Perepelitsyn, and D. Oparin), *Experiment. Astron.* **50**, 199 (2020).
38. Моралес и др. (G. Morales, D. Martinez-Delgado, E.K. Grebel, A.P. Cooper, B. Javanmardi, and A. Miskolczi), *Astron. Astrophys.* **614**, A143 (2018).
39. Моррисси и др. (P. Morrissey, T. Conrow, T.A. Barlow, T. Small, M. Seibert, T.K. Wyder, T. Budavari, S. Arnouts, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **173**, 682 (2007).
40. Петтини, Пэйджел (M. Pettini and B.E.J. Pagel), *MNRAS* **348**, L59 (2004).
41. Подж, Эскридж (R.W. Pogge and P.B. Eskridge), *Astron. J.* **106**, 1405 (1993).
42. Прошина и др. (I.S. Proshina, A.Yu. Kniazev, and O.K. Sil'chenko), *Astron. J.* **158**, 5 (2019).
43. Салим и др. (S. Salim, J.J. Fang, R.M. Rich, S.M. Faber, and D.A. Thilker), *Astrophys. J.* **755**, Aid.105 (2012).
44. Серра и др. (P. Serra, T. Oosterloo, R. Morganti, K. Alatalo, L. Blitz, M. Bois, F. Bournaud, M. Bureau, et al.), *MNRAS* **422**, 1835 (2012).
45. Сид Фернандес и др. (R. Cid Fernandes, G. Stasińska, A. Mateus, and N. Vale Asari), *MNRAS* **413**, 1687 (2011).
46. Сильченко и др. (O.K. Sil'chenko, A.V. Moiseev, and O.V. Egorov), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **244**, Aid. 6 (2019).
47. Сильченко О.К., Моисеев А.В., Опарин Д.В., Письма в Астрон. журн. **46**, 307 (2020) [O.K. Sil'chenko, A.V. Moiseev, and D.V. Oparin, *Astron. Lett.* **46**, 289 (2020)].
48. Сотникова Н.Я., Решетников В.П., Письма в Астрон. журн. **24**, 97 (1998) [N.Ya. Sotnikova, V.P. Reshetnikov, *Astron. Lett.* **24**, 73 (1998)].
49. Сэйдж, Уэлч (L.J. Sage and G.A. Welch), *Astrophys. J.* **644**, 850 (2006).
50. Талли и др. (R.B. Tully, H.M. Courtois, A.E. Dolphin, J.R. Fisher, Ph. Heraudeau, B.A. Jacobs, I.D. Karachentsev, D. Makarov, et al.), *Astron. J.* **146**, Aid.86 (2013).
51. Уэлч, Сэйдж (G.A. Welch and L.J. Sage), *Astrophys. J.* **584**, 260 (2003).
52. Уэлч и др. (G.A. Welch, L.J. Sage, and L.M. Young), *Astrophys. J.* **725**, 100 (2010).
53. Хофман и др. (G.L. Hoffman, B.M. Williams, B.M. Lewis, G. Helou, and E.E. Salpeter), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **69**, 65 (1989).
54. Шатский и др. (N. Shatsky, A. Belinski, A. Dodin, S. Zheltoukhov, V. Kornilov, K. Postnov, S. Potanin, B. Safonov, A. Tatarnikov, and A. Cherepashchuk), *Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century* (2020), p. 127.
55. Шет и др. (K. Sheth, M. Regan, J.L. Hinz, A. Gil de Paz, K. Menendez-Delmestre, J.-C. Munoz-Mateos, M. Seibert, T. Kim, et al.), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **122**, 1397 (2010).
56. Эльмегрин и др. (B.G. Elmegreen, D.M. Elmegreen, and Yu.N. Efremov), *Astrophys. J.* **863**, Aid.59 (2018).
57. Янг и др. (L.M. Young, M. Bureau, T.A. Davis, F. Combes, R.M. McDermid, K. Alatalo, L. Blitz, M. Bois, et al.), *MNRAS* **414**, 940 (2011).