

РЕГУЛЯРНЫЕ ЦЕПОЧКИ ОБЛАСТЕЙ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ В СПИРАЛЬНЫХ РУКАВАХ И КОЛЬЦАХ ДИСКОВЫХ ГАЛАКТИК

© 2023 г. А. С. Гусев^{1,*}

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

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

Поступила в редакцию 30.12.2022 г.

После доработки 27.03.2023 г.

Принята к публикации 27.03.2023 г.

Регулярность в распределении молодых звездных группировок вдоль спиральных рукавов галактик, впервые открытая в 1983 г. Брюсом и Деброй Элмегринами, считалась достаточно редким явлением. Исследования последних лет пространственной закономерности в распределении молодого звездного населения вдоль рукавов спиральных галактик NGC 628, NGC 895, NGC 4321, NGC 5474, NGC 6946, и вдоль колец спиральной галактики NGC 6217 и линзовидной галактики NGC 4324 показали, что пространственная (квази)регулярность в распределении молодого звездного населения и/или наличие регулярных цепочек областей звездообразования является достаточно распространенным явлением. Характерная шкала регулярности во всех галактиках равна 350–500 пк или кратна ей. Отметим, что теоретические модели предсказывают шкалу неустойчивости звездно-газового диска порядка нескольких кпк, что в несколько раз больше наблюдаемого. Статья частично основана на докладе, представленном на конференции “Современная звездная астрономия-2022”, прошедшей в Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ им. М.В. Ломоносова 8–10 ноября 2022 г.

Ключевые слова: спиральные галактики, звездообразование, межзвездная среда

DOI: 10.31857/S0004629923050043, EDN: YWJNNH

1. ВВЕДЕНИЕ

В 1983 г. В. Элмегрин и Д. Элмегрин [1] обратили внимание на то, что в спиральных ветвях некоторых галактик соседние области H II располагаются на одинаковых расстояниях друг от друга. Авторы [1] отметили редкость подобного феномена: из 200 изученных галактик с развитой спиральной структурой и многочисленными областями звездообразования, регулярные цепочки областей H II были визуально обнаружены лишь в 22 галактиках, причем в 15 галактиках регулярность в распределении областей H II была найдена в одном спиральном рукаве и лишь в 7 галактиках – в двух. Характерные расстояния между соседними областями H II составили в различных галактиках от 1 до 4 кпк [1].

Позднее Ефремов [2, 3] обнаружил подобную закономерность в распределении облаков H I в спиральных рукавах нашей Галактики. Он оценил среднее расстояние между сверхоблаками H I в спиральном рукаве Киля в 1.5 кпк, а в рукаве Лебеда – в 1.3 кпк [2]. Используя ультрафиолетовые изображения, полученные по программе Galaxy Evolution Explorer (GALEX), он также обнаружил регулярную цепочку звездных комплексов в северо-

ро-западном рукаве Туманности Андромеды с характерным расстоянием 1.1 кпк и связал это с наличием регулярного магнитного поля в данном рукаве [3].

Редкость наличия пространственных регулярностей в распределении звездных комплексов или областей H II в спиральных галактиках, казалось бы, вполне объяснима. В самом простейшем случае гравитационной неустойчивости газовой среды, полученное в [1] непосредственно из уравнения Сафронова [4], характерное расстояние между соседними областями звездообразования вдоль спиральных рукавов

$$\Lambda = \frac{2c_g^2}{G\Sigma_g}, \quad (1)$$

где c_g – скорость звука в газе, Σ_g – поверхностная плотность газа и G – гравитационная постоянная. Отметим, что характерный масштаб Λ формально не зависит в этом случае от параметра устойчивости диска Q (параметра Тоомре), однако, от параметра Q зависит характерное время развития неустойчивостей во вращающемся диске:

$$\tau \sim (1 - Q^2)^{-1/2}.$$

При учете магнитного поля уравнение (1) приобретает вид:

$$\Lambda = \frac{2c_g^2}{G\Sigma_g\lambda_{\text{mag}}},$$

где коэффициент λ_{mag} сложным образом зависит от Q и плотности энергии магнитного поля w (см. [1], ур-я (11)–(15) и работу [5], уравнения). Магнитное поле позволяет развиваться неустойчивостям в газовом диске при $Q > 1$ [1, 5].

Коэффициент $\lambda_{\text{mag}} \sim 1\text{--}1.5$ для всего диапазона наблюдаемых параметров Q и w , в частности, для $Q = 1$ $\lambda_{\text{mag}} = 1.1\text{--}1.2$ (см. [1], табл. 3).

В более общем случае, теоретические исследования гравитационной неустойчивости звездно-газовых [6–8] и многокомпонентных дисков [9] показывают, что длина волны возмущений $\Lambda = 2\pi/k$ (k – волновое число рассматриваемой неустойчивости) зависит от целого набора параметров: Σ_g , c_g , поверхностной плотности звездного диска Σ_s , дисперсии скоростей звезд σ_s и формы кривой вращения диска $v(r)$ (см. набор соответствующих уравнений в [10, 11]). При этом длина волны возмущений в двухкомпонентной среде соответствует минимуму дисперсионной кривой для двух компонентов (фрагментация в среде происходит на наиболее быстро растущей длине волны). Регулярность в распределении областей звездообразования и их прародителей – молекулярных облаков – требует постоянства указанных физических параметров звездно-газового диска на достаточно больших масштабах внутри галактического диска в широком диапазоне галактоцентрических расстояний r , что не должно часто встречаться в классических галактических дисках.

Помимо теоретических моделей, связанных с гравитационной неустойчивостью звездно-газового диска, имеются альтернативные модели фрагментации газовых филаментов [12, 13], одно- и многокомпонентных спиральных ветвей [14, 15], колец [16] в дисках галактик, связанных с ростом азимутальных возмущений вдоль ветви (кольца). Все эти модели показывают зависимость длины волны возмущений от тех же параметров межзвездной среды, звездного диска и магнитного поля, что и модели гравитационной (магнито-гравитационной) неустойчивости диска.

Отметим, что все теоретические расчеты предсказывают длину волны возмущений (или характерное расстояние между соседними областями звездообразования) порядка нескольких килопарсек для типичных значений параметров звездной и межзвездной среды [1, 11, 17].

В последнее десятилетие появился целый ряд работ по исследованию регулярности в распреде-

лении молодого звездного населения и молекулярных облаков вдоль спиральных рукавов и колец галактик, изменивший наши представления о распространенности этого явления и характерных пространственных масштабах регулярности. С другой стороны, в последние 10–15 лет появились новые данные наблюдений в инфракрасном и радиодиапазонах звездного компонента, H I и H₂ в галактиках, полученные с угловым разрешением, достаточным для анализа пространственных параметров звездного и диска и газа на субкилопарсековых масштабах для ближайших галактик (проекты BIMA SONG [18], THINGS [19], HERACLES [20], CARMA [21], SINGS [22]), что позволяет напрямую измерить масштаб регулярности в рамках теоретических моделей.

Целью настоящей работы является суммирование данных об исследованиях регулярностей в распределении молодого звездного населения и молекулярных облаков вдоль спиральных рукавов и колец галактик различных типов, полученных как нашей, так и другими группами, и сопоставление этих результатов с данными расчетов, основанных на теоретических моделях.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕГУЛЯРНОСТЕЙ В РАСПРЕДЕЛЕНИИ МОЛОДОГО ЗВЕЗДНОГО НАСЕЛЕНИЯ

В 2013 г. Гусев и Ефремов [23] исследовали распределение областей звездообразования различных размеров и светимостей (звездных скоплений, комплексов и областей H II) в близкой (расстояние 7.2 Мпк согласно [24]), наблюдаемой практически в положении “плашмя” (наклон $i = 7^\circ$ согласно [25] и ряду других работ) grand design галактике типа Sc NGC 628 (M74; рис. 1¹).

В отличие от предыдущих работ, где производился визуальный поиск регулярных цепочек областей звездообразования, мы в своих исследованиях применили более строгий, с математической точки зрения, алгоритм. На первом шаге галактика, при необходимости, разворачивается в положение “плашмя”. Спиральные ветви аппроксимируются логарифмическими спиралями. На следующем этапе проводится апертурная фотометрия вдоль спирали с использованием эллиптической апертуры с большим эксцентриситетом; центры апертур вдоль логарифмической спирали берутся с некоторым шагом, а большая полуось эллипсов, подбираемая так, чтобы охватывать спиральный рукав на всю его ширину, – перпендикулярна к касательной к спирали в точке центра апертуры. Далее строятся профили яр-

¹ Изображение NGC 4321 на рисунке, полученное в [26], взято из базы данных NED, NGC 4324 – из базы обзора SDSS (<http://www.sdss.org/dr13/>) [27]; изображения остальных галактик – из наблюдений по программам автора.

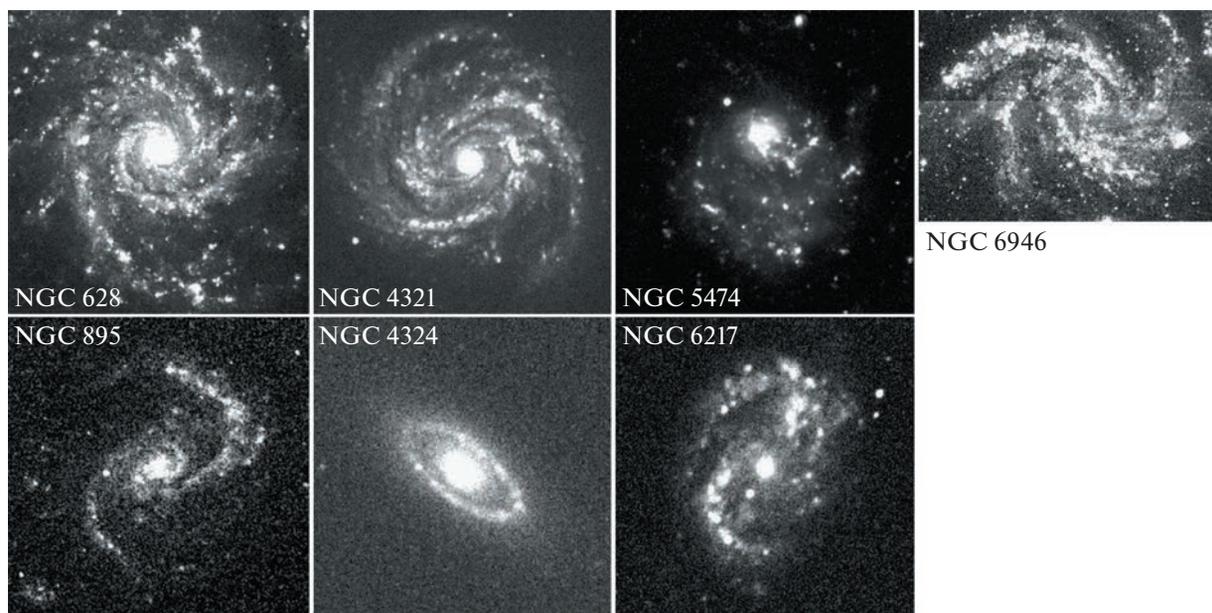


Рис. 1. Изображения галактик, в спиральных ветвях или кольцах которых обнаружены регулярные цепочки областей звездообразования. Изображение NGC 4324 дано в полосе u , остальных галактик – в полосе U . Север – вверх, восток – слева.

кости в полосах, чувствительных к наличию молодого звездного населения (ультрафиолетовые FUV, NUV, UB и $H\alpha$ в оптике, 8 мкм в ИК-диапазоне), находятся их максимумы и расстояния λ между максимумами. Дальнейший анализ происходит как с использованием гистограмм распределений λ (рис. 2), так и с помощью Фурье-анализа (рис. 3). В более поздних работах мы использовали основанные на Фурье-анализе методы, разработанные в работах [28–31] для анализа временных рядов при сильно “зашумленном” сигнале.

Вероятность наличия ложных дополнительных пиков на периодограммах возрастает при уменьшении числа объектов и уменьшении отношения “сигнал/шум” [31]. В большинстве изучаемых в данном разделе галактик количество областей концентрации молодого звездного населения больше 10. Для меньшего количества объектов мы можем говорить лишь о локальных регулярных цепочках.

Численное моделирование, проведенное в [31], показало, что для количества объектов ≥ 10 , получаемый пик с максимальной плотностью мощности всегда соответствует реальной длине волны (частоте); все ложные пики, при наличии, имеют меньшую спектральную плотность мощности (см. [31], рис. 25).

Исследования [23] в FUV, U и $H\alpha$ показали, что молодое звездное население в обоих спиральных рукавах NGC 628 располагается регулярно с

характерной шкалой $\Lambda \approx 400$ пк, что в 4 раза меньше оценок [1] для этой галактики. При этом крупные звездные комплексы, наблюдаемые лишь в одном из рукавов NGC 628, действительно располагаются на расстоянии $4\Lambda = 1.6$ кпк друг от друга, а выборки менее крупных звездных группировок (скоплений и ассоциаций) располагаются на характерных расстояниях $2\Lambda = 800$ пк друг от друга в обоих спиральных ветвях [23].

В работе [23] было также показано, что наличие или отсутствие ударных волн не влияет на регулярность в распределении молодого звездного населения. Признаки наличия ударной волны наблюдаются лишь в одном из рукавов NGC 628, там, где крупные звездные комплексы отсутствуют. Регулярное распределение областей звездообразования наблюдается, однако, вдоль обеих ветвей с одинаковым характерным расстоянием.

В 2018 г. Элмегрин и др. [32] рассмотрели в полосе 8 мкм распределение ИК источников излучения пыли – областей современного звездообразования с возрастом $< (1-2)$ млн. лет – в слабо наклоненной ($i = 24^\circ$ согласно базе данных LEDA²), относительно близкой (расстояние 16.2 Мпк согласно базе данных NED³) галактике типа SABb-SABbc NGC 4321 (M 100). Эта широко известная галактика имеет два спиральных рукава с многочисленными филаментами (рис. 1).

² <http://ned.ipac.caltech.edu/>

³ <http://leda.univ-lyon1.fr/>

Авторы [32] обнаружили в галактике 27 регулярных цепочек пылевых конденсаций, состоящих, в сумме, из 147 источников, с характерным расстоянием между соседними объектами $\lambda \approx 410$ пк, таким же, как и полученным ранее для областей звездообразования в NGC 628.

Гусев и Шимановская [33] в 2020 г. исследовали распределение областей звездообразования в кольце галактики с баром NGC 6217 (тип SBb; рис. 1), в которой подозрение на регулярность расстояний между соседними областями (≈ 1.3 кпк) была высказана в работе [34]. Используя данные наблюдений в NUV, U и $H\alpha$, авторы [33] обнаружили регулярность в распределении молодого звездного населения в кольце с характерным расстоянием $\Lambda \approx 700$ пк, причем наличие моды $3\Lambda/2 \approx 1.0$ кпк (рис. 2, 3), также наблюдаемое в кольце NGC 6217, может указывать на наличие характерного расстояния $\Lambda/2$, близкого по величине к значению 400 пк, полученному для NGC 628 [23] и NGC 4321 [32]. Стоит заметить, что галактика NGC 6217 расположена в три раза дальше от нас ($d = 20.6$ Мпк), чем NGC 628, что затрудняет анализ пространственного распределения в NGC 6217 на масштабах порядка 500 пк и меньше [33].

Отметим, что кольцо галактики располагается вблизи радиуса коротации, т.е. там, где наличие ударных волн не ожидается [33].

В 2022 г. появились две работы независимых групп исследователей, в которых изучалась регулярность в распределении молодого звездного населения в спиральных ветвях и кольцах четырех галактик.

В первой из них [35] было рассмотрено распределение молодого звездного населения в спиральных ветвях Scd-галактик NGC 895, NGC 5474 и NGC 6946. Исследования проводились в полосах FUV, U , $H\alpha$, а для NGC 6946 – также и на 8 мкм. Несмотря на одинаковый морфологический тип, галактики сильно отличаются по структуре. NGC 895 является типичной двухрукавной grand design галактикой; NGC 5474 представляет из себя асимметричную галактику с тремя рукавами, расположенными с одной стороны от центра; четырехрукавная NGC 6946 выглядит флоккулентной, хотя ее спирали имеют волновую природу [36, 37] (рис. 1).

В NGC 895 – наиболее далекой ($d = 32.7$ Мпк) из всех галактик, рассматриваемых в данном разделе, авторы [1] обнаружили регулярную цепочку из шести звездных комплексов с характерным расстоянием 1.4 кпк лишь в одной из двух спиральных ветвей. Анализ, проведенный в [35], показал наличие пространственных регулярностей в распределении молодого звездного населения в обоих спиральных рукавах. В первом из рука-

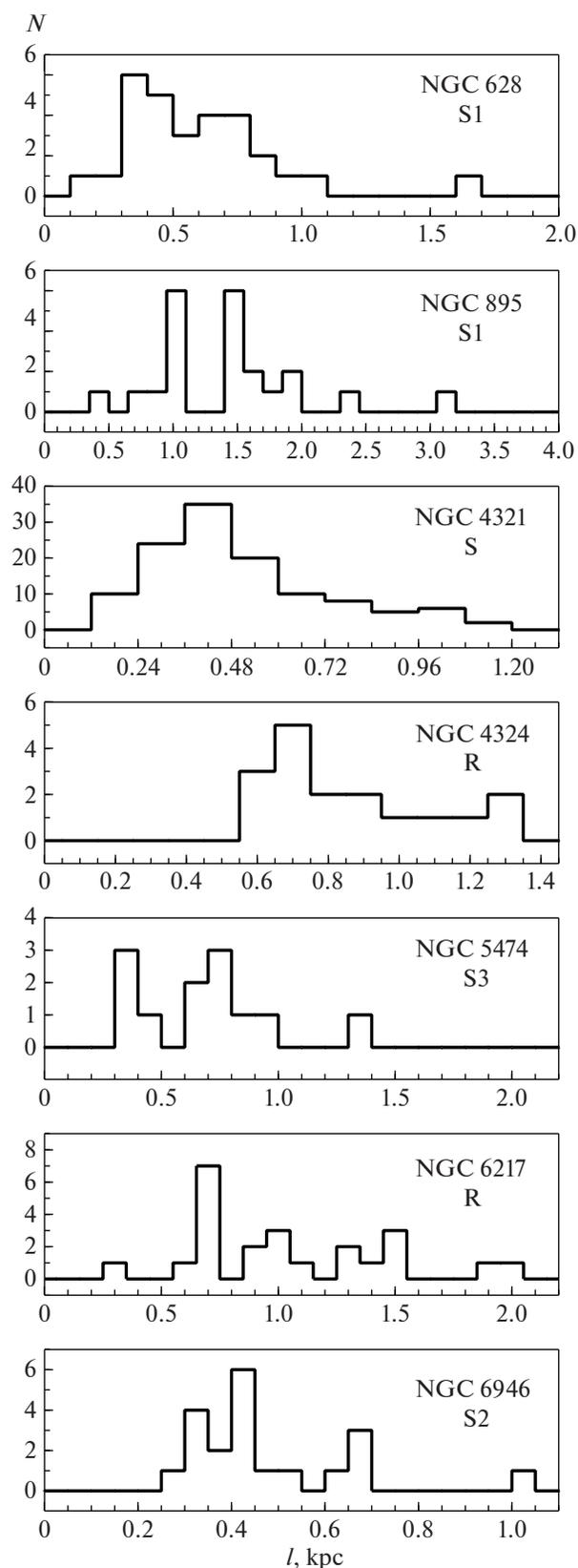


Рис. 2. Примеры распределений по расстоянию между соседними областями звездообразования (локальными максимумами яркости) в спиральных ветвях и кольцах галактик.

PSD/PSD (FAR = 25%)

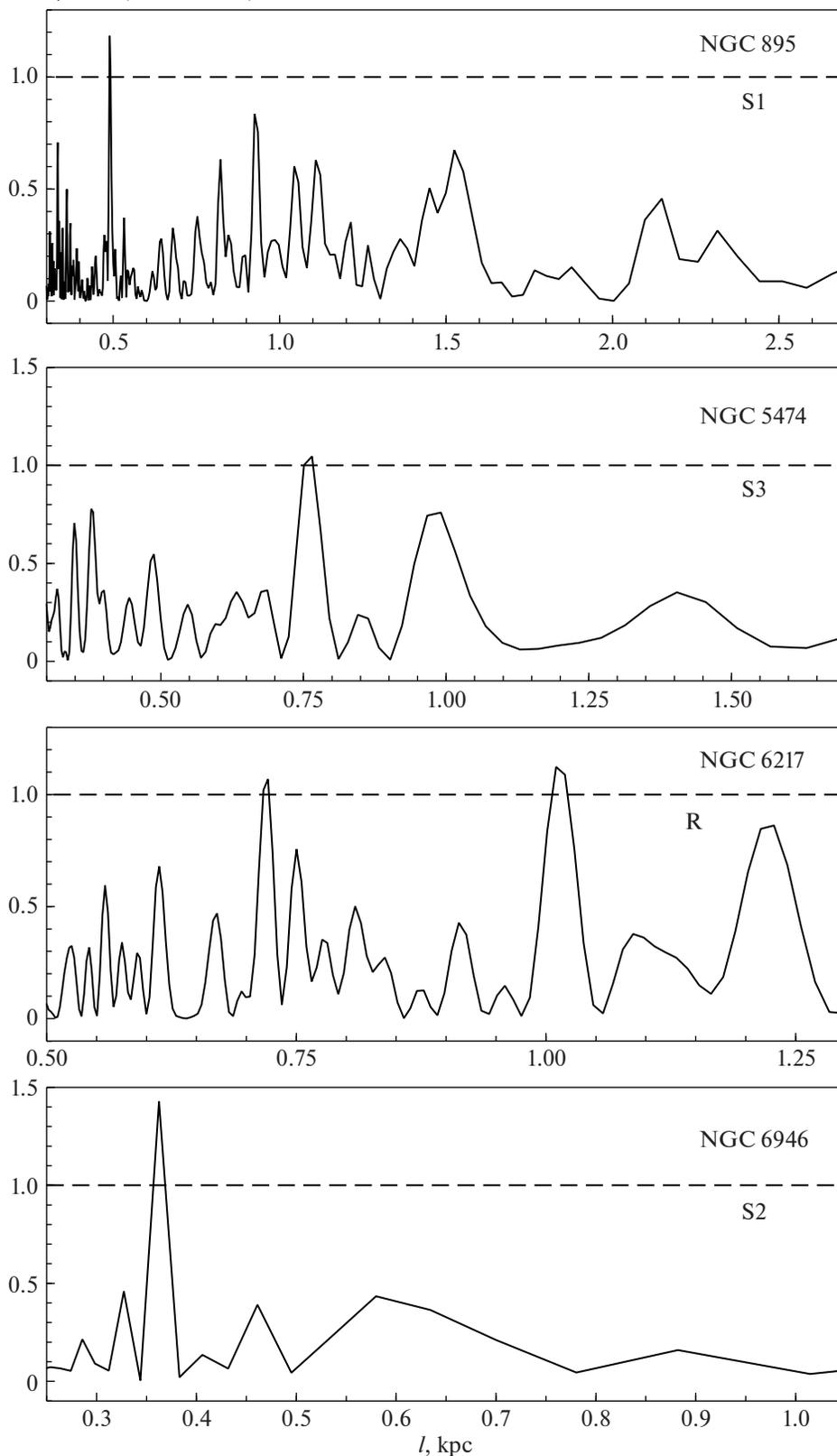


Рис. 3. Примеры нормированной спектральной плотности мощности функции распределения локальных максимумов яркости в фотометрических полосах, чувствительных к присутствию молодого звездного населения, в спиральных ветвях и кольцах галактик. Значения $PSD > 1$ соответствуют вероятности ложного определения выделенной частоты (длины волны) $< 25\%$.

Таблица 1. Характерные расстояния λ между соседними областями звездообразования в спиральных ветвях и кольцах галактик

NGC	С/К	λ , кпк
628	C1	0.4, 0.8, 1.6
	C2	0.4, 0.8
895	C1	0.5, 1.0, 1.5
	C2	1.0, 1.5, 2.0
4321	С (ИК)	0.41
4324	К	0.65, 1.0
5474	C1	0.43, 0.86
	C2	0.66, 1.15
	C3	0.39, 0.75
6217	К	0.7, 1.0
6946	C1	0.4
	C2	0.37
	C2 (ИК)	0.31, 0.55, 0.89
	C3	0.3
	C3 (ИК)	0.43
	C4 (ИК)	0.4

Примечание. C1, ... – номер спирального рукава, К – кольцо галактики.

вов была подтверждена шкала 1.4–1.5 кпк, полученная в [1], обнаружено характерное расстояние ≈ 1.0 кпк, а данные Фурье-анализа указали и на наличие шкалы $\Lambda \approx 500$ пк (рис. 2, 3). Во втором спиральном рукаве были найдены характерные шкалы расстояний ≈ 1.0 , ≈ 1.5 и ≈ 2.0 кпк, причем последняя уверенно подтверждается и данными Фурье-анализа.

В коротком внутреннем рукаве NGC 5474 авторы [35] обнаружили цепочку из пяти областей звездообразования, образующую регулярную последовательность с $\Lambda = 430$ пк и $2\Lambda = 860$ пк. В среднем рукаве галактики шесть областей звездообразования составляют регулярную цепочку с характерными расстояниями между соседями ≈ 660 пк и ≈ 1.15 кпк. Эта цепочка была ранее отмечена в [1]. В дальней спиральной ветви было также найдено два характерных расстояния: ≈ 390 пк и удвоенное ≈ 740 пк. Последнее подтверждается и данными Фурье-анализа, дающего величину 750 пк (рис. 2, 3).

В NGC 6946 регулярные цепочки областей звездообразования визуально не просматриваются ни в одной из спиральных ветвей. Однако в работе [35] была выявлена пространственная регулярность в распределении молодого звездного населения и/или наличие регулярных цепочек областей звездообразования во всех спиральных

ветвях. В одном из внутренних рукавов галактики обнаружена регулярная цепочка из пяти областей звездообразования с характерным расстоянием ≈ 400 пк. Во втором из внутренних спиральных рукавов присутствует регулярность в распределении молодого звездного населения как и УФ и оптике (расстояние 360–380 пк), так и в ИК (расстояния ≈ 310 , ≈ 550 и ≈ 890 пк). Минимальные шкалы ≈ 310 и 360–380 пк были подтверждены данными Фурье-анализа. В третьей, внешней спирали NGC 6946, согласно [35] были выявлены регулярные распределения молодого звездного населения ~ 300 пк в оптике и 420–440 пк в ИК. В четвертом спиральном рукаве источники в оптике, УФ и ИК-источники показали регулярное распределение с $\Lambda \approx 400$ пк.

Во второй работе 2022 г. Прошина, Моисеев и Сильченко [38] обнаружили закономерность распределения молодых звездных комплексов и областей H II в кольце линзовидной (!) галактики типа SA0+ NGC 4324 (рис. 1). Исследуя эту галактику в полосах FUV, NUV, *u* и в линии H α , авторы [38] установили, что расстояния между соседними областями H II в кольце $\Lambda \approx 650$ пк, а между звездными комплексами, видимыми в *u*, ≈ 1.0 кпк. При этом относительно более молодые области звездообразования (области H II с возрастом до 10 млн. лет) часто располагаются посередине между относительно старыми ($t \sim 100$ млн. лет) звездными комплексами.

Полученные в [38] численные результаты близки к данным [33] для кольца NGC 6217. Отметим, галактика NGC 4324 находится от нас еще дальше, чем NGC 6217 ($d = 26.2$ Мпк [39]), и исследовать возможные регулярности на меньших масштабах (300–500 пк) не представляется возможным.

Сводные данные о найденных характерных расстояниях между соседними областями звездообразования в спиральных ветвях и кольцах семи изученных в последние годы галактик приведены в табл. 1.

Полученные результаты показывают, что характерная шкала регулярности Λ во всех галактиках равна 350–500 пк или кратна ей.

3. ДЛИНА ВОЛНЫ ВОЗМУЩЕНИЙ Λ В ГАЗОВОМ И ЗВЕЗДНО-ГАЗОВОМ ДИСКЕ ГАЛАКТИКИ NGC 628

Используя данные наблюдений молекулярного водорода в линии CO (3 мм, $J = 1 \rightarrow 0$) из проекта VIMA SONG [18], взятые из базы данных NED, и атомарного водорода в линии 21 см [19], взятые из базы данных проекта THINGS⁴, мы

⁴ <http://www.mpia.de/THINGS>

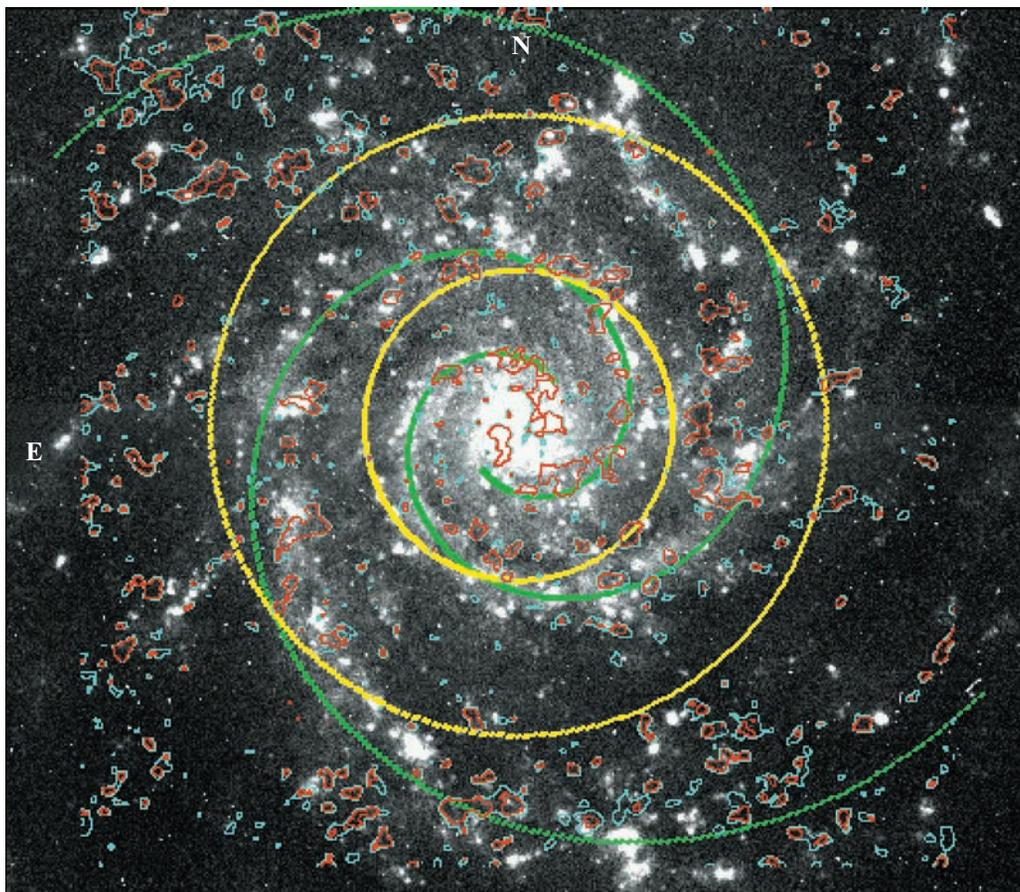


Рис. 4. Изображение NGC 628 в полосе U . Зеленые кривые — логарифмические спиральные ветви. Желтые окружности имеют радиусы $60''$ и $120''$. Красным и голубым цветами отмечены изолинии $\lambda = 600$ пк и $\lambda = 800$ пк соответственно.

оценили характерную длину волны возмущений λ в газовом диске хорошо изученной спиральной галактики NGC 628 (рис. 4), в которой прослеживается четкая регулярность в распределении молодого звездного населения вдоль спиральных рукавов [23]. Отметим, что данные двумерные изображения галактики в линиях CO и 21 см уже использовались нами ранее в работах [23] и [40], соответственно.

Угловое разрешение при наблюдениях как H I, так и H₂ составляет $\approx 6''$ (200 пк) [18, 19]. Данные THINGS содержат помимо карт интенсивностей (поверхностных плотностей Σ) H I, карты радиальной скорости v_{rad} и дисперсии скоростей газа $\sigma(\text{H I})$. Карта дисперсии скоростей H I также использовалась в настоящем исследовании.

Отметим, что наблюдения H₂ в NGC 628 проводились также в рамках проектов HERACLES [20] и CARMA [21]. Данные HERACLES показывают несколько лучшую чувствительность, но имеют худшее разрешение, чем данные VIMA SONG [11], а данные CARMA не захватывают

внешние области NGC 628. В целом данные наблюдений H₂, полученные в рамках трех данных проектов, хорошо согласуются друг с другом [11, 20], за исключением центральной области галактики ($r < 50''$), не рассматриваемой в данной работе.

Коэффициенты перевода потоков в линиях CO и 21 см в поверхностные плотности H₂ и H I брались из работы [10].

Полученные нами радиальные распределения $\Sigma(\text{H I})$, $\Sigma(\text{H}_2)$ и $\sigma(\text{H I})$, представленные на рис. 5, согласуются в пределах погрешностей с аналогичными распределениями, полученными в работах [10, 11]. Исключение составляют лишь результаты по $\Sigma(\text{H I})$: на основании одних и тех же данных авторы [10] и [11] получили значения $\Sigma(\text{H I})$, отличающиеся в ~ 2 раза (см. дискуссию в [11]). В данной работе мы приняли решение использовать калибровку авторов [10] из команды проекта THINGS. Заметим, что различия в оценках $\Sigma(\text{H I})$ не окажут принципиального влияния на наши результаты: атомарный водород распре-

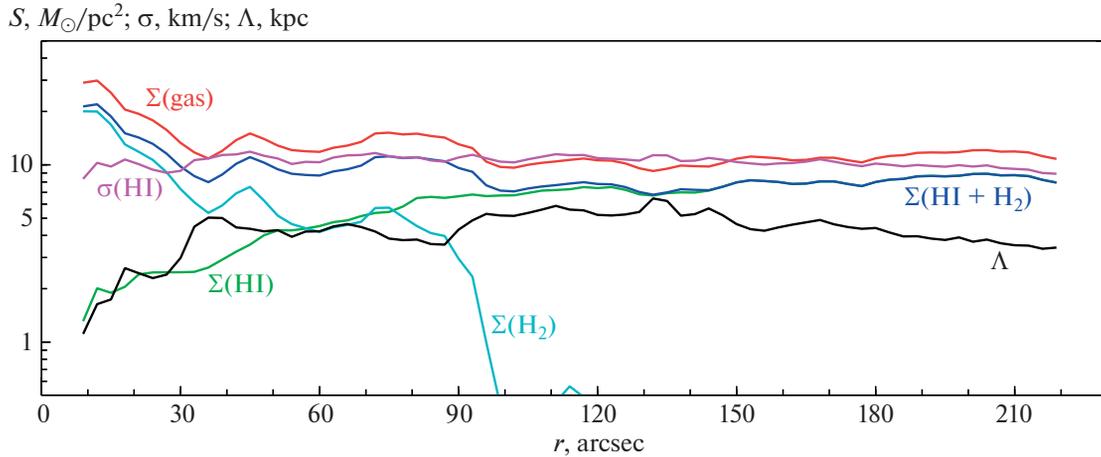


Рис. 5. Радиальные профили поверхностных плотностей $\Sigma(\text{HI})$ (зеленая кривая), $\Sigma(\text{H}_2)$ (голубая), $\Sigma(\text{HI} + \text{H}_2)$ (синяя), $\Sigma(\text{gas})$ (красная), дисперсии скоростей $\sigma(\text{H I})$ (фиолетовая) и характерной длины волны звездообразования λ (черная кривая) в галактике NGC 628.

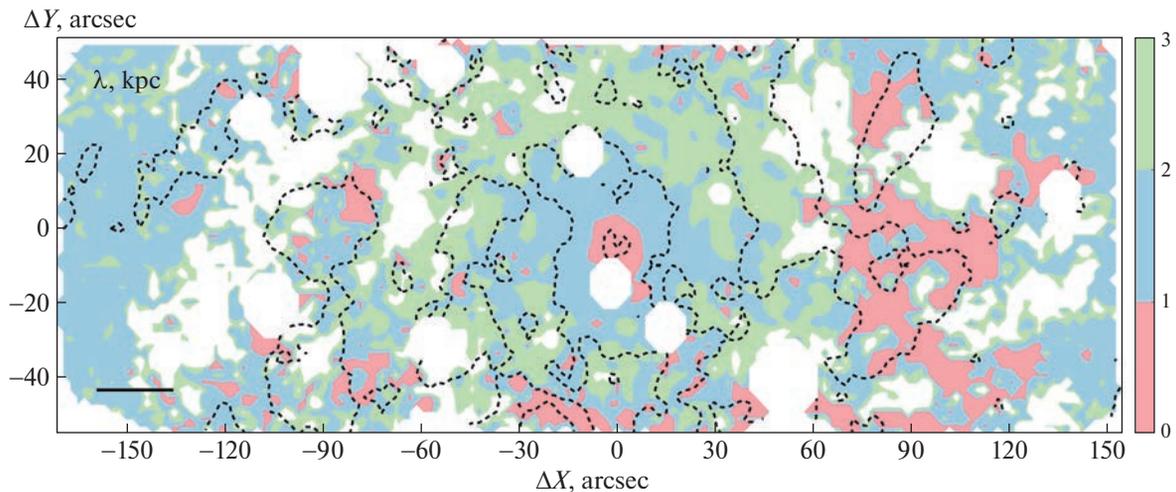


Рис. 6. Наиболее нестабильная длина волны λ в кпк для модели звездно-газового диска NGC 628. Белые области демонстрируют замаскированные звезды или области с $\lambda > 3$ кпк. Черные пунктирные линии обозначают области звездообразования. Черный отрезок в левом нижнем углу соответствует линейной шкале 840 пк. Север – вверх, восток – слева.

делен более равномерно по диску галактики, чем молекулярный, концентрирующийся строго в спиральных ветвях NGC 628 (см. [10], рис. 35, [18], рис. 6, [23], рис. 14).

Дополнительно мы использовали оптические изображения NGC 628, полученные нами ранее (см. работу [23] и ссылки в ней).

Поскольку галактика наклонена к нам под углом 7° , эффекты проекции как для величин поверхностных плотностей газа, так и для геометрических параметров (координаты, галактоцентрическое расстояние) дают поправку менее 1%. Поэтому в данной работе мы не исправляли кар-

ты NGC 628 и значения $\Sigma(\text{H I})$, $\Sigma(\text{H}_2)$ за наклон диска.

Считая атомарный и молекулярный водород хорошо перемешанным (см., напр., [41]), мы принимаем в работе равенство их дисперсий скоростей, $\sigma(\text{H I}) = \sigma(\text{H}_2)$, и равенство скорости звука и дисперсии скоростей в газе: $c(\text{gas}) = \sigma(\text{gas})$.

Для учета вклада гелия и более тяжелых элементов используется коэффициент 1.36 (см., напр., [11]): $\Sigma(\text{gas}) = 1.36(\Sigma(\text{H I}) + \Sigma(\text{H}_2))$.

Используя карты $\Sigma(\text{H I})$, $\Sigma(\text{H}_2)$ и $\sigma(\text{H I})$, мы построили радиальные профили поверхностных

плотностей и дисперсии скоростей газа в галактике в кольцевых апертурах шириной 3" (рис. 5). Шаг 3" был выбран для согласования данных THINGS с масштабом 1.5"/пиксель и VIMA SONG с масштабом 1"/пиксель.

Расчет радиального профиля характерного расстояния Λ проводился по формуле (1), где $c_g = \sigma(\text{HI})$ и $\Sigma_g = 1.36(\Sigma(\text{HI}) + \Sigma(\text{H}_2))$.

Полученные азимутально усредненные характерные расстояния Λ оказываются в несколько раз больше ожидаемых из наблюдений [1, 23]. При этом стоит обратить внимание, что на расстояниях $r = 40''\text{--}200''$ от центра NGC 628, там, где наблюдаются регулярные цепочки областей звездообразования, значения Λ , Σ_g и σ_g остаются практически постоянными и не зависят от r : $\Lambda = 4.7 \pm 0.7$ кпк, $\Sigma_g = (12 \pm 2)M_\odot/\text{пк}^2$, $\sigma_g = (10.7 \pm 0.5)$ км/с. Поверхностная плотность HI в галактике начинает падать далеко за пределами развития спиральных рукавов, на расстояниях $r > 300''$ от центра [10].

Примерное постоянство параметров поверхностной плотности и дисперсии скоростей (скорости звука) газа, ответственных за характерную длину волны звездообразования Λ , в широком диапазоне расстояний до центра галактики объясняет, в принципе, существование регулярных цепочек областей звездообразования в спиральных рукавах NGC 628. Однако полученные на $r = 400''\text{--}200''$ средние значения Λ в ≈ 3 раза больше наблюдаемых расстояний в [1] и в ≈ 12 раз больше оценок [23].

Мы построили карту значений λ для NGC 628, используя карты $\Sigma(\text{HI})$, $\Sigma(\text{H}_2)$ и $\sigma(\text{HI})$. На рис. 4 показаны наложенные на оптическое изображение NGC 628 изолинии $\Lambda = 800$ и 600 пк.

Как видно из рис. 4, хотя области с минимальными значениями λ и концентрируются вдоль спиральных рукавов, общая площадь областей с $\Lambda < 800$ пк крайне мала. Размеры крупнейших отдельных областей не превышают 700 пк.

Согласно теории неустойчивости газового диска, масштаб усреднения должен быть больше длины волны возмущения, т.е. области с $\Lambda < 600\text{--}800$ пк должны полностью покрывать спиральные рукава галактики и иметь толщину $\sim \Lambda$.

Таким образом, прямое определение значений Λ в диске NGC 628, полученное по формуле (1), не согласуется с результатами работы [23], в которой найдено характерное расстояние 400 пк.

Звездно-газовый диск NGC 628 анализировал Марчук [11], опираясь на данные проектов THINGS, HERACLES и VENGA [42, 43]. Карта

локальных значений λ для звездно-газового диска галактики приведена на рис. 6⁵. Как мы видим, значения и распределение параметра Λ для звездно-газового диска NGC 628 также не согласуется с результатами авторов [23]: области с $\lambda < 1$ кпк занимают незначительную долю общей площади, а их линейный размер не превышает величину неоднородности Λ .

Отметим, что расчеты фрагментации спиральных рукавов, проведенные в [17] для NGC 628, также предсказывают характерные расстояния $\Lambda > 1$ кпк вдоль спиралей.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные по нашей методике [23, 33] характерные масштабы регулярности оказываются в несколько раз меньшими, чем в работе [1]. Это объясняется тем, что авторы [1] исследовали распределение крупных звездных комплексов и областей HI. Наша методика позволяет исследовать зоны повышенного звездообразования (концентрацию молодого звездного населения с возрастом $t < 300$ млн. лет). Звездные комплексы [1] являются лишь частным случаем таких областей повышенной концентрации молодого звездного населения.

Авторы [38] обнаружили дрейф звездообразования вдоль кольца NGC 4324, где относительно более молодые области звездообразования часто располагаются посередине между относительно старыми. Такая картина не является уникальной: в большинстве галактик более молодые и старые области чередуются. В качестве примера можно привести галактику NGC 6217 (рис. 7): на ее цветном изображении видно, что области звездообразования, образующие регулярную цепочку, имеют разный возраст. Наиболее молодыми являются области HI, практически невидимые в широкополосных фильтрах, а наиболее старыми — области без признаков эмиссии в H α (см. морфологическую эволюционную последовательность в [44]). В качестве второго примера можно привести и данные спектральных наблюдений [45] регулярной цепочки областей звездообразования в спиральной ветви галактики NGC 3963 (рис. 8). Расположенные на расстоянии ≈ 1.6 кпк друг от друга, некоторые области имеют ярко выраженный эмиссионный спектр (см. линию H β), а другие — нет.

Возможно, что в случае синхронного начала звездообразования в соседних ГМО, расширяющаяся ударная волна от одной из областей звездообразования, распространяющаяся, в том числе, и вдоль спирали или кольца, встретится с ударной

⁵ Рисунок любезно предоставлен А.А. Марчуком (СПбГУ). Он похож, но не идентичен рис. 4 из [11].

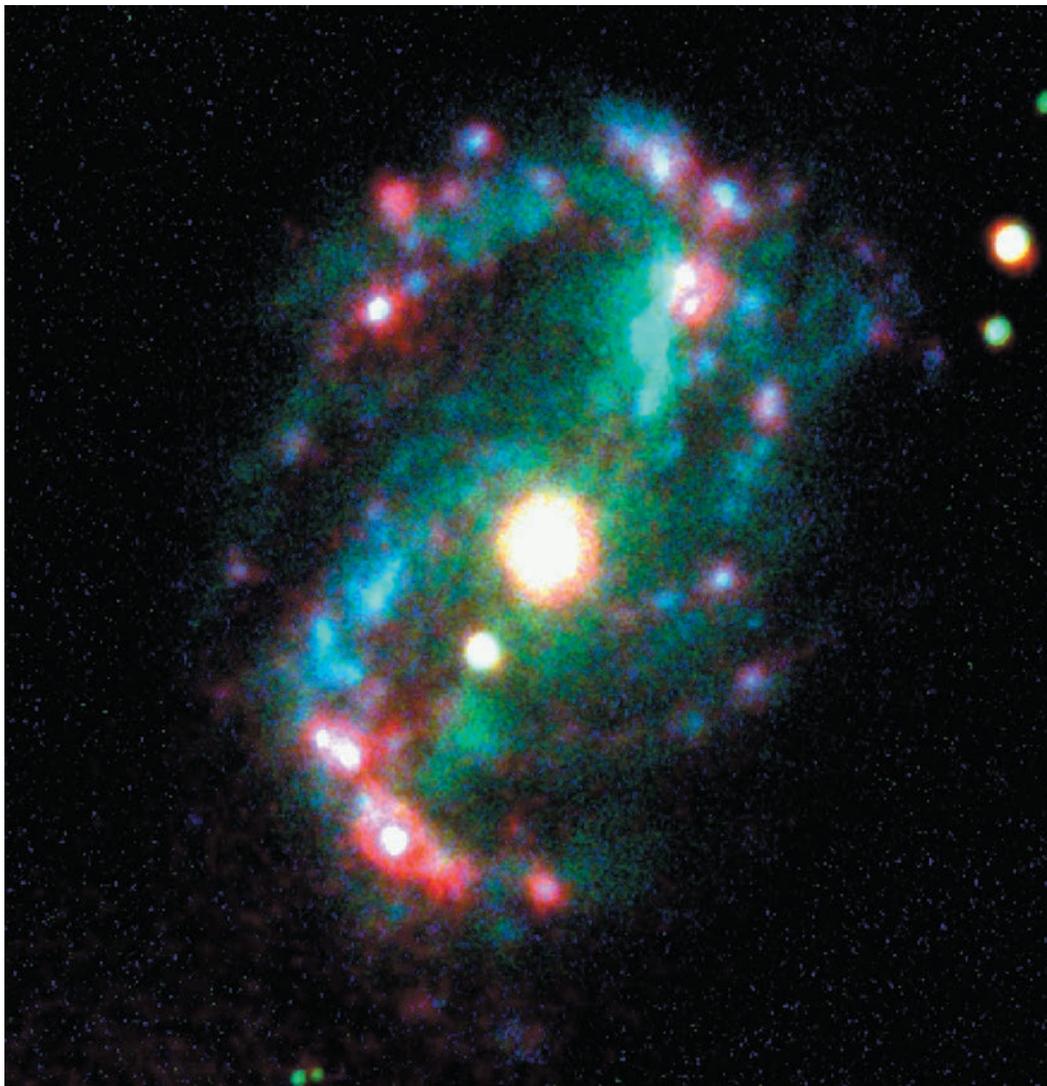


Рис. 7. Составное изображение NGC 6217 в U (синий цвет), B (зеленый) и $H\alpha$ (красный). Север –верху, восток –слева.

волной от соседнего источника примерно посередине между ними.

Влияние магнитного поля на регулярность звездообразования играет, скорее, вспомогательную роль. К сожалению, исследования магнитного поля даже в ближайших галактиках, таких как NGC 628 и NGC 6946, проведены с линейным разрешением >1 кпк [46–48], что недостаточно для изучения детального влияния магнитного поля на интересующих нас масштабах. В любом случае, на величину Λ магнитное поле влияет слабо; оно может уменьшить его не более, чем на 20% (см. Введение).

Отметим, что значения λ , полученные из анализа гистограмм распределения расстояний между соседними областями звездообразования и по данным Фурье-анализа, не всегда согласуются

между собой. Это особенно заметно при исследовании NGC 6946. Данное расхождение, по-видимому, связано либо с квазирегулярным распределением областей звездообразования (соседние области располагаются в узком, но значимом диапазоне расстояний), либо с наличием отдельных локальных регулярных цепочек областей звездообразования в спиральном рукаве или кольце.

Полученные на примере NGC 628 результаты показывают, что азимутально усредненная длина волны звездообразования Λ может сохранять примерно постоянные значения в широком диапазоне галактоцентрических расстояний. С одной стороны, постоянство Λ в классической спиральной галактике, какой является NGC 628, может служить указанием на то, что постоянство

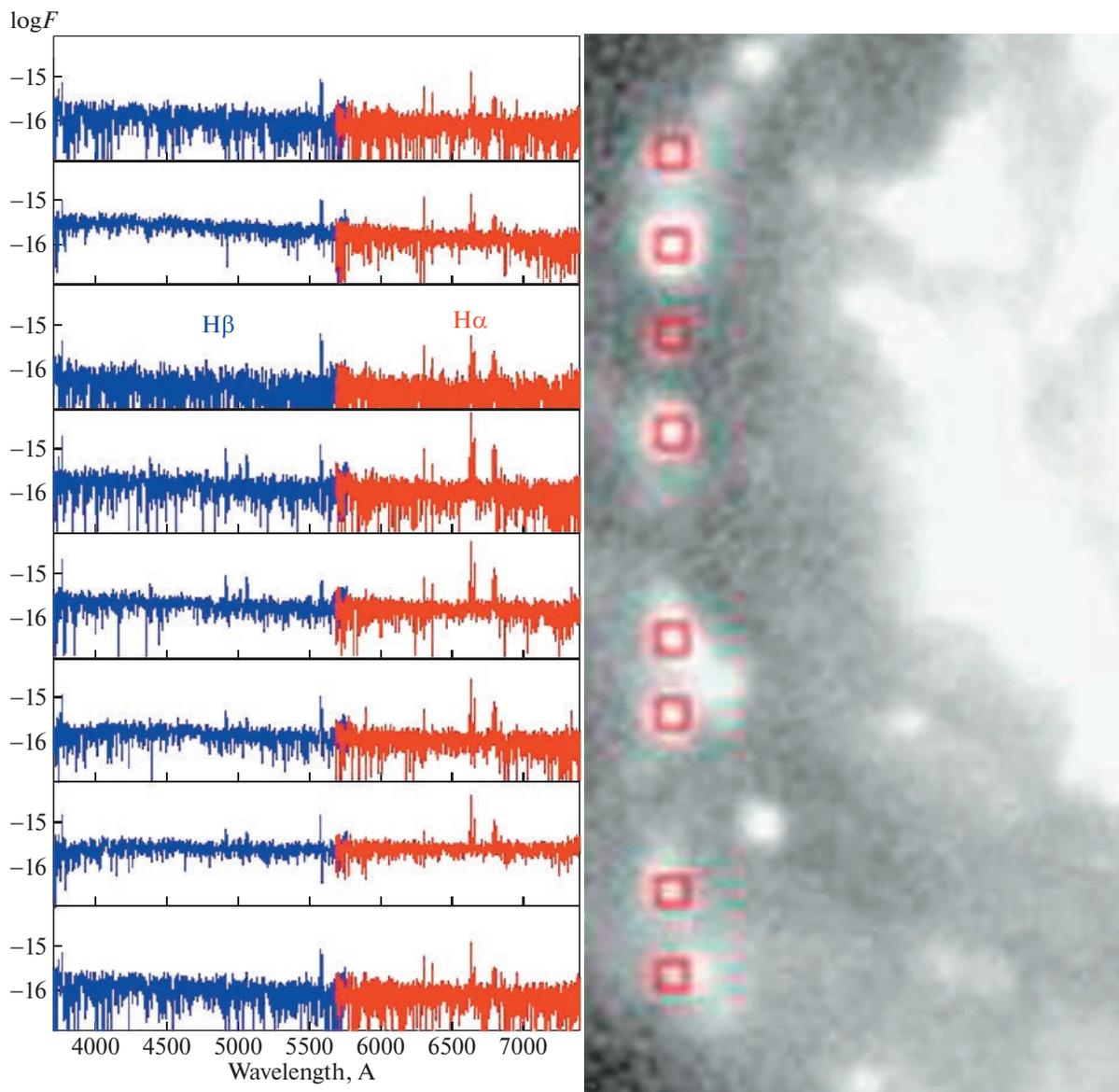


Рис. 8. Южная спиральная ветвь галактики NGC 3963 (справа) с регулярной цепочкой областей звездообразования (красные квадраты) и спектры соответствующих областей (слева).

параметра Λ и, как следствие, наличие регулярности в распределении молодого звездного населения, может быть относительно распространенным случаем в галактиках. С другой стороны, это, как-будто, служит теоретическим подтверждением строгой регулярности в распределении областей звездообразования в спиральных NGC 628.

Здесь, однако, существует неразрешимое до сих пор противоречие. Все теоретические модели: гравитационной неустойчивости диска, фрагментации спиральных рукавов, филаментов и колец — предсказывают регулярность с Λ , равным нескольким килопарсекам, что в несколько раз больше наблюдаемых. Механизм образования ре-

гулярностей на масштабах 350–500 пк неизвестен и требует дальнейших исследований.

Возникает вопрос: не существует ли нескольких шкал регулярности на разных пространственных масштабах? На это могут указывать следующие результаты: 1) в NGC 628 наблюдается несколько выделенных характерных расстояний для разных выборок объектов, более яркие и крупные звездные комплексы располагаются на больших расстояниях друг от друга [23]; 2) в ближайшей из исследованных галактик, NGC 6946 ($d = 5.9$ Мпк), выявляются характерные расстояния ~ 300 пк; 3) согласно [1, 32], характерные расстояния между соседними областями звездообра-

зования примерно равны трем диаметрам (D) этих областей. В галактике NGC 4321, где авторы [32] исследовали ИК-источники, меньшие по размерам, чем звездные комплексы из [1], отношение $\Lambda \approx 3D$ сохраняется. Отметим, что в NGC 628 иерархия звездных концентраций сохраняется с единой фрактальной размерностью 1.5 в диапазоне масштабов от 2 пк до 1 кпк [49, 50].

Данный вопрос также требует дальнейших исследований.

Полученные минимальные характерные расстояния Λ в 5–10 раз превышают линейное разрешение изображений соответствующих галактик. Лишь в одном случае – в спиральной ветви С1 галактики NGC 895 – была с помощью Фурье-анализа обнаружена шкала Λ , в 3 раза большая линейного разрешения изображений NGC 895. При этом прямая зависимость между линейным разрешением изображений и характерным расстоянием Λ отсутствует. Как отмечалось выше, величина Λ , по-видимому, зависит от диаметра областей звездообразования. С другой стороны, размеры молодых звездных группировок различного иерархического уровня (комплексы, агрегаты, ассоциации, скопления [51]) примерно одинаковы в различных галактиках.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования последних лет для ряда галактик (NGC 628, NGC 895, NGC 4321, NGC 4324, NGC 5474, NGC 6217 и NGC 6946) показали, что регулярность в пространственном распределении молодого звездного населения вдоль спиральных рукавов и колец галактик наблюдается чаще, чем предполагалось. Она обнаружена в галактиках различной морфологии, от S0 до Scd.

В большинстве исследованных галактик характерное расстояние между соседними зонами концентрации молодого звездного населения равно или кратно 350–500 пк.

Наличие или отсутствие ударных волн не влияет на образование регулярных цепочек областей звездообразования вдоль галактических спиралей и колец.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) № 20-02-00080. Исследование поддержано Междисциплинарной научно-образовательной Школой МГУ им. М.В. Ломоносова “Фундаментальные и прикладные исследования космоса”.

БЛАГОДАРНОСТИ

Благодарю анонимного рецензента за ценные замечания. Выражаю благодарность организаторам конференции “Современная звездная астрономия–2022”. Благодарю Е.В. Шимановскую (ГАИШ МГУ), А.В. Засова (ГАИШ МГУ), О.В. Егорова (ГАИШ МГУ, Гейдельбергский университет), А.А. Марчука (СПбГУ) и Н.А. Зайцеву (ГАИШ МГУ) за помощь и консультации, А.В. Моисеева (САО РАН) – за плодотворную дискуссию. Отдельную благодарность выражаю А.А. Марчуку за оригинальную карту распределения λ . В данной работе использовались открытые данные проектов THINGS, BIMA SONG, SDSS и базы данных NED и LEDA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *B. G. Elmegreen and D. M. Elmegreen*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **203**, 31 (1983).
2. *Ю. Н. Ефремов*, Письма в Астрон. журн. **35**(8), 563 (2009).
3. *Yu. N. Efremov*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **405**, 1531 (2010), arXiv:1002.4555 [astro-ph.CO].
4. *V. S. Safronov*, Ann. Astrophys. **23**, 979 (1960).
5. *D. Lynden-Bell*, Observatory **86**, 57 (1966).
6. *C. J. Jog and P. M. Solomon*, Astrophys. J. **276**, 114 (1984).
7. *C. J. Jog and P. M. Solomon*, Astrophys. J. **276**, 127 (1984).
8. *A. B. Romeo and N. Falstad*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **433**, 1389 (2013), arXiv:1302.4291 [astro-ph.CO].
9. *R. R. Rafikov*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **323**, 445 (2001), arXiv:astro-ph/0007058.
10. *A. K. Leroy, F. Walter, E. Brinks, F. Bigiel, W. J. G. de Blok, B. Madore, and M. D. Thornley*, Astron. J. **136**, 2782 (2008), arXiv:0810.2541 [astro-ph].
11. *A. A. Marchuk*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **476**, 3591 (2018), arXiv:1804.07964 [astro-ph.GA].
12. *S. Inutsuka and S. M. Miyama*, Astrophys. J. **480**, 681 (1997).
13. *M. Mattern, J. Kainulainen, M. Zhang, and H. Beuther*, Astron. and Astrophys. **616**, id. A78 (2018), arXiv:1804.02256 [astro-ph.GA].
14. *B. G. Elmegreen*, Astrophys. J. **433**, 39 (1994).
15. *S. Inoue and N. Yoshida*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **474**, 3466 (2018), arXiv:1706.01895 [astro-ph.GA].
16. *B. G. Elmegreen*, Astrophys. J. **425**, L73 (1994).
17. *S. Inoue, N. Takagi, A. Miyazaki, E. M. Cooper, F. Egusa, and H. Yajima*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **506**, 84 (2021), arXiv:2103.12130 [astro-ph.GA].
18. *T. T. Helfer, M. D. Thornley, M. W. Regan, T. Wong, K. Sheth, S. N. Vogel, L. Blitz, and D. C.-J. Bock*, Astrophys. J. Suppl. **145**, 259 (2003), arXiv:astro-ph/0304294.
19. *F. Walter, E. Brinks, W. J. G. de Blok, F. Bigiel, R. C., Jr Kenicutt, M. D. Thornley, and A. Leroy*, Astron. J. **136**, 2563 (2008), arXiv:0810.2125 [astro-ph].

20. *A. K. Leroy, F. Walter, F. Bigiel, A. Usero, et al.*, *Astron. J.* **137**, 4670 (2009), arXiv:0905.4742 [astro-ph.CO].
21. *N. Rahman, A. D. Bolatto, R. Xue, T. Wong, et al.*, *Astrophys. J.* **745**, id. A183 (2012), arXiv:1110.1630 [astro-ph.CO].
22. *R. C. Kennicutt, Jr., L. Armus, G. Bendo, D. Calzetti, et al.*, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **115**, 928 (2003), arXiv:astro-ph/0305437.
23. *A. S. Gusev and Yu. N. Efremov*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **434**, 313 (2013), arXiv:1306.1731 [astro-ph.CO].
24. *M. E. Sharina, I. D. Karachentsev, and N. A. Tikhonov*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **119**, 499 (1996).
25. *Ф. X. Сахибов и М. А. Смирнов*, *Астрон. журн.* **81**(12), 1093 (2004).
26. *P. M. Marcum, R. W. O'Connell, M. N. Fanelli, R. H. Cornett, et al.*, *Astrophys. J. Suppl.* **132**, 129 (2001).
27. *F. D. Albareti, C. Allende Prieto, A. Almeida, F. Anders, et al.*, *Astrophys. J. Suppl.* **233**, id. A25 (2017), arXiv:1608.02013 [astro-ph.GA].
28. *J. D. Scargle*, *Astrophys. J.* **263**, 835 (1982).
29. *J. H. Horne and S. L. Baliunas*, *Astrophys. J.* **302**, 757 (1986).
30. *W. H. Press and G. B. Rybicki*, *Astrophys. J.* **338**, 277 (1989).
31. *J. T. VanderPlas*, *Astrophys. J. Suppl.* **236**, id. A16 (2018), arXiv:1703.09824 [astro-ph.IM].
32. *B. G. Elmegreen, D. M. Elmegreen, and Y. N. Efremov*, *Astrophys. J.* **863**, id. A59 (2018), arXiv:1806.08957 [astro-ph.GA].
33. *A. S. Gusev and E. V. Shimanovskaya*, *Astron. and Astrophys.* **640**, id. L7 (2020), arXiv:2007.08333 [astro-ph.GA].
34. *Б. П. Артамонов, Ю. Ю. Бадан, В. В. Бруевич, А. С. Гусев*, *Астрон. журн.* **76**, 438 (1999).
35. *A. S. Gusev, E. V. Shimanovskaya, and N. A. Zaitseva*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **514**, 3953 (2022), arXiv:2206.03427 [astro-ph.GA].
36. *S. Kendall, R. C. Kennicutt, and C. Clarke*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **414**, 538 (2011), arXiv:1101.5764 [astro-ph.GA].
37. *S. Ghosh and C. J. Jog*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **459**, 4057 (2016), arXiv:1604.05401 [astro-ph.GA].
38. *И. С. Прошина, А. В. Мусеев, О. К. Сильченко*, *Письма в Астрон. журн.* **48**(3), 153 (2022), arXiv:2210.07786 [astro-ph.GA].
39. *R. B. Tully, H. M. Courtois, A. E. Dolphin, J. R. Fisher, et al.*, *Astron. J.* **146**, id. A86 (2013), arXiv:1307.7213 [astro-ph.CO].
40. *A. S. Gusev, F. Sakhibov, and Yu. N. Efremov*, *Astron. Nachricht.* **336**, 401 (2015), arXiv:1504.04743 [astro-ph.GA].
41. *K. M. Mogotsi, W. J. G. de Blok, A. Caldú-Primo, F. Walter, R. Ianjamasimanana, and A. K. Leroy*, *Astron. J.* **151**, id. A15 (2016), arXiv:1511.06006 [astro-ph.GA].
42. *G. A. Blanc, T. Weinzirl, M. Song, A. Heiderman, et al.*, *Astron. J.* **145**, id. 138 (2013), arXiv:1303.1552 [astro-ph.CO].
43. *G. A. Blanc, A. Schrubba, N. J. Evans II, S. Jogee, et al.*, *Astrophys. J.* **764**, id. 117 (2013), arXiv:1212.4152 [astro-ph.GA].
44. *B. C. Whitmore, R. Chandar, H. Kim, C. Kaleida, et al.*, *Astrophys. J.* **729**, id. A78 (2011), arXiv:1103.4026 [astro-ph.GA].
45. *A. S. Gusev and A. V. Dodin*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **505**, 2009 (2021), arXiv:2105.06203 [astro-ph.GA].
46. *R. Beck, N. Loiseau, E. Hummel, E. M. Berkhuijsen, R. Grave, and R. Wielebinski*, *Astron. and Astrophys.* **222**, 58 (1989).
47. *G. Heald, R. Braun, and R. Edmonds*, *Astron. and Astrophys.* **503**, 409 (2009), arXiv:0905.3995 [astro-ph.GA].
48. *P. Frick, R. Beck, A. Shukurov, D. Sokoloff, M. Ehle, and J. Kamphuis*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **318**, 925 (2000).
49. *B. G. Elmegreen, D. M. Elmegreen, R. Chandar, B. Whitmore, and M. Regan*, *Astrophys. J.* **644**, 879 (2006), arXiv:astro-ph/0605523.
50. *A. S. Gusev*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **442**, 3711 (2014), arXiv:1406.0661 [astro-ph.GA].
51. *Yu. N. Efremov, G. R. Ivanov, and N. S. Nikolov*, *Astrophys. Space Sci.* **135**, 119 (1987).