

ИССЛЕДОВАНИЕ СПИРАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ГАЛАКТИК В КОМПАКТНЫХ ГРУППАХ И В ИЗОЛЯЦИИ

© 2024 г. М. Н. Скрябина^{1*}, А. Д. Панасюк¹, А. В. Мосенков³, П. И. Смирнова¹, А. А. Марчук^{1,2},
И. В. Чугунов^{1,2}, В. П. Решетников^{1,2}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Главная (Пулковская) Астрономическая Обсерватория, Санкт-Петербург, Россия

³Университет Бригама Янга, США

Поступила в редакцию: 17.12.2023 г.

После доработки 04.06.2024 г.; принята к публикации 06.06.2024 г.

Получены и проанализированы характеристики спиральной структуры галактик, находящихся в компактных группах (из каталогов HCG и SDSSCGA) и в изоляции (из каталога CG). Изучена зависимость типа спирального узора от пространственного окружения галактик. Сделаны выводы о том, как приливное взаимодействие влияет на спиральную структуру. Показано, что доля гранд-дизайн спиралей в компактных группах значительно выше, чем в выборке изолированных объектов. Гранд-дизайн галактики, находящиеся в поле, в среднем имеют более голубые и более узкие спиральные ветви, что, вероятно, может быть связано с отсутствием приливного взаимодействия, которое оказывает сильное влияние на структуру галактик в тесном окружении.

Ключевые слова: спиральные галактики, компактные группы, пространственное окружение.

DOI: 10.31857/S0320010824070049, **EDN:** MBXIBZ

ВВЕДЕНИЕ

Спиральная структура является отличительной особенностью спиральных галактик. Исследования спиральной структуры остаются актуальными на протяжении уже почти 200 лет с того момента, как Лорд Росс в 1846 г. впервые получил зарисовки “туманности” М 51 (галактика Водоворот), демонстрирующие крупномасштабный двухрукавный спиральный узор. Лишь спустя десятки лет выяснилось, что данная спиральная “туманность” является галактикой, сопоставимой в размерах с нашей галактикой Млечный Путь, а М 51 является не единичным случаем, а одной из огромного количества подобных объектов.

Спиральные галактики являются преобладающим типом галактик в локальной Вселенной, что подтверждается как в ранних, так и в современных исследованиях. Так, например, в работе (Конселис, 2006) получено, что доля спиральных галактик составляет около 75% от всех галактик ярче $M_B = -20$. Факт преобладания спиральных галактик обнаруживается и в каталоге Galaxy Zoo, в котором было проклассифицировано более миллиона объектов (Линтотт и др., 2011; Виллет и др., 2013). Исследование особенностей и параметров спиральных ветвей галактик помогает объяснить, как об-

разуются эти структуры, и какие механизмы играют в их образовании ключевую роль. Изучение структуры и свойств галактик с помощью компьютерного моделирования дает возможность корректировать и совершенствовать модели формирования и эволюции галактик, а именно, уточнять “рецепты”, используемые для построения этих моделей (Юан, Гросбол, 1981; Сало, Лаурикаинен, 2000; Форган и др., 2018).

Объекты, объединяемые в тип спиральных галактик, имеют морфологические подтипы согласно классификации, предложенной Эдвином Хабблом в 1926 г. (Хаббл, 1926). Однако классификация Хаббла не описывает всё разнообразие спирального узора в галактиках. Здесь можно упомянуть еще одну, более детальную классификацию спиральной структуры, представленную в работе (Элмегрин, Элмегрин, 1987), которая характеризует вид самих спиралей. В настоящей работе мы будем пользоваться именно этой классификацией для описания характеристик спирального узора. (Элмегрин, 1990) выделяют следующие основные типы спирального узора: галактики с упорядоченной спиральной структурой или гранд-дизайн (grand design) — галактики с двумя ярко выраженными спиральными рукавами, например, М 81; флоккулентные спирали (floculent) — галактики с большим количеством коротких спи-

*Электронный адрес: skryabina.mary98@gmail.com

ралей, например, M 63; а также промежуточный класс многорукавных спиральных галактик (multi-armed), например, M 33.

Несмотря на существующие споры относительно физических механизмов, участвующих в процессе формирования различных типов спиральных рукавов, выделяют несколько основных. Каждый из этих механизмов имеет хорошее наблюдательное и теоретическое обоснование, по крайней мере для некоторых галактик. Первый из таких механизмов — квазистационарная теория волн плотности (Density Wave Theory, (Лин, Шу, 1964); (Робертс и др., 1975)), основанная на возникновении механических колебаний в диске, которые порождают волны плотности и способствуют концентрации звезд в некоторых участках. Волна плотности оказывает влияние не только на звезды, но и на газ, приводя к активному звездообразованию в областях повышенной плотности. Таким образом, в галактике возникает упорядоченная спиральная структура. Данная теория позволяет объяснить многие характеристики спиральных рукавов (Швейцер, 1976; Юан, Гросбол, 1981; Чемин и др., 2005; Саха, Элмегрин, 2016).

Еще один возможный механизм образования спиральных рукавов — теория свингового усиления (Джулиан, Тумре, 1966). В рамках данной теории предполагается, что спиральные рукава представляют собой временные, но повторяющиеся структуры, возникающие вследствие локальных неустойчивостей и возмущений. В отличие от спиралей в модели квазистационарных волн плотности, спирали, возникшие в процессе свингового усиления, не являются стационарными, они постоянно появляются и исчезают (Селвуд, Карлберг, 1984; Баба и др., 2009). Спиральные рукава типа гранд-дизайн и симметричные внутренние части многорукавных галактик интерпретируются как долгоживущие спиральные волны плотности, тогда как флоккулентные галактики и внешние части многорукавных галактик связывают со случайными локальными гравитационными неустойчивостями в диске (Элмегрин и др., 2011).

Образование спиралей у галактик с баром объясняется теорией многообразий (Manifold theory, (Кайманн, Контопулос, 1996)). В рамках данной теории спиральная структура является результатом того, что звезды, образующиеся вблизи концов галактического бара, движутся по хаотичным, сильно эксцентричным орбитам, которые образуют многообразие в фазовом пространстве. Согласно этой теории, гравитационное воздействие бара заставляет звезды в диске располагаться в определенном порядке, образуя спиральные рукава, по которым они движутся.

Также с помощью моделирования было показано, что двухрукавная структура может образовываться в процессе приливных взаимодействий галактики с ее окружением (Корменди, Норман, 1979).

Исследование зависимости свойств спирального узора от пространственного окружения было выполнено ранее, в частности, в работе (Савченко и др., 2020) для 155 спиральных галактик. Они не обнаружили существенных отличий в углах закрутки, полуширинах спиралей и других параметрах, измеренных для галактик поля и галактик в группах и скоплениях. (Смит и др., 2022) также проанализировали зависимость характеристик спиральной структуры от пространственного окружения (у галактик поля и в скоплениях), но для существенно большей выборки, состоящей из более чем 4000 близких дисковых галактик. Авторы пришли к выводу, что галактики в скоплениях имеют более слабые спирали, больший процент двухрукавных спиралей и меньшее среднее значение угла закрутки, чем у галактик поля. Этот вывод указывает на то, что тип наблюдаемого узора, а также параметры спиральных ветвей связаны с окружением, в котором находится спиральная галактика.

Цель данного исследования состоит в изучении влияния пространственного окружения на структуру спирального узора галактик с помощью более аккуратного метода анализа спиральной структуры. В работе (Смит и др., 2022) авторы выполнили анализ параметров спиральных галактик, используя результаты Фурье анализа SDSS изображений из работы (Ю, Хо, 2020), где были измерены угол закрутки, центральная концентрация, f_3 (доля вклада третьей компоненты ряда Фурье в подсумму первых четырех Фурье амплитуд) и др. В данной работе с помощью современного глубокого обзора неба DESI Legacy Imaging Surveys (Дей и др., 2019) выполнен анализ спиралей галактик в двух экстремальных случаях пространственного окружения: для изолированных галактик и галактик в компактных группах (CG). С помощью оригинального метода фитинга спиральной структуры из работы (Савченко и др., 2020) мы получили расширенный список параметров спиральной структуры галактик, таких как угол закрутки, ширина спиральных рукавов, протяженность спиральной структуры, показатель цвета спиралей, а также вариацию этих параметров для всей совокупности рукавов галактики. Кроме того, метод позволяет определить изменение угла закрутки и ширины спирали вдоль рукава, тогда как Фурье анализ дает постоянный угол закрутки вдоль рукава и не подразумевает определения его ширины.

ВЫБОРКА И АНАЛИЗ

Для этого исследования нами были отобраны галактики, находящиеся в компактных группах из каталогов HCG (Хиксон, 1982) и SDSSCGA (Сон и др., 2015), а также изолированные галактики из каталога CG (Аргудо-Фернандес и др., 2015). В финальную выборку были отобраны лишь те галактики, размер и угол наклона диска которых позволяют визуально определить тип спирального узора. Таких галактик в нашей выборке 104 из каталога HCG, 210 из каталога SDSSCGA и 329 из каталога CG. Дополнительным важным критерием отбора галактик из каталогов CG является подтвержденная принадлежность к группе, которая определяется по значениям красных смещений галактики, её соседей и всей группы в целом. Данные по красным смещениям индивидуальных галактик собраны из базы данных SDSS DR16 (Ахумада и др., 2020) и HyperLeda (Макаров и др., 2014). В финальную выборку галактик из CG попали те объекты, спроецированные расстояния у которых лежат в пределах 1 Мпк от центра группы.

Далее каждый из отобранных объектов был проклассифицирован в зависимости от типа спирального узора. В работе выделены следующие основные типы: гранд-дизайн (G), многорукавная (M) и флоккулентная структуры (F) (Элмегрин, Элмегрин, 1987). Также в нашей классификации присутствуют дополнительные типы галактик: I — галактики с нерегулярной спиральной структурой, R — галактики с кольцом (преимущественно внешним). Классификация производилась тремя наблюдателями. Галактике присваивался один из перечисленных типов только в случае, когда два наблюдателя из трех определяли его одинаково. Для галактик, у которых тип был определен неоднозначно, мы ввели дополнительные категории: G/M, M/F, G/F. Это позволило провести сравнительный анализ данных параметров у галактик, находящихся в изоляции и в составе компактных групп. С результатами классификации и распределением галактик по классам можно ознакомиться в разделе с результатами.

Из описанной выше выборки была также отобрана “золотая” подвыборка галактик с хотя бы одной ярко выраженной спиралью. В нее вошли 63 изолированные галактики и 36 галактик в компактных группах. Для данной подвыборки была выполнена обработка изображений и фитинг спиральных ветвей — подробнее об этом в разделе с анализом спиралей.

ДАННЫЕ И ИХ ОБРАБОТКА

В качестве источника глубокой фотометрии для исследования спиральной структуры отобранных

галактик использовался обзор DESI Legacy Imaging Surveys (Дей и др., 2019). DESI Legacy Imaging Surveys — это комплекс из трех проектов: Dark Energy Camera Legacy Survey (DECaLS), Beijing-Arizona Sky Survey (BASS) и Mayall z-band Legacy Survey (MzLS). Они были созданы для исследования внегалактических источников в северном и южном полушариях неба с площадью охвата порядка 14 000 кв. град. Наблюдения проводятся на телескопах Kitt Peak National Observatory и Cerro Tololo Inter-American Observatory в трех оптических фильтрах *grz*. Проект DECaLS обеспечивает предельное обнаружение 5σ на уровне 23.72, 23.27 и 22.22 звездных величин в *g*, *r* и *z* диапазонах соответственно, для BASS/MzLS — 23.48, 22.87 и 22.29 величин. Качество изображения, основываясь на значениях FWHM для функции рассеяния точки (PSF), полученного в рамках DESI Legacy Imaging Surveys, составляет примерно 1,3'', 1,2'' и 1,1'' в *g*, *r* и *z* полосах соответственно (Дей и др., 2019).

Для определения параметров спирального узора использовались изображения в фильтрах *g* (фотометрическая глубина 29.0 ± 0.22 зв. вел./кв. сек) и *r* (фотометрическая глубина 28.38 ± 0.25 зв. вел./кв. сек). По данным в фильтре *r* были определены параметры ориентации галактик: позиционный угол *P.A.* и наклон плоскости галактики к лучу зрения *i*. Данная процедура осуществлялась посредством двух независимых методов. Первым являлся метод изофот, описанный в работе (Еджейевский, 1987). Разница между изофотой и азимутально усредненным профилем на расстоянии *R* от центра галактики представляется в виде разложения в ряд Фурье:

$$I(R, \varphi) = I_{\text{azim}}(R) + \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos(n\varphi) + B_n \sin(n\varphi).$$

На основе полученных коэффициентов A_n и B_n итеративно находятся искомые параметры ориентации галактики *P.A.* и *i*. В качестве итоговой ориентации галактики используются значения параметров для изофоты 25 зв. вел./кв. сек. Для улучшения качества работы алгоритма производится маскирование внешних источников и ярких спиральных рукавов. Для реализации данного метода использовался программный пакет IMAN¹. Второй метод — это метод монотонности спиральных рукавов (Полторах, Фридман, 2007). Идея метода строится на предположении о том, что радиус спирали монотонно увеличивается при движении вдоль рукава от центра галактики к её периферии. Одна-

¹https://bitbucket.org/mosenkov/iman_new/src/master/

ко при проекции плоскости галактики на фокальную плоскость данная монотонность может нарушаться. Задача метода состоит в поиске допустимых значений i и $P.A.$, позволяющих путем депроекции изображения получить монотонные зависимости для радиуса вдоль рукава. В качестве реализации данного метода использовалась программа MSA, описанная в работе (Савченко, 2012). Этот метод лишен многих недостатков метода изофот, однако при малых истинных значениях угла i сильно возрастает область возможных значений позиционного угла и наклона плоскости галактики.

После получения параметров ориентации выполнялись депроекция галактик путем поворота изображения на угол $-P.A.$ и растяжение на коэффициент $q = \cos(i)^{-1}$ вдоль малой оси галактики. По получаемым изображениям отбирались параметры ориентации, полученные методом, обеспечивающим визуально более круглое изображения для диска.

Для депроецированных изображений было выполнено суммирование по двум фильтрам g и r . Это позволяет лучше проследить ход спиральных ветвей и учесть тот факт, что галактики разных типов имеют разные цвета спиральных рукавов. На полученных изображениях для минимизации вклада стороннего излучения созданы маски с использованием Python библиотеки photutils².

АНАЛИЗ СПИРАЛЕЙ

Для анализа параметров спиральных рукавов использовалась “золотая” подвыборка галактик с хотя бы одной ярко выраженной спиралью. Для нашего анализа спиральная ветвь должна легко выделяться из спирального узора и не иметь ветвлений и пересечений. В анализируемую подвыборку вошли 99 галактик, а именно, 15 объектов из HCG, 63 объекта из CG и 21 галактика из SDSSCGA. Для каждого объекта выборки определялся радиус изофоты 25 зв. вел./кв. сек. (оптический радиус R_{25}). Данная процедура была выполнена по азимутально усредненному профилю депроецированного изображения в фильтре r . Распределение галактик выборки по R_{25} представлено на рис. 1а. Как видно из графика, большинство галактик выборки имеют оптический радиус менее 0.8 угл. мин, среднее значение $\langle R_{25} \rangle = 0.52^{0.3}_{-0.19}$ угл. мин. Также для каждой галактики были посчитаны значения абсолютных звездных величин (рис. 1б) с учетом галактического поглощения и К-поправки (Чилингарян и др., 2010). Среднее значение $-21.56^{0.42}_{-0.47}$ зв. величины.

Для отобранных объектов был выполнен фитинг спиралей на сложенных gr изображениях DESI Legacy. Процедура декомпозиции описана подробно в статье (Савченко и др., 2020) и кратко приведена ниже.

Для каждого объекта выборки в первую очередь была проведена разметка спиралей при помощи регионов-окружностей в SAOImageDS9 (Джой, Мэндел, 2003). Разметка спирали проводилась от бара или центра галактики к периферийной области галактики, в которой еще возможно отследить спиральные ветви. Далее при помощи специального алгоритма выполнялось построение срезов перпендикулярно направлению закрутки спирали в каждой точке центральной линии изнутри наружу вплоть до слабой периферии галактики. Значения интенсивностей усреднялись по срезу и аппроксимировались асимметричной гауссианой, представленной в виде

$$I(r) = I_0 \times \exp \left[-\frac{(r - r_{peak})^2}{\omega_1^2 s + \omega_2^2 (1 - s)} \right],$$

где ω_1 , ω_2 — внутренние и внешняя полуширины спирального рукава, I_0 — значение интенсивности в центре, r — расстояние между крайними точками вдоль среза, r_{peak} соответствует положению точки с наибольшим значением яркости, s — бинарный параметр, который равен 0, когда $r < r_{peak}$, иначе равен 1 (Савченко и др., 2020). Также произведена свертка с профилем PSF для учета влияния оптической системы и атмосферы на анализируемый профиль. Таким образом, получив параметры на каждом участке спирали, была построена модель (маска) всего спирального рукава.

Процедура фитинга спиральных рукавов выполнена для всех 99 галактик, включая изолированные галактики и объекты из компактных групп. Для 4 из 99 галактик моделирование спирального узора выполнено лишь для одной ветви, тогда как для остальных 95 галактик фитинг выполнен для 2–5 спиральных ветвей. В результате фитинга получены параметры спирального узора (табл. ??), анализ которых подробно описан в следующем разделе статьи. Примеры масок спиралей для полученных моделей представлены на рис. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Распределение по типам и количеству спиральных рукавов

Тип спирального узора и количество спиральных ветвей галактики предположительно связаны с различными механизмами формирования спиральной структуры. Например, во многих моделях,

²<https://photutils.readthedocs.io/en/stable/>

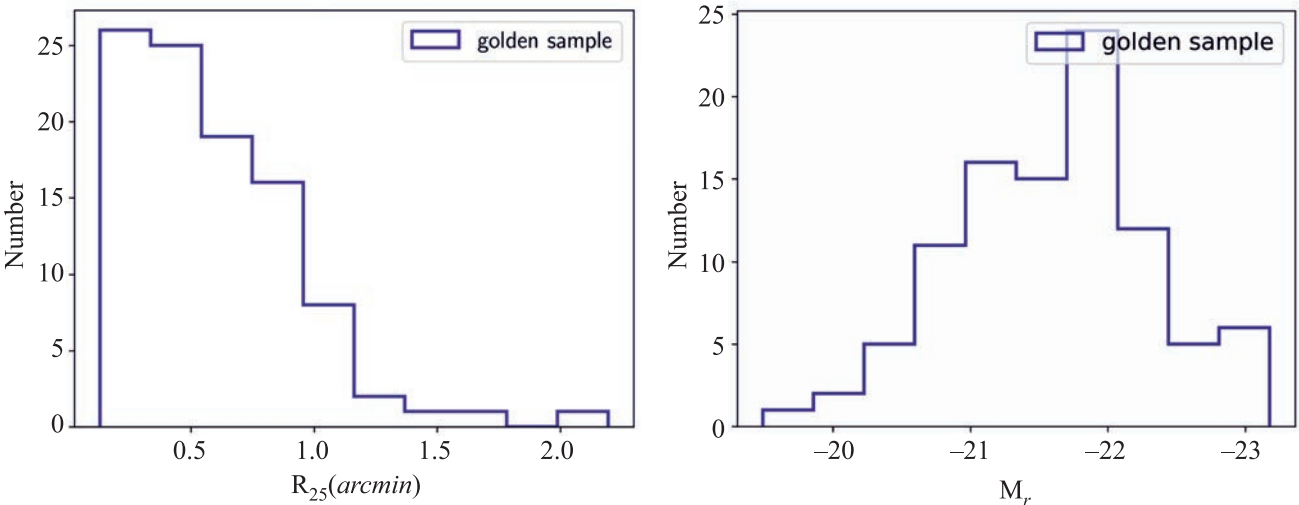


Рис. 1. Распределения галактик “золотой” выборки по оптическому радиусу (а) и по значениям абсолютной звездной величины с учетом Галактического поглощения и К-поправки (б).

Таблица 1. Структурные параметры профилей дисков галактик, определенных для выборки объектов из каталогов CIG, HCG и SSDSSCGA по суммарным *gr* DESI Legacy изображениям

Название	Описание
Name	Название галактики
$\langle \omega \rangle$	Усредненное значение ширины спиральных рукавов в DESI <i>gr</i> суммарном изображении, в кпк
R_{25}	Значение оптического радиуса, в кпк
$\frac{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}}{2\pi}$	Разность максимального и минимального значения азимутального угла для всех спиралей
$\langle \psi \rangle$	Среднее значение угла закрутки: угол между касательной спирали и азимутальными направлениями, в градусах
$R_{\max}$	Максимальная протяженность спиральной структуры, в кпк
A	Асимметрия спиральных рукавов: $\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_2}$
a	Тангенс угла наклона графика зависимости ширины спиральных ветвей от галактоцентрического радиуса (скорость изменения ширины спиральных рукавов)

рассматривающих гравитационную неустойчивость как механизм формирования спиралей, можно наблюдать многорукавные спиральные структуры, количество спиральных рукавов которых зависит от распределения массы в галактике (Донгия, 2015; Мичикоши, Кокубо, 2016). Как правило, в подобных исследованиях не удается воспроизвести двухрукавную спиральную структуру, что может означать необходимость привлечения другого механизма образования спиралей данного типа. В некоторых работах было показано, что двухрукавные галактики могут образовываться в процессе приливного взаимодействия (Ох и др., 2008; Страк и др., 2011), тем самым увеличивая до-

лю данного типа спиралей в группах по сравнению с изолированными галактиками.

В случае распределения по классам, в работе (Элмегрин, Элмегрин, 1982) было продемонстрировано, что доли гранд-дизайн галактик в скоплениях и в поле примерно одинаковы. Однако в работе (Савченко и др., 2020) для выборки из ~ 150 спиральных галактик получено, что доля гранд-дизайн спиралей в изоляции немного меньше, чем в неизолированном окружении, и составляет 15% и 25% соответственно. К тем же результатам пришли (Диаз-Гарсиа и др., 2019), используя выборку из ~ 400 спиральных галактик. (Харт и др., 2016) также пришли к схожему выводу, что доля гранд-

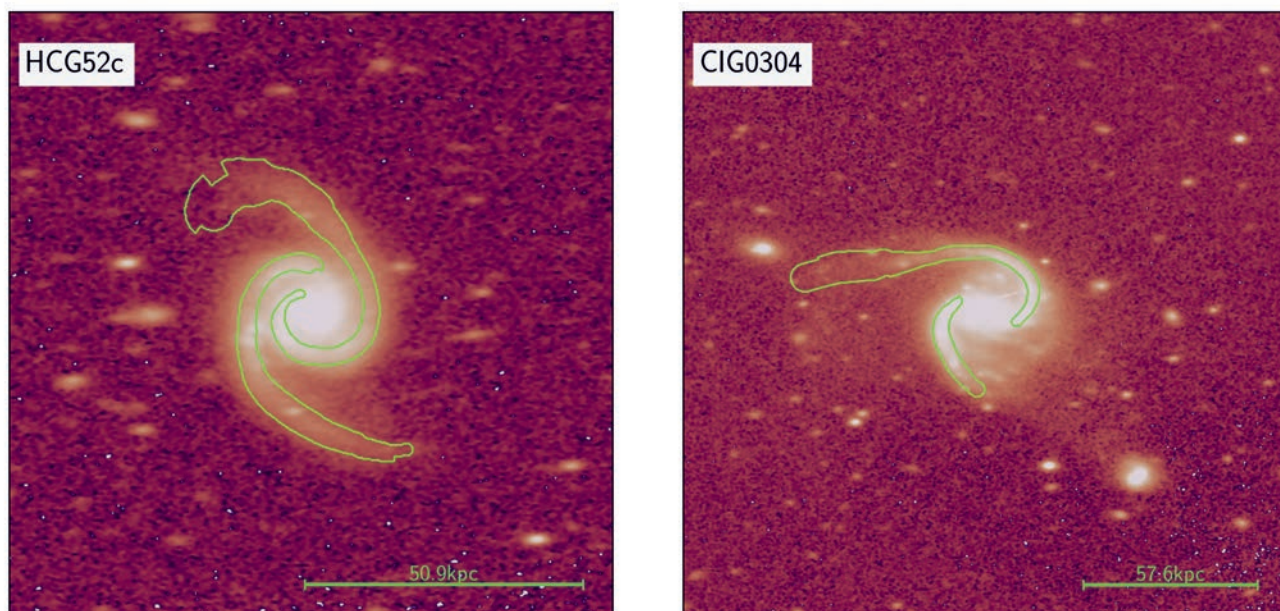


Рис. 2. Примеры масок спиралей, полученных в процессе фитинга спиральных ветвей.

дизайн галактик больше в областях повышенной плотности.

Исследуем этот вопрос для нашей первоначальной выборки из 643 галактик, включающей галактики в компактных группах (тесном окружении) и в изоляции. Сначала рассмотрим распределения объектов по типу спирального узора и количеству спиральных рукавов. На рис. 3 показано, что среди изолированных галактик большую долю всех объектов составляют многорукавные галактики и галактики со структурой гранд-дизайн. Их частота встречаемости составляет 27% и 36% соответственно. В случае же объектов, расположенных в компактных группах, доля многорукавных галактик очень мала и не превышает 9%. Галактики с гранд-дизайн структурой являются преобладающими в данной подвыборке, их доля составляет 73%. Таким образом, доля гранд-дизайн галактик является существенной в обеих подвыборках, несмотря на то, что в компактных группах их частота встречаемости выше. Сравнивая долю флоккулентных галактик, мы получили следующие результаты: 15% среди изолированных галактик и лишь 2% среди галактик в компактных группах. Данный факт может быть объяснен отличиями в доминирующих механизмах образования спиралей в разных пространственных окружениях. В частности, большую роль в образовании гранд-дизайн спиралей должны играть приливные взаимодействия галактик.

Также нами проанализировано распределение галактик выборки по количеству спиральных ру-

кавов. Результаты распределения представлены на рис. 4.

Среди галактик в компактных группах доля двухрукавных галактик составляет 64%, в выборке же изолированных галактик это значение равно 48%. Если рассматривать галактики с $N_{arms} \geq 3$, частота их встречаемости в изоляции и в компактных группах составляет 30% и 7% соответственно. На графиках также присутствуют галактики, у которых спирали сложно различимы, но они присутствуют. В компактных группах и в поле доля таких галактик составляет 28% и 21% соответственно. Можно сделать предположение, что доля галактик с очень слабыми спиральными рукавами больше в компактных группах по причине существенных отличий в угловых размерах изолированных объектов в сравнении с галактиками в компактных группах (средние значения R_{25} составляют $0.32^{+0.34}_{-0.12}$ угл. мин и $0.57^{+0.31}_{-0.14}$ угл. мин соответственно). Это обстоятельство могло оказать влияние на точность определения количества спиральных ветвей. Данный факт отображен на рис. 6.

Влияние пространственного окружения на характеристики спирального узора в гранд-дизайн галактиках

Во введении были рассмотрены различные механизмы образования спирального узора галактик. Каждый из описанных механизмов имеет хорошее обоснование в литературе и может приводить к формированию определенных типов спиралей. Вполне вероятно, что механизмы возникновения

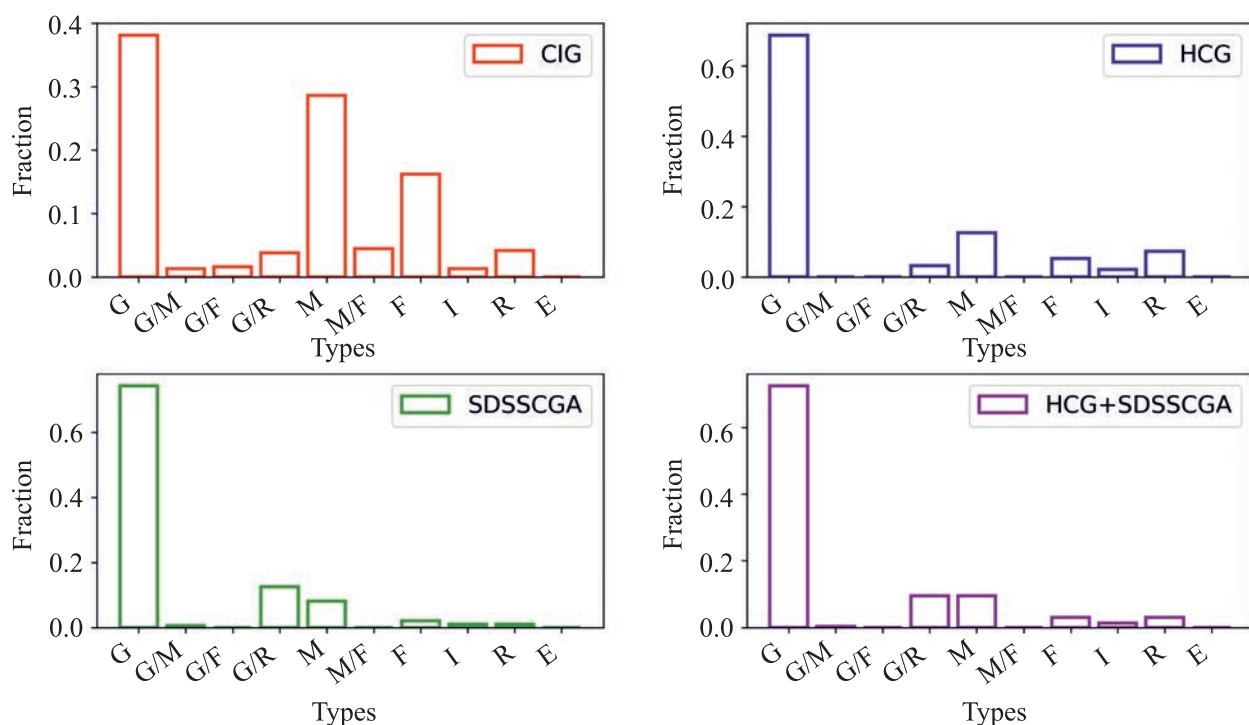


Рис. 3. Распределения по типам спирального узора для изолированных галактик выборки из каталога CIG и галактик в компактных группах из каталогов SDSSCGA и HCG. Здесь G — доля галактик с типом спиралей гранд-дизайн, M — много-рукавные галактики, I — галактики с нерегулярной спиральной структурой, F — флоккулентные галактики, R — галактики с кольцом, E — галактики, наблюдаемые в положении с ребра (или близком к нему).

спиральных ветвей могут отличаться от галактики к галактике. Более того, некоторые спирали могут формироваться благодаря совокупности различных механизмов. В процессе изучения гранд-дизайн спиралей в компактных группах и в изоляции имеется возможность проанализировать, каким образом именно приливные взаимодействия влияют на характеристики данного типа узора.

На рис. 5 представлены распределения по параметрам спирального узора для двух подвыборок гранд-дизайн галактик: в изолированном и неизолированном окружении. Следует заметить, что гранд-дизайн спирали в группах, как правило, имеют немного меньшие средние значения азимутальных углов по сравнению с изолированными объектами, и эти значения в среднем отличаются на 12%. В свою очередь, ширины спиральных рукавов и углы закрутки спиралей у галактик в компактных группах больше, чем у изолированных объектов на 13% и 20% соответственно. Меньшие средние значения ширин спиральных рукавов у изолированных галактик можно объяснить тем, что их спирали не испытывают “растяжения” вследствие приливных взаимодействий (Смит и др., 2022). Также можно заметить, что галактики в компактных группах в среднем имеют более красные спирали и, со-

ответственно, менее активное звездообразование, что отмечалось и в других работах (Кауфманн и др., 2004; Ветцель и др., 2012; Смит и др., 2022). Данный эффект можно объяснить, например, тем, что разогрев диска галактики гравитационным полем группы или скопления может уменьшить гравитационную неустойчивость в диске и, следовательно, подавить звездообразование (Гнедин, 2003).

Рассмотрим спирали с точки зрения симметричности. В рамках данной работы степень симметричности спиралей выражается через внутреннюю и внешнюю полуширины спиральных рукавов:

$$A = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_2}.$$

Положительные значения A (усредненные по всем срезам) означают, что часть гауссианы, соответствующая внутренней стороне рукава имеет более крутой наклон, чем та, что соответствует внешней стороне. По результатам анализа (рис. 5) можно сделать вывод, что спиральные ветви галактик как в компактных группах, так и в изоляции практически симметричны. Статистически значимые отличия в скорости изменения ширины спиральных рукавов от центра к периферии, а также в протя-

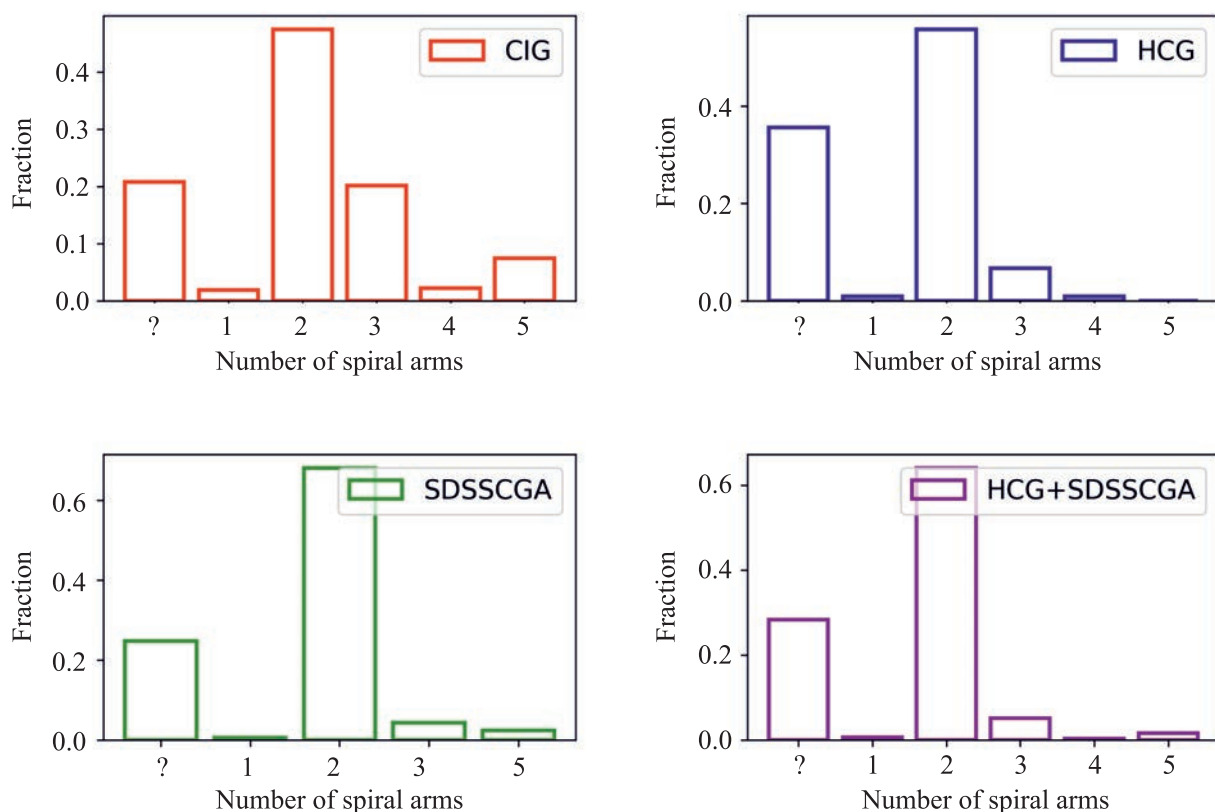


Рис. 4. Распределения по количеству спиральных рукавов для изолированных галактик выборки из каталога CIG и галактик в компактных группах из каталогов SDSSCGA и HCG. По горизонтальной оси отложено количество спиральных рукавов в галактике.

женности спиральных ветвей для двух исследуемых подвыборок в данной работе не обнаружены.

Рассмотрим также результаты фитинга параметров спиральных ветвей для всех типов галактик выборки в зависимости от окружения. Проведя анализ распределения параметров спиралей для галактик в группах и объектов поля, можно сделать выводы, схожие с полученными ранее для гранд-дизайн галактик (рис. 6): в данном анализе также присутствует тренд в пользу больших (на 15%) значений углов закрутки, больших ширин спиральных ветвей (на 14%), меньших значений азимутальных углов (на 11%) для галактик в компактных группах по сравнению с галактиками поля. В целом у галактик в компактных группах также наблюдаются более красные и симметричные спиральные ветви (отличие в показателе цвета $g-r$ на 20%). Статистических отличий в уширении спиральных ветвей на периферии по сравнению с внутренними частями спиралей не обнаружено, как и в случае с протяженностью спиральных рукавов. Статистика по всем параметрам для гранд-дизайн галактик, а так-

же суммарно для всех типов галактик приведена в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были изучены особенности спиральной структуры галактик в зависимости от пространственного окружения. Проведены исследование и анализ параметров спиральных ветвей галактик для двух экстремальных случаев: изолированных галактик (из каталога CIG) и галактик в компактных группах (каталоги HCG и SDSSGA). Для этого была выполнена классификация спиралей по типам, а также выполнен количественный анализ спиральной структуры, включая фитинг отдельных спиралей с помощью срезов, построенных перпендикулярно направлению закрутки спирали в каждой точке центральной линии изнутри наружу вплоть до слабой периферии галактики. Общее количество галактик, для которых проводился фитинг спиралей, равно 99, общее количество фитируемых спиралей равно 250. По результатам анализа можно сделать следующие выводы об особенно-

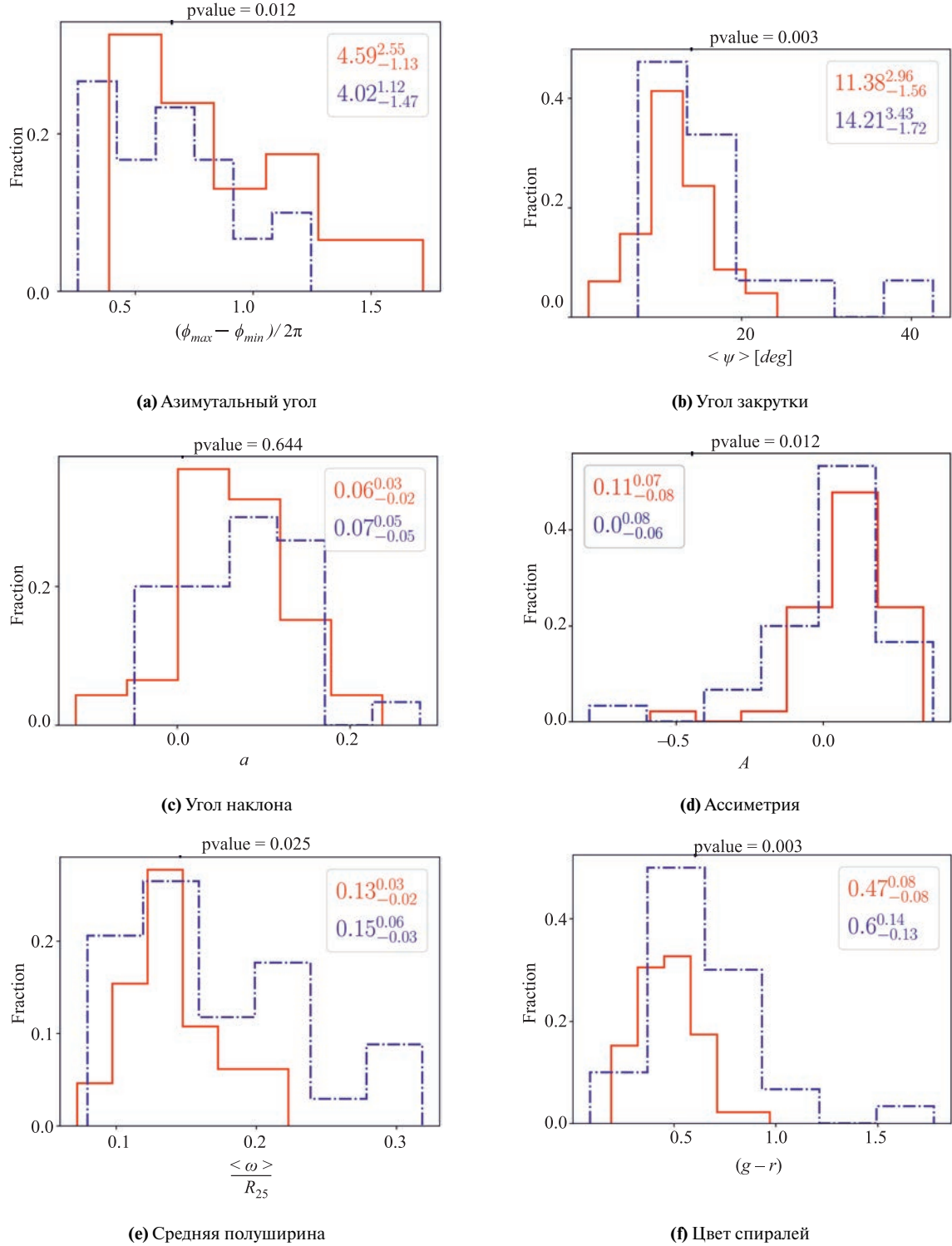


Рис. 5. Распределения по параметрам спиральных рукавов для галактик со структурой типа гранд-дизайн, находящихся в группах (синий цвет) и изоляции (красный цвет): (a) — разность максимального и минимального значений азимутального угла для всех измеренных спиральных ветвей галактики; (b) — среднее значение угла закрутки для всех измеренных спиральных ветвей галактики; (c) — тангенс угла наклона графика зависимости ширины спиральных ветвей от галактоцентрического радиуса; (d) — асимметрия спиральных ветвей; (e) — среднее значение ширины спиральных ветвей; (f) — показатель цвета спиралей $(g - r)$; (g) — оптический радиус диска галактик; (h) — протяженность спиральных ветвей. P value для всех выборок посчитано на базе U критерия Манна–Уитни.

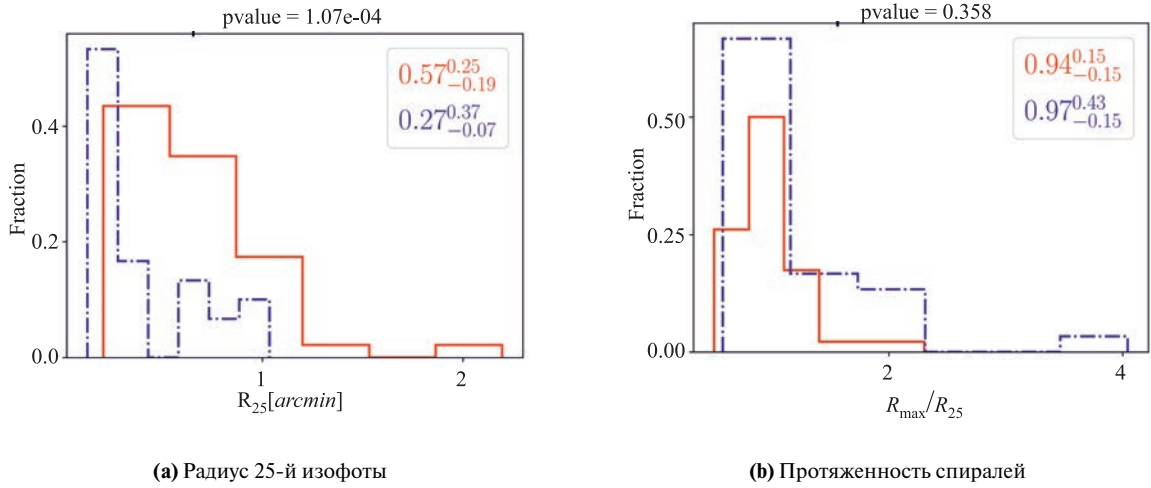


Рис. 5. Продолжение.

Таблица 2. Параметры спиральных ветвей, полученные в результате фитинга спиралей для подгрупп: гранд-дизайн галактики в компактных группах, изолированные гранд-дизайн галактики, все галактики выборки из компактных групп, все изолированные галактики выборки

Параметр	Гранд-дизайн (группы)	Гранд-дизайн (изол.)	Все типы (группы)	Все типы (изол.)
R_{25}	$0.27^{+0.37}_{-0.07}$	$0.57^{+0.25}_{-0.19}$	$0.32^{+0.34}_{-0.12}$	$0.57^{+0.31}_{-0.14}$
$\langle \psi \rangle$	$14.21^{+3.43}_{-1.72}$	$11.38^{+2.96}_{-1.56}$	$14.58^{+3.06}_{-1.99}$	$12.43^{+3.16}_{-2.15}$
$\langle \omega \rangle$	$0.15^{+0.06}_{-0.03}$	$0.13^{+0.03}_{-0.02}$	$0.15^{+0.07}_{-0.03}$	$0.13^{+0.03}_{-0.02}$
a	$0.07^{+0.05}_{-0.05}$	$0.06^{+0.03}_{-0.02}$	$0.07^{+0.05}_{-0.04}$	$0.05^{+0.04}_{-0.02}$
A	$0.0^{+0.08}_{-0.06}$	$0.11^{+0.07}_{-0.08}$	$0.01^{+0.07}_{-0.06}$	$0.11^{+0.07}_{-0.1}$
$\frac{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}}{2\pi}$	$4.02^{+1.12}_{-1.47}$	$4.59^{+2.55}_{-1.13}$	$4.11^{+1.45}_{-1.41}$	$4.57^{+1.93}_{-1.11}$
$\frac{R_{\max}}{R_{25}}$	$0.97^{+0.43}_{-0.15}$	$0.94^{+0.15}_{-0.15}$	$0.99^{+0.41}_{-0.17}$	$0.95^{+0.17}_{-0.13}$
$(g - r)$	$0.6^{+0.14}_{-0.13}$	$0.47^{+0.08}_{-0.08}$	$0.59^{+0.15}_{-0.12}$	$0.47^{+0.09}_{-0.13}$

стях структуры гранд-дизайн спиралей и влиянии приливных взаимодействий на их встречаемость:

(i) Структура типа гранд-дизайн преобладает как в изолированных спиральных галактиках, так и в выборке галактик в компактных группах. Однако доля спиралей данного типа в компактных группах существенно выше, чем у изолированных галактик, и составляет 73% против 36%. Вероятно, несколько различных механизмов, включая механизм приливного взаимодействия, могут формировать данный тип спиральной структуры. В случае же объектов с многорукавной структурой, в компактных группах их доля сильно меньше, чем среди объектов поля (9% против 27% выборки). Флоккулетные галактики практически не наблюдаются среди членов компактных групп, их доля со-

ставляет 2% (против 15% в случае изолированных галактик).

(ii) Аналогичные выводы можно сделать для количества спиральных рукавов. Двухрукавные галактики вносят существенный вклад в долю всех объектов обеих выборок, но в компактных группах их встречаемость больше (64% против 48%). При этом в компактных группах и в изоляции одновременно с тем преобладают галактики с очень слабыми еле различимыми спиральными ветвями, что может быть следствием отличий в размерах галактик подвыборок.

(iii) Гранд-дизайн галактики в компактных группах в среднем имеют более широкие спиральные рукава, большие углы закрутки и более красные спирали. Эти особенности, вероятно, также могут быть объяснены приливными

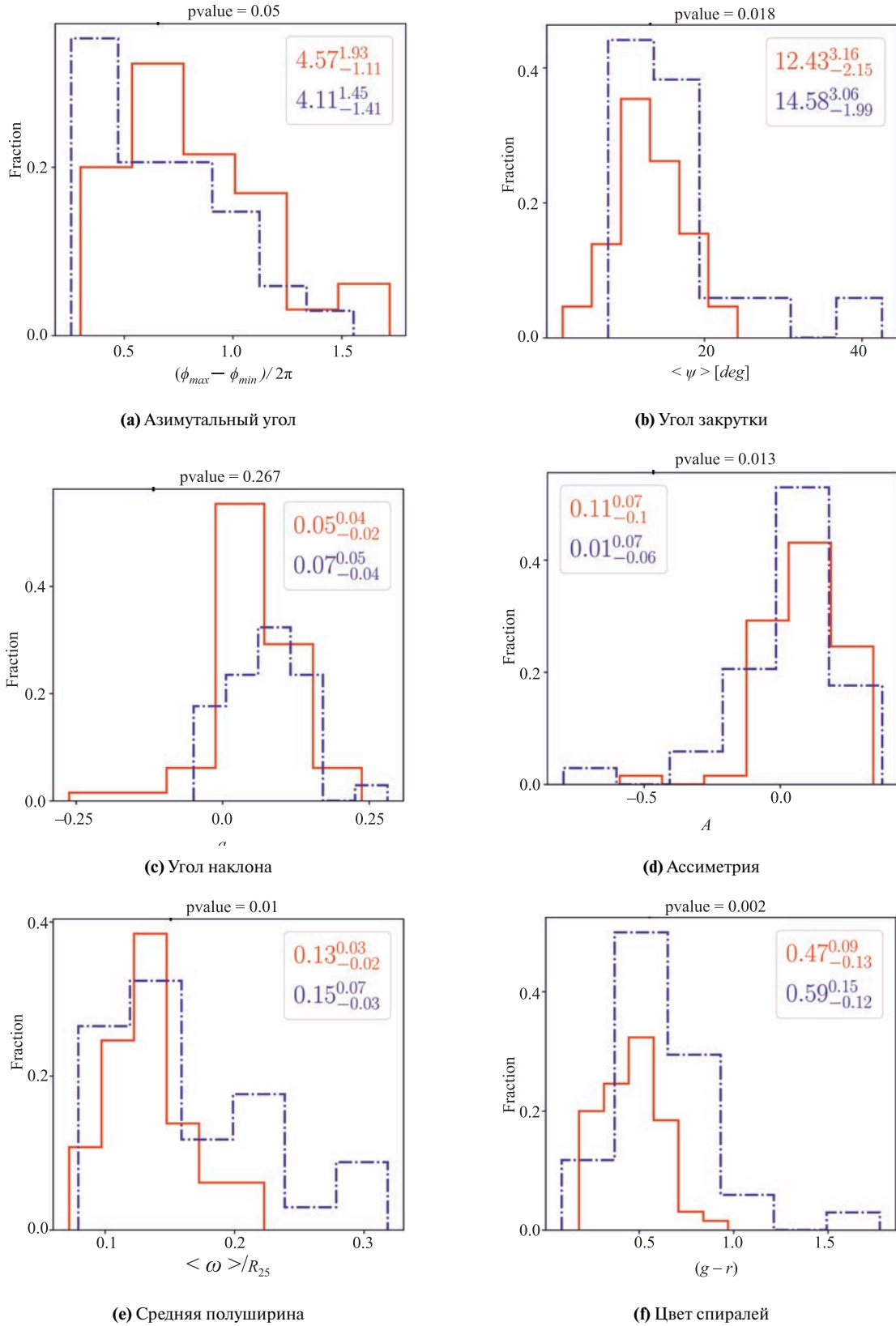


Рис. 6. Распределения по параметрам спиральных рукавов для изолированных галактик (красный цвет) и галактик в компактных группах (синий цвет): аналогично рис. 5

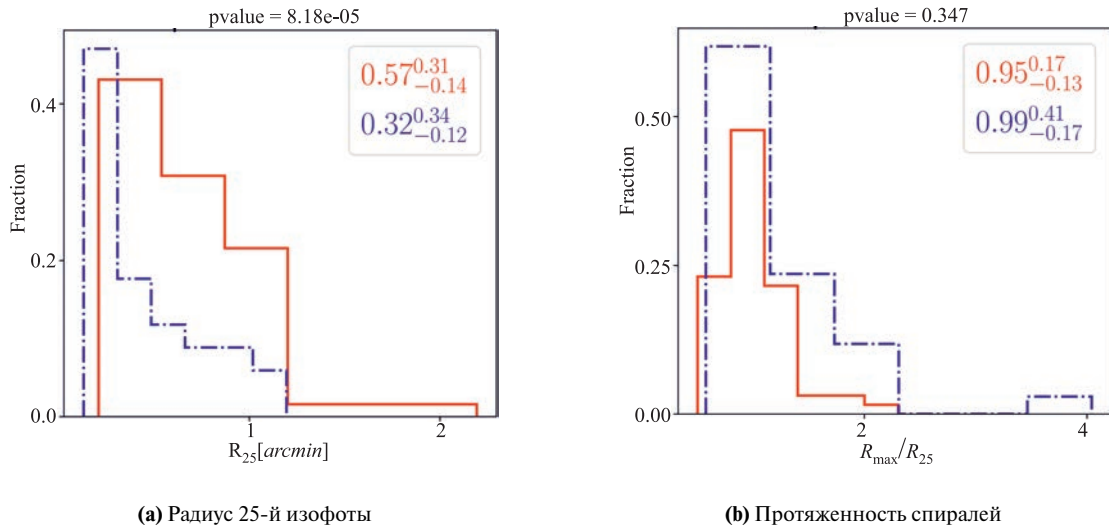


Рис. 6. Продолжение.

взаимодействиями с галактиками в группе, что способствуют растягиванию спиральных рукавов и менее активному процессу звездообразования.

Таким образом, только приливное взаимодействие не может объяснить образование всех гранд-дизайн спиралей в местной Вселенной (Кендалл и др., 2011). Тем не менее приливные эффекты могут являться важным дополнительным механизмом, усиливающим встречаемость гранд-дизайн галактик (Сейгар, Джеймс, 1998), что также подтверждается в данной работе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (грант 22–22–00483).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аргудо-Фернандес и др. (M. Argudo-Fernández, S. Verley, G. Bergond, et al.), *Astron. Astrophys.* **578**, A110 (2015).
- Ахумада и др. (R. Ahumada, C.A. Prieto, A. Almeida, et al.), <http://arxiv.org/abs/1912.02905>.
- Баба и др. (J. Baba, Y. Asaki, J. Makino, et al.), *Astrophys. J.* **706**, 471 (2009).
- Ветцель и др. (A.R. Wetzel, J.L. Tinker, and C. Conroy), *MNRAS* **424**, 232 (2012).
- Виллет и др. (K.W. Willett, C.J. Lintott, S.P. Bamford, et al.), *MNRAS* **435**, 2835 (2013).
- Гнедин (O.Y. Gnedin), *Astrophys. J.* **582**, 141 (2003).
- Дей и др. (A. Dey, D.J. Schlegel, D. Lang, et al.), *Astron. J.* **157**, 168 (2019).
- Джой, Мэндел (W.A. Joye and E. Mandel), *Astron. Data Analys. Software Systems XII ASP Conf. Ser.* **295**, 489 (2003).
- Джулиан, Тумре (W.H. Julian and A. Toomre), *Astrophys. J.* **146**, 810 (1966).
- Диаз-Гарсиа и др. (S. Díaz-García, H. Salo, J.H. Knapen, and M. Herrera-Endoqui), *Astron. Astrophys.* **631**, A94 (2019).
- Донгия (E. D’Onghia), *Astrophys. J. Lett.* **808**, L8 (2019).
- Еджейевский (R. I. Jedrzejewski), *MNRAS* **226**, 747 (1987).
- Кайманн, Контопулос (D.E. Kauffmann and G. Contopoulos), *Astron. Astrophys.* **309**, 381 (1996).
- Кауфманн и др. (G. Kauffmann, S.D.M. White, T.M. Heckman, et al.), *MNRAS* **353**, 713 (2004).
- Кендалл и др. (S. Kendall, R.C. Kennicutt, and C. Clarke), *MNRAS* **414**, 538 (2011).
- Конселис (C.J. Conselice), *MNRAS* **373**, 1389 (2006).
- Корменди, Норман (J. Kormendy and C.A. Norman), *Astrophys. J.* **233**, 539 (1979).
- Лин, Шу (C.C. Lin and F.H. Shu), *Astrophys. J.* **140**, 646 (1964).
- Линтотт и др. (C. Lintott, K. Schawinski, S. Bamford, et al.), *MNRAS* **410**, 166 (2011).
- Макаров и др. (D. Makarov, P. Prugniel, N. Terekhova, H. Courtois, and I. Vauglin), *Astron. Astrophys.* **570**, A13 (2014).
- Мичикоши, Кокубо (S. Michikoshi and E. Kokubo), *Astrophys. J.* **821**, 35 (2016).
- Ох и др. (S.H. Oh, W.-T. Kim, H.M. Lee, and J. Kim), *Astrophys. J.* **683**, 94 (2008).
- Полторак, Фридман (S.G. Poltorak and A.M. Fridman), *Astron. Rep.* **51**, 460 (2007).

24. Робертс и др. (W. W. Roberts, Jr., M. S. Roberts, and F. H. Shu), *Astrophys. J.* **196**, 381 (1975).
25. Савченко (S. S. Savchenko), *Astrophys. Bull.* **67**, 310 (2012).
26. Савченко и др. (S. Savchenko, A. Marchuk, A. Mosenkov, and K. Grishunin), *MNRAS* **493**, 390 (2020).
27. Сало, Лаурикаинен (H. Salo and E. Laurikainen), *MNRAS* **313**, 377 (2000).
28. Саха, Элмегрин (K. Saha and B. Elmegreen), *Astrophys. J.* **826**, 21 (2016).
29. Сейгар, Джеймс (M. S. Seigar and P. A. James), *MNRAS* **299**, 685 (1998).
30. Селвуд, Карлберг (J. A. Sellwood and R. G. Carlberg), *Astrophys. J.* **282**, 61 (1984).
31. Смит и др. (B. J. Smith, M. L. Giroux, and C. Struck), *Astrophys. J.* **164**, 146 (2022).
32. Смит и др. (J. Sohn, H. S. Hwang, M. J. Geller, et al.), *J. Korean Astron. Soc.* **48**, 381 (2015).
33. Страк и др. (C. Struck, C. L. Dobbs, and J.-S. Hwang), *MNRAS* **414**, 2498 (2011).
34. Форган и др. (D. H. Forgan, F. G. Ramón-Fox, and I. A. Bonnell), *MNRAS* **476**, 2384 (2018).
35. Харт и др. (R. E. Hart, S. P. Bamford, K. W. Willett, et al.), *MNRAS* **461**, 3663 (2016).
36. Хиксон (P. Hickson), *Astrophys. J.* **255**, 382 (1982).
37. Хаббл (E. P. Hubble), *Astrophys. J.* **64**, 321 (1926).
38. Чемин и др. (L. Chemin, C. Balkowski, V. Cayatte, et al.), *MNRAS* **436**, 469 (2005).
39. Чилингарян и др. (I. Chilingarian, A.-L. Melchior, and I. Zolotukhin), *MNRAS* **405**, 1409 (2010).
40. Швейцер (F. Schweizer), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **31**, 313 (1976).
41. Элмегрин, Элмегрин (D. M. Elmegreen and B. G. Elmegreen), *MNRAS* **201**, 1021 (1982).
42. Элмегрин, Элмегрин (D. M. Elmegreen and B. G. Elmegreen), *Astrophys. J.* **314**, 3 (1987).
43. Элмегрин (B. G. Elmegreen), *Ann. New York Acad. Sci.* **596**, 40 (1990).
44. Элмегрин и др. (D. M. Elmegreen, B. G. Elmegreen, A. Yau, et al.), *Astrophys. J.* **737**, 32 (2011).
45. Ю, Хо (S.-Y. Yu and L. C. Ho), *Astrophys. J.* **900**, 150 (2020).
46. Юан, Гросбол (C. Yuan and P. Grosbol), *Astrophys. J.* **243**, 432 (1981).