Декомпозиция 138 галактик на 0.1 < z < 2.2 с учётом спирального узора

И.В. Чугунов¹, А.А. Марчук^{1,2} ¹ГАО РАН, ²СПбГУ

Аннотация

Различные вопросы, связанные с природой и эволюцией спиральных рукавов, всё ещё остаются нерешёнными, и кроме того, лишь малое количество исследований посвящено спиральной структуре удалённых галактик и их эволюции. Нами проведена декомпозиция с учётом спирального узора для 138 удалённых галактик из поля HST COSMOS и нового обзора JWST CEERS на красных смещениях 0.1 < z < 2.2 (до 10.5 млрд лет назад). Для всех 9 галактик из обзора CEERS использованы изображения в нескольких фильтрах. В результате исследованы зависимости параметров спиральной структуры от красного смещения и от длины волны, на которой был испущен свет. В частности, подтверждено увеличение угла закрутки спиральной структуры с длиной волны. Для ширины спиральных рукавов обнаружена зависимость от красного смещения, но гораздо сильнее она зависит от длины волны, на которой наблюдается галактика. Также показано, что на больших красных смещениях спиральная структура становится существенно более асимметричной.

Введение

Спиральные рукава — важный элемент крупномасштабной структуры дисковых галактик, и большинство близких массивных галактик относятся к спиральным (Conselice, 2006). Спиральные рукава выделяются на фоне диска повышенной яркостью, в среднем более голубым показателем цвета, активным звездообразованием, повышенным содержанием газа и многими другими свойствами. Спиральный узор был обнаружен в середине XIX века (Rosse, 1850), ещё до того, как стало ясно, что вообще представляют собой галактики (Hubble, 1926). В то же время, многие проблемы, связанные с происхождением спиральных рукавов и их эволюцией остаются неразрешёнными, как например заметная "комковатость" далеких галактик, что может быть связано с гравитационной неустойчивостью в рукавах (см. обзорные работы C. Dobbs и Baba 2014; Sellwood и Masters 2022).

Спиральной структуре близких галактик посвящено множество работ (Sellwood и Masters, 2022). В то же время, среди галактик, удалённых на космологические расстояния, значительный процент также относится к спиральным (Margalef-Bentabol и др., 2022), но лишь малочисленные работы посвящены исследованию непосредственно спиральной структуры. Большинство таких исследований обычно замыкается на изучении углов закрутки¹ рукавов (S. S. Savchenko и Reshetnikov, 2011; Davis и др., 2012; Martínez-García, González-Lópezlira и Puerari, 2023; Reshetnikov и др., 2022; Reshetnikov и др., 2023). Существуют единичные примеры работ, где для далёких спиральных галактик измеряются другие свойства спирального узора: например, изменение ширины вдоль спирального рукава (Марчук и др., 2022; S. Savchenko и др., 2020) или определение радиусов коротации (Marchuk, Mosenkov и др., 2024).

Один из методов, при помощи которого потенциально можно определять различные параметры спиральной структуры — это декомпозиция. При двумерной фотометрической декомпозиции

^{*}e-mail:chugunov21@list.ru

¹Угол закрутки — параметр, описывающий форму рукава: в заданной точке это угол, который спиральный рукав образует пересечением с окружностью, центр которой совпадает с центром галактики.

изображение галактики представляется как сумма компонент, моделируемых аналитическими функциями. Оптимальные параметры модели — при которых модель наилучшим образом описывает изображение — могут быть получены при помощи алгоритмов оптимизации, и можно считать, что они соответствуют параметрам самой галактики (Erwin, 2015; Méndez-Abreu и др., 2017). Сами же спиральные рукава практически никогда не включаются в декомпозицию. Причин тому несколько. Во-первых, отсутствуют устоявшиеся модели распределения яркости в спиральных рукавах, поскольку они имеют разнообразный вид и сложную структуру. Во-вторых, подобная модель должна иметь большое количество параметров, и, как следствие, декомпозиция с её использованием будет очень затратной по вычислительной мощности. Тем не менее, в предыдущих работах нами была проведена декомпозиция с новой разработанной моделью спиральных рукавов, сначала для 29 близких галактик в инфракрасном диапазоне (Chugunov и др., 2024), а затем для одной галактики М 51 в 17 фотометрических полосах от ультрафиолетового до дальнего инфракрасного (Marchuk, Chugunov и др., 2024). В этих работах было показано, что при помощи декомпозиции можно получать полные параметры спирального узора, такие как ширины, углы закрутки, вклад в полную светимость, азимутально-усреднённый профиль и другие.

Таким образом, исследование разных параметров спирального узора в удалённых галактиках — актуальная задача. Новые наблюдательные данные приводят к неожиданным выводам, например, по данным наблюдений на телескопе Джеймс Уэбб обнаружилось, что количество спиральных галактик в ранней Вселенной существенно выше, чем представлялось ранее (Kuhn и др., 2023). При этом для анализа параметров далёких спиральных галактик имеются подходящие данные и методы. Например, ранее была составлена и проанализирована выборка из 171 удалённой спиральной галактики из обзора HST COSMOS, содержащая галактики на 0.1 < z < 1.1 (Reshetnikov и др., 2022; Reshetnikov и др., 2023). В данной работе эта выборка будет расширена в область ещё больших красных смещений за счёт данных, полученных с телескопа Джеймс Уэбб, из глубокого обзора CEERS (Bagley и др., 2023). Для галактик этой выборки будет проделана декомпозиция с учётом спиральных рукавов, с использованием модели, близкой к той, что применялась ранее (Chugunov и др., 2024). Наконец, в полученных результатах будут исследованы зависимости разных параметров от красного смещения z, что позволит сделать выводы касательно эволюции этих параметров со временем.

В рамках этой работы принимается стандартная космологическая модель Λ CDM со значениями $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_{\Lambda} = 0.7$ и $H_0 = 70$ км с⁻¹ Мпк⁻¹.

1 Выборка изображений галактик

Для целей данной работы были использованы изображения галактик из двух разных источников, так что галактики делятся на две подвыборки.

Первая подвыборка содержит изображения галактик из обзора COSMOS, выполненного на космическом телескопе Хаббл. В рамках этого обзора выполнены глубокие снимки, охватывающие участок неба площадью около 2 кв. градусов, в полосе F814W, с размером пикселя 0.03''. За основу этой подвыборки была взята выборка из 171 спиральной галактики, которую ранее подготовили и исследовали Reshetnikov и др. (2023). Поскольку декомпозиция не всегда даёт хороший результат по тем или иным причинам (см. раздел 3), только для 129 галактик выборки результаты декомпозиции использовались в дальнейшем анализе. Эти галактики находятся на красных смещениях 0.1 < z < 1.1 (среднее значение $\langle z \rangle = 0.45$).

Для составления второй подвыборки были использованы изображения из обзора CEERS, который был выполнен на космическом телескопе Джеймс Уэбб. Этот обзор охватывает другой участок неба, площадь которого составляет около 100 кв. минут дуги. Изображения имеют такой же размер пикселя (0.03"), но имеют большую глубину, кроме того, в данных CEERS изображения получены в семи различных фильтрах в ближнем инфракрасном диапазоне: F115W, F150W, F200W, F277W, F356W, F410M и F444W. Подвыборка состоит из галактик, отобранных из ра-



Рис. 1: Слева: гистограмма распределения галактик из выборки по красному смещению. Справа: график, показывающий распределение галактик по красному смещению и длине волны излучения в собственной системе отсчёта. Каждая точка соответствует отдельному изображению. На обоих графиках также показано время хода наблюдаемого света, соответствующее красному смещению.

бот Guo и др. (2023), Le Conte и др. (2023) и Kalita и др. (2023). Лишь для 9 галактик были получены надёжные результаты декомпозиции, но благодаря данным в различных фильтрах, это соответствует 57 отдельным изображениям, для каждого из которых получена модель (для 6 галактик сделаны модели во всех фильтрах, для ещё 3 галактик пропущены наиболее корот-коволновые фильтры F115W и F150W, поскольку спиральные рукава выглядят в них слишком клочковатыми). Несмотря на малый размер этой подвыборки, её добавление важно по двум причинам. Во-первых, галактики в ней находятся на красных смещениях 1.0 < z < 2.2, что позволяет расширить диапазон исследуемых красных смещений. Во-вторых, для каждой из этих галактик исследуются изображения в разных фильтрах, что позволяет выделить эффекты изменения параметров спиральной структуры далеких галактик с длиной волны.

Если галактики с разными красными смещениями исследуются в одном и том же фильтре, то излучение, которое от них регистрируется, соответствует разным длинам волн в собственной системе отсчёта (*rest-frame wavelength*), что может искажать наблюдаемые эволюционные изменения в галактиках. Например, в работе Menéndez-Delmestre и др. (2024) было показано, что такой эффект влияет на измеряемые параметры баров. В других работах, например S. Savchenko и др. (2020) и Marchuk, Chugunov и др. (2024), было показано, что измеряемые параметры спиральных рукавов в значительной мере зависят от длины волны, в которой наблюдается галактика.

Таким образом, финальная выборка галактик, для которой были получены надёжные результаты декомпозиции, насчитывает 138 объектов на красных смещениях 0.1 < z < 2.2, что соответствует временам вплоть до 10.5 млрд лет назад. Учитывая полосы пропускания фильтров и красные смещения галактик, их изображения в обеих выборках соответствуют диапазонам от коротковолновой части оптического диапазона до ближнего инфракрасного в собственной системе отсчёта. На Рис. 1 показано распределение галактик по красному смещению и по длине волны излучения в собственной системе отсчёта, на которой получены изображения.

2 Модель спиральных рукавов

Для декомпозиции была использована фотометрическая модель спиральных рукавов, в основном сходная с моделью из прошлой работы (Chugunov и др., 2024). Основные принципы построения модели остались неизменными, как и большинство её свойств, однако некоторые изменения коснулись функционального вида распределения яркости в рукаве. Также в некоторых частях была изменена техническая реализация, в том числе поменялся набор входных параметров модели. Все эти изменения связаны не с тем, что новая модель более физически обоснована, а с тем, что она становится более удобной в практическом использовании.

Как и ранее, функция задаёт двумерное распределение яркости в одном спиральном рукаве, так что каждый спиральный рукав моделируется независимо. Параметры модели — физически осмысленные свойства спиральных рукавов, либо хорошо связаны с ними, их количество обеспечивает достаточную гибкость модели, что было показано в предыдущих работах (Chugunov и др., 2024; Marchuk, Chugunov и др., 2024).

Формально зададим поверхностную яркость в спиральном рукаве в полярных координатах как $I(r, \varphi)$. Координаты относятся к плоскости диска галактики и отсчитываются от её центра, поэтому формально используются ещё 4 параметра: координаты диска на изображении (X₀, Y₀), а также его ориентация в пространстве (задаваемая наклоном плоскости диска к картинной плоскости *i* и позиционным углом видимой большой полуоси диска PA) задания. Здесь r — галактоцентрическое расстояние, φ — азимутальный угол, который отсчитывается от направления позиционного угла PA.

Пусть начало спирального рукава расположено на азимутальном угле φ_0 . Для удобства введём координату ψ , которая будет отсчитываться от начала спирального рукава в сторону, в которую он направлен. Тогда $\psi = \varphi - \varphi_0$, если рукав закручивается против часовой стрелки, иначе $\psi = \varphi_0 - \varphi$. Формулу удобно рассмотреть по частям:

$$I(r,\psi) = I_{\parallel}(r(\psi),\psi) \times I_{\perp}(r-r(\psi),\psi)$$
(1)

Здесь I_{\parallel} — распределение поверхностной яркости вдоль центральной линии спирали («хребта»), которая описывается функцией $r(\psi)$. I_{\perp} — распределение яркости поперёк спирального рукава. Далее рассмотрим каждую функцию по отдельности.

В следующих параграфах описаны функции $r(\psi)$ (2.1), I_{\parallel} (2.2) и I_{\perp} (2.3) по отдельности. Далее приведена сводная таблица с параметрами модели (Таб. 1).

2.1 Форма рукава

Функция $r(\psi)$ описывает форму спирального рукава. В ней, как и раньше, $\log r$ является полиномом 4-й степени от ψ (для логарифмической спирали $\log r$ — линейная функция от ψ). Сами коэффициенты полинома не являются параметрами модели, так как их оказалось неудобно использовать на практике, но выводятся из параметров. Формулу можно представить в таком виде:

$$r(\psi) = r_0 \times \exp\left(\sum_{n=1}^4 k_n (\psi/\psi_{\text{end}})^n\right)$$
(2)

На координатах (r_0, φ_0) располагается начало спирального рукава, на координатах (r_{end}, φ_{end}) — его конец; эти величины являются параметрами функции. Ими определяется и количество оборотов спирального рукава, и направление закрутки.

Вместе с ψ будем использовать те же индексы, что и с φ аналогичным образом, например, $\psi_{\rm end}$ — величина ψ там же, где $\varphi = \varphi_{\rm end}$.

Параметры m_2, m_3, m_4 — дополнительные параметры функции. Они определяют отклонение $r(\psi)$ от простой формы логарифмической спирали, проходящей через (r_0, φ_0) и $(r_{\text{end}}, \varphi_{\text{end}})$.

Значения k_n выводятся из параметров функции следующим образом:

$$\begin{cases}
k_1 = m_1 - m_2 + m_3 - m_4 \\
k_2 = m_2 - 3m_3 + 6m_4 \\
k_3 = 2m_3 - 10m_4 \\
k_4 = 5m_4
\end{cases}$$
(3)

где $m_1 = \ln (r_{\rm end}/r_0).$

Следует прояснить, почему k_n задаются не напрямую, а определяются из параметров m_2, m_3, m_4 именно таким способом, поскольку в данном виде функция выглядит сложнее, чем в первоначальной версии.

- Благодаря такому подбору коэффициентов спиральный рукав проходит через заданную начальную (r₀, φ₀) и конечную (r_{end}, φ_{end}) точки вне зависимости от m₂, m₃, m₄, что важно, поскольку положения начала и конца рукава можно зафиксировать визуально. Общий же вид формулы 2 не обеспечивает прохождения функции через заданную конечную точку при произвольном наборе параметров.
- Параметры m_2, m_3, m_4 тесно связаны с коэффициентами разложения полинома для угла закрутки (4) на полиномы Лежандра. В результате изменения формы спирального рукава, вносимые изменениями m_2, m_3, m_4 по отдельности, максимально независимы друг от друга, поскольку полиномы Лежандра — ортогональные функции. Напротив, если использовать в качестве параметров модели сразу коэффициенты полинома k_n , как в старой модели спирального рукава, то возникает значительное вырождение между параметрами. Увеличение каждого из параметров k_n по отдельности увеличивает угол закрутки спиральных рукавов, причём увеличение k_2, k_3, k_4 сильнее увеличивает угол закрутки в конце рукава.

На рисунке 2 проиллюстрировано, как параметры m_2, m_3, m_4 влияют на форму спирали.

Функция $r(\psi)$ создаёт спиральные рукава с переменным углом закрутки, и угол закрутки в конкретной точке μ можно выразить как функцию от ψ :

$$\mu(\psi) = \arctan\left(\sum_{n=1}^{4} nk_n \psi^{n-1} / \psi_{\text{end}}^n\right).$$
(4)

2.2 Распределение яркости вдоль рукава

Функция I_{\parallel} описывает распределение яркости вдоль «хребта» спирального рукава — на кривой, которая задаётся формулой $r(\psi)$. Поскольку спиральный рукав — часть диска, в основе лежит экспоненциально убывающая зависимость от радиуса. В начале и в конце рукава добавляются множители, обеспечивающие плавное возрастание яркости от нуля в начале и плавное убывание до нуля в конце. Эти множители уже зависят от ψ . Распределение в целом остаётся похожим на то, которое было реализовано в модели из работы Chugunov и др. (2024), см. Рис. 1 в указанной работе.

 I_{\parallel} удобнее записать как функцию от двух параметров: ψ и от r, причём можно представить её как произведение функций от каждого из этих параметров по отдельности:

$$I_{\parallel}(r,\psi) = I_{r\parallel}(r) \times I_{\psi\parallel}(\psi) \tag{5}$$

$$I_{r\parallel}(r) = I_0 e^{-r/h_s}$$
(6)

$$I_{\psi\parallel}(\psi) = \begin{cases} 3\left(\frac{\psi}{\psi_{\text{growth}}}\right)^2 - 2\left(\frac{\psi}{\psi_{\text{growth}}}\right)^3 & 0 \le \psi < \psi_{\text{growth}} \\ 1 & \psi_{\text{growth}} \le \psi < \psi_{\text{cutoff}} \\ \frac{\psi_{\text{end}} - \psi}{\psi_{\text{end}} - \psi_{\text{cutoff}}} & \psi_{\text{cutoff}} \le \psi \le 1 \end{cases}$$
(7)



Рис. 2: Влияние параметров m_2, m_3, m_4 на форму спирали. При равенстве нулю всех параметров получается логарифмическая спираль.

В этих формулах I_0 — центральная поверхностная яркость, которая в рукаве не достигается, но по форме аналогична центральной поверхностной яркости диска, h_s — экспоненциальный масштаб спирального рукава (снова по аналогии с выражением для диска). Эти две величины используются как параметры функции.

На угле ψ_{growth} заканчивается рост $I_{\psi\parallel}(\psi)$, а ψ_{cutoff} — где начинается убывание. В качестве параметров функции вместо этих величин вводятся $p_{\text{growth}} = \psi_{\text{growth}}/\psi_{\text{end}}$ и $p_{\text{cutoff}} = \psi_{\text{cutoff}}/\psi_{\text{end}}$ (то есть, соответствующие части рукава вместо углов — для универсальности параметров).

Смысл этих точек похож на тот, который изображён на рис. 1 в работе Chugunov и др. (2024), но положение максимума яркости всего рукава не соответствует положению ψ_{growth} .

2.3 Распределение яркости поперёк рукава

Распределение яркости поперёк рукава задаётся функцией I_{\perp} , которая по форме похожа на функцию Серсика. Рукав может быть асимметричным и иметь переменную ширину. Функцию I_{\perp} можно представить в зависимости от $\rho = r - r(\psi)$ и ψ . Здесь ρ — радиальное расстояние от точки до «хребта» рукава.

$$I_{\perp}^{\rm in/out}(\rho,\psi) = \exp\left(-\ln(2) \times \left(\frac{|\rho|}{w_{\rm loc}^{\rm in/out}(\psi)}\right)^{\frac{1}{n^{\rm in/out}}}\right)$$
(8)

Несколько пояснений:

- $w_{\rm loc}^{\rm in/out}(\psi)$ HWHM² рукава в радиальном направлении (зависимость от ψ подробнее рассмотрена далее в этом же разделе), $n^{\rm in/out}$ — индекс Серсика, задающий распределение яркости в рукаве.
- Индексы ⁱⁿ и ^{out} применяются, соответственно, ко внутренней стороне рукава относительно «хребта» (ρ < 0), и ко внешней (ρ > 0). Для внутренней и внешней стороны показатели Серсика nⁱⁿ и n^{out} определяются независимо друг от друга, как и ширины wⁱⁿ_{loc} и w^{out}_{loc}.
- Функция похожа на функцию Серсика, но имеет отличие: вместо показателя b_n, зависящего от n, поставлена константа ln(2). Поэтому w^{in/out}_{loc} (ψ) — не эффективный радиус, содержащий половину светимости рукава³, а HWHM. Эксперименты показали, что это более удобный и наглядный параметр, характеризующий ширину рукавов.

Будем называть $w_{\rm loc}^{\rm in/out}(\psi)$ локальной внутренней/внешней полушириной — это расстояние вдоль радиуса от «хребта» рукава до точки, где яркость составляет половину яркости на «хребте». Сумму внутренней и внешней будем называть локальной шириной: $w_{\rm loc} = w_{\rm loc}^{\rm in} + w_{\rm loc}^{\rm out}$. В качестве параметров, задающих ширину, используются средняя ширина w, асимметрия A и внутренний и внешний показатели расширения $\gamma^{\rm in/out}$. Тогда для локальной внутренней и внешней ширины верно следующее выражение:

$$w_{\rm loc}^{\rm in/out}(\psi) = w \frac{1 \mp A}{2} \times \exp\left(\gamma_{\rm in/out} \left(\frac{\psi}{\psi_{\rm end}} - 0.5\right)\right)$$
(9)

Несмотря на видимую сложность формулы, все параметры имеют ясный физический смысл. За среднюю ширину, которая определяется параметром w, принимается локальная ширина на $\psi = \psi_{\text{end}}/2$, то есть, в середине рукава. Асимметрия A показывает, насколько внешняя часть

²HWHM (half-width at half maximum) — расстояние до точки, где интенсивность составляет половину от максимальной

 $^{^{3}}$ При стандартном виде функции Серсика, но с одномерным распределением, как в спиральном рукаве, та величина, которая считается эффективным радиусом, будет ограничивать не половину, а существенно большую часть излучения (порядка 80% для типичных значений n в рукавах). См. работу Graham и Driver (2005), раздел 2.1. с подробным выводом для стандартного вида функции Серсика.

Часть модели	Параметр	Описание			
r(arphi)	$r_0, arphi_0$	Координаты начала рукава			
	$r_{ m end}, \varphi_{ m end}$	Координаты конца рукава			
	m_2,m_3,m_4	Коэфф. полинома, описывающего форму			
I_{\parallel}	I_0	Спроектированная центральная яркость			
	h_s	Экспоненциальный масштаб рукава			
	p_{growth}	Часть рукава с возрастающей яркостью			
	$p_{ m cutoff}$	Часть рукава с убыванием яркости до нуля			
I_{\perp}	w	Ширина рукава в его середине			
	A	Асимметрия рукава в середине			
	$n^{\mathrm{in}}, n^{\mathrm{out}}$	Индекс Серсика			
	$\gamma^{\mathrm{in}},\gamma^{\mathrm{out}}$	Темп расширения рукава			

Таблица 1:	Сводная	таблица	параметров	модели	спирального	рукава
------------	---------	---------	------------	--------	-------------	--------

рукава шире внутренней в на $\psi = \psi_{\text{end}}/2$ (этот показатель меняется от -1 до 1, а 0 означает симметрию). При показателях расширения $\gamma^{\text{in/out}}$ в конце рукава внутренняя и внешняя локальные полуширины, соответственно, в $e^{\gamma^{\text{in}}}$ и $e^{\gamma^{\text{out}}}$ больше, чем в начале (при равенстве нулю ширина постоянна).

3 Декомпозиция

Непосредственно для декомпозиции использовался модифицированный нами пакет программ IMFIT (Erwin, 2015) с добавленной функцией спиральных рукавов (см. раздел 2), свободно доступный по адресу https://github.com/IVChugunov/IMFIT_spirals. Как и в предыдущих работах, при декомпозиции используется алгоритм Левенберга — Марквардта (Moré, 1978) для минимизации невязки между моделью и изображением, реализованный в IMFIT. Для выполнения декомпозиции, кроме исходного изображения, используется PSF для учёта его влияния на полученное изображение, карта ошибок, отражающая вес каждого пикселя при фиттинге, а также начальное приближение параметров модели. В некоторых случаях используется маска, на которой отмечены области изображения, которые необходимо не учитывать при фиттинге (например, дефекты изображения или посторонние объекты)

Для построения PSF изображений телескопа Хаббл была использована программа TinyTim (Krist, Hook и Stoehr, 2011). Для PSF изображений телескопа Джеймс Уэбб были использованы PSF, доступные по адресу https://www.astro.princeton.edu/~draine/Kernels.html (см. также Aniano и др. 2011). Карты ошибок для изображений из подвыборки COSMOS недоступны, поэтому использовались карты, построенные тем же методом, что и в работе Marchuk, Chugunov и др. (2024). Для подвыборки CEERS карты ошибок предоставляются вместе с данными. Маски для всех изображений подготавливались вручную.

Для подготовки начальных приближений для фиттинга, а также других вспомогательных действий был написан вспомогательный скрипт, выполняющий следующие действия:

- По набору точек, которые ставятся вручную вдоль спиральных рукавов, создаются их срезы, наподобие метода из работы S. Savchenko и др. (2020). По срезам строится контур, охватывающий спиральный рукав (см. пример такого контура на Рис. 3).
- Делается фиттинг модели, не учитывающей спиральные рукава, с использованием полученного контура как маски. Результат служит начальным приближением «классических»

компонент для декомпозиции с учётом спиральных рукавов, кроме того, ориентация плоскости диска определяется и задаётся для модели спиральных рукавов именно этим способом.

• По разметке рукавов подбираются параметры модели для начального приближения, описывающие форму спиральных рукавов.

После описанных шагов проводится полноценная декомпозиция с учётом спирального узора. Скрипт автоматизирует и значительно ускоряет многие действия, необходимые для проведения декомпозиции, при этом обеспечивая приемлемое качество результатов. Тем не менее, некоторые ошибки и проблемы при декомпозиции оказываются типичными несмотря на то, что математически результат оказывается оптимальным (то есть, невязка оказывается наименьшей). Так, например, модели балджа и диска могут «поменяться местами», то есть, модель балджа, описываемая функцией Серсика, окажется протяжённой и будет описывать диск галактики, а модель диска, описываемая экспоненциальным законом, будет соответствовать реальному балджу. Такая проблема часто встречается в работах по декомпозиции (см. например Gao и Ho, 2017; Gong и др., 2023). Другие проблемы часто связаны с включением спиральных рукавов в модель: например, модели спиральных рукавов могут принять слишком большие значения ширины, в результате чего в области, которая соответствует межрукавному пространству в реальной галактике, модель содержит значительный поток от спиральных рукавов, а диск оказывается значительно тусклее, чем должен быть. В любом случае, подобные неточности можно отслеживать по изображениям и численным параметрам моделей, по разностным изображениям, а также по срезам, после чего можно попытаться сделать декомпозицию заново с некоторыми исправлениями. Так, например, можно исправить начальное приближение (например, установить ограничения на параметры или добавить новую компоненту в модель) или уточнить маску.

На Рис. 3 показан пример декомпозиции одной из галактик двумя моделями: для «классической» модели и для исследуемой с учётом спиральных рукавов.

В отличие от работ Reshetnikov и др. (2022) и Reshetnikov и др. (2023) наклон диска галактик к картинной плоскости не принимался нулевым, а измерялся при помощи декомпозиции. В результате получено распределение галактик по наклону, показанное на Рис. 4. Видно, что больпинство галактик имеет значения наклона вблизи $i \approx 30^{\circ}$, что хорошо согласуется с указанным в Reshetnikov и др. (2023) средним значением отношения осей $\langle b/a \rangle = 0.87$. Отметим, что галактик с большим наклоном диска к картинной плоскости сравнительно мало, поэтому неучёт угла наклона в упомянутых работах не слишком искажает их результаты.

4 Результаты

В этой главе будут рассмотрены результаты, полученные из декомпозиции.

4.1 Параметры балджей

Можно сравнить параметры балджей, полученные в моделях, включающих спиральные рукава и в «классических» моделях. Сравнение приведено на Рис. 5. Можно заметить систематические отличия в параметрах: в среднем, при переходе от «классических» моделей к моделям со спиральными рукавами эффективная яркость балджа I_e понижается, в то время как эффективный радиус r_e , индекс Серсика n и вклад в полную светимость B/T возрастают. Наблюдаемое поведение полностью соответствует предыдущим работам (Chugunov и др., 2024; Marchuk, Chugunov и др., 2024) и может быть объяснено тем же самым способом. При неучёте спиральных рукавов в модели яркость диска оказывается завышенной, в том числе и в центральной части галактики, где располагается балдж. Для того, чтобы яркость центральных частей галактики соответствовала реальной, балдж в целом становится меньше, его вклад в светимость и индекс Серсика занижается. Увеличение I_e при этом кажется противоречащим такому объяснению, но в действительности из-за уменьшенного r_e точка, где достигается I_e , находится ближе к центру галактики, поэтому значение I_e повышается, хотя визуально балдж не становится ярче.



Рис. 3: Пример декомпозиции одной из галактик выборки. Слева направо: изображение, модели, разностные изображения. В верхнем ряду показана «классическая» модель, в нижнем — модель со спиральными рукавами, и соответствующие им разностные изображения (фиолетовый цвет показывает недооценку яркости в модели, оранжевый — переоценку, белый — хорошее соответствие). Изображение в верхнем и в нижнем ряду одно и то же, но в нижнем ряду бирюзовым цветом также показаны контуры спиральных рукавов, измеренные при помощи вспомогательного скрипта.



Рис. 4: Распределение галактик из выборки по наклону диска.

Можно также рассмотреть, как параметры балджа зависят от красного смещения z. Наибольший интерес представляет зависимость B/T от z, приведённая на левой половине Рис. 6. Заметно, что вклад балджа в светимость в целом возрастает с ростом красного смещения, то есть, уменьшается со временем. Подобная зависимость на первый взгляд выглядит очень неожиданно, поскольку существует согласие, что балджи галактик растут со временем. Рост балджей со временем подтверждается в численных моделях (Brooks и Christensen, 2016), и в наблюдениях (Sachdeva, Saha и Singh, 2017). Это наблюдение верно не только для абсолютной светимости балджа, но и для его доли в полной светимости (Bruce и др., 2014). Такое поведение вполне вписывается в современную космологическую модель, в которой значительную роль играют слияния галактик и динамическая эволюция — эти факторы приводят к росту балджей (Hopkins и др., 2010). При этом следует учитывать физические различия между балджами и псевдобалджами, и поскольку в выборке балджи многих галактик имеют низкий индекс Серсика (n < 2), большая их часть может в действительности являться псевдобалджами (Gadotti, 2009). Всё же, наблюдаемый рост вклада балджей с красным смещением требует отдельного объяснения. По всей видимости, возможное объяснение заключается в том, что выборка галактик является сильно неполной по светимостям, и в разные диапазоны по z попадают галактики разной светимости (см. правую часть Рис. 6), из-за эффектов наблюдательной селекции. Вошедшие в выборку галактики на красных смещениях $z \approx 1$ значительно ярче, чем галактики с наименьшими красными смещениями, поэтому первые могли испытать гораздо больше слияний уже к $z \approx 1$, чем более близкие галактики выборки за более продолжительное время. Для полноценного исследования эволюционных эффектов здесь необходимо создать выборку галактик с ограничениями на массу и/или светимость, чтобы избежать эффектов наблюдательной селекции. Если же в текущей выборке ограничиться галактиками в диапазоне светимостей -23 mag < M(AB)F814W < -22 mag, то коэффициент корреляции между B/T и z из положительного станет отрицательным, что согласуется с предложенной интерпретацией.

4.2 Углы закрутки спиральных рукавов

Зависимость угла закрутки от красного смещения показана на Рис. 7. Для всей выборки наблюдается увеличение угла закрутки с красным смещением, причём тренд становится сильнее, если



Рис. 5: Сравнение параметров балджа в «классических» моделях (по горизонтали на всех графиках) и в моделях со спиральными рукавами (по вертикали). На графике для I_e показаны результаты только для подвыборки COSMOS.



Рис. 6: Слева: зависимость вклада балджа в полную светимость B/T от красного смещения z. Для подвыборки CEERS приведены результаты только для полосы F277W. Здесь и далее бордовые квадраты показывают средние значения величины (в данном случае B/T) в ограниченных диапазонах по z: границы диапазонов отмечены горизонтальными чертами, среднеквадратичные отклонения в диапазоне — вертикальными. Квадрат зелёного цвета показывает результаты из работы Chugunov и др., 2024. Справа: светимость галактик подвыборки COSMOS в зависимости от z.

рассматривать только двухрукавные галактики (для них угол закрутки увеличивается на 5.9° за единицу z). Наличие этого тренда согласуется с выводами Reshetnikov и др. (2022) и Reshetnikov и др. (2023), хотя количественно угол закрутки слабее меняется с z, чем в упомянутых работах, по всей видимости, из-за включения в анализ заметно неполной подвыборки CEERS. Ранее, Davis и др. (2012) не обнаружил подобного тренда, что, возможно, связано с несовершенством использованного метода: в частности, способ измерения, связанный с преобразованием Фурье, не предусматривал изменения угла закрутки в спиральных рукавах (Yu, Ho и др., 2018).

Однако при рассмотрении данного тренда никак не учитывается возможное влияние эффектов смещения длины волны. Для того, чтобы их учесть, можно провести апроксимацию значений углов закрутки билинейной функцией красного смещения и длины волны в собственной системе отсчёта. Это возможно благодаря тому, что для подвыборки CEERS доступны данные в относительно широком диапазоне длин волн. Такая апроксимация проиллюстрирована на Рис. 8, также на графиках для сравнения приведены данные измерений из других работ. Зависимость от z остаётся такой же, как при апроксимации линейной функцией только от z, но также обнаруживается отрицательная связь с длиной волны: при увеличении длины на 1 мкм угол закрутки уменьшается приблизительно на 3°. При наблюдении отдельно взятой галактики уменьшение угла закрутки с ростом наблюдаемой длины волны ожидается в том случае, если спиральная структура в ней образована долгоживущей волной плотности, в противном случае ожидается, что углы закрутки будут одинаковыми (Yu и Ho, 2018). Тогда наблюдаемая связь угла закрутки с длиной волны, хоть и слабая, может указывать на то, что хотя бы в части галактик из подвыборки CEERS наблюдаются долгоживущие волны плотности.

Также по аналогии с работой Reshetnikov и др. (2023) проведён тест Прингла — Доббс (Pringle и C. L. Dobbs, 2019), при помощи которого можно оценить доминирующий механизм формирования спиральной структуры. Можно приблизительно считать, что для транзиентных и приливных спиральных рукавов котангенс угла закрутки равномерно возрастает со временем, поэтому случайная выборка галактик с рукавами, имеющими такую природу, будет иметь распределение



Угол закрутки и красное смещение

Рис. 7: Зависимость усредненного по рукавам угла закрутки от красного смещения для всей выборки (слева) и для двухрукавных галактик (справа). Для подвыборки CEERS приведены результаты только для полосы F277W.



Рис. 8: Зависимость среднего угла закрутки спиральных рукавов от красного смещения (слева) и от длины волны в собственной системе отсчёта (справа). Для подвыборки CEERS на левом графике приведены результаты только для полосы F277W. Билинейная апроксимация проведена для длин волн в собственной системе отсчёта $\lambda_{\rm rf} < 1.5$ мкм. Нанесены также результаты измерений из других работ: S. Savchenko и др. (2020) (усреднённый результат), Reshetnikov и др. (2023) (тренд, а также данные по 4 наиболее удалённым спиральным галактикам), Chugunov и др. (2024) (усреднённый результат), Marchuk, Chugunov и др. (2024) (результаты для галактики М51 в оптическом и ближнем инфракрасном диапазоне).



Тест Прингла — Доббс

Рис. 9: Распределение котангенса угла закрутки для галактик в разных диапазонах красного смещения. В диапазоне $1.05 \le z < 2.2$ находятся галактики из подвыборки CEERS. Остальные три диапазона, содержащие галактики из подвыборки COSMOS, выбраны таким образом, чтобы включать приблизительно равное число объектов.

значений котангенса угла закрутки, близкое к равномерному. Таким образом, суть теста заключается в том, чтобы проверить распределение котангенса угла закрутки спиральных рукавов, и на Рис. 9 показаны распределения для разных диапазонов z. Среди первых трёх диапазонов $(0 \le z < 1.05)$, распределение выглядит наиболее равномерным при $0 \le z < 0.35$, и наименее — при $0.6 \le z < 1.05$. Для подвыборки CEERS, занимающей диапазон $1.05 \le z < 2.2$, но содержащей только 9 галактик, данных недостаточно, чтобы сделать однозначный вывод, хотя распределение выглядит относительно равномерным. Таким образом, это можно рассматривать как свидетельство в пользу того, что доминирующий механизм формирования спиральных рукавов меняется со временем, в соответствии с результатом Reshetnikov и др. (2023).

4.3 Ширины спиральных рукавов

В качестве меры ширины спиральных рукавов будет использоваться отношение средней ширины w к экспоненциальному масштабу диска галактики h, который также измерялся при помощи декомпозиции. Эта нормировка делается для того, чтобы можно было сравнивать ширины вне зависимости от размеров галактик. По аналогии с углом закрутки, сразу была проведена билинейная апроксимация относительной ширины w/h как функции от красного смещения и длины волны в собственной системе отсчёта, приведённая на Рис. 10. Хотя по графикам видно, что в подвыборке CEERS относительные ширины рукавов существенно выше, чем в подвыборке COSMOS, этот эффект в первую очередь связан с различиями в длинах волн. Действительно, относительная ширина сильно зависит от длины волны, в среднем увеличиваясь на 35% экспоненциального масштаба диска при увеличении длины волны наблюдения на 1 мкм. Это наблюдение соответствует результату работы Marchuk, Chugunov и др. (2024), где было обнаружено, что ширина спиральных рукавов возрастает с длиной волны, а экспоненциальный масштаб диска снижается. Однако это верно только в оптическом диапазоне и небольшой части ближнего инфракрасного. Как видно на Рис. 10, где воспроизведен результат упомянутой работы, после фильтра J (1.24) мкм), w/h начинает снижаться. Подобное поведение можно объяснить следующим образом. Молодое звёздное население излучает большую часть энергии в голубой части спектра, а старое — в красной и в инфракрасной, поэтому в пределах оптического диапазона наблюдение в более длинных волнах показывает более старое звёздное население. Более старое население после того, как сформировалось в спиральных рукавах, может сильнее отдалиться от них за время своей жизни, чем молодое, поэтому в красных фильтрах спиральные рукава выглядят шире. Однако при дальнейшем увеличении длины волны в излучение галактики начинают вносить вклад другие источники, например, полиароматические углеводороды в диапазоне нескольких мкм. Эти



Рис. 10: Аналогично Рис. 8, но для относительной ширины w/h.

источники связаны с текущим звездообразованием, поэтому наблюдаемая ширина спиральных волн снова становится меньше. По этой причине для билинейной апроксимации как ширины, так и угла закрутки (Гл. 4.2) и вклада в светимость (Гл. 4.4) использовались только те изображения, в которых собственная длина волны не превышает 1.5 мкм — чтобы в рассматриваемом диапазоне увеличение длины волны имело однозначную физическую интерпретацию, а именно, увеличение вклада старого звёздного населения. На Рис. 10 также видно, что зависимость ширины рукавов от длины волны для удалённых галактик похожа на зависимость для близкой галактики М 51 — это свидетельствует о сходстве рукавов далёких галактик и близких.

С увеличением же красного смещения наблюдается понижение относительной ширины спиральных рукавов, хотя и не слишком значительное: на 8% эксп. масштаба диска за единицу z. Поскольку речь идёт о соотношении w/h, то можно предположить, что причиной может быть не рост абсолютной ширины спиральных рукавов со временем, но и уменьшение масштаба диска h. Однако, учитывая, что формирование дисков в большинстве галактик вероятно происходит от внутренних частей ко внешним (Nelson и др., 2016), то убывания h дисков со временем при прочих равных условиях ожидать не следует. По-видимому, действительно имеет место рост ширины спиральных рукавов со временем. Вероятно, это можно связать с тем, что со временем количество газа в галактиках и активность звездообразования понижается (Combes, 2018). В таком случае, вклад идущего звездообразования в яркость рукавов в среднем понижается со временем, а вклад распределения звёздной массы — увеличивается. Распределение массы не так резко сконцентрировано в спиральных рукавах, как распределение молодых звёзд, поэтому со временем рукава становятся более широкими.

4.4 Вклад спиральных рукавов в светимость

Зависимость вклада спиральной структуры в полную светимость галактики от красного смещения и от длины волны в собственной системе приведена на Рис. 11. Можно заметить, что вклад спиральных рукавов повышается с ростом красного смещения и понижается с длиной волны, причём зависимость становится более выраженной для двухрукавных галактик (рост на 7% за единицу z и убывание на 6% при увеличении длины волны на 1 мкм). Уменьшение этого показателя с длиной волны обнаруживалась, например, в работах S. Savchenko и др. (2020) и Marchuk, Chugunov и др. (2024) и легко может быть объяснено тем же способом, который предлагается во второй работе. В спиральных рукавах сосредоточено текущее звездообразование, поэтому наиболее заметны они в молодом звёздном населении, которое и наблюдается на более коротких длинах волн. Увеличение же вклада спиральных рукавов в светимость с красным смещением,



Рис. 11: Аналогично Рис. 8, но для вклада спиральных рукавов в светимость галактики S/T.

означающее его же понижение со временем, может быть объяснено либо снижением доли газа и активности звездообразования в галактиках (Combes, 2018), либо, что более вероятно, простыми эффектами наблюдательной селекции: в галактиках на большом расстоянии сложнее заметить слабую спиральную структуру, поэтому такие объекты могут просто не попадать в выборку.

4.5 Асимметрия спиральной структуры

Для двухрукавных галактик можно оценить асимметрию спиральной структуры (не путать с асимметрией отдельного спирального рукава, которая служит параметром модели, см. Гл. 2), сравнивая значения какого-либо показателя спиральных рукавов. Выберем какой-либо параметр p, тогда при его значениях p_1 и p_2 для двух рукавов можно определить относительную разность $d(p) = \frac{|p_1 - p_2|}{p_1 + p_2}$. Чем больше d(p), тем больше относительное различие какого-либо параметра между двумя рукавами, и тем более нерегулярная спиральная структура в галактике.

Для разных параметров спиральной структуры была измерена относительная разность и исследована зависимость от красного смещения. Для большинства параметров обнаружена слабая положительная корреляция относительной разности с красным смещением: два примера приведены на Рис. 12.

Хотя тренды слабые и относительно ненадёжные, их присутствие в большинстве параметров позволяет говорить о том, что на больших красных смещениях галактики в среднем становятся более асимметричными. Это может быть связано с тем, что на таких красных смещениях взаимодействия между галактиками происходят более часто (Conselice, 2007), из-за чего симметричная спиральная структура может нарушаться, или из-за в целом более нерегулярной структуры. В работе Shibuya и др. (2016) также было найдено, что при увеличении красного смещения по крайней мере до $z \approx 1$ увеличивается наблюдаемая комковатость галактик, а затем, начиная с $z \approx 1 \dots 3$ до $z \approx 8$, она снижается.

5 Заключение и выводы

В данной работе была проведена декомпозиция 138 удалённых галактик с учётом спиральных рукавов. Такая выборка является рекордной по количеству галактик, для которых была проведена декомпозиция с использованием сложной модели спиральной структуры. Галактики находятся на красных смещениях 0.1 < z < 2.2, что позволило исследовать, как различные параметры спиральной структуры эволюционируют со временем. Кроме того, для некоторых галактик имеются



Рис. 12: Относительные разности, измеренные для положения максимума яркости в спиральном рукаве r_{max} (слева) и ширины спиральных рукавов w (справа).

изображения в различных фильтрах, благодаря чему также исследована зависимость некоторых параметров от длины волны. Ниже мы кратко приводим результаты, полученные в нашей работе:

- 1. Для балджей подтверждён вывод о том, что при неучёте спиральных рукавов в модели их светимость и индекс Серсика систематически занижается. Кроме того, в данной выборке доля балджа в полной светимости понижается с красным смещением, что, по-видимому, связано с эффектами наблюдательной селекции.
- 2. Углы закрутки спиральных рукавов увеличиваются с красным смещением, что подтверждает результаты работ Reshetnikov и др. (2022) и Reshetnikov и др. (2023). Для двухрукавных галактик угол эта тенденция наиболее сильна: их угол закрутки увеличивается на 6° за единицу z. В данной работе этот тренд расширен до области 1 ≤ z ≤ 2 и получен другим способом. Кроме того, обнаружено, что угол закрутки спиральных рукавов немного снижается с увеличением длины волны: это может указывать на то, что хотя бы в некоторых галактиках спиральная структура образована долгоживущей волной плотности в диске. Применение теста Прингла Доббс показало, что, по-видимому, доминирующий механизм формирования спиральных рукавов меняется со временем: доля спиральных галактик с транзиентным и приливным спиральным узором становится больше, что также подтверждает выводы, сделанные в упомянутых работах.
- 3. Относительная ширина спиральных рукавов немного уменьшается с красным смещением (на 8% эксп. масштаба диска за единицу z), но на наблюдаемую выборку гораздо сильнее влияет зависимость ширины от длины волны, на которой получено изображение галактики, в собственной системе отсчёта: в оптическом и в ближнем инфракрасном диапазоне ширина увеличивается на 35% эксп. масштаба диска при увеличении длины волны на 1 мкм.
- 4. Вклад спиральных рукавов увеличивается с красным смещением, что может быть связано с эффектами наблюдательной селекции, и уменьшается с ростом длины волны. Для двухрукавных галактик эти эффекты сильнее: светимость увеличивается на 7% светимости всей галактики за единицу z и уменьшается на 6% светимости галактики при увеличении длины волны на 1 мкм.

5. Спиральная структура двухрукавных галактик становится немного более асимметричной на больших красных смещениях. Это может быть связано с в целом более клочковатой структурой, или с тем, что в ранней Вселенной чаще происходили взаимодействия между галактиками, которые могли нарушать симметрию спиральной структуры.

Получены важные результаты о том, как разнообразные параметры спиральной структуры меняются со временем, что в конечном счёте важно для понимания процессов эволюции галактик. Это особенно важно с учётом того, что параметрам настолько удалённых спиральных галактик посвящены единичные работы, в которых изучаются малые выборки или отдельные объекты. При этом данные телескопа Джеймс Уэбб открыли широкие возможности для исследования таких параметров. Данная работа также иллюстрирует, что для исследования спиральной структуры важно учитывать эффекты, связанные со сдвигом длины волны у галактик на больших красных смещениях. Эти эффекты неизбежно появляются при исследовании выборки галактик с отличающимися красными смещениями. Также необходимо учитывать, что эффекты наблюдательной селекции осложняют изучение удалённых галактик. Тем не менее, эти сложности могут быть решены даже при относительно небольшой выборке галактик. Работа также показывает эф-фективность метода декомпозиции для измерения большого числа разных свойств спиральной структуры.

Список литературы

- Conselice, Christopher J. (2006). The Fundamental Properties of Galaxies and a New Galaxy Classification System. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 373, c. 1389–1408.
- Rosse, The Earl Of (1850). Observations on the Nebulae. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series I 140, c. 499–514.
- Hubble, E. P. (1926). Extragalactic Nebulae. The Astrophysical Journal 64, c. 321-369.
- Dobbs, Clare II Junichi Baba (2014). Dawes Review 4: Spiral Structures in Disc Galaxies. Publications of the Astronomical Society of Australia 31, e035.
- Sellwood, J. A. и Karen L. Masters (2022). Spirals in Galaxies. Annual Review of Astronomy and Astrophysics 60.
- Margalef-Bentabol, Berta μ др. (2022). Observations of the initial formation and evolution of spiral galaxies at 1 < z < 3 in the CANDELS fields. MNRAS 511.1, c. 1502–1517.
- Savchenko, S. S. и V. P. Reshetnikov (2011). Pitch Angles of Distant Spiral Galaxies. Astronomy Letters 37, с. 817—825.
- Davis, Benjamin L. и др. (2012). Measurement of Galactic Logarithmic Spiral Arm Pitch Angle Using Two-dimensional Fast Fourier Transform Decomposition. The Astrophysical Journal Supplement Series 199, с. 33.
- Martínez-García, Eric E., Rosa A. González-Lópezlira и Ivânio Puerari (2023). Colour Jumps across the Spiral Arms of Hubble Ultra Deep Field Galaxies. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 524, c. 18–31.
- Reshetnikov, V. P., A. A. Marchuk, I. V. Chugunov, P. A. Usachev & A. V. Mosenkov (2022). Evolution of the Spiral Structure of Galaxies from HST COSMOS Field Data. Astronomy Letters 48, c. 644–652.
- (2023). The Possible Evolution of Pitch Angles of Spiral Galaxies. Astronomy and Astrophysics 680, c. L14.
- Марчук, А. А., В. П. Решетников, А. В. Мосенков, И. В. Чугунов и П. А. Усачев (2022). Изменение ширины спиральных ветвей далеких галактик по данным HST COSMOS. Известия Главной Астрономической Обсерватории в Пулкове 227, с. 100—112.
- Savchenko, Sergey, Alexander Marchuk, Aleksandr Mosenkov и Konstantin Grishunin (2020). A Multiwavelength Study of Spiral Structure in Galaxies. I. General Characteristics in the Optical. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 493, c. 390—409.

- Marchuk, Alexander A., Aleksandr V. Mosenkov и др. (2024). A New, Purely Photometric Method for Determination of Resonance Locations in Spiral Galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 527, с. L66—L70.
- Erwin, Peter (2015). IMFIT: A Fast, Flexible New Program for Astronomical Image Fitting. The Astrophysical Journal 799, c. 226.
- Méndez-Abreu, J. и др. (2017). Two-Dimensional Multi-Component Photometric Decomposition of CALIFA Galaxies. Astronomy and Astrophysics 598, A32.
- Chugunov, Ilia V. и др. (2024). Galaxies Decomposition with Spiral Arms I: 29 Galaxies from S4G. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 527, c. 9605—9624.
- Marchuk, Alexander A., Ilia V. Chugunov и др. (2024). Galaxies Decomposition with Spiral Arms II. A Multiwavelength Case Study of M 51. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 528, c. 1276—1295.
- Kuhn, Vicki и др. (2023). JWST Reveals a Surprisingly High Fraction of Galaxies Being Spiral-like at \$0.5\leq Z\leq4\$.
- Bagley, Micaela B. и др. (2023). CEERS Epoch 1 NIRCam Imaging: Reduction Methods and Simulations Enabling Early JWST Science Results. *The Astrophysical Journal* 946, c. L12.
- Guo, Yuchen и др. (2023). First Look at z > 1 Bars in the Rest-frame Near-infrared with JWST Early CEERS Imaging. The Astrophysical Journal 945, с. L10.
- Le Conte, Zoe A. и др. (2023). A JWST Investigation into the Bar Fraction at Redshifts 1 < z < 3.
- Kalita, Boris S. μ др. (2023). A Rest-Frame near-IR Study of Clumps in Galaxies at 1 < z < 2 Using JWST/NIRCam: Connection to Galaxy Bulges.
- Menéndez-Delmestre, Karín и др. (2024). Bar Properties as a Function of Wavelength: A Local Baseline with S⁴G for High-Redshift Studies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 527.4, с. 11777—11800.
- Graham, Alister W. и Simon P. Driver (2005). A Concise Reference to (Projected) Sérsic R1/n Quantities, Including Concentration, Profile Slopes, Petrosian Indices, and Kron Magnitudes. *Publications of the Astronomical Society of Australia* 22, c. 118–127.
- Moré, Jorge J. (1978). The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory. B: Numerical Analysis. Под ред. G. A. Watson. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, c. 105–116.
- Krist, John E., Richard N. Hook и Felix Stoehr (2011). 20 Years of Hubble Space Telescope Optical Modeling Using Tiny Tim. 8127, 81270J.
- Aniano, G., B. T. Draine, K. D. Gordon и K. Sandstrom (2011). Common-Resolution Convolution Kernels for Space- and Ground-Based Telescopes. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 123, c. 1218.
- Gao, Hua и Luis C. Ho (2017). An Optimal Strategy for Accurate Bulge-to-disk Decomposition of Disk Galaxies. *The Astrophysical Journal* 845, с. 114.
- Gong, Jun-Yu, Ye-Wei Mao, Hua Gao ¤ Si-Yue Yu (2023). Multiwavelength Bulge-Disk Decomposition for the Galaxy M81 (NGC 3031). I. Morphology. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 267, c. 26.
- Brooks, Alyson и Charlotte Christensen (2016). Bulge Formation via Mergers in Cosmological Simulations. B: *Galactic Bulges*. Под ред. Eija Laurikainen, Reynier Peletier и Dimitri Gadotti. T. 418. Astrophysics and Space Science Library, c. 317.
- Sachdeva, Sonali, Kanak Saha
µ Harinder P. Singh (2017). Growth of Bulges in Disk Galaxies Since
z \sim 1. The Astrophysical Journal 840, c. 79.
- Bruce, V. A. μ др. (2014). The bulge-disc decomposed evolution of massive galaxies at 1 < z < 3 in CANDELS. MNRAS 444.2, c. 1001–1033.
- Hopkins, Philip F. и др. (2010). Mergers and Bulge Formation in ACDM: Which Mergers Matter? ApJ 715.1, c. 202—229.
- Gadotti, Dimitri A. (2009). Structural Properties of Pseudo-Bulges, Classical Bulges and Elliptical Galaxies: A Sloan Digital Sky Survey Perspective. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 393, c. 1531–1552.

- Yu, Si-Yue, Luis C. Ho, Aaron J. Barth II Zhao-Yu Li (2018). The Carnegie-Irvine Galaxy Survey. VI. Quantifying Spiral Structure. *The Astrophysical Journal* 862, c. 13.
- Yu, Si-Yue II Luis C. Ho (2018). Dependence of the Spiral Arms Pitch Angle on Wavelength as a Test of the Density Wave Theory. *The Astrophysical Journal* 869, c. 29.
- Pringle, J. E. и C. L. Dobbs (2019). The Evolution of Pitch Angles of Spiral Arms. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 490, с. 1470–1473.
- Nelson, Erica June и др. (2016). Where Stars Form: Inside-out Growth and Coherent Star Formation from HST H α Maps of 3200 Galaxies across the Main Sequence at 0.7 < z < 1.5. The Astrophysical Journal 828, c. 27.
- Combes, Françoise (2018). Molecular Gas in Distant Galaxies from ALMA Studies. Astronomy and Astrophysics Review 26, c. 5.

Conselice, Christopher J. (2007). Galaxy Mergers and Interactions at High Redshift. 235, c. 381-384.

Shibuya, Takatoshi, Masami Ouchi, Mariko Kubo μ Yuichi Harikane (2016). Morphologies of ~190,000 Galaxies at z = 0.10 Revealed with HST Legacy Data. II. Evolution of Clumpy Galaxies. The Astrophysical Journal 821, c. 72.

Decomposition of 138 galaxies at 0.1 < z < 2.2 with spiral structure

I.V. Chugunov¹, A.A. Marchuk^{1,2}

¹ The Central Astronomical Observatory of the RAS at Pulkovo, ²Saint Petersburg State University

Abstract

Various problems concerning the origin and evolution of spiral arms in galaxies are still remain unsettled. Also, only few studies are devoted to the parameters of the spiral structure in distant galaxies. To investigate this, we have performed decomposition with spiral arms of 138 distant galaxies from COSMOS and CEERS surveys, located at redshift 0.1 < z < 2.2 (up to 10.5 Gyr ago). For all 9 galaxies from CEERS, multi-band images are utilized. As a result, different parameters dependence on redshift and wavelength are studied. In particular, we confirm that pitch angle of spiral arms increases with redshift. For the spiral arm width, we find relationship with redshift, but this value depends much stronger on wavelength. Also, we show that galaxies exhibit slightly more asymmetric spiral structure at higher redshift.