

Изменение ширины спиральных ветвей далеких галактик по данным HST COSMOS

А.А. Марчук^{1,2,*}, В.П. Решетников^{1,2}, А.В. Мосенков^{1,3}, И.В. Чугунов^{1,2},
П.А. Усачев²

¹ГАО РАН

²СПбГУ

³Brigham Young University

* *e-mail*: a.marchuk@spbu.ru

Аннотация

В работе измерены ширины спиральных ветвей 184 видимых "плашмя" галактик в поле COSMOS Космического телескопа Хаббл, наблюдаемых вплоть до красного смещения $z \approx 1$. Спиральные рукава измерялись методом приближения срезов, перпендикулярных направлению рукава, аналитической функцией. Продемонстрировано, что типичные значения параметра a , характеризующего рост ширины рукава с галактоцентрическим расстоянием, для далеких галактик из поля COSMOS в среднем значимо меньше, чем для близких. Среднее значение для галактик из поля COSMOS $\langle a \rangle = 0.06$, в то время как для близких галактик оно составляет 0.12. Показано, что для большинства далеких галактик ширина увеличивается с расстоянием до центра, а обратный тренд, когда ширина уменьшается, наблюдается в 25% случаев. В диапазоне красных смещений z от 1 до 0 обнаружена слабая тенденция к уменьшению параметра a .

Введение

Спиральные рукава являются одной из самых заметных особенностей у дисковых галактик. Несмотря на то, что с момента получения первых изображений спиралей прошло уже почти два века (Rosse, 1850), а активное теоретическое исследование причин их образования имеет уже более чем полувекую историю (Lin, Shu, 1964), спиральные рукава в галактиках и их свойства остаются сравнительно плохо изученными. Важность изучения этих вопросов обусловлена тем, что спиральные галактики составляют большинство в локальной части Вселенной (Conselice, 2006), а также тем значимым влиянием, которое спиральный узор оказывает на глобальные процессы в галактике, такие как темпы звездообразования (Querejeta et al., 2021), перераспределение углового момента в диске (Sellwood, Binney, 2002), его устойчивость (Inoue et al., 2021), химическую эволюцию (Scarano, Lépine, 2013) и т.д. Современные обзоры на эту тему содержатся в работах Sellwood, Masters (2022); Shu (2016); Binney (2020); Dobbs, Baba (2014).

Наличие большого числа спиральных галактик, многие из которых демонстрируют очень контрастный симметричный узор, требует объяснения. Спиральный узор не может быть просто материальным “облаком” из газа и звезд наподобие приливных хвостов, поскольку тогда бы он становился тугозакрученным после нескольких оборотов вокруг диска. Было предложено несколько гипотез относительной физической природы спиральных рукавов, из которых можно выделить четыре основных. Наиболее известной является теория волн плотности в диске галактики, первоначально предложенная для квазистационарного решения (Lin, Shu, 1964). Считается, что этот механизм должен хорошо объяснять спирали в т.н. гранд дизайн галактиках. Помимо неустойчивости в диске, волна плотности с непостоянной угловой скоростью вращения может быть вызвана близким пролетом спутника, как было показано Toomre, Toomre (1972); Pettitt, Wadsley (2018), или влиянием бара (Kaufmann, Contopoulos, 1996; Díaz-García et al., 2019). Наконец, численные модели и некоторые наблюдательные свидетельства указывают на транзиентную и рекуррентную природу спиралей, оказывающихся сравнительно короткоживущими. Глобальный хорошо заметный узор в таких моделях формируется за счет постоянного перезамыкания отдельных частей спирали, вращающихся с той же скоростью что и диск и усиливающихся за счет механизма свингового усиления (Julian, Toomre, 1966; Sellwood, 2012).

Гипотетически, разные механизмы образования спиралей могут действовать в разных галактиках в зависимости от их окружения, свойств, эволюционной стадии. Так, например, возможна ситуация, что для галактик на больших z доминирующим является не тот же механизм, что у близких объектов. Для далеких галактик сложно составить значимую выборку, поэтому подобные исследования спирального узора для них пока немногочисленны. Известно, что спиральные рукава обнаруживаются уже в ранней Вселенной при $z \approx 3$ (Wu et al., 2022), а после запуска JWST уже обнаруживаются кандидаты и среди более далеких объектов. Все известные типы спиральной структуры, такие как гранд дизайн, мультирукавные и флоккулентные галактики, уже присутствовали на $z \geq 1$ (Elmegreen, Elmegreen, 2014). Пространственная плотность спиральных дисковых галактик уменьшается с ростом z (Margalef-Bentabol et al., 2022), а сами спирали становятся более “клочковатыми” (Cowie et al., 1996; Tadaki et al., 2014).

Различить, какой именно механизм ответственен за образование спирального узора в конкретном случае довольно сложно, поскольку следующие из теории наблюдательные тесты весьма немногочисленны. В основном усилия сосредоточены на изучении т.н. угла закрутки спиралей (Yu, Ho, 2019; Hart et al., 2017), в том числе у галактик на больших z (Savchenko, Reshetnikov, 2011). Предложенный в Savchenko et al. (2020) метод позволил промерить помимо углов и другие параметры спиральной структуры, в том числе контраст и ширину отдельных ветвей. Параметры ширины отдельно анализировались в работе Mosenkov et al. (2020). Основной целью данной работы является сравнение ширины спиральных ветвей в близких галактиках с теми, что получены для галактик поля COSMOS на больших z . На текущий день подобные измерения, помимо 155 галактик в выборке Savchenko et al. (2020), проведены менее чем для десятка галактик (Honig, Reid, 2015; Reid et al., 2014; Silva-Villa, Cano Gómez, 2022).

Наша статья организована следующим образом. В Разделе 2 описывается составленная выборка и подготовка данных. В Разделе 3 кратко описан наш метод анализа спиральной структуры в галактиках. В Разделе 4 представлены основные результаты исследования относительно ширины спиральных рукавов в галактиках поля COSMOS. Основные выводы

упомянуты в Заключение в Разделе 5.

Выборка

Выборка далеких галактик со спиральными рукавами на $z \sim 0.5 - 1$ отбиралась из поля COSMOS Космического телескопа Хаббл HST (Koekemoer et al., 2007), полученного в фильтре F814W с помощью камеры ACS. Это поле хорошо изучено и имеет площадь почти 2 ° . Отбор осуществлялся по объектам из работы Mandelbaum et al. (2012) следующим образом. Для всех галактик ярче чем 22.5 зв. величина были определены видимые сжатия b/a с помощью пакета SExtractor (Bertin, Arnouts, 1996). В выборку были включены 7441 галактика с видимым сжатием $b/a \geq 0.7$, которые по визуальной оценке ориентированы практически плашмя. Затем визуально были просмотрены все галактики-кандидаты и отобраны те из них, которые имеют хорошо различимые спиральные рукава, и не являются взаимодействующими, то есть не имеют видимых галактик-спутников или приливных структур. В результате отбора в сформированную выборку вошли 184 объекта. Среднее видимое сжатие b/a для них равно 0.87 ± 0.07 , поэтому галактики в дальнейшем принимались видимыми в положении “плашмя” или близко к такому положению.

Все галактики выборки отождествлялись с данными каталога COSMOS2020 (Weaver et al., 2022), который содержит оценки красных смещений z , оценку массы галактики в солнечных массах M (ее десятичный логарифм), размер эффективного радиуса галактики R_{eff} в пикселях (угловой размер $0.''15/\text{пиксель}$), абсолютную звездную величину и т.д. Фотометрические красные смещения найдены с помощью программы LePhare (Arnouts, Pbert, 2011) и имеют точность определения порядка 1%. Галактики выборки оказались в среднем яркими, массивными и расположены вплоть до $z \sim 1$ (среднее красное смещение $\langle z \rangle \approx 0.5$). Полный анализ свойств отобранных галактик выходит за рамки данной статьи, и может быть найден в соответствующей статье в ПАЖ (скоро будет опубликована) и других статьях (готовятся к публикации).

В качестве дополнительных наборов данных мы выделили еще три выборки. В первую вошли только наиболее массивные галактики с оценкой звездной массы $\lg M \geq 10.5$, которая может считаться относительно полной по расстоянию. Во вторую мы отобрали 102 галактики с выраженным двухрукавным спиральным узором (т.н. гранд дизайн галактики), которые позволяют сравнить свойства между галактиками одного морфологического типа. В качестве выборки сравнения выбраны 155 галактик из работы Savchenko et al. (2020), к которым первоначально и был применен описанный ниже метод анализа спирального узора. Это галактики из локальной Вселенной, среднее расстояние до которых $90 \pm 57 \text{ Мпк}$. Галактики отбирались из каталогов EFIGI (Baillard et al., 2011) и GalaxyZoo (Lintott et al., 2008) по видимому оптическому диаметру, после чего просматривались глазами. Исследовались изображения в трех оптических полосах gri по данным обзора Sloan Digital Sky Survey DR13 (Albaret et al., 2017). В отличие от галактик из поля COSMOS, эти галактики были дополнительно переобработаны, развернуты плашмя, а также вычтен азимутально-усредненный профиль (см. рис.6 в Savchenko et al. 2020 для примера).

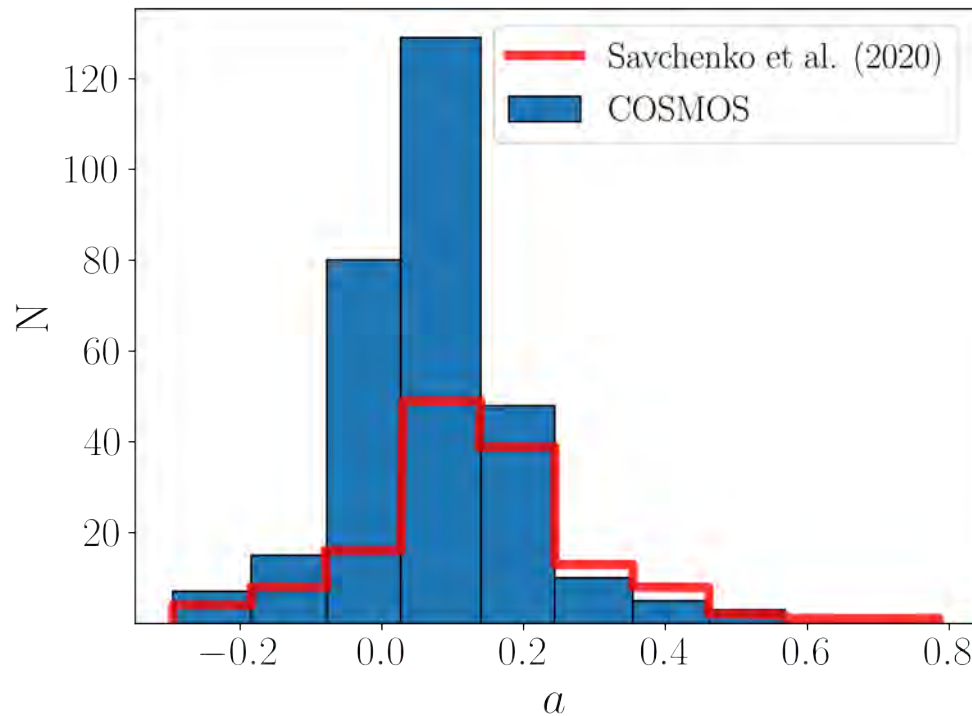


Рис. 1: Распределение параметра a , показывающего наклон роста ширины спирального рукава с увеличением галактоцентрического расстояния.

Анализ спиралей

Анализ спиральных рукавов галактик проводился для редуцированных изображений в полосе F814W из работы Mandelbaum et al. (2012), приведенным к масштабу $0.''03/\text{пиксель}$. Процедура измерения свойств спирального узора аналогична методике из работы Савченко и др. (2020), и кратко приведена ниже. Для каждой галактики мы размечаем индивидуальные спиральные рукава начиная от концов бара или центральных областей, вплоть до внешних областей, где спираль еще видна над уровнем фона. Все спирали должны быть четко различимы, и не содержать ветвлений и самопересечений. Затем по специальному алгоритму в каждой точке рукава строится срез, перпендикулярный направлению спирали, и протянутый между минимумами межукавного пространства. Каждый срез аппроксимируется аналитически суммой линейного профиля и асимметричной гауссовой функции, имеющей вид

$$I(r) = I_0 \times \exp\left[-\frac{(r - r_{peak})^2}{W_1^2 * s + W_2^2 * (1 - s)}\right],$$

где I_0 обозначает центральный поток, $W_{1,2}$ - внутренняя и внешняя полуширины, r_{peak} обозначает положение пика, параметр s равен 0 если $r \leq r_{peak}$, иначе 1 (см. рис.5 в работе Savchenko et al. 2020). Производится свертка получившегося профиля с соответствующим профилем PSF F814W для учета влияния оптической системы на изображения. Подгонка профилей выполняется полуручным методом, а именно выбираются границы профиля и визуально оценивается качество получившегося приближения.

После того, как аппроксимация произведена для всех срезов, мы имеем полностью промеренную модель рукава. Пример проводимой разметки представлен на рис.1 в Mosenkov et al. (2020), а пример результата аппроксимации приведен на рис.6 в Savchenko et al. (2020),

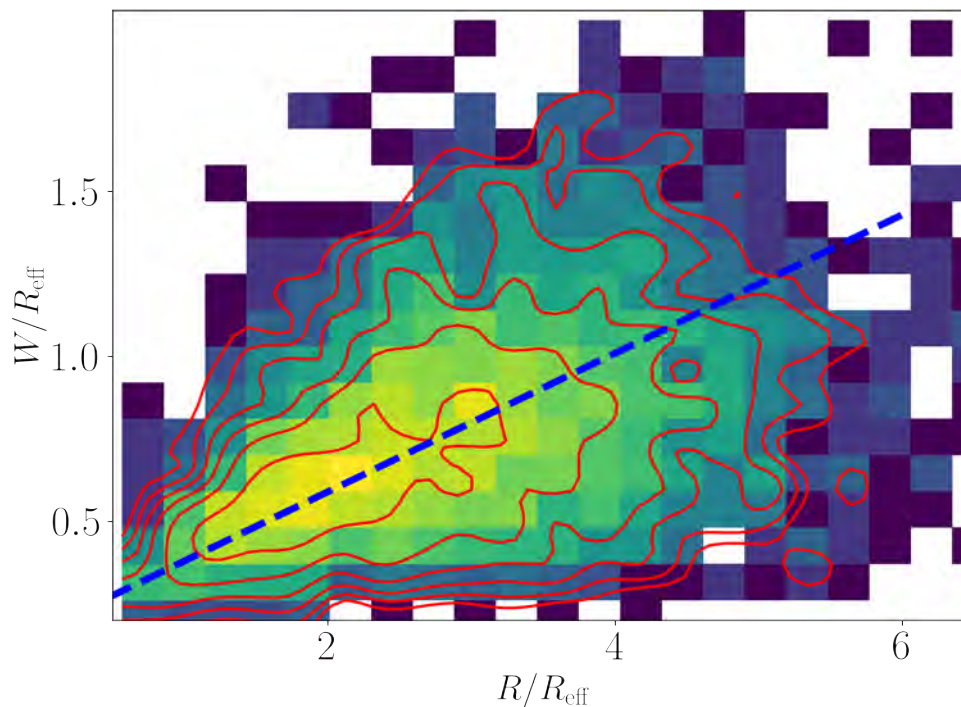


Рис. 2: Величина ширины рукава в зависимости от расстояния до центра галактики, показанная для всей выборки из поля COSMOS. Все расстояния нормированы на соответствующий эффективный радиус R_{eff} . Более светлые области соответствуют большей плотности точек, красные контуры показывают изолинии плотности. Синяя прерывистая линия соответствует лучшему линейному приближению и имеет наклон 0.21.

где положения пиков r_{peak} отмечены точками, а размер маски соответствует полученным полуширинам. Полная ширина спирали в перпендикулярном направлении оценивается как $W = W_1 + W_2$. Полученные данные позволяют получить величину параметра a , который и будет исследоваться дальше в работе, показывающего скорость прироста ширины спирали с расстоянием от центра галактики (см. в качестве примера рис.7 из Савченко и др., 2020). Для этого на основе полученных срезов поперек спирального рукава строится зависимость ширины W спирали от расстояния, находится линейная аппроксимация, и ее угловой коэффициент равен искомой величине a . Среднеквадратичное отклонение от прямой позволяет оценить ошибку определения a и статистическую значимость.

Результаты

На Рисунке 1 показано распределение параметра линейного роста ширины с расстоянием a для анализируемой выборки из поля COSMOS, а также выборки сравнения из работы Savchenko et al. (2020). Распределения построены для одинаковых бинов по a . Видно, что отличия в распределениях есть. Во-первых, средняя величина a для спиральных рукавов из поля COSMOS равна $\langle a \rangle = 0.06 \pm 0.13$, что меньше среднего для близких спиралей $\langle a \rangle = 0.12 \pm 0.14$ по данным Savchenko et al. (2020). Это отличие статистически значимо при сравнении выборок как есть, поскольку доверительный интервал оцененный методом бустрапа (Efron, 1979) не содержит 0. Во-вторых, выборка по параметру a для спиралей из COSMOS заметно сдвинута в сторону отрицательных значений. Так, 25% значений оказываются меньше 0, тогда как для галактик из Savchenko et al. (2020) это значение равно

14%. Также применение теста на нормальность Шапиро-Уилка (SHAPIRO, WILK, 1965) позволяет утверждать, что исследуемая выборка не распределена по Гауссу, тогда как для близких галактик этого нельзя утверждать ($p = 0.42$). В-третьих, можно проверить взяли ли параметр a из одного и того же распределения в основной выборке и в выборке сравнения, применив U-критерий Манна-Уитни (Mann, Whitney, 1947), позволяющий выявлять различия в значении параметра даже между малыми выборками. Величина p -значения в этом критерии меньше 0.01, что позволяет отвергнуть нулевую гипотезу об одинаковости распределения и подтверждает видимые различия.

Таким образом, из Рисунка 1 следует, что скорость роста ширины рукава в галактиках на $z \approx 0.5 - 1.0$ ниже, чем локально, а доля объектов с узкими или даже уменьшающимися вдоль радиуса спиральями — больше. На Рисунке 2 показана зависимость ширины спирали от галактоцентрического расстояния для всей выборки из поля COSMOS как целого, где все размеры нормированы на величину эффективного радиуса галактики R_{eff} , полученного в каталоге Weaver et al. (2022). Видно, что несмотря на большую долю отрицательных a , ширина спирального рукава в среднем растет к краю галактики, как и в локальной Вселенной. На Рисунке 2 также показано наилучшее линейное приближение точек, имеющее наклон 0.21, что ожидаемо меньше аналогичного наклона 0.24, полученного в Mosenkov et al. (2020) на рис. 5 в этой работе. Отметим, что указанная величина наклона для всей выборки больше, чем средний наклон $\langle a \rangle$ распределения на Рисунке 1, поскольку расширяющиеся спирали прослеживаются в среднем до большего расстояния.

Хотя различия с выборкой сравнения и присутствуют, для большинства галактик ширина увеличивается с расстоянием от центра, как и в Savchenko et al. (2020); Mosenkov et al. (2020). Несмотря на то, что зачастую визуально хорошо видно увеличение ширины спиралей с расстоянием в видимом диапазоне (например Foyle et al. 2010; Querejeta et al. 2021) или по ширине сопутствующей пылевой полосы (Lynds, 1970), количественных измерений этого эффекта в литературе довольно мало. Так, Silva-Villa, Cano Gómez (2022) промерили несколькими методами ширину спиралей в NGC 5236 и получили $a \approx 0.04 - 0.05$. Reid et al. (2014) получили сходные значения для ширины спиралей в нашей Галактике по данным наблюдения областей ионизованного водорода. Наконец, Honig, Reid (2015) промерили отдельные сегменты спиральных рукавов в 4 близких галактиках, видимых плашмя, и получили значение $a = 0.08 \pm 0.03$. Все указанные значения, как и выборка Savchenko et al. (2020), определены для довольно близких объектов. Большое количество далеких спиральных галактик, обработанных в этой работе, впервые дает возможность проследить как эта величина меняется с увеличением z и проследить ее возможную эволюцию.

На Рисунке 3 показано изменение величины параметра a с увеличением красного смещения z . Не смотря на большой разброс наблюдательных точек, заметен слабый тренд, более четко проявляющийся после усреднения в отдельных бинах $\Delta z = 0.25$. Видно, что до $z \approx 0.6 - 0.8$ средний темп роста ширины спиралей к краю галактик увеличивается, а количество примеров объектов с $a < 0$ уменьшается. Для галактик на больших красных смещениях тренд меняет свое направление, что может быть связано с влиянием наблюдательной селекции, к тому же количество так далеко расположенных объектов мало. Одновременно с этим может влиять тот факт, что диски в далеких галактиках становятся более иррегулярными (Cowie et al., 1996; Tadaki et al., 2014), “размывая” спиральный узор. Различия в распределении a и глобальный тренд также становятся более видны, если взять крупные выборки до $z = 0.5$ и после. При этом использование сравнительно полной подвыборки

массивных галактик с $lg M \geq 10.5$ или только двухрукавных (см. Раздел про выборки) вид тренда в целом не меняет.

Рисунок 3 также содержит данные, полученные для галактик в локальной Вселенной из работ Savchenko et al. (2020); Honig, Reid (2015); Reid et al. (2014); Silva-Villa, Cano Gómez (2022). Видно, что измеренные для близких галактик a относительно согласуются между собой и не ложатся напрямую на показанный тренд, демонстрируя большие значения. Причин тому может быть несколько, начиная от влияния K -поправки, которая приводит к тому, что все объекты мы видим в несколько разных длинах волн и ширины в этих полосах них могут не совпадать, и заканчивая неучтенными эффектами влияния проекции и PSF. В любом случае, для окончательного разрешения этого вопроса необходимо более корректное исследование с большей и полной выборкой, а также проведенные симуляции с “удалением” локальных объектов на большие z и последующей промеркой рукавов в них для выявления систематики (например как это сделано в Kruk et al. 2019).

Как видно, для галактик на больших z в нашем анализе для большей части выборки ширина растет с увеличением расстояния до центра. Такое поведение предсказывается механизмом свингового усиления, при котором после перезамыкания и усиления рукава часть вещества выбрасывается наружу (см. рисунки в классической работе Toomre 1981). В этом смысле полученный тренд может отражать тот факт, что галактики на больших z демонстрируют больший коэффициент усиления, который связан в том числе с плотностью вещества в их дисках. Проблема в том, что для остальных теорий образования спирального узора нет никаких четких предсказаний насчет поведения ширины спирального узора, а сам механизм свингового усиления так или иначе используется во всех основных теориях (например для приливного взаимодействия см. Hernquist 1990, для волн плотности см. Toomre 1981). Этот вопрос, можно ли различить механизм образования спиралей по наблюдательным проявлениям, требует решения в будущем. Возможно здесь окажется продуктивным подход из работы Dobbs, Pringle (2010), где сделана попытка исследовать численные модели галактик со спиралью, образованными в рамках разных теорий их генерации. Такого рода исследование должно также учитывать кинематику диска галактики, которая может уменьшать или увеличивать ширину спиральных рукавов (Kennicutt, Hodge, 1982).

Заключение

В работе впервые рассмотрены свойства ширины спирального узора для выборки далеких невзаимодействующих спиральных галактик, расположенных близко к положению “плашмя”, найденных в поле COSMOS Космического телескопа Хаббл. В выборку вошли 184 галактики, для которых параметры спиральной структуры оценивались методом перпендикулярных срезов, предложенным в работе Savchenko et al. (2020). Выборка промеренных спиралей для близких галактик из указанной работы использовалась как выборка сравнения. Было обнаружено, что величина параметра a , показывающего как меняется ширина спирали с расстоянием до центра галактики, для галактик из поля COSMOS статистически меньше, чем для близких галактик. Так, средняя величина $\langle a \rangle = 0.06$ против $\langle a \rangle = 0.12$ для галактик из Savchenko et al. (2020) при сравнимых ошибках. Показано также, что распределение параметра наклона a для этих двух выборок не распределено по одному закону, а доля галактик с убывающей вдоль рукава шириной ($a < 0$) для далеких галактик больше (25% против 16%).

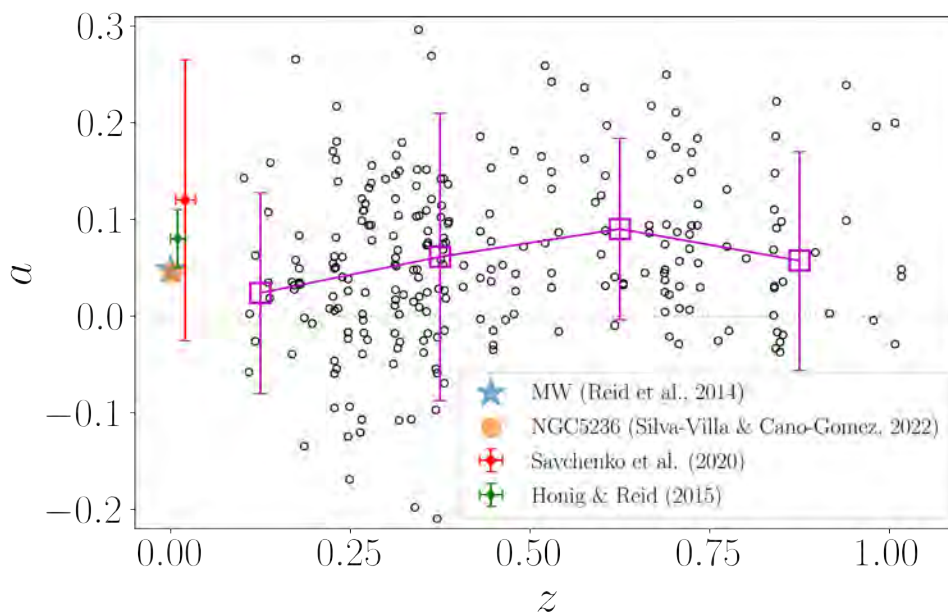


Рис. 3: Зависимость величины параметра наклона a от красного смещения галактики (черные круги). Сиреневые квадраты с барами показывают средние значения и ошибку a в z -бинах размером в 0.25. Отдельно указаны результаты из Savchenko et al. (2020), для нашей Галактики из Reid et al. (2014), для 4-х близких галактик из Honig, Reid (2015) и для NGC 5236 по данным Silva-Villa, Cano Gómez (2022).

Впервые продемонстрирован слабый тренд, свидетельствующий о постепенном увеличении величины a с ростом z вплоть до красных смещений 0.6-0.8. Показанный тренд сохраняется при рассмотрении подмножеств исходной выборки с постоянным числом рукавов или только массивных галактик. Проведено сравнение с измерениями галактик в локальной Вселенной, доступных из литературы. Указанный тренд может свидетельствовать об изменении свойств галактик за последние 7 млрд. лет, регулирующих спиральный узор, или о различии в механизмах генерации спиралей в близких и далеких галактиках.

Тем не менее, для большинства галактик вплоть до $z \approx 1$ измеренные ширины спиральных рукавов в среднем растут к краю галактики, что может косвенно указывать на наличие механизма свингового усиления в этих галактиках уже в эти эпохи формирования. Полученные нами результаты основаны на относительно небольшой выборке объектов и нуждаются в подтверждении, желательно на полной выборке с дополнительным моделированием и учетом эффектов наклона диска. Вероятно доступные в скором времени глубокие поля космического телескопа Джеймса Уэбба дадут богатый наблюдательный материал для подобного исследования.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант 22-22-00483.

Список литературы

Albareti Franco D., Allende Prieto Carlos, Almeida Andres, Anders Friedrich, Anderson Scott, Andrews Brett H., Aragón-Salamanca Alfonso, Argudo-Fernández Maria, Armengaud Eric, Aubourg ... The 13th Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Spectroscopic Data

- from the SDSS-IV Survey Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory // *ApJS*. XII 2017. 233, 2. 25.
- Arnouts S., Ilbert O.* LePHARE: Photometric Analysis for Redshift Estimate. VIII 2011. ascl:1108.009.
- Baillard A., Bertin E., de Lapparent V., Fouqué P., Arnouts S., Mellier Y., Pelló R., Leborgne J. F., Prugniel P., Makarov D., Makarova L., McCracken H. J., Bijaoui A., Tasca L.* The FIGI catalogue of 4458 nearby galaxies with detailed morphology // *A&A*. VIII 2011. 532. A74.
- Bertin E., Arnouts S.* SExtractor: Software for source extraction. // *A&AS*. VI 1996. 117. 393–404.
- Binney James.* The shearing sheet and swing amplification revisited // *MNRAS*. VII 2020. 496, 1. 767–783.
- Conselice Christopher J.* The fundamental properties of galaxies and a new galaxy classification system // *MNRAS*. XII 2006. 373, 4. 1389–1408.
- Cowie Lennox L., Songaila Antoinette, Hu Esther M., Cohen J. G.* New Insight on Galaxy Formation and Evolution From Keck Spectroscopy of the Hawaii Deep Fields // *AJ*. IX 1996. 112. 839.
- Díaz-García S., Salo H., Knapen J. H., Herrera-Endoqui M.* The shapes of spiral arms in the S⁴G survey and their connection with stellar bars // *A&A*. XI 2019. 631. A94.
- Dobbs C. L., Pringle J. E.* Age distributions of star clusters in spiral and barred galaxies as a test for theories of spiral structure // *MNRAS*. XI 2010. 409, 1. 396–404.
- Dobbs Clare, Baba Junichi.* Dawes Review 4: Spiral Structures in Disc Galaxies // *PASA*. IX 2014. 31. e035.
- Efron B.* Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife // *The Annals of Statistics*. 1979. 7, 1. 1 – 26.
- Elmegreen Debra Meloy, Elmegreen Bruce G.* The Onset of Spiral Structure in the Universe // *ApJ*. I 2014. 781, 1. 11.
- Foyle K., Rix H. W., Walter F., Leroy A. K.* Arm and Interarm Star Formation in Spiral Galaxies // *ApJ*. XII 2010. 725, 1. 534–541.
- Hart Ross E., Bamford Steven P., Hayes Wayne B., Cardamone Carolin N., Keel William C., Kruk Sandor J., Lintott Chris J., Masters Karen L., Simmons Brooke D., Smethurst Rebecca J.* Galaxy Zoo and SPARCFIRE: constraints on spiral arm formation mechanisms from spiral arm number and pitch angles // *MNRAS*. XII 2017. 472, 2. 2263–2279.
- Hernquist L.* Dynamical status of M51. // *Dynamics and Interactions of Galaxies*. 1990. 108–117.
- Honig Z. N., Reid M. J.* Characteristics of Spiral Arms in Late-type Galaxies // *ApJ*. II 2015. 800, 1. 53.

- Inoue Shigeeki, Takagi Toshinobu, Miyazaki Atsushi, Cooper Erin Mentuch, Egusa Fumi, Yajima Hidenobu.* Instability analysis for spiral arms of local galaxies: M51, NGC 3627, and NGC 628 // MNRAS. IX 2021. 506, 1. 84–97.
- Julian William H., Toomre Alar.* Non-Axisymmetric Responses of Differentially Rotating Disks of Stars // ApJ. XII 1966. 146. 810.
- Kaufmann D. E., Contopoulos G.* Self-consistent models of barred spiral galaxies. // A&A. V 1996. 309. 381–402.
- Kennicutt Jr. R., Hodge P.* A comparison of measured spiral arm properties with model predictions // ApJ. II 1982. 253. 101–107.
- Koekemoer A. M., Aussel H., Calzetti D., Capak P., Giavalisco M., Kneib J. P., Leauthaud A., Le Fèvre O., McCracken H. J., Massey R., Mobasher B., Rhodes J., Scoville N., Shopbell P. L.* The COSMOS Survey: Hubble Space Telescope Advanced Camera for Surveys Observations and Data Processing // ApJS. IX 2007. 172, 1. 196–202.
- Kruk Sandor J., Erwin Peter, Debattista Victor P., Lintott Chris.* Revealing the cosmic evolution of boxy/peanut-shaped bulges from HST COSMOS and SDSS // MNRAS. XII 2019. 490, 4. 4721–4739.
- Lin C. C., Shu Frank H.* On the Spiral Structure of Disk Galaxies. // ApJ. VIII 1964. 140. 646.
- Lintott Chris J., Schawinski Kevin, Slosar Anže, Land Kate, Bamford Steven, Thomas Daniel, Raddick M. Jordan, Nichol Robert C., Szalay Alex, Andreescu Dan, Murray Phil, Vandenberg Jan.* Galaxy Zoo: morphologies derived from visual inspection of galaxies from the Sloan Digital Sky Survey // MNRAS. IX 2008. 389, 3. 1179–1189.
- Lynds B. T.* The Distribution of Dark Nebulae in Late-Type Spirals // The Spiral Structure of our Galaxy. 38. I 1970. 26.
- Mandelbaum Rachel, Hirata Christopher M., Leauthaud Alexie, Massey Richard J., Rhodes Jason.* Precision simulation of ground-based lensing data using observations from space // MNRAS. II 2012. 420, 2. 1518–1540.
- Mann H. B., Whitney D. R.* On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other // The Annals of Mathematical Statistics. 1947. 18, 1. 50 – 60.
- Margalef-Bentabol Berta, Conselice Christopher J., Haeussler Boris, Casteels Kevin, Lintott Chris, Masters Karen, Simmons Brooke.* Observations of the initial formation and evolution of spiral galaxies at $1 < z < 3$ in the CANDELS fields // MNRAS. III 2022. 511, 1. 1502–1517.
- Mosenkov Aleksandr, Savchenko Sergey, Marchuk Alexander.* Investigation of the parameters of spiral pattern in galaxies: the arm width // Research in Astronomy and Astrophysics. VIII 2020. 20, 8. 120.
- Pettitt Alex R., Wadsley J. W.* Bars and spirals in tidal interactions with an ensemble of galaxy mass models // MNRAS. III 2018. 474, 4. 5645–5671.

- Querejeta M., Schinnerer E., Meidt S., Sun J., Leroy A. K., Emsellem E., Klessen R. S., Muñoz-Mateos J. C., Salo H., Laurikainen E., Bešlić I., Blanc G. A., Chevance M., Dale D. A., Eibensteiner C., Faesi C., García-Rodríguez A., Glover S. C. O., Grasha K., Henshaw J., Herrera C., Hughes A., Kreckel K., Kruijssen J. M. D., Liu D., Murphy E. J., Pan H. A., Pety J., Razza A., Rosolowsky E., Saito T., Schruba A., Usero A., Watkins E. J., Williams T. G.* Stellar structures, molecular gas, and star formation across the PHANGS sample of nearby galaxies // *A&A*. XII 2021. 656. A133.
- Reid M. J., Menten K. M., Brunthaler A., Zheng X. W., Dame T. M., Xu Y., Wu Y., Zhang B., Sanna A., Sato M., Hachisuka K., Choi Y. K., Immer K., Moscadelli L., Rygl K. L. J., Bartkiewicz A.* Trigonometric Parallaxes of High Mass Star Forming Regions: The Structure and Kinematics of the Milky Way // *ApJ*. III 2014. 783, 2. 130.
- Rosse The Earl Of.* Observations on the Nebulae // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series I*. I 1850. 140. 499–514.
- SHAPIRO S. S., WILK M. B.* An analysis of variance test for normality (complete samples) // *Biometrika*. dec 1965. 52, 3-4. 591–611.
- Savchenko S. S., Reshetnikov V. P.* Pitch angles of distant spiral galaxies // *Astronomy Letters*. XII 2011. 37, 12. 817–825.
- Savchenko Sergey, Marchuk Alexander, Mosenkov Aleksandr, Grishunin Konstantin.* A multiwavelength study of spiral structure in galaxies. I. General characteristics in the optical // *MNRAS*. III 2020. 493, 1. 390–409.
- Scarano S., Lépine J. R. D.* Radial metallicity distribution breaks at corotation radius in spiral galaxies // *MNRAS*. I 2013. 428, 1. 625–640.
- Sellwood J. A.* Spiral Instabilities in N-body Simulations. I. Emergence from Noise // *ApJ*. V 2012. 751, 1. 44.
- Sellwood J. A., Binney J. J.* Radial mixing in galactic discs // *MNRAS*. XI 2002. 336, 3. 785–796.
- Sellwood J. A., Masters Karen L.* Spirals in Galaxies // *ARA&A*. VIII 2022. 60.
- Shu Frank H.* Six Decades of Spiral Density Wave Theory // *ARA&A*. IX 2016. 54. 667–724.
- Silva-Villa E., Cano Gómez X.* NGC 5236's stars as tracers of arms and arm widths in spiral galaxies // *MNRAS*. VII 2022. 514, 1. L22–L26.
- Tadaki Ken-ichi, Kodama Tadayuki, Tanaka Ichi, Hayashi Masao, Koyama Yusei, Shimakawa Rhythm.* The Nature of H α -selected Galaxies at $z > 2$. II. Clumpy Galaxies and Compact Star-forming Galaxies // *ApJ*. I 2014. 780, 1. 77.
- Toomre A.* What amplifies the spirals // *Structure and Evolution of Normal Galaxies*. I 1981. 111–136.
- Toomre Alar, Toomre Juri.* Galactic Bridges and Tails // *ApJ*. XII 1972. 178. 623–666.

Weaver J. R., Kauffmann O. B., Ilbert O., McCracken H. J., Moneti A., Toft S., Brammer G., Shuntov M., COSMOS2020: A Panchromatic View of the Universe to $z = 10$ from Two Complementary Catalogs // *ApJS*. I 2022. 258, 1. 11.

Wu Yunjing, Cai Zheng, Sun Fengwu, Bian Fuyan, Lin Xiaojing, Li Zihao, Li Mingyu, Bauer Franz E., Egami Eiichi, Fan Xiaohui, González-López Jorge, Li Jianan, Wang Feige, Yang Jinyi, Zhang Shiwu, Zou Siwei. The Identification of a Dusty Grand Design Spiral Galaxy at $z = 3.06$ with JWST and ALMA // *arXiv e-prints*. VIII 2022. arXiv:2208.08473.

Yu Si-Yue, Ho Luis C. On the Connection between Spiral Arm Pitch Angle and Galaxy Properties // *ApJ*. II 2019. 871, 2. 194.

Width variation in the spiral arms of distant galaxies from HST COSMOS field

A.A. Marchuk^{1,2,*}, V.P. Reshetnikov^{1,2}, A.V. Mosenkov^{1,3}, I.V. Chugunov^{1,2},
P.A. Usachev²

¹Central (Pulkovo) Astronomical Observatory of RAS, Russia

²St.Petersburg State University, Russia

³Brigham Young University, USA

* *e-mail:* a.marchuk@spbu.ru

Abstract

We measured the slope of width growth with radius for spiral arms in 184 galaxies from the HST COSMOS field. The galaxies are viewed in an orientation close to face-on, and observed out to redshift $z \approx 1$. The spiral arms are measured using an approximation of slices perpendicular to the arm originally proposed in Savchenko et al. (2020). It is shown that the typical values of the a parameter, which defines the increase of the arm width with the galactocentric distance, are, on average, significantly smaller for distant galaxies from the COSMOS field than for local ones. The average value is $\langle a \rangle = 0.06$. It is shown that for the most galaxies, the width still increases with distance, and the opposite trend is observed for 25% of the cases. In the range of redshifts from 1 to 0, we observe a slight tendency for the parameter a to decrease.