

## ЭВОЛЮЦИЯ СПИРАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ГАЛАКТИК ПО ДАННЫМ ПОЛЯ HST COSMOS

© 2022 г. В. П. Решетников<sup>1,2\*</sup>, А. А. Марчук<sup>1,2</sup>,  
И. В. Чугунов<sup>1,2</sup>, П. А. Усачев<sup>1,2</sup>, А. В. Мосенков<sup>3,2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Университет Бригама Янга, США

Поступила в редакцию 30.09.2022 г.

После доработки 31.11.2022 г.; принята к публикации 15.11.2022 г.

Выполнено исследование угла закрутки ( $\psi$ ) спиральных ветвей галактик в поле COSMOS Космического телескопа Хаббл. Выборка состоит из 102 видимых плашмя галактик с двухрукавным узором, находящихся на среднем красном смещении  $\langle z \rangle \approx 0.5$ . Показано, что типичные значения  $\psi$  у ветвей далеких галактик близки к значениям для близких спиральных галактик. В пределах одной галактики разброс значений  $\psi$  для разных ветвей составляет, в среднем, половину среднего угла закрутки. В диапазоне  $z$  от 1 до 0 обнаружена тенденция к уменьшению значения  $\psi$ . Анализ распределений угла  $\psi$  у галактик на разных красных смещениях не противоречит предположению, что у большинства галактик при  $z \leq 0.5$  спиральные ветви имеют приливное происхождение или они возникли за счет транзитных рекуррентных неустойчивостей в их дисках.

*Ключевые слова:* галактики, фотометрия, эволюция.

DOI: 10.31857/S0320010822110122

### ВВЕДЕНИЕ

Спиральные ветви являются наиболее заметной особенностью у большинства ярких галактик в окружающей нас части Вселенной. Так, в локальной Вселенной доля таких галактик составляет  $\sim 75\%$  от всех галактик ярче абсолютной звездной величины  $-20^m$  в полосе  $B$  (Конселис, 2006). Исследованию спирального узора галактик посвящено огромное количество работ (см. недавний обзор Селлвуда и Мастерс, 2022), однако многие вопросы, связанные с формированием и поддержанием существования спиральных ветвей, а также с их наблюдательными проявлениями остаются плохо изученными. Важность изучения этих вопросов обусловлена тем значимым влиянием, которое спиральный узор оказывает на глобальные процессы в галактике, например, на перераспределение углового момента в диске (Селлвуд и Бинни, 2002), его устойчивость (Иноуэ и др., 2021), темп звездообразования (Керехета и др., 2021), химическую эволюцию (Скарано, Лепин, 2013) и т.д.

Исследования спирального узора далеких галактик пока немногочисленны. Известно, что знакомые по близкой Вселенной типы спиральной

структуры (grand-design, флоккулентные, множественные ветви) уже присутствовали на  $z \geq 1$  (Элмегрин, Элмегрин, 2014). Пространственная плотность спиральных галактик падает с ростом  $z$  (между  $z = 0.5$  и  $z = 2.5$  она уменьшается примерно на порядок — Маргалев-Бентабол и др., 2022), однако объекты с крупномасштабным спиральным узором встречаются даже на  $z \approx 3$  (Ву и др., 2022).

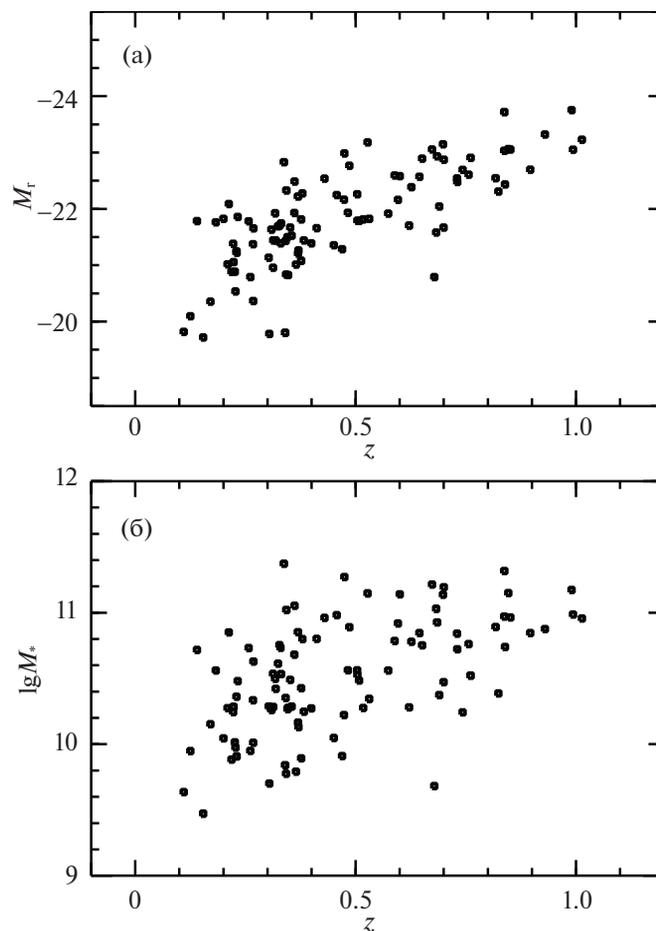
Основной целью нашей работы является исследование углов закрутки у сотни двухрукавных спиральных галактик вплоть до красного смещения  $z \sim 1$ .

Все числовые величины в статье приведены для космологической модели с постоянной Хаббла  $70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$  и  $\Omega_m = 0.3$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.7$ .

### ВЫБОРКА ГАЛАКТИК

Для изучения структуры далеких спиральных галактик мы рассмотрели поле COSMOS Космического телескопа Хаббл (Коекмоер и др., 2007). Изображение этого поля, имеющего площадь почти  $2 \square^\circ$ , было получено в фильтре F814W с помощью камеры ACS. Для отбора объектов в COSMOS мы использовали выборку из 26 113

\* Электронный адрес: v.reshetnikov@spbu.ru



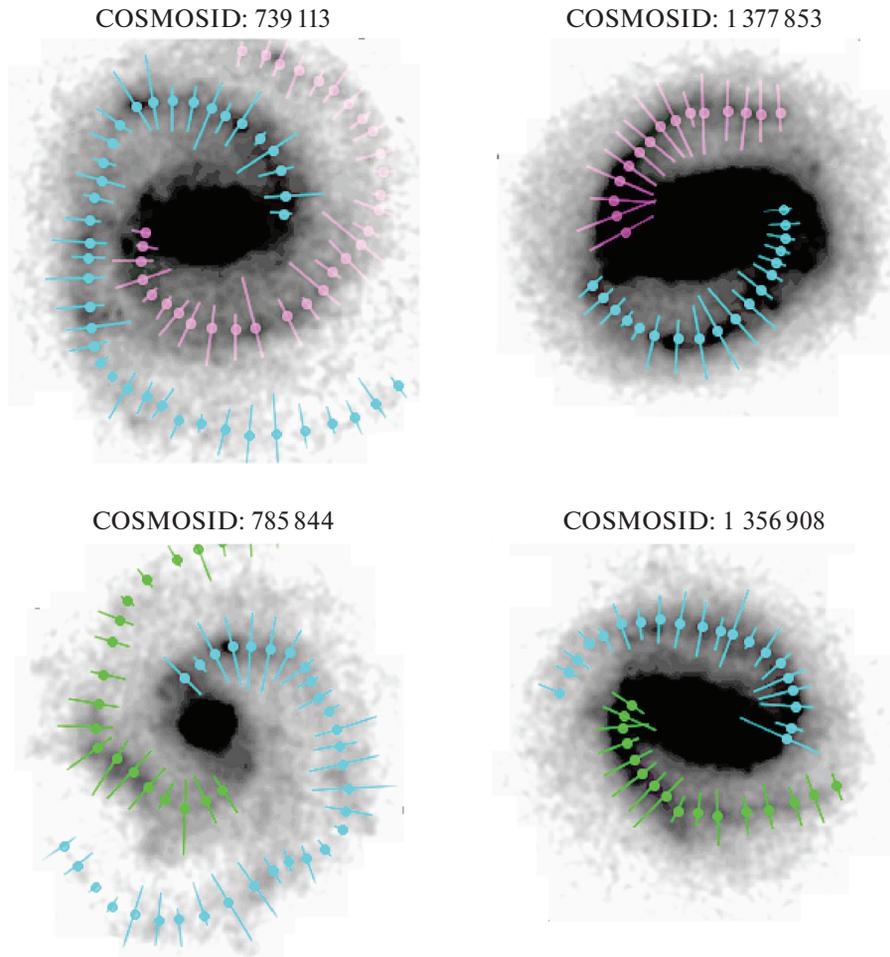
**Рис. 1.** Зависимость абсолютной звездной величины спиральных галактик в фильтре  $r$  (а) и их звездной массы (б) от красного смещения.

ярких ( $F814W < 22^m5$ ) галактик в этом поле, представленную в работе Мандельбаум и др. (2012). Для всех объектов выборки с помощью пакета SExtractor (Бертин, Арно, 1996) были определены видимые сжатия ( $b/a$ ) и отобраны 7441 галактика с  $b/a \geq 0.7$ . Далее был выполнен визуальный просмотр изображений галактик, и сформирована выборка из 184 видимых практически плашмя спиральных галактик с хорошо различимыми спиральными ветвями. В ходе последующего анализа в окончательной выборке были оставлены 102 галактики с выраженным двухрукавным спиральным узором. Дальнейшая работа по анализу спиральных ветвей галактик (см. следующий раздел статьи) проводилась по представленным в работе Мандельбаум и др. (2012) редуцированным и приведенным к масштабу  $0''.03/\text{пиксел}$  изображениям галактик.

Галактики выборки были отождествлены с каталогом COSMOS2020 (Вивер и др., 2022). Для каждого объекта из COSMOS2020 были взяты найденные с помощью программы LePhare (Илберт и др., 2006) фотометрические красные сме-

щения (их точность составляет  $\sim 1\%$ ), абсолютные звездные величины в фильтре  $r$  (Subaru HSC) и оценки массы звезд в солнечных массах ( $M_*$ ). На рис. 1а,б показано положение галактик на плоскостях абсолютная звездная величина ( $M_r$ ) — красное смещение ( $z$ ) и звездная масса галактики —  $z$ . На рисунках видно, что в нашу выборку попали галактики вплоть до  $z \approx 1$  (среднее красное смещение выборки  $\langle z \rangle = 0.47 \pm 0.23$ ), причем галактики являются в среднем яркими  $\langle M_r \rangle = -21^m85 \pm 0^m88$  и массивными  $\langle \lg M_* \rangle = 10.52 \pm 0.43$ . На рис. 1а,б также хорошо видна наблюдательная селекция — светимость и масса попавших в выборку объектов растут с увеличением  $z$ . Если ограничиться только наиболее массивными галактиками с  $\lg M_* \geq 10.5$  ( $M_* \geq 3 \times 10^{10} M_\odot$ ), то такие объекты выделяются во всем диапазоне  $z$ , и соответствующая подвыборка является относительно полной.

Как было указано выше, в выборку были включены галактики с  $b/a \geq 0.7$ , которые по визуальной оценке ориентированы практически плашмя. Среднее видимое сжатие объектов в окончательной выборке оказалось равным  $\langle b/a \rangle = 0.87 \pm 0.065$ .



**Рис. 2.** Примеры галактик из выборки с промеренными спиральями. Точками отмечены положения пиков яркости, отрезки соответствуют полуширине спиралей.

В дальнейшем анализе поправка за возможный наклон плоскости диска не учитывалась, и галактики принимались видимыми точно “плашмя”.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СПИРАЛЬНЫХ ВЕТВЕЙ

Процедура измерения характеристик спирального узора аналогична методике из работы Савченко и др. (2020), и кратко описана ниже. Для каждой галактики мы размечаем индивидуальные спиральные рукава, начиная от концов бара или центральных областей и вплоть до внешних областей, где спираль еще видна над уровнем фона. Все спирали должны быть хорошо различимы и не должны 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 асимметричной гауссо-

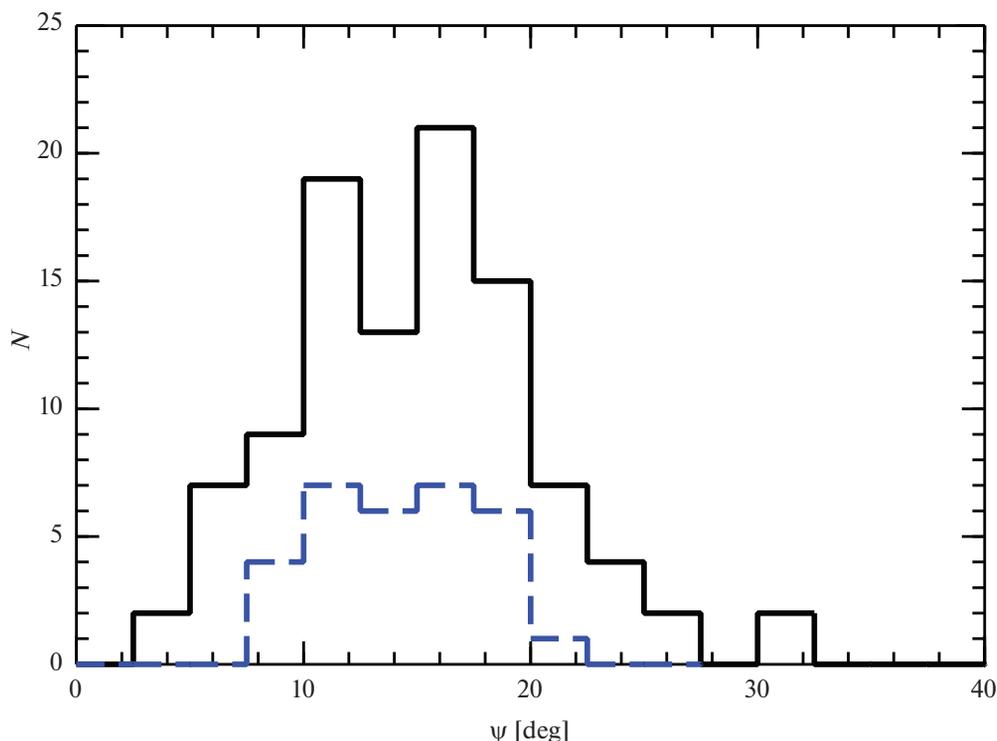
вой функцией, имеющей вид

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

где  $I_0$  обозначает центральный поток,  $W_{1,2}$  — внутренняя и внешняя полуширины,  $r$  — расстояние вдоль среза,  $r_{\text{peak}}$  обозначает положение пика яркости, параметр  $s$  равен 0 если  $r \leq r_{\text{peak}}$ , иначе 1 (см. рис. 5 в работе Савченко и др., 2020). Производится свертка получившегося профиля с соответствующим профилем PSF F814W для учета влияния оптической системы на изображения.

После того, как аппроксимация произведена для всех срезов, мы имеем полностью промеренную модель рукава. Примеры получившейся разметки после аппроксимации для 4 галактик приведены на рис. 2. Положения пиков  $r_{\text{peak}}$  отмечены точками, а размер отрезка соответствует полученным полуширинам.

Угол закрутки  $\psi$  оценивается на основе полученных срезов поперек спирального рукава. Для



**Рис. 3.** Распределение галактик из поля COSMOS по средним углам закрутки (сплошная линия); соответствующее распределение для галактик из трех глубоких полей Космического телескопа Хаббл изображено штриховой линией (Савченко, Решетников, 2011).

этого координаты положения пиков вдоль спирали наносятся на плоскость  $\log r \div \varphi$ , где  $\varphi$  — это полярный угол, и затем находится линейная регрессия. Угол наклона линейной зависимости равен искомому углу закрутки  $\psi$ , а среднев квадратическое отклонение от прямой дает оценку ошибки определения угла закрутки  $\sigma_\psi$ . В итоге у 99 галактик выборки были найдены углы закрутки для обеих спиральных ветвей, у трех галактик измерения удалось выполнить лишь для одной из ветвей.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Углы закрутки

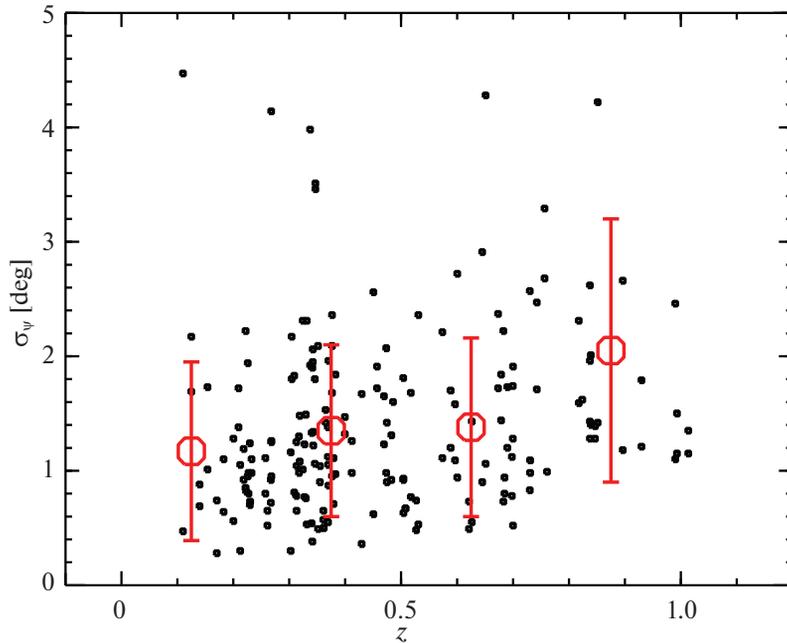
На рис. 3 показано распределение усредненных по двум ветвям углов закрутки для 99 галактик выборки, у которых есть измерения для обеих ветвей. Для сравнения на этом же рисунке изображено распределение для 31 галактики из трех глубоких полей Космического телескопа Хаббл (HDF-N, HDF-S, HUDF) из работы Савченко и Решетникова (2011). Галактики из статьи Савченко и Решетникова (2011) находятся на среднем красном смещении  $\langle z \rangle = 0.69 \pm 0.30$ , и их углы закрутки, найденные на основе Фурье-анализа изображений, измерены в фильтре F606W. Как видно на рис. 3, распределения для двух выборок далеких галактик, у которых углы закрутки определены разными

методами, хорошо согласуются. Так, среднее значение угла закрутки для двухрукавных спиральных галактик из поля COSMOS составляет  $\langle \psi \rangle = 14^\circ 85 \pm 5^\circ 51$ , для галактик из работы Савченко и Решетникова (2011)  $\langle \psi \rangle = 14^\circ 1 \pm 3^\circ 5$ . Если рассмотреть все измеренные ветви в COSMOS по отдельности, то для них среднее значение составляет  $\langle \psi \rangle = 15^\circ 02 \pm 7^\circ 05$  (201 спиральная ветвь).

Сравним приведенные выше средние значения  $\psi$  с данными для близких галактик.

Например,  
 $\langle \psi \rangle = 15^\circ 2 \pm 3^\circ 7$  (50 grand-design галактик, фильтр  $g$ ; Савченко, Решетников, 2013),  
 $\langle \psi \rangle = 18^\circ 3 \pm 7^\circ 5$  (79 галактик, фильтр  $r$ ; Ю, Хо, 2019),  
 $\langle \psi \rangle = 14^\circ 8 \pm 5^\circ 3$  (155 галактик, фильтр  $r$ ; Савченко и др., 2020).

У 75 близких grand-design спиральных галактик из работы Диаз-Гарсия и др. (2019) угол закрутки показывает зависимость от морфологического типа — он меняется от  $13^\circ 6 \pm 1^\circ 6$  (S0/a–Sab) до  $19^\circ 7 \pm 2^\circ 5$  (Scd–Sdm) (измерения проведены на длине волны 3.6 мкм). Сходная зависимость от типа прослеживается и в других работах (например, Савченко и др., 2020). В большой выборке объектов (4378 галактик, фильтр  $r$ ; Ю, Хо, 2020) угол закрутки варьируется от  $\sim 10^\circ$  для галактик



**Рис. 4.** Зависимость среднеквадратического отклонения угла закрутки спиральной ветви от красного смещения галактики. Кружки с барами — средние значения в бинах по  $z$  0–0.25, 0.25–0.5, 0.5–0.75 и 0.75–1.0.

типа Sa до  $\sim 30^\circ$  для Sd (см. рис. 10 в статье Ю, Хо, 2020).

Таким образом, типичные значения углов закрутки у галактик на  $z \sim 0.5-1$  близки к значениям для галактик в окружающей части Вселенной.

#### Разброс угла закрутки

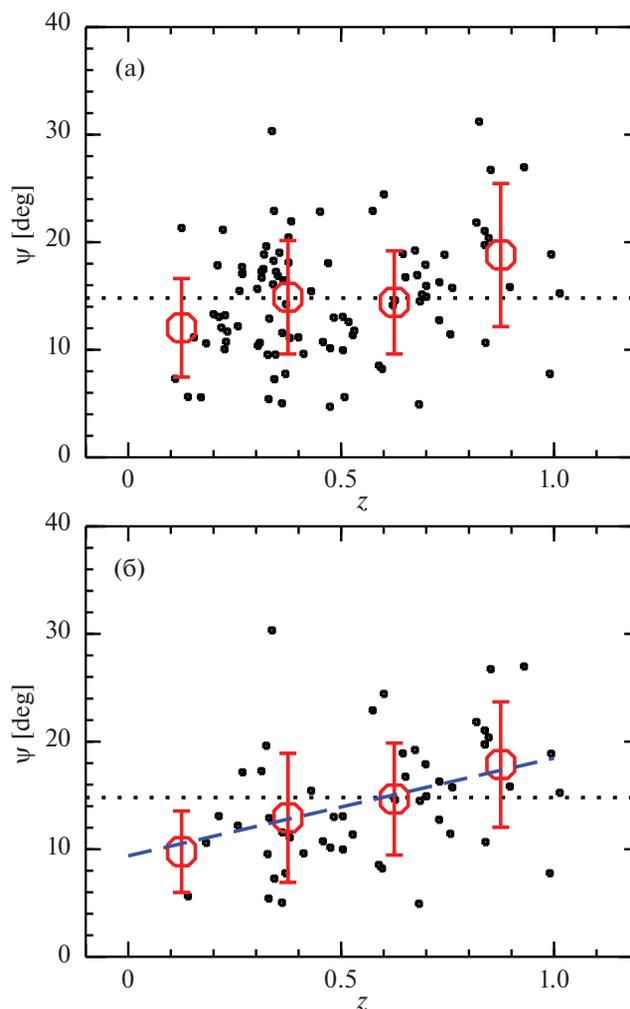
В пределах одной галактики спиральные ветви показывают довольно большой разброс значений угла закрутки. Среднее значение разности величин  $\psi$  для двух спиральных ветвей объектов нашей выборки составляет  $\Delta\psi = |\psi_1 - \psi_2| = 6^\circ 3 \pm 5^\circ 3$ . Средняя относительная вариация угла закрутки  $\Delta\psi / \langle \psi \rangle = 0.48 \pm 0.41$ . Таким образом, типичный разброс значений  $\psi$  для разных ветвей в пределах одной галактики достигает половины величины среднего угла закрутки. Радиальные вариации  $\psi$  в пределах одной и той же ветви могут достигать сравнимых значений (Савченко и др., 2020).

На рис. 4 для всех измеренных спиральных ветвей изображена зависимость ошибки определения угла закрутки ( $\sigma_\psi$ ) от красного смещения галактики. Разброс точек на рисунке очень большой, но прослеживается определенная тенденция к росту значений  $\sigma_\psi$  с увеличением  $z$ . Это может означать как влияние наблюдательной селекции (сложность измерений у более далеких галактик), так и большую иррегулярность, “комковатость” (clumpiness) ветвей у далеких галактик (Элмегрин и др., 2007).

#### Эволюция угла закрутки?

Изменение значений средних углов закрутки спиральных ветвей галактик с красным смещением изображено на рис. 5а,б. Несмотря на большой разброс наблюдательных точек, на рис. 5а заметен слабый тренд  $\psi$  с  $z$ . Если же рассмотреть менее искаженную наблюдательной селекцией подвыборку массивных спиральных галактик с  $\lg M_* \geq 10.5$  (рис. 5б), то этот тренд становится более выраженным: от  $z = 1$  к  $z = 0$  наблюдаемые углы закрутки уменьшаются, т.е. спиральные ветви становятся, в среднем, закрученными более туго. (Статистически связь между  $\psi$  и  $z$  на рис. 5б является умеренной (ее коэффициент ранговой корреляции Спирмена равен 0.38), но значимой на уровне  $>99\%$ .) Показанная на рис. 5б линейная зависимость соответствует темпу закручивания  $\sim 1^\circ$ /млрд лет.

Возможной причиной существования наблюдаемого тренда между  $\psi$  и  $z$  может являться влияние  $k$ -поправки, т.е. того, что при переходе к более далеким галактикам мы видим их изображения во все более коротковолновом диапазоне. Если угол закрутки ветвей зависит от длины волны ( $\lambda$ ) таким образом, что значения  $\psi$  увеличиваются с уменьшением  $\lambda$ , это могло хотя бы частично объяснить рис. 5. Как сказано выше, наши измерения были выполнены в фильтре Космического телескопа Хаббл ACS/F814W с эффективной длиной волны  $\lambda_{\text{eff}} \approx 8000 \text{ \AA}$ , т.е. примерно в полосе  $I$ . При наблюдениях объектов на  $z = 1$  этот фильтр будет

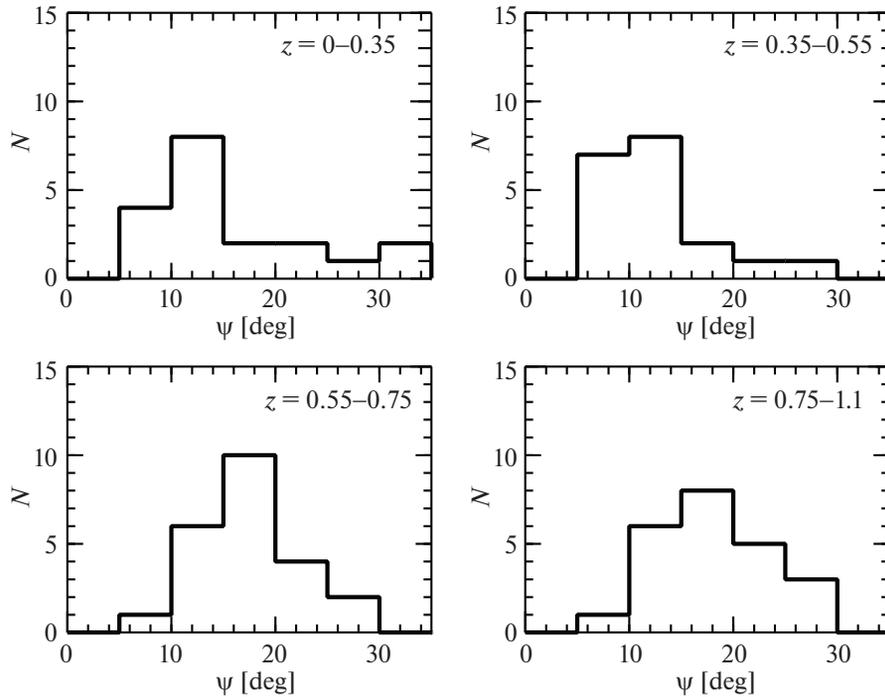


**Рис. 5.** Зависимость среднего угла закрутки спирального узора от красного смещения галактики: (а) вся выборка, (б) галактики с  $\lg M_* \geq 10.5$ . Кружки с барами на обоих рисунках — средние значения в бинах по  $z$  0–0.25, 0.25–0.5, 0.5–0.75 и 0.75–1.0. Горизонтальными линиями из точек показано среднее значение  $\psi$  для всей выборки, штриховая линия — линейная регрессия для массивных спиральных галактик.

приближенно соответствовать фильтру  $B$ . Непосредственное сравнение углов закрутки близких галактик, найденных в голубых фильтрах ( $B$ ,  $g$ ) и в ближнем ИК диапазоне, не показало значимых различий (см., например, Сейгар и др., 2006; Дэвис и др., 2012; Савченко и др., 2020). Кроме того, есть указания на то, что угол закрутки спиральных ветвей может уменьшаться при переходе от “красных” к “голубым” фильтрам (Ю, Хо, 2018). Если это так, то это даже усиливает значимость наблюдательного тренда на рис. 5. Еще одной причиной может являться наблюдательная селекция при отборе объектов — среди более далеких галактик из-за худшего пространственного разрешения выше вероятность пропустить галактики с туго закрученными спиральными ветвями. Оба этих эффекта — влияние  $k$ -поправки и наблюдательной селекции — нуждаются в дальнейшем изучении.

Стоит также отметить, что в ходе эволюции спиральных галактик от  $z \sim 1$  к  $z \sim 0$  увеличивается светимость балджей и их вклад в полную светимость галактик возрастает (см., например, Сачдева и др., 2017). С другой стороны, в ряде работ было отмечено, что у галактик с более яркими балджами и с более высокой концентрацией светимости к центру значения  $\psi$ , в среднем, меньше, чем у галактик с более слабыми балджами и с меньшей концентрацией (см., например, Савченко, Решетников, 2013; Ю, Хо, 2020). Таким образом, изменение угла закрутки с  $z$  хотя бы отчасти может быть следствием эволюции глобальной структуры галактик.

Разные модели генерации и поддержания спиральной структуры предсказывают разное поведение угла закрутки в зависимости от времени. Например, в моделях, в которых ветви возникают за



**Рис. 6.** Распределения углов закрутки  $\psi$  спиральных ветвей массивных галактик выборки ( $\lg M_* \geq 10.5$ ) в разных интервалах красных смещений.

счет приливного возмущения и/или транзитных спиральных неустойчивостей в самогравитирующем диске, угол  $\psi$  может уменьшаться со временем (см. обзор Доббс, Баба, 2014). В то же время в теории волн плотности (Лин, Шу, 1964) спиральный узор является квазистационарным с неизменным углом закрутки.

Для транзитных и рекуррентных спиральных ветвей недавно был предложен простой наблюдательный тест (Прингл, Доббс, 2019). Пусть спиральная ветвь при формировании имеет угол закрутки  $\psi_{\max}$ , затем ветвь постепенно закручивается и, наконец, исчезает при некотором минимальном значении  $\psi_{\min}$ . Тогда на основе простых соображений можно получить, что котангенс угла закрутки меняется линейно со временем:  $\text{ctg } \psi \propto t$ . Следовательно, если в произвольный момент времени мы рассмотрим случайную выборку галактик, спиральные ветви в которых находятся на разных стадиях закручивания, можно ожидать, что галактики будут распределены однородно по  $\text{ctg } \psi$  в интервале от  $\text{ctg } \psi_{\min}$  до  $\text{ctg } \psi_{\max}$ . Применение этого теста для двух выборок близких галактик в первом приближении подтвердило однородность распределения значений  $\text{ctg } \psi$  (Прингл, Доббс, 2019; Лингард и др., 2021).

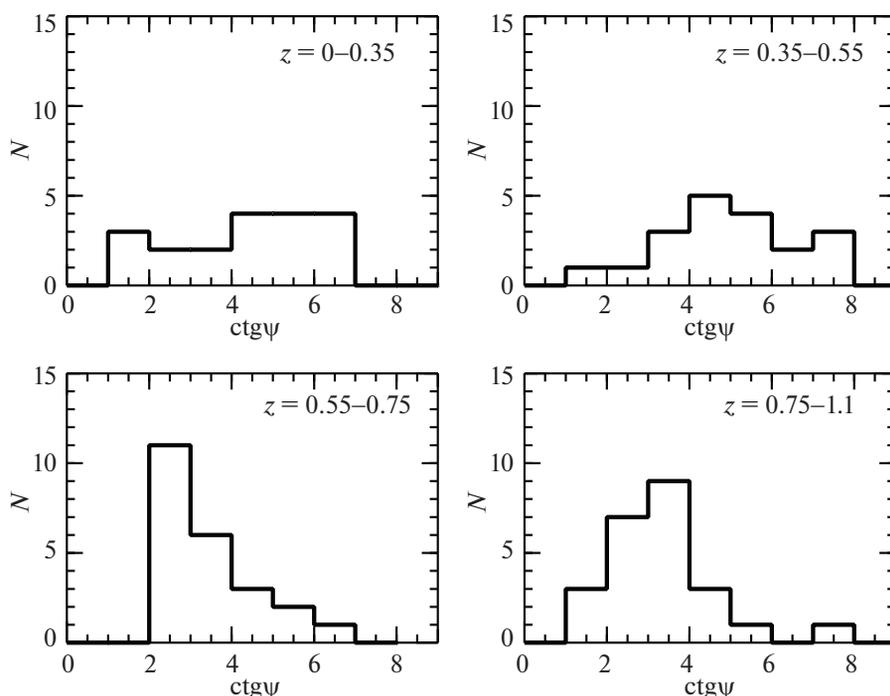
Рассмотрим, как распределены по значениям  $\text{ctg } \psi$  далекие галактики в поле COSMOS. Мы взяли относительно полную подвыборку галактик с

$\lg M_* \geq 10.5$ , для которых есть измерения  $\psi$  для 85 индивидуальных спиральных ветвей. На рис. 6 и 7 в четырех интервалах  $z$  приведены распределения галактик по  $\psi$  и по  $\text{ctg } \psi$ . (Величины интервалов были подобраны так, чтобы в них попадало примерно одинаковое число галактик.) Показанные на рис. 6 распределения в первом приближении неоднородны, и их средние значения смещаются в сторону меньших значений  $\psi$  с уменьшением красного смещения. При переходе к  $\text{ctg } \psi$  вид распределений меняется (рис. 7) — в первых двух интервалах красных смещений распределения близки к однородным (конечно, в пределах скудной статистики), что согласуется с результатами недавних работ, в которых изучались близкие галактики (Прингл, Доббс, 2019; Лингард и др., 2021). При  $z > 0.5$  распределения демонстрируют глобальные пики при  $\text{ctg } \psi \approx 3$  ( $\psi \approx 18^\circ$ ). Изменение вида распределений с красным смещением может означать, что в разные эпохи могли преобладать разные механизмы генерации спирального узора.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В нашей работе была впервые детально рассмотрена форма спиральных ветвей у двухрукавных галактик в поле COSMOS Космического телескопа Хаббл.

Мы нашли, что характерные значения угла закрутки спирального узора вплоть до  $z \sim 1$  —  $\langle \psi \rangle \approx 15^\circ$  близки к значениям для близких галактик.



**Рис. 7.** Распределения значений  $\text{ctg}\psi$  спиральных ветвей массивных галактик выборки ( $\lg M_* \geq 10.5$ ) в разных интервалах красных смещений.

В пределах одной галактики разные спиральные ветви демонстрируют сильно различающиеся значения угла закрутки. Для индивидуальных ветвей ошибка определения  $\psi$  увеличивается с  $z$ , что может быть следствием их растущей иррегулярности.

Обнаружен наблюдательный тренд, свидетельствующий о постепенном уменьшении значений  $\psi$  с уменьшением  $z$  (рис. 5). Этот тренд соответствует средней скорости закручивания  $\sim 1^\circ/\text{млрд лет}$ .

Анализ распределений величины  $\text{ctg}\psi$  (тест Прингла–Доббс) массивных галактик ( $\lg M_* \geq 10.5$ ) для разных интервалов красных смещений не противоречит тому, что при  $z \leq 0.5$  основными механизмами генерации спиральных ветвей могли быть приливные возмущения и транзитные неустойчивости в их дисках. Применение этого теста для больших выборок спиральных галактик на разных красных смещениях может стать полезным инструментом для изучения эволюции спирального узора.

Отметим, что полученные нами результаты основаны на относительно небольшой выборке объектов, и они нуждаются в подтверждении на гораздо большем материале. Сочетание данных по глубоким полям космических телескопов HST и JWST с развитием компьютерных методов анализа изображений вскоре даст возможность исследовать затронутые в нашей статье вопросы гораздо более детально.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 22-22-00483).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бертин, Арно (E. Bertin and S. Arnouts), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **117**, 393 (1996).
2. Вивер и др. (J.R. Weaver, O.B. Kauffmann, O. Ilbert, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **258**, id.11 (2022).
3. Ву и др. (Y. Wu, Z. Cai, F. Sun, et al.), *Astrophys. J.*, submitted (arXiv:2208.08473) (2022).
4. Диаз-Гарсия и др. (S. Diaz-Garcia, H. Salo, J.H. Knapen, and M. Herrera-Endoqui), *Astron. Astrophys.* **631**, A94 (2019).
5. Доббс, Баба (C. Dobbs and J. Baba), *Publ. Astron. Soc. Austr.* **31**, e035 (2014).
6. Дэвис и др. (B.L. Davis, J.C. Berrier, D.W. Shields, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **199**, id. 33 (2012).
7. Илберт и др. (O. Ilbert, S. Arnouts, H.J. McCracken, et al.), *Astron. Astrophys.* **457**, 841 (2006).
8. Иноуэ и др. (S. Inoue, T. Takagi, A. Miyazaki, et al.), *MNRAS* **506**, 84 (2021).
9. Конселис (C.J. Conselice), *MNRAS* **373**, 1389 (2006).
10. Керехета и др. (M. Querejeta, E. Schinnerer, S. Meidt, J. Sun, A.K. Leroy, et al.), *Astron. Astrophys.* **656**, A133 (2021).
11. Коекмоер и др. (A.M. Koekemoer, H. Aussel, D. Calzetti, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **172**, 196 (2007).
12. Лин, Шу (C.C. Lin and F.H. Shu), *Astrophys. J.* **140**, 646 (1964).

13. Лингард и др. (T. Lingard, K.L. Masters, S. Krawczyk, et al.), *MNRAS* **504**, 3364 (2021).
14. Мандельбаум и др. (R. Mandelbaum, Ch.M. Hirata, A. Leauthaud, R.J. Massey, and J. Rhodes), *MNRAS* **420**, 1518 (2012).
15. Маргалейф-Бентабол и др. (B. Margalef-Bentabol, Ch.J. Conselice, B. Haussler, et al.), *MNRAS* **511**, 1502 (2022).
16. Прингл, Доббс (J.E. Pringle and C.L. Dobbs), *MNRAS* **490**, 1470 (2019).
17. Савченко С.С., Решетников В.П., Письма в Астрон. журн. **37**, 883 (2011) [S.S. Savchenko, V.P. Reshetnikov, *Astron. Lett.* **37**, 817 (2011)].
18. Савченко, Решетников (S.S. Savchenko and V.P. Reshetnikov), *MNRAS* **436**, 1074 (2013).
19. Савченко и др. (S. Savchenko, A. Marchuk, A. Mosenkov, and K. Grishunin), *MNRAS* **493**, 390 (2020).
20. Сачдева и др. (S. Sachdeva, K. Saha, and N.P. Singh), *Astrophys. J.* **840**, 79 (2017).
21. Сейгар и др. (M.S. Seigar, J.S. Bullock, A.J. Barth, and L.C. Ho), *Astrophys. J.* **645**, 1012 (2006).
22. Селлвуд, Мастерс (J.A. Sellwood and K.L. Masters), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **60**, 73 (2022).
23. Селлвуд, Бинни (J.A. Sellwood and J.J. Binney), *MNRAS Astrophys.* **336**, 785 (2002).
24. Скарано, Лепин (S. Scarano and J.R.D. Lépine), *MNRAS* **428**, 625 (2013).
25. Элмергин и др. (D.M. Elmegreen, B.G. Elmegreen, T. Ferguson, B. Mullan), *Astrophys. J.* **663**, 734 (2007).
26. Элмергин, Элмергин (D.M. Elmegreen and B.G. Elmegreen), *Astrophys. J.* **781**, 11 (2014).
27. Ю, Хо (Si-Yue Yu and L.C. Ho), *Astrophys. J.* **869**, id.29 (2018).
28. Ю, Хо (Si-Yue Yu and L.C. Ho), *Astrophys. J.* **871**, id.194 (2019).
29. Ю, Хо (Si-Yue Yu and L.C. Ho), *Astrophys. J.* **900**, id.150 (2020).