



Сгущения вещества («клампы») в галактиках на $z \lesssim 3$ и их связь со спиральными рукавами

И.В. Чугунов¹ , А.А. Марчук¹

¹ ГАО РАН

Поступила в редакцию 1 декабря 2025 / Принята к публикации 4 декабря 2025

Аннотация

Звездообразование в далёких галактиках далеко не всегда структурируется в виде спирального узора, а часто принимает форму отдельных сгущений вещества — т.н. «клампов» (англ. *clumps*). В исследованиях, посвящённых этим объектам, уделяется мало внимания спиральной структуре, поэтому связь между клампами и спиральными рукавами ещё не выяснена окончательно. В работе мы использовали выборку из 159 спиральных галактик на $0.1 \leq z \leq 3.3$, наблюдавшихся на космических телескопах HST и JWST, для которой ранее была выполнена декомпозиция с учётом спирального узора как отдельного компонента. С помощью остаточных изображений от имеющихся фотометрических моделей мы выделили отдельные клампы и измерили их свойства, а также исследовали, как они соотносятся с параметрами спиральных рукавов. В частности, мы обнаружили, что при учёте спирального узора вклад клампов в полную светимость, их размер и масса поникаются. Сами клампы пространственно сосредоточены к спиральным рукавам и по показателям цвета ближе к ним, чем к дискам. Также с помощью SED-моделирования клампов подтверждена зависимость между их массой и возрастом.

ключевые слова: Галактики на больших z , спиральная структура, клампы

Введение

В ближней Вселенной звездообразование, идущее в дисках галактик, чаще всего выражается в виде более или менее упорядоченного спирального узора. В результате, большинство массивных галактик в нашу эпоху — спиральные: к ним относится 75% объектов с $M(B) < -20$ (Conselice 2006).

Эта картина, однако, меняется на больших красных смещениях. С 90-х годов прошлого века, главным образом благодаря наблюдениям космического телескопа «Хаббл» (HST), стало известно, что удалённые галактики выглядят более комковатыми и асимметричными по сравнению с объектами в ближней Вселенной (van den Bergh и др. 1996). Так, на $z > 1$ многие галактики с идущим звездообразованием вовсе не имеют какой-либо упорядоченной спиральной структуры, а состоят из множества сгущений вещества — «клампов» (от англ. *clumps*) (Conselice 2014). Стоит отметить, что спиральные галактики также встречаются и на больших красных смещениях, хотя с ростом z их доля падает (Espejo Salcedo и др. 2025) — на сегодняшний день известны единичные примеры спиральных галактик на $z > 4$ (Tsukui и Iguchi 2021; Ikeda и др. 2025). В то же время, известны и редкие примеры комковатых галактик в ближней Вселенной (Adams и др. 2022).

Благодаря тому, что клампы наблюдаются и выглядят ярче всего в синей и в ультрафиолетовой частях спектра (в системе отсчёта наблюдаемой галактики), становится ясно, что эти структуры содержат молодые голубые звёзды, а значит, характеризуются активным звездообразованием. Их размеры составляют порядка сотен парсек и до килопарсека, а кинематика этих объектов показывает, что они относятся к дискам галактик (Puech 2010; Genzel и др. 2011). Таким образом,

*e-mail:chugunov21@list.ru

клампы имеют сходство с областями звездообразования в ближней Вселенной, но отличаются от них заметно большими размерами. Это различие может объясняться более высокой турбулентностью дисков галактик на больших красных смещениях, из-за которой масштаб неустойчивости Джинса них существенно больше, чем в их аналогах из ближней Вселенной (Livermore и др. 2015; Kalita, Suzuki и др. 2025).

После начала работы космического телескопа «Джеймс Уэбб» (JWST) в 2022 году для удалённых галактик стали доступны наблюдения инфракрасной части их спектра с хорошим разрешением. В результате этого удалось выяснить, что клампы представляют собой не просто области звездообразования, но и заметные концентрации звёздной массы (Kalita, Silverman, Daddi, Mercier и др. 2025).

Среди открытых вопросов, касающихся клампов — их срок жизни и взаимодействие с родительской галактикой, и влияние на процессы вековой эволюции в них. Например, согласно некоторым работам найдено, что если клампы не разрушаются за длительный срок (более 100 миллионов лет), то они могут мигрировать в центр своей галактики, становясь частью балджа и вызывая тем самым рост балджей в галактиках на космологических временах (Noguchi 1999; B. G. Elmegreen, Bournaud и D. M. Elmegreen 2008; Mandelker и др. 2014), что в свою очередь заметно влияет на рост баров и другие характеристики.

Также неясно, как именно соотносятся клампы и спиральные рукава, несмотря на то, что и в тех, и в других структурах в основном концентрируется звездообразование галактики. Например, выделяется класс «комковатых спиральных галактик» (*clumpy spirals*), в которых наблюдается и спиральный узор, и клампы, по-видимому сконцентрированные к спиральным рукавам. Вопрос о причинах видимой связи этих структур всё ещё остаётся открытым (Kalita, Silverman, Daddi, Bottrell и др. 2024). Кроме того, в работах, посвящённых исследованию клампов, возможное наличие спиральных рукавов в диске галактики обычно не учитывается. В результате часто возникает ситуация, при которой «клампы», которые измеряются, в действительности оказываются фрагментами спиральной структуры (см. например Kalita, Suzuki и др. 2025). Для выделения излучения гладкой спиральной структуры на изображении можно использовать фотометрическую декомпозицию, однако при учёте спиральных рукавов этот метод становится трудоёмким и применяется редко (Chugunov, Marchuk и Mosenkov 2025). В данной работе мы постараемся частично закрыть этот пробел: будут измерены параметры клампов далёких галактик отдельно от спиральных рукавов и исследована связь между этими двумя типами структур.

1 Данные и методы

Для решения поставленной задачи хорошо подходит выборка из выполненной нами ранее работы Chugunov, Marchuk и Mosenkov 2025, подробно в ней описанная. Выборка состоит из 159 галактик с отчётливо видимой спиральной структурой на красных смещениях $0.1 \leq z \leq 3.3$. Изображения галактик были получены по данным глубоких полей телескопов HST и JWST, для последнего имеются изображения в нескольких фильтрах. В упомянутой работе для всех данных была выполнена фотометрическая декомпозиция с учётом спирального узора (подробнее о методе см. методическую статью Chugunov, Marchuk, Mosenkov и др. 2024). Таким образом, выделение спирального узора в исследуемой выборке уже выполнено.

Во многих работах, посвящённых клампам, авторы сталкиваются с необходимостью выделять эти объекты на фоне остальных компонент галактики. Используемые при этом методы опираются на тот факт, что клампы относительно компактны, так что нередко используются методы, основанные на вейвлет-преобразовании (Sok и др. 2025) или на вычитании сглаженного изображения из исходного (Kalita, Silverman, Daddi, Bottrell и др. 2024). В нашем случае доступны изображения от моделей, на которых остаются в основном только шум и сами клампы (см. пример на Рис. 1), что делает ситуацию существенно проще. Конечно, эту возможность нельзя назвать универсальной, поскольку для получения таких изображений требуется выполнять декомпозицию с учётом спирального узора.

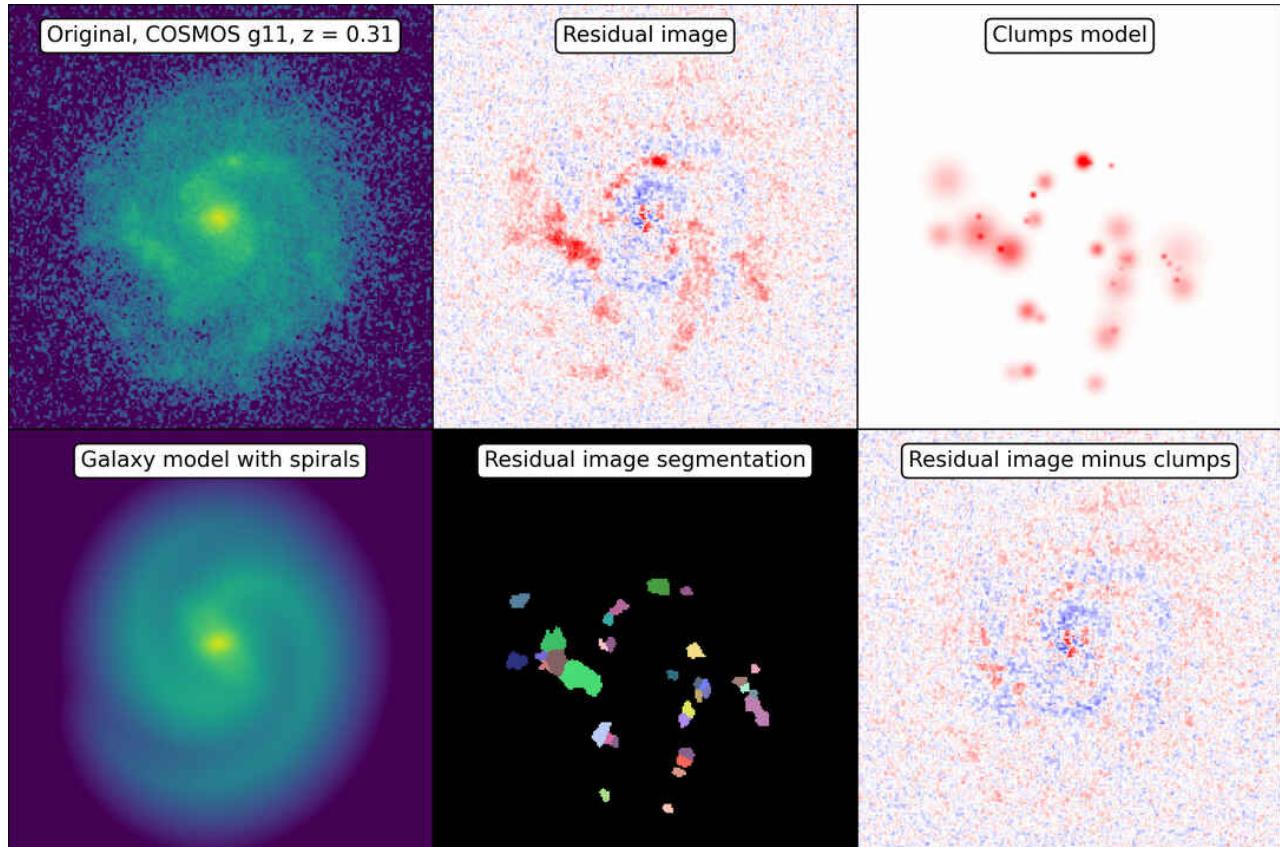


Рис. 1: Несколько изображений, демонстрирующих ключевые шаги метода, на примере одной галактики. Вверху слева: исходное изображение галактики. Внизу слева: её фотометрическая модель со спиральными рукавами из Chugupov, Marchuk и Mosenkov 2025. Вверху в центре: остаточное изображение от модели, где красным цветом показаны области, в которых модель недооценивает яркость галактики, синим — где переоценивает. Внизу в центре: сегментация остаточного изображения, где каждая цветная область обозначает предварительное положение отдельного клампа. Вверху справа: фотометрическая модель системы клампов, подогнанная под остаточное изображение, в той же цветовой схеме. Внизу справа: остаточное изображение, из которого вычтена модель клампов.

Таким образом, для поиска клампов на остаточных изображений можно использовать методы, предназначенные для поиска многочисленных объектов на изображении, например, галактик в поле. Мы применяли библиотеку `photutils.segmentation` для языка `Python` (Bradley и др. 2024), а именно, функции `detect_sources` и `deblend_sources`. Они представляют собой, соответственно, нахождение объектов при помощи пороговой обработки и их сегментацию методом водораздела. Дополнительно была реализована и применена сегментация на основе преобразования расстояний (*distance transform*). Найденные таким образом области показывают количество и приблизительное местоположение клампов в галактике, что служит начальным приближением для дальнейшего, более точного измерения их параметров.

Для следующего этапа задействовалась фотометрическая декомпозиция при помощи пакета программ `IMFIT` (Erwin 2015). Распределение яркости в каждом отдельном клампе моделировалось как двумерная симметричная функция Гаусса; подобный выбор встречается и в других работах и отражает тот факт, что клампы имеют небольшой размер и тонкие детали структуры в них разрешить не удается (Kalita, Suzuki и др. 2025). Мы не используем вариант, при котором малая и большая оси могут отличаться, поскольку при его применении одна функция более склонна охватывать несколько близко расположенных клампов. Для каждого клампа тогда имеется четыре свободных параметра, которые описывают его координаты, размер и поверхностную яркость. Функция рассеяния точки (PSF) также учитывалась, как и в предыдущей работе (Chugunov, Marchuk и Mosenkov 2025).

Для ускорения и упрощения процесса декомпозиция применялась к остаточным изображениям от модели со спиральными рукавами. Кроме того, поскольку в большинстве своём клампы пространственно обособлены друг от друга, клампы добавлялись в модель по очереди. На каждой итерации в модель добавлялся очередной потенциальный кламп и подгонялись его параметры; для остальных клампов, которые были подогнаны ранее, параметры были зафиксированы. В случае, если рядом с очередным клампом находятся другие, то за одну итерацию они добавляются совместно, чтобы не возникало ситуации, при которой одна функция подгоняется для описания нескольких близко расположенных клампов. Хотя такой подход требует множества итераций, он является более предпочтительным, поскольку в противном случае пришлось бы подгонять одну модель с большим числом параметров, что было бы значительно дольше с используемым алгоритмом Левенберга — Марквардта (Moré 1978). При этом, поскольку излучение от разных клампов практически не пересекается, то их параметры независимы друг от друга, и их одновременная подгонка не даёт преимущества в точности.

В итоге проделанной работы для остаточных изображений были получены фотометрические модели, описывающие систему клампов в них, и параметрическое описание каждого, которое задаёт положение, размер и светимость клампа — пример такой модели, а также остаточное изображение от клампов представлено на Рис. 1. На Рис. 2 показан пример изображения галактики и трёх моделей, включая ту, в которой присутствуют спиральные рукава и клампы. На этом Рисунке хорошо заметно, насколько модель становится визуально лучше, а χ^2 — меньше. Можно также отметить, что такая модель описывает все детали структуры галактики. Полученные параметры далее исследовались статистически, а также на предмет их связи с параметрами галактик и их компонент.

2 Результаты

В результате применения описанного метода нам удалось обнаружить, в среднем, 19 клампов на галактику. Лишь в 5 галактиках из 159 не было найдено ни одного клампа. В более удалённых галактиках обнаруживается меньше клампов, что объясняется худшим качеством изображений, из-за чего тусклые клампы становятся незаметны, а пары или группы близко расположенных клампов сливаются воедино.

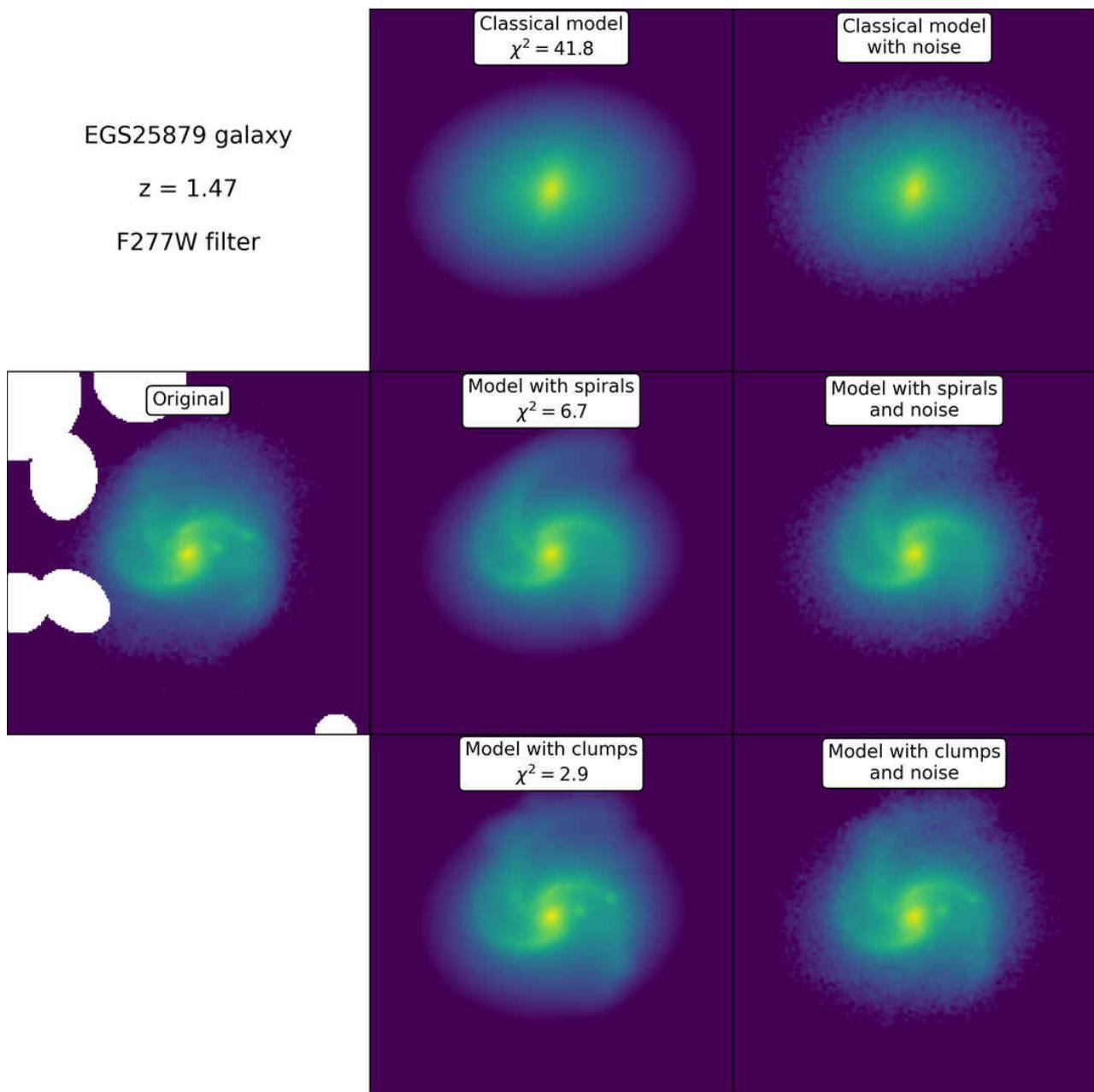


Рис. 2: Представлено изображение одной из галактик выборки (слева) и ее модели. В среднем столбце показаны сами модели, в правом — те же модели, на которые добавлен шум, имитирующий реальное изображение. В верхнем ряду представлена модель без спиральных рукавов (только диск и балдж), в среднем — модель с добавлением спиральных рукавов, в нижнем — модель со спиральными рукавами и клампами.

2.1 Светимость клампов

Один из параметров, представляющих интерес — вклад клампов в полную светимость галактики C/T , который можно напрямую оценить из полученных в декомпозиции моделей клампов и остальных компонент. Естественно было бы сразу исследовать, как этот параметр изменяется с красным смещением z , однако перед этим нужно учесть некоторые важные детали.

Во-первых, выборка галактик подвержена эффектам селекции — на больших красных смещениях представлены только массивные галактики, при этом, по результатам некоторых исследований, доля комковатых галактик коррелирует со звёздной массой (de la Vega и др. 2025). Во-вторых, качество изображений далеких галактик значительно понижается: с увеличением z не только ухудшается пространственное разрешение, но и поверхностная яркость из-за космологического ослабления света падает пропорционально $(1+z)^4$ (Melia и Yennapureddy 2018; Whitney и др. 2020). В-третьих, ещё один эффект, который необходимо учесть — это зависимость параметров от длины волны. Даже если галактики на разных красных смещениях наблюдаются в одном и том же фильтре, то получаемое излучение в системе отсчёта самих галактик относится к разным длинам волн, и, соответственно, к разному звёздному населению. Кроме того, для разных галактик в нашей выборке доступны изображения в различных фильтрах. Учитывая, что клампы выделяются главным образом в голубой и ультрафиолетовой части спектра, этот эффект может быть особенно важен. Те же самые проблемы в контексте других параметров рассматривались в нашей предыдущей работе Chugunov, Marchuk и Mosenkov 2025, в частности, в разделах 4.2 и 5; здесь они будут решаться схожим образом.

Для части выборки — 33 галактик, которые наблюдались на JWST — доступны изображения в нескольких фильтрах, что позволяет оценить зависимость C/T от длины волны в собственной системе отсчёта λ_{rf} , которая связана с опорной длиной волны фильтра λ_p соотношением $\lambda_{\text{rf}} = \lambda_p/(1+z)$. Эта зависимость представлена на Рис. 3; по ней можно видеть, что C/T значительно повышается в области коротких волн, причём особенно резко — при $\lambda_{\text{rf}} < 1$ мкм. Поскольку для разных галактик в общем наблюдается сходное поведение $C/T(\lambda)$, то мы усредняем функцию $\frac{C/T(\lambda)}{C/T(\lambda_0)}$, где λ_0 — какая-либо фиксированная длина волны, и используем её для перевода C/T для разных галактик к одной длине волны. В качестве λ_0 мы будем использовать длину волны 806 нм, которая соответствует λ_p для фильтра $F814W$ инструмента ACS HST (Hathi 2024). Этот фильтр был использован для большинства галактик в нашей выборке.

Чтобы исследовать, как возможность обнаруживать и измерять параметры клампов зависит от качества изображения, мы проводим тест с искусственным отдалением галактик, аналогично тому, что было выполнено в предыдущей работе (Chugunov, Marchuk и Mosenkov 2025; в частности, см. рис. 17 в ней же). Суть метода заключается в том, что в исходном изображении галактики ухудшается разрешение и понижается поверхностная яркость таким образом, чтобы воспроизвести, как та же галактика наблюдалась бы на большем красном смещении, чем она есть на самом деле.

Используя изображения, созданные таким способом, можно применить к ним те же методы измерения параметров клампов, что и для исходных, и исследовать, возникают ли какие-либо изменения из-за ухудшения качества изображения. На Рис. 4 для 10 относительно близких и ярких галактик из выборки показано, как C/T для них изменяется при увеличении искусственного красного смещения. Можно заметить, что в среднем C/T понижается с увеличением z — это согласуется с соображением, что при ухудшении качества изображения становится труднее обнаружить отдельные клампы в галактике.

Зависимость от массы измерить отдельно от других параметров сложнее, так что вернёмся к ней позднее. Сейчас рассмотрим интересующую нас зависимость от z (или, что эквивалентно, от времени хода света t_L). На Рис. 5 показано, как C/T , приведённая к длине волны фильтра $F814W$ (обозначим её как C/T_{F814W}), зависит от t_L .

Эта зависимость выглядит немонотонной: от нашей эпохи до $z = 1 \dots 2$ среднее C/T возрастает, но на $z > 2$ снова снижается. Подобная немонотонность для схожего параметра — частоты встречаемости комковатых галактик — обнаруживается и в других работах (например, Sok и др.

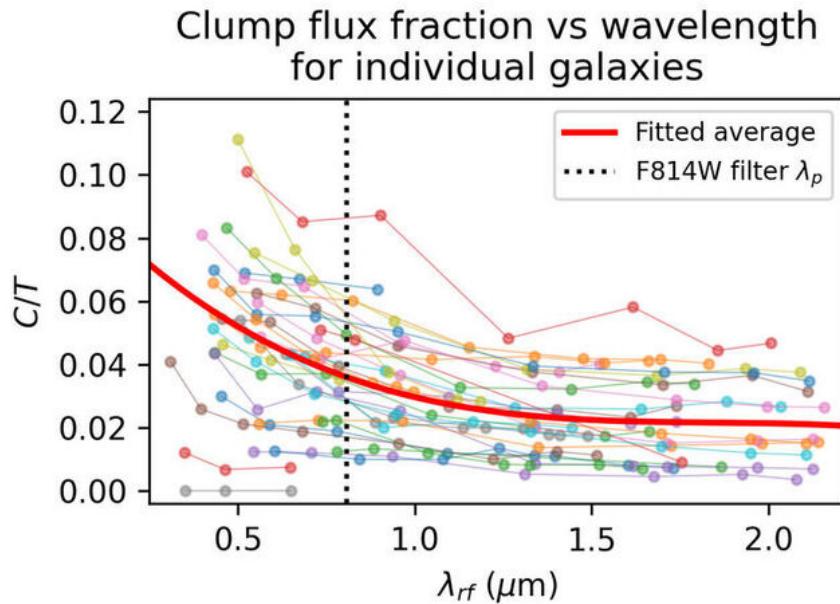


Рис. 3: На рисунке ломаными линиями с точками показаны зависимости вклада клампов в полную светимость C/T от длины волны в собственной системе отсчёта λ_{rf} для тех галактик, для которых доступны изображения в разных фильтрах. Каждая ломаная соответствует одной галактике. Яркая красная линия показывает усреднённую зависимость C/T от λ_{rf} , аппроксимированную полиномом третьей степени. Она в дальнейшем используется для приведения C/T всех галактик к одной длине волны (которая равна 806 нм, соответствует фильтру F814W и показана вертикальной точечной линией) для корректного сравнения в дальнейшем.

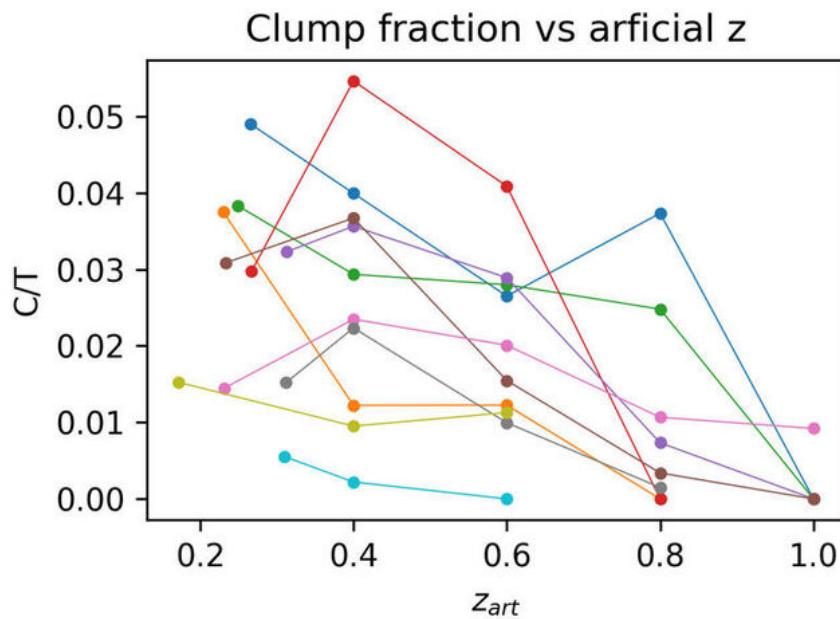


Рис. 4: На рисунке ломаными линиями показано, как для нескольких галактик из выборки изменяется C/T в зависимости от искусственного красного смещения z_{art} . Для каждой ломаной наименьшее красное смещение — истинное.

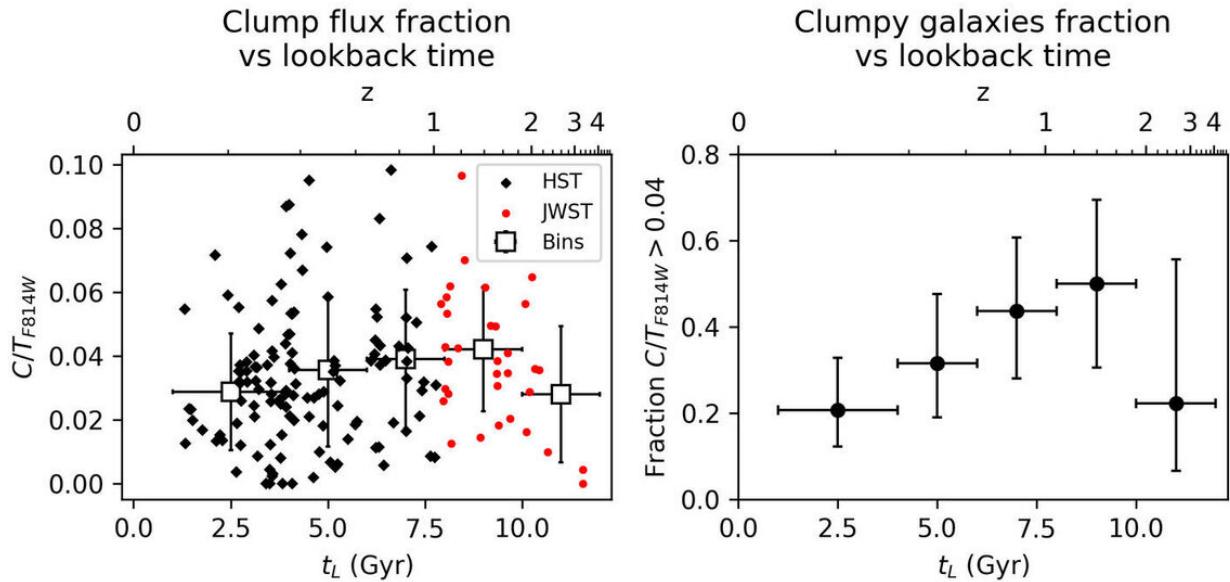


Рис. 5: Слева: зависимость вклада клампов в полную светимость, приведённую к длине волны фильтра $F814W$, C/T_{F814W} , от времени хода света от галактики t_L . Квадраты с усами ошибок показывают среднее значение величины в ограниченном диапазоне t_L (отмеченном усами ошибок по горизонтали) и его разброс (по вертикали). Справа: доля галактик, у которых $C/T_{F814W} > 0.04$, в разных диапазонах t_L . Усы ошибок по вертикали показывают 95%-ный доверительный интервал.

2025). Поскольку в клампах происходит звездообразование, то этот параметр нередко сравнивают с историей звездообразования во Вселенной, пространственная плотность которого достигает максимального значения вблизи $z \approx 2$ — так называемый «космический полдень» (*cosmic noon*) (Madau и Dickinson 2014). Некоторым приближением частоты встречаемости комковатых галактик в нашей работе можно считать долю галактик, у которых C/T_{F814W} не меньше определённого значения, также представленную на Рис. 5. Однако стоит помнить, что в нашей работе измеряется доля таких объектов среди спиральных галактик, а не любых.

Также отметим, что среднее значение C/T_{F814W} в нашей выборке составляет 3.4%, а максимальное не превышает 10%. Для галактик на $z > 1$ из наблюдений JWST, для которых доступны изображения в разных фильтрах, C/T на длинах волн вблизи 2 мкм не превышает 5%. Учитывая, что в этой части инфракрасного диапазона отношение массы к светимости мало отличается для разных звёздных населений (McGaugh и Schombert 2014), можно считать, что вклад клампов в массу галактик также не превышает 5%. Этот результат отличается от полученного в работе Kalita, Suzuki и др. 2025, где исследованы 32 галактики на $z \sim 1.5$ и сделан вывод, что вклад клампов в полную массу галактики может составлять 1–20%. Причина расхождения здесь в том, что в нашей работе вклад спиральных рукавов учтён отдельно, и излучение этих структур не учитывается как излучение клампов, тогда как в Kalita, Suzuki и др. 2025 выделенные клампы иногда явно следуют спиральному узору, фактически моделируя его.

Далее рассмотрим зависимость C/T_{F814W} не только от времени хода света t_L , но и от абсолютной звёздной величины родительской галактики M_{F814W} (которая послужит нам некоторым приближением массы) и среднего отношения сигнал-шум в диске (SNR), которое отражает качество изображения. Так же, как это делалось в нашей работе Chugunov, Marchuk и Mosenkov 2025, рассмотрим трилинейную зависимость C/T_{F814W} от этих параметров (см. Рис. 6).

Мы не обнаруживаем какой-либо связи C/T_{F814W} со светимостью родительской галактики, но, как и ожидается, для галактик с более высоким SNR, то есть, и качеством изображения, доля клампов в полной светимости повышается. Зависимость C/T_{F814W} от t_L при учёте двух

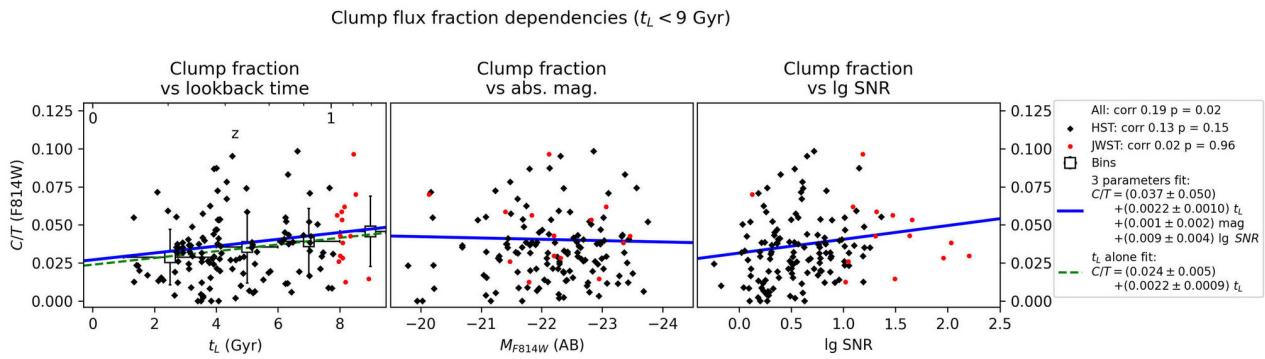


Рис. 6: Зависимости C/T_{F814W} , от трёх параметров, слева направо: время хода света t_L , абсолютная звёздная величина родительской галактики M_{F814W} и среднее отношение сигнал-шум в диске SNR. Синяя линия показывает аппроксимацию этих трёх зависимостей **совместно** трилинейной функцией, зелёная пунктирная — линейную аппроксимацию только от t_L . Включены только галактики с $t_L < 9$ млрд лет, что соответствует $z < 1.4$, поскольку в этой части наблюдается рост C/T_{F814W} при увеличении t_L .

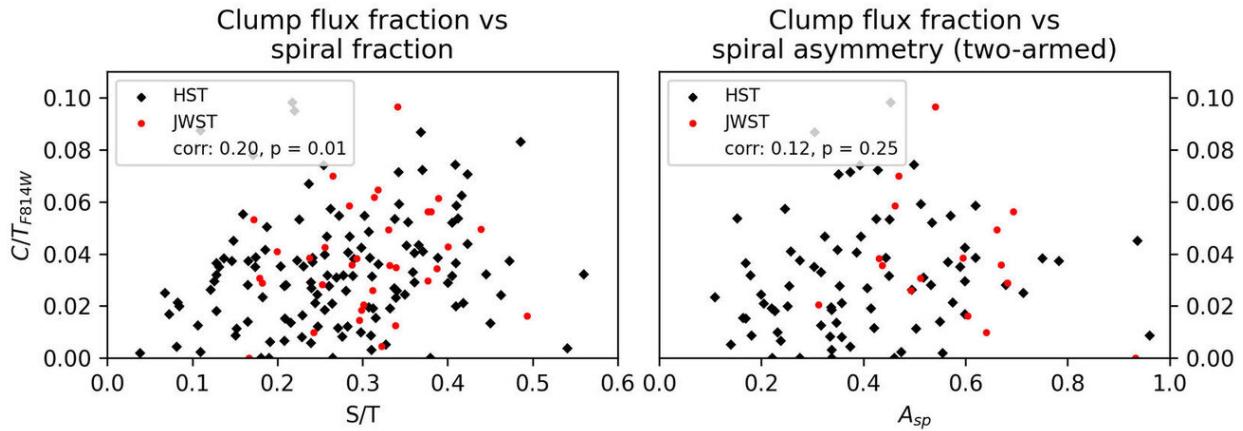


Рис. 7: Зависимость C/T_{F814W} от вклада спиральных рукавов в светимость S/T (слева) и от асимметрии спирального узора A_{sp} для двухрукавных галактик (справа, точек тут меньше).

других параметров остаётся практически такой же, как и без их учёта. Таким образом, похоже рост среднего вклада клампов с увеличением t_L действительно имеет место, как минимум, в последние 9 миллиардов лет.

Рассмотрим, как C/T_{F814W} зависит от двух других параметров, касающихся спирального узора: его вклада в полную светимость S/T и его асимметрии A_{sp} . Оба этих параметра были подробно рассмотрены в нашей предыдущей работе Chugunov, Marchuk и Mosenkov 2025, в разделах 4.3.1 и 4.3.4. Диаграммы, показывающие соотношение между этими параметрами, представлены на Рис. 7.

Мы наблюдаем слабую положительную корреляцию между C/T_{F814W} и S/T : в частности, у галактик с малым вкладом спиральных рукавов в светимость обычно не бывает высокой относительной светимости клампов. Это может как указывать на связь спиральных рукавов и клампов, так и быть простым проявлением наблюдательных эффектов: вероятно, что у комковатых галактик сложнее заметить упорядоченную спиральную структуру, если она слаба, и такие объекты могли не попасть в выборку. Мы не наблюдаем значимой корреляции между C/T_{F814W} и A_{sp} , вопреки предположению в нашей предыдущей работе, что более высокая асимметрия спирального узора в прошлом может быть вызвана повышенной комковатостью галактик Chugunov, Marchuk

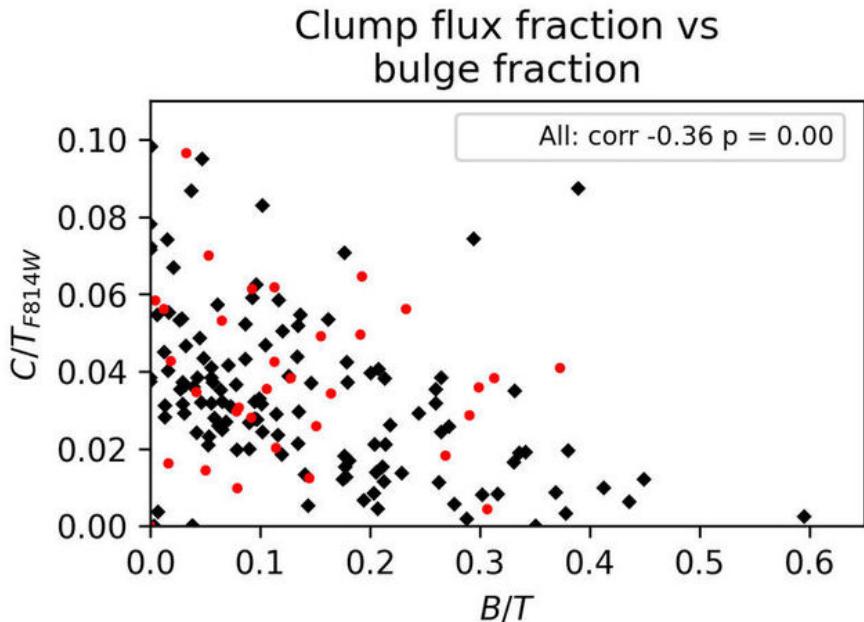


Рис. 8: Зависимость C/T_{F814W} от вклада балджа в светимость галактики B/T .

и Mosenkov 2025. По-видимому, она объясняется другими причинами, например искривлением узора из-за большей частоты приливных взаимодействий.

Наконец, рассмотрим связь между C/T_{F814W} и вкладом балджа в полную светимость галактики B/T . Она представлена на Рис. 8.

Присутствует заметная отрицательная корреляция между двумя этими величинами: галактики с относительно яркими балджами практически никогда не имеют яркой системы клампов, и наоборот. Вероятно, это может объясняться тем, что массивные балджи стабилизируют диски и мешают формированию клампов, по крайней мере, долгоживущих (Dekel и др. 2023). Другим объяснением может быть ускоренное сваливание клампов в центр в таких системах и рост вклада балджа.

2.2 Размеры клампов

Рассмотрим измеренные нами размеры клампов. На Рис. 9 показано их распределение по эффективному радиусу. Отметим, что истинный размер многих клампов оказывается меньше, чем функция рассеяния точки (PSF), из-за чего их оценку размера нельзя назвать надёжной. Так, например, на $z = 0.45$ (среднее для галактик, наблюдавшихся на HST) размер PSF для фильтра F814W совпадает с размерами клампов радиусом 270 парсек.

Видно, что средний размер клампов в нашей выборке, даже если учитывать только галактики, наблюдавшиеся на JWST ($z > 1$), несколько меньше, чем в Kalita, Suzuki и др. 2025 (см. Рис. 10 в их работе) для галактик на $z \approx 1.5$. Медианное значение в нашей выборке составляет 370 пк, в Kalita, Suzuki и др. 2025 — порядка 500 пк. Это различие, помимо разницы в методе выделения клампов, также связано с отдельным учётом спирального узора в нашей работе, из-за чего излучение спиральных рукавов не приписывается клампам.

На Рис. 10 представлены размеры и абсолютные светимости клампов. Более крупные клампы оказываются более яркими, что согласуется с известной зависимостью между массой и размером клампов Kalita, Suzuki и др. 2025. Средняя поверхностная яркость внутри r_e не слишком отличается для более ярких и более тусклых клампов, и для абсолютного большинства наблюдаемых объектов она лежит в диапазоне $10^2 \dots 10^4 L_\odot/\text{пк}^2$.

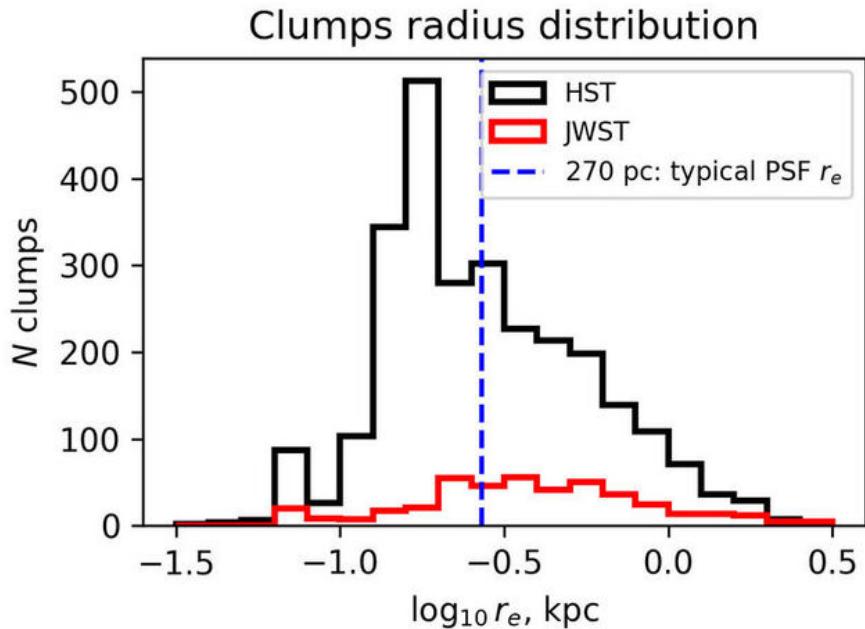


Рис. 9: Распределение клампов по эффективному радиусу r_e . Показан также радиус PSF, переведённый в линейный размер для типичной галактики в выборке.

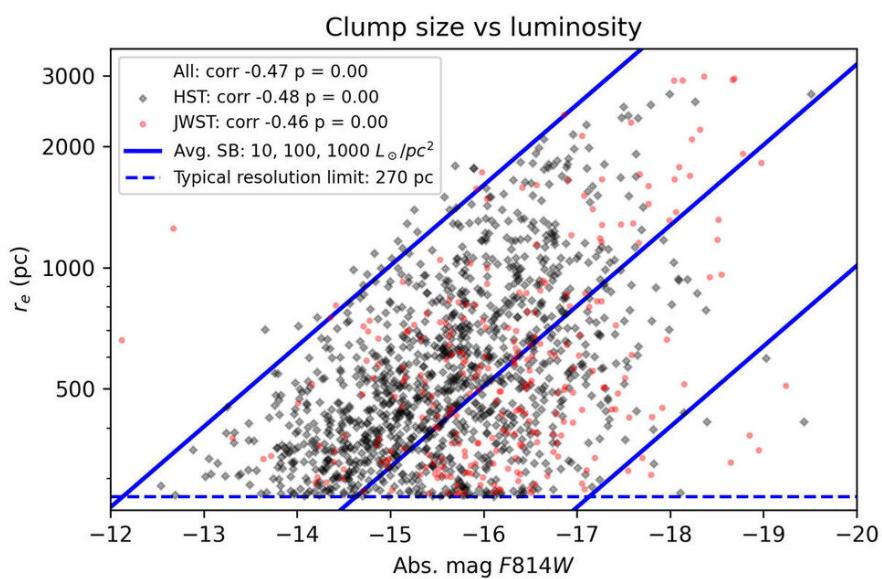


Рис. 10: Эффективные радиусы клампов r_e и их абсолютные звёздные величины. Нанесены также линии одинаковой средней яркости внутри r_e . Рассматриваются только клампы радиусом более 270 пк.

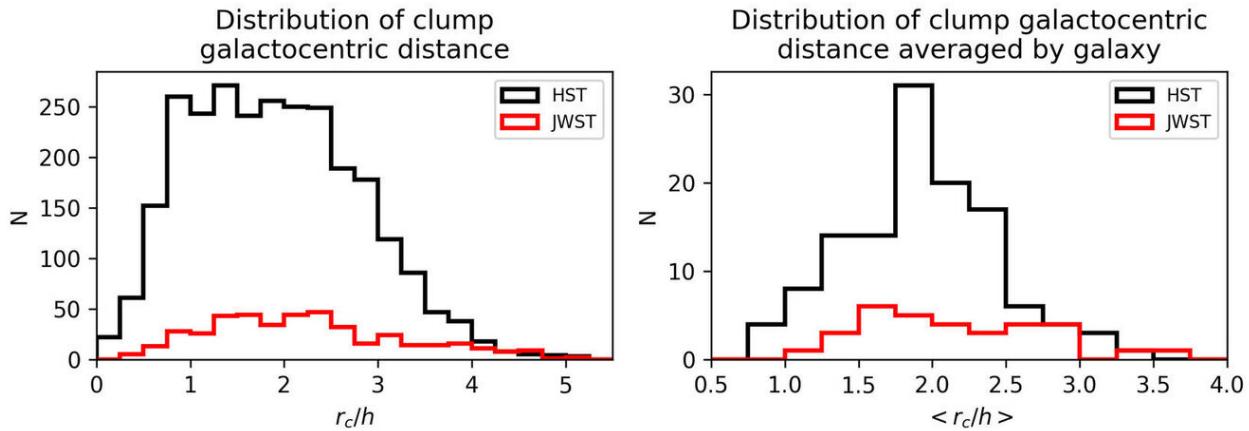


Рис. 11: Слева: распределение отдельных клампов по галактоцентрическому расстоянию в единицах экспоненциального масштаба диска r_c/h . Справа: распределение галактик выборки по $\langle r_c/h \rangle$ — средневзвешенному по светимости r_c/h их клампов.

2.3 Пространственное распределение клампов

Далее рассмотрим, как клампы распределены по диску галактики. Для начала обратим внимание на их радиальное распределение. Для каждого клампа определим параметр r_c/h — расстояние от клампа до центра галактики r_c , делённое на экспоненциальный масштаб её диска h . Для каждой галактики средневзвешенное по светимостям r_c/h для её клампов обозначим как $\langle r_c/h \rangle$. Распределение галактик выборки и отдельных клампов по этим показателям приведено на Рис. 11.

Большинство клампов обнаруживается на галактоцентрических расстояниях в 1–2.5 h . В работе Chugunov, Marchuk, Mosenkov и др. 2024 мы ранее обнаружили, что наибольший вклад спиральных рукавов в светимость галактики достигается приблизительно в той же части диска — чаще всего между 1.5–2.5 h (см. рис. 21 в упомянутой работе). Потенциально этот диапазон вполне объясним, учитывая, что и клампы, и спиральные рукава — звездообразующие структуры, из-за чего и те, и другие формируются в областях, подходящих для звездообразования: где доминирует диск и где достаточно высока плотность газа.

Рассмотрим соотношение между пространственным распределением спиральных рукавов и клампов подробнее. Перед этим определим, какая часть диска относится к спиральным рукавам, а какая нет, на основе наших фотометрических моделей со спиральными рукавами, а затем измерим, какая часть клампов оказывается в спиральных рукавах, а какая нет. Ключевая идея выделения состоит в следующем: если спиральная структура занимает, например, N% диска, а клампы распределены в диске случайным образом, то N% клампов должны попасть в спиральные рукава; иначе доля будет отличаться.

Опишем метод более детально. Мы будем считать, что части изображения, где яркость модели спиральных рукавов выше всего, относятся к спиральному узору, но для того, чтобы чётко выделить границу, нужно выбрать пороговое значение яркости. Для единообразного сравнения разных изображений будем выбирать порог для каждой галактики таким образом, чтобы спиральный узор занимал фиксированную долю диска, например, 20%. Диск мы будем определять как область галактики в пределах $4h$ от центра. Пример выделения области спиральных рукавов таким способом представлен на Рис. 12.

После того, как мы выделили область, занятую спиральным узором, остаётся измерить количество клампов, центр которых оказался в спиральных рукавах. Поскольку доля диска, которая занята спиральными рукавами, может быть выбрана произвольным образом, то для надёжности мы рассматриваем различные значения этой величины для всей выборки. Для каждой галактики мы считаем $f_{c,x}$ — долю клампов, которые попали в спиральный узор, при условии, что он занимает $x\%$ диска. Распределение этой величины для галактик из выборки приведено на Рис. 13.

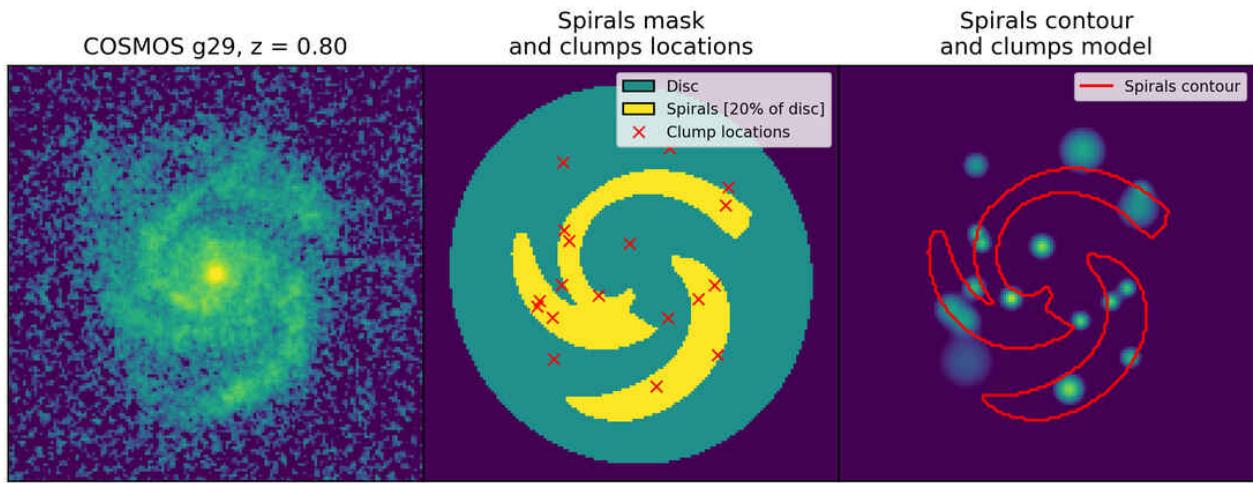


Рис. 12: Схема, показывающая процесс разделения диска на области спиральных рукавов и межрукавного пространства. В данном случае принято, что спиральный узор должен занимать 20% диска. Слева: изображение одной из галактик выборки. По центру: области, соответствующие диску галактики и спиральному узору, а также отмеченные на них центры клямпов. Справа: модель клямпов и наложенный на неё контур спиральной структуры.

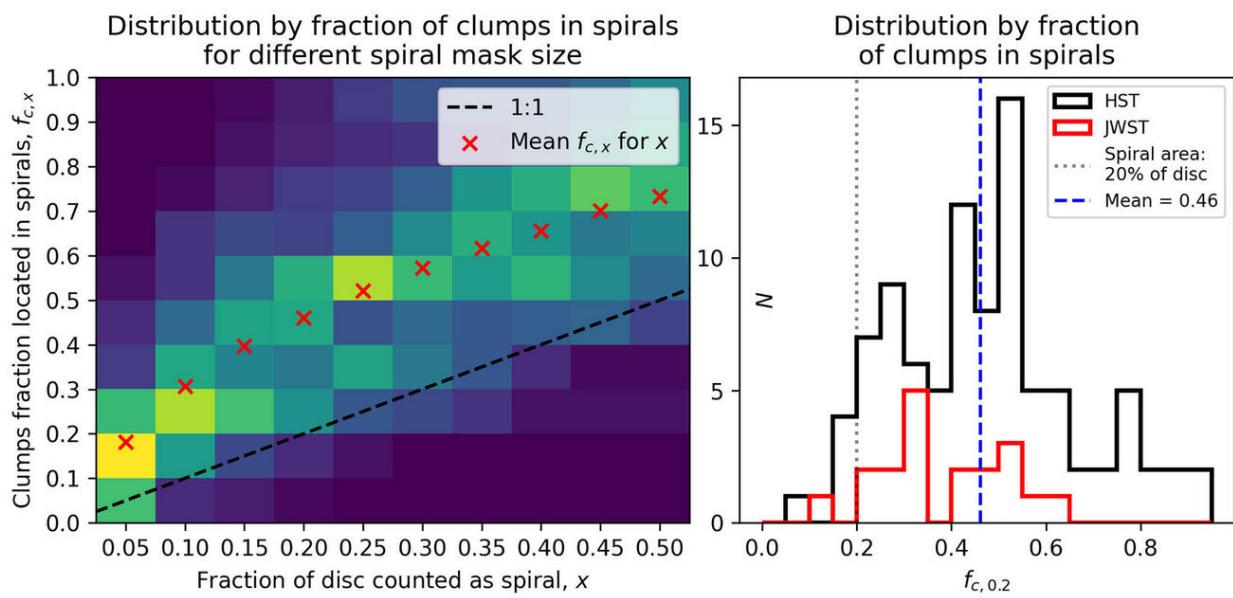


Рис. 13: Слева: тепловая карта, показывающая распределение $f_{c,x}$ (доли клямпов, которые попадают в долю x площади диска с наибольшей яркостью спиральных рукавов), для разных x . Каждый столбец показывает распределение для фиксированного x и среднее значение. Справа: гистограмма распределения $f_{c,0.2}$. Диаграмма построена по 114 галактикам, в которых найдено хотя бы 10 клямпов.

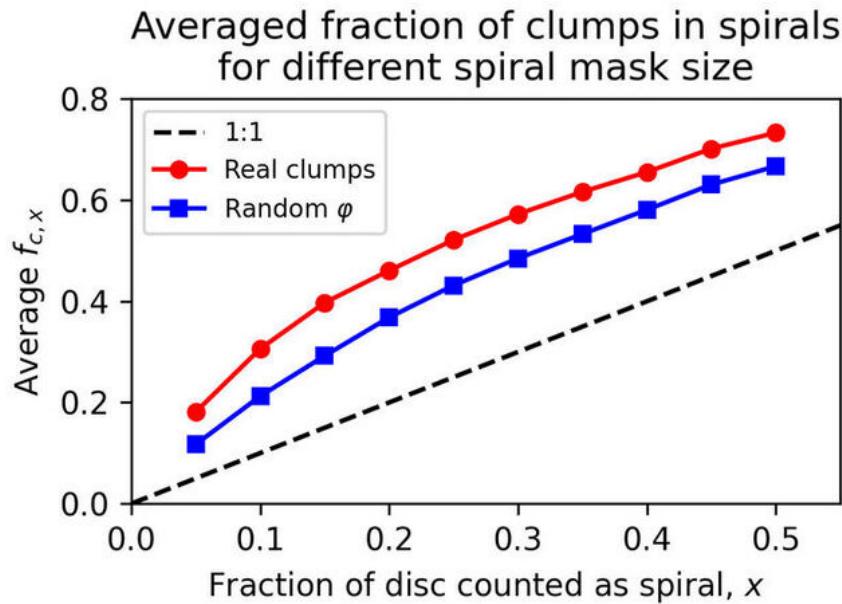


Рис. 14: На графике изображена зависимость усреднённого по выборке $f_{c,x}$ от x . Линии показывают зависимость для реальных клампов и для гипотетической системы клампов, которая бы имела случайно распределённые азимутальные положения φ , но расстояния до центра были бы теми же, что и прежде.

Мы видим, что доля клампов, попадающих в спиральные рукава, существенно выше, чем доля площади диска, занимаемая спиральными рукавами, вне зависимости от того, какую долю площади диска относить к спиральным рукавам, то есть, $f_{c,x} > x$. Так, например, в 20% пикселей диска с самой большой яркостью спиральной структуры попадает в среднем 46% клампов. Таким образом, мы видим, что в области спиральных рукавов концентрация клампов повышена в сравнении с остальным диском.

Для того, чтобы повысить надежность сделанных выводов, мы применяем тот же метод с некоторыми вариациями. Во-первых, вместо количественной доли клампов мы можем измерить часть потока излучения от системы клампов, которая попадает в спиральные рукава, поскольку клампы имеют ненулевой размер. Во-вторых, при выделении границ спиральной структуры можно использовать не саму яркость рукавов, а её долю в яркости всей галактики как основной критерий отнесения пикселя к спиральной структуре или межрукавному пространству. Мы наблюдаем, что качественно результат остаётся тем же самым: вне зависимости от метода и от того, какой порог берётся для разделения спиральных рукавов и межрукавного пространства, клампы оказываются сконцентрированы к спиральному узору.

Однако наблюдаемая зависимость в таком виде может быть связана не только с концентрацией клампов в спиральных рукавах, но и со сходством в радиальном распределении этих структур, как отмечено в начале этого подраздела. Для проверки этой гипотезы мы проводим следующий тест: для всех клампов в галактиках сохраняем r_c/h , но выбираем новое азимутальное положение φ случайным образом, и для получившейся системы также измеряем $f_{c,x}$. Тогда случайное распределение по азимуту оказывается заведомо независимым от спиральных рукавов, а распределение по радиусу сохраняется. Если в этом случае $f_{c,x}$ останется таким же, то это будет означать, что главную роль в пространственном совпадении клампов и спиральных рукавов играет сходство радиального распределения. На Рис. 14 показано $f_{c,x}$ для реального распределения клампов и для описанного «азимутально-случайного» распределения клампов.

При рассмотрении азимутально-случайного распределения клампов, мы обнаруживаем, что для него $f_{c,x} > x$, то есть, в спиральные рукава попадает более высокая доля азимутально-

случайных клампов, чем спиральный узор занимает в диске. Однако эта доля меньше, чем для реальной системы клампов: например, в 20% пикселей диска с наибольшей яркостью спирального узора попадает, в среднем, 37% клампов. Таким образом, скорее всего видимая концентрация клампов в спиральных рукавах связана не только с тем, что эти объекты населяют одну и ту же область диска, но и в ней они также склонны находиться поблизости.

2.4 Спектральное распределение энергии в клампах

Известно, что излучение галактик в разных частях спектра создаётся различными объектами (главным образом старыми и молодыми звёздами, межзвёздной средой). Поэтому спектральное распределение энергии излучения галактики в целом и её компонент по отдельности может дать представление об физических свойствах.

Для части галактик в нашей выборке — 33 объектов на $z > 1$, наблюдавшихся на JWST — изображения доступны в нескольких фильтрах, которые покрывают диапазон от голубой части спектра до ближней инфракрасной в системе отсчёта галактики (см. например, Рис. 3). Мы можем использовать эту информацию для анализа показателей цвета и спектрального распределения энергии (SED).

2.4.1 Показатели цвета

Одна из простых и часто используемых характеристик, отражающая спектральное распределение энергии — показатель цвета, который считают как разность звёздных величин объекта между двумя фильтрами. Однако в нашем случае, поскольку галактики находятся не на одинаковых z , показатель цвета для одной и той же пары фильтров будет показывать наклон разных частей спектра для разных галактик, и их сравнение не будет иметь большого смысла.

Вместо этого, для любого объекта мы можем приблизительно посчитать, каким бы его показатель цвета $g - r$ в собственной системе отсчёта (как если бы все галактики находилась на $z \approx 0$). Для этого мы интерполируем зависимость звёздной величины от длины волны и оцениваем звёздную величину, которую объект должен иметь на длине волны в собственной системе отсчёта, соответствующей фильтрам g и r ($\lambda_p = 477$ и 622 нм, соответственно, Fukugita и др. 1996). Разность этих звёздных величин мы и принимаем как цвет $g - r$. Отметим, что не для всех галактик доступные фильтры покрывают диапазон, содержащий длины волн g и r , и не во всех случаях мы можем сделать такую оценку показателя цвета.

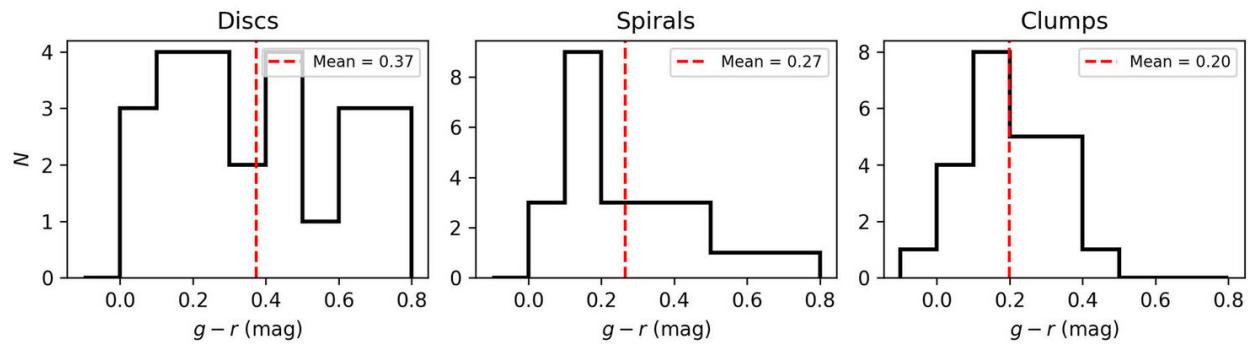
Таким способом мы можем посчитать цвета как галактик в целом, так и отдельных компонент, для которых есть фотометрические модели, будь то диск или отдельные клампы. На Рис. 15 мы приводим гистограммы распределения $g - r$ для диска, спирального узора и совокупности клампов в 24 галактиках, для которых набор фильтров позволяет их измерить.

Видно, что показатели цвета клампов и спиральных рукавов в среднем ниже, чем у дисков, что согласуется с представлением о повышенном звездообразовании в этих структурах. По сравнению со спиральными рукавами, клампы имеют ещё более голубой цвет, а значит, вероятно, и более активное звездообразование. В любом случае, параметры этих структур различаются, что подчёркивает важность их отдельного учёта.

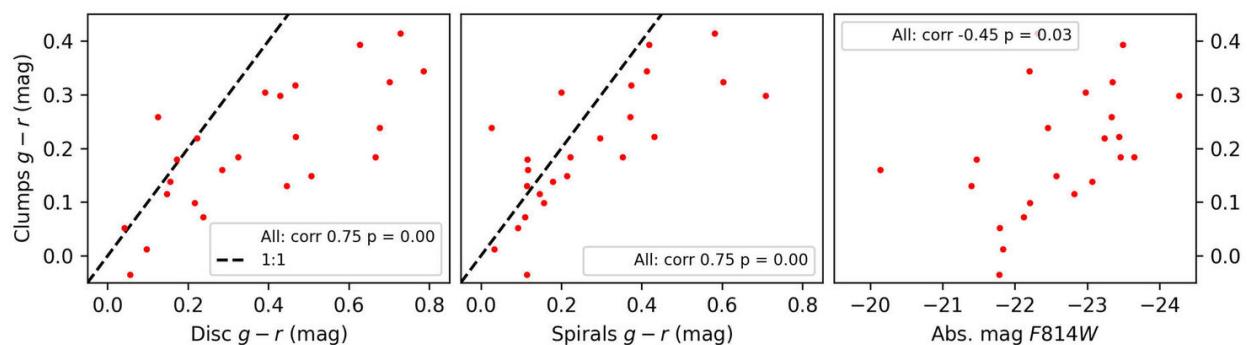
На Рис. 16 представлено сравнение показателя цвета клампов с цветами дисков и спирального узора по отдельным галактикам, а также со светимостью родительской галактики.

Хотя цвета клампов в среднем более голубые, чем у спиралей и дисков, присутствует сильная корреляция между цветами этих трёх структур. Учитывая, что и клампы, и спиральные рукава формируются из вещества диска, такой результат можно назвать ожидаемым. Также мы наблюдаем, что в более ярких галактиках клампы оказываются более красными. Это можно объяснить тем, что в среднем массивные галактики имеют более красный цвет, чем маломассивные (Kajisawa и Yamada 2005; Santini и др. 2014).

Components color distributions

Рис. 15: Гистограммы, показывающие распределения галактик по показателю цвета $g - r$ их компонент: дисков, спирального узора и совокупности клямпов (слева направо).

Clumps color correlations

Рис. 16: Для отдельных галактик показано соотношение $g - r$ системы клямпов с $g - r$ дисков (слева), $g - r$ спирального узора (по центру) и абсолютной звёздной величиной галактики (справа). Прерывистая линия показывает соотношение 1:1.

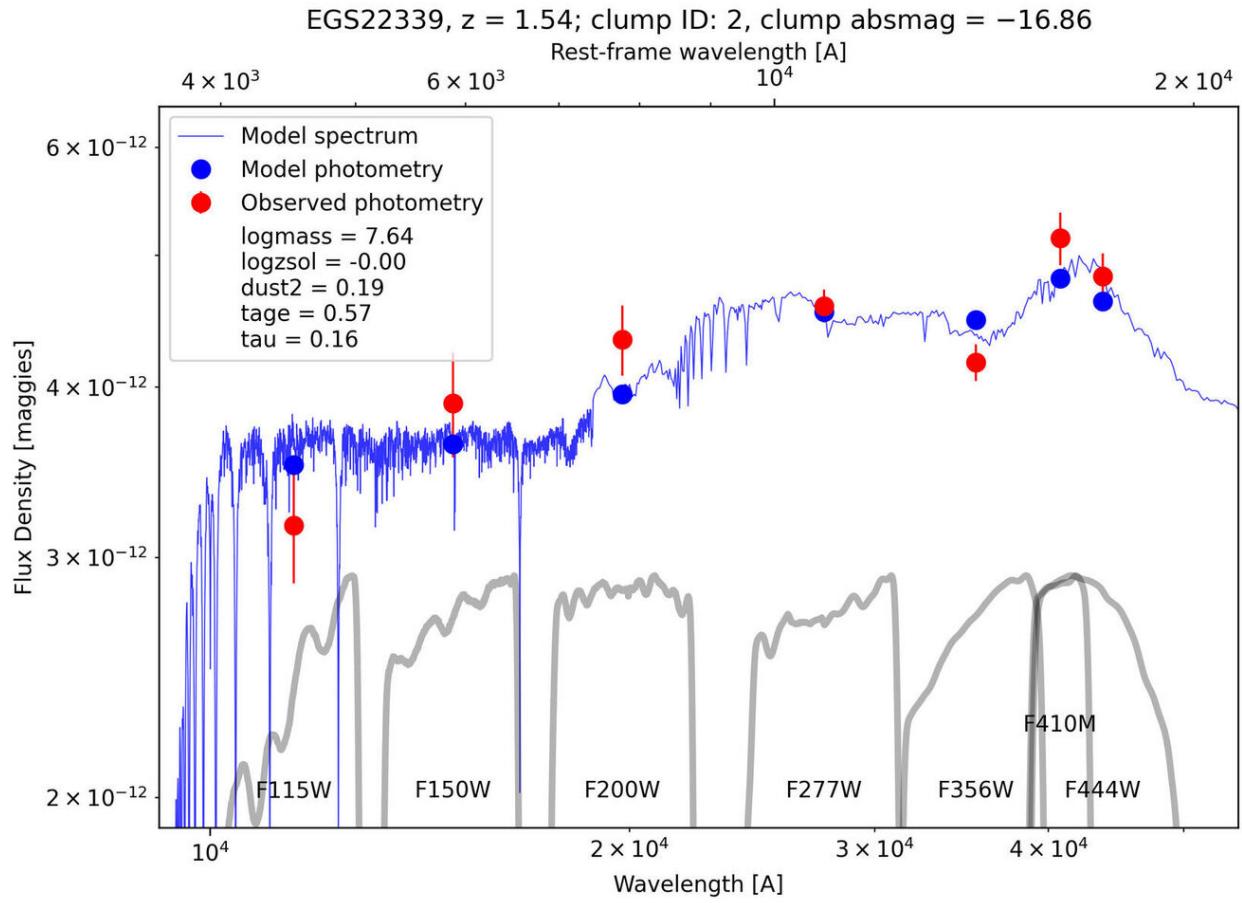


Рис. 17: Пример подгонки SED для одного из ярких клампов.

2.4.2 Подгонка спектрального распределения энергии

Подгонка спектрального распределения энергии (*Spectral energy distribution*, SED) — распространённая техника нахождения параметров звёздного населения (и иногда межзвёздной среды). Её суть заключается в том, что для наблюдаемой фотометрии в нескольких фильтрах подбирается звёздное население и пыль с такими параметрами, чтобы теоретический спектр наилучшим образом соответствовал реальной фотометрии (см. например, подробный обзор Conroy 2013). В этом разделе мы опишем применение такого подхода к моделированию нами SED клампов и его результаты.

В имеющихся данных мы выбрали клампы, абсолютная звёздная величина которых ярче -15^m , в галактиках, для которых построены модели хотя бы в 5 фильтрах, чтобы полученные результаты были более надёжными. Для подгонки SED мы использовали библиотеку `Prospector` для языка `Python` (Johnson и др. 2021), которая работает с кодом популяционного синтеза `FSPS` (Conroy и Gunn 2010), включает методы оптимизации и предоставляет удобные функции для подгонки SED.

На Рис. 17 показан пример SED для одного клампа и спектр, который был для него подогнан. В некоторых случаях качество подгонки SED оказалось плохим; часто это происходило из-за явного несоответствия потоков в соседних полосах (например, резких скачков). Если светимость клампа мала, то небольшие относительные различия в модельном распределении яркости в галактике могут сильно повлиять на оценку светимости клампа по остаточному изображению.

Мы рассмотрели клампы, для которых качество подгонки SED оказалось хорошим ($\chi^2 < 3$) и построили зависимость между массой и возрастом. Она приведена на Рис. 18.

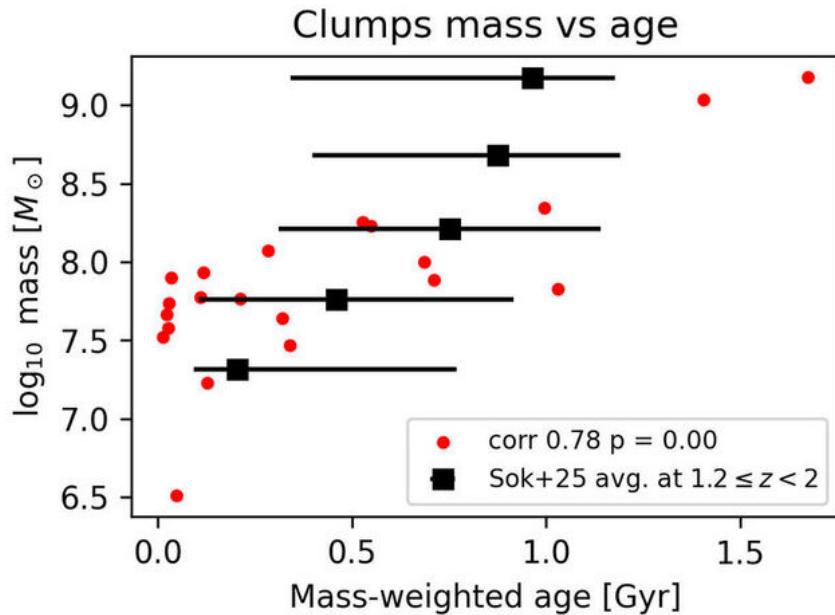


Рис. 18: Для каждого клампа отмечена масса и средневзвешенный по массе возраст, определённые с помощью подгонки SED. На график также нанесены средние значения возраста для диапазонов масс из работы Sok и др. 2025.

Мы видим сильную корреляцию между массой и возрастом, которая похожа на ту, что была обнаружена в работе Sok и др. 2025. Авторы объясняют эту зависимость тем, что время жизни клампов может быть связано с массой, и маломассивные могут распадаться быстрее. Однако отсутствие маломассивных клампов большого возраста можно также объяснить наблюдательными эффектами, так как такие клампы будут довольно тусклыми. В то же время, отсутствие (потенциально ярких) массивных и молодых клампов должно означать, что их масса возрастает достаточно постепенно.

Наконец, отметим, что наибольшая масса отдельно взятого клампа из нашей выборки составляет $10^{9.2} M_{\odot}$. В литературе встречаются и более высокие значения: например, в Sok и др. 2025 и Kalita, Suzuki и др. 2025 массы доходят практически до $10^{10} M_{\odot}$, в Kalita, Silverman, Daddi, Mercier и др. 2025 — до $10^{9.5} M_{\odot}$. Хотя мы измерили массу не для всех клампов, нам удалось сделать это для наиболее ярких, и мы ожидаем, что если бы в нашей выборке были такие же массивные клампы, то мы бы смогли измерить их массы. Вероятно, как и ранее, причина этих различий в том, что мы ранее вычли спиральный узор, и поэтому крупные его сегменты не выделяются как клампы.

3 Заключение и выводы

В работе исследованы клампы в 159 спиральных галактиках на $0.1 \leq z \leq 3.3$. Мы использовали сделанную ранее декомпозицию, в которой были учтены спиральные рукава, поэтому при выделении клампов нам удалось разделить излучение этих объектов и спирального узора. Мы измерили основные характеристики клампов, такие как их светимость, размер и пространственное распределение, а для некоторых из них исследовали распределение энергии в их спектре. Мы проверили, как соотносятся параметры клампов и спиральных рукавов. Кратко перечислим наиболее важные из полученных нами результатов:

- В оптическом и в ближнем инфракрасном диапазоне вклад клампов в полную светимость галактики зависит от длины волны и возрастает к голубой части спектра, что отражает

ет повышенный темп звездообразования в клампах. На наблюдаемый вклад влияет качество изображения: при его ухудшении теряется возможность обнаружить часть клампов (Рис. 3, 4).

- С учётом указанных наблюдательных эффектов, мы находим, что вклад клампов в полную светимость не зависит от массы галактики и возрастает от нашей эпохи до $z = 1 \dots 2$ (Рис. 5, 6). На длине волны около 0.8 мкм в собственной системе отсчёта он не превышает 10%, а около 2 мкм — не более 5%.
- Средний эффективный радиус клампов для изображений JWST ($z > 1$) составляет около 370 пк. У более крупных клампов наблюдается более высокая светимость. (Рис. 9, 10).
- Клампы и спирали населяют похожий диапазон галактоцентрических расстояний (для клампов — 1 … 2.5 экспоненциальных масштабов диска h). Сравнение реального азимутального распределения клампов со случайным показывает, что эти два типа структур не только занимают области диска с похожими параметрами, но и сконцентрированы друг к другу в пространстве (Рис. 11, 13, 14).
- Для светимостей, масс и размеров клампов мы получаем более низкие значения, чем в литературе. Этот результат можно назвать ожидаемым, поскольку в нашей работе спиральные рукава учтены отдельно и их излучение не приписывается клампам. Таким образом показано, как именно учёт спиральных рукавов важен для измерения параметров клампов.
- Показатели цвета $g - r$ клампов оказываются более голубыми, чем даже у спиральных рукавов (и для обоих типов объектов они ниже, чем в дисках). Это указывает на то, что звездообразование в клампах ещё более активно, чем в спиральных рукавах (Рис. 15).
- После подгонки SED клампов нами подтверждена зависимость между массой и возрастом клампов. Отсутствие очень молодых и массивных клампов указывает на то, что масса клампов возрастает постепенно. (Рис. 18).

В текущей работе нам удалось измерить различные характеристики клампов и показать как их сходства, так и различия со спиральными рукавами, а также подчеркнуть важность раздельного учёта этих структур.

При этом алгоритм измерения параметров клампов ещё может быть улучшен. Например, модели галактик с учётом спирального узора создавались без какого-либо систематического учёта клампов (и, более того, даже без намерения исследовать клампы в дальнейшем). Измерение свойств клампов проводилось лишь потом, в текущей работе, так что параметры клампов и спиральных рукавов могут быть несколько рассогласованы. По существу, учёт клампов (или, в общем случае, отдельных областей звездообразования) в фотометрических моделях является логическим продолжением учёта спиральных рукавов, особенно в коротковолновой части спектра, где трудно выделить гладкую составляющую спирального узора (см. например, Marchuk и др. 2024).

В любом случае, одновременное исследование клампов и спиральной структуры, особенно в комковатых спиральных галактиках, может помочь выяснить, как звездообразование во Вселенной переходит от преимущественно «комковатого» режима к упорядоченному. Учитывая, что на сегодняшний день существуют различные конкурирующие теории формирования спирального узора (см. например в обзоре Sellwood и Masters 2022), включение клампов и отдельных областей звездообразования в их исследования потенциально как может помочь сделать выбор в пользу какой-то из них, так и в целом пролить свет на отдельные процессы вековой эволюции в галактиках.

Хотя подгонка SED — очень перспективный способ измерения физических параметров компонент галактики, в том числе клампов, в нашей работе надёжность её результатов понижается из-за ограниченности доступного спектрального диапазона. Практически во всех случаях фильтры покрывают только оптическую и ближнюю инфракрасную части спектра; из-за этого не

удаётся разрешить вырождение между возрастом, металличностью и содержанием пыли (Conroy 2013; Pacifici и др. 2023). В этой части спектра увеличение каждой из этих трёх величин будет приводить к покраснению звёздного населения, и для конкретного SED крайне трудно отличить, например, молодое, но запылённое звёздное население от старого, но без пыли.

Таким образом, определить возраст клампов с высокой надёжностью пока не удаётся. Такая проблема не уникальна и возникала, например, в работе Kalita, Suzuki и др. 2025, где была получена лишь верхняя оценка возраста клампов около 700 миллионов лет. Наиболее прямым и надёжным способом решить эту проблему могла бы спектроскопия, при помощи которой можно определить эти параметры, но она крайне времязатратна для объектов на больших z .

Если не затрагивать спектроскопию, то для повышения надёжности результатов потребуются фотометрические данные в ультрафиолетовой и/или средней инфракрасной части спектра. Так, излучение в среднем инфракрасном диапазоне (несколько мкм и больше) создаётся практически исключительно пылью, а в ультрафиолетовом (на длинах волн короче Бальмеровского предела) — очень молодыми звёздами. Включение этих длин волн (хотя бы одного из двух диапазонов) дало бы оценку текущего темпа звездообразования и количества пыли, тем самым снимая вырождение между ними и не допуская критических ошибок (см. например Battisti и др. 2025).

К сожалению, на длинах волн короче предела Бальмера светимость галактик резко понижается по сравнению с оптическим диапазоном. Поэтому, хотя коротковолновые фильтры JWST NIRCam покрывают ультрафиолетовый диапазон начиная с $z \sim 1$, наблюдения и измерение параметров деталей структуры галактик в этой части спектра затруднены. Что же касается длинных волн, то здесь проблемой становится угловое разрешение: с увеличением длины волны оно неуклонно ухудшается. Хотя на JWST установлен инструмент MIRI для среднего инфракрасного диапазона (до 25 мкм), разрешения в нём уже недостаточно, чтобы различать клампы в таких галактиках, как в нашей выборке на $z > 1$. Только интерферометр ALMA, частично покрывающий субмиллиметровый диапазон, может работать со сравнимым угловым разрешением.

Выходом из этой ситуации может быть использование галактик, излучение которых подверглось гравитационному линзированию — этот эффект может многократно улучшать пространственное разрешение и усиливать яркость линзированной галактики. В настоящее время уже существуют работы, где исследовались мелкомасштабные клампы именно в таких галактиках (Claeyssens и др. 2023).

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.
- van den Bergh, Sidney и др. (1996). *A Morphological Catalog of Galaxies in the Hubble Deep Field*. *The Astronomical Journal* 112, c. 359.
- Conselice, Christopher J. (2014). *The Evolution of Galaxy Structure Over Cosmic Time*. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 52, c. 291–337.
- Espejo Salcedo, J. M. и др. (2025). *Galaxy Morphologies at Cosmic Noon with JWST: A Foundation for Exploring Gas Transport with Bars and Spiral Arms*. *Astronomy and Astrophysics* 700, A42.
- Tsukui, Takafumi и Satoru Iguchi (2021). *Spiral Morphology in an Intensely Star-Forming Disk Galaxy More than 12 Billion Years Ago*. *Science* 372, c. 1201–1205.
- Ikeda, Ryota и др. (2025). *Formation Of Sub-Structure In Luminous Submillimeter Galaxies (FOSSILS): Evidence of Multiple Pathways to Trigger Starbursts in Luminous Submillimeter Galaxies*.
- Adams, Dominic и др. (2022). *Galaxy Zoo: Clump Scout: Surveying the Local Universe for Giant Star-forming Clumps*. *The Astrophysical Journal* 931, c. 16.
- Puech, M. (2010). *Clumpy Galaxies at $z \sim 0.6$: Kinematics, Stability and Comparison with Analogue at Other Redshifts*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 406, c. 535–547.
- Genzel, R. и др. (2011). *The Sins Survey of $z \sim 2$ Galaxy Kinematics: Properties of the Giant Star-forming Clumps*. *The Astrophysical Journal* 733, c. 101.
- Livermore, R. C. и др. (2015). *Resolved Spectroscopy of Gravitationally Lensed Galaxies: Global Dynamics and Star-Forming Clumps on ~ 100 pc Scales at $1 < z < 4$* . *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 450, c. 1812–1835.
- Kalita, Boris S., Tomoko L. Suzuki и др. (2025). *Clumps as Multiscale Structures in Cosmic Noon Galaxies*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 536, c. 3090–3111.
- Kalita, Boris S., John D. Silverman, Emanuele Daddi, Wilfried Mercier и др. (2025). *Near-IR Clumps and Their Properties in High- z Galaxies with JWST/NIRCam*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 537, c. 402–418.
- Noguchi, Masafumi (1999). *Early Evolution of Disk Galaxies: Formation of Bulges in Clumpy Young Galactic Disks*. *The Astrophysical Journal* 514, c. 77–95.
- Elmegreen, Bruce G., Frédéric Bournaud и Debra Meloy Elmegreen (2008). *Bulge Formation by the Coalescence of Giant Clumps in Primordial Disk Galaxies*. *The Astrophysical Journal* 688, c. 67–77.
- Mandelker, Nir и др. (2014). *The Population of Giant Clumps in Simulated High- z Galaxies: In Situ and Ex Situ Migration and Survival*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 443, c. 3675–3702.
- Kalita, Boris S., John D. Silverman, Emanuele Daddi, Connor Bottrell и др. (2024). *A Rest-frame Near-IR Study of Clumps in Galaxies at $1 < z < 2$ Using JWST/NIRCam: Connection to Galaxy Bulges*. *The Astrophysical Journal* 960, c. 25.
- Chugunov, Ilia V., Alexander A. Marchuk и Aleksandr V. Mosenkov (2025). *Less Wound and More Asymmetric: JWST Confirms the Evolution of Spiral Structure in Galaxies at $z > 3$* . *Publications of the Astronomical Society of Australia* 42, e029.
- Chugunov, Ilia V., Alexander A. Marchuk, Aleksandr V. Mosenkov и др. (2024). *Galaxies Decomposition with Spiral Arms - I: 29 Galaxies from S4G*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 527, c. 9605–9624.
- Sok, Visal и др. (2025). *The Stellar Mass and Age Distributions of Star-Forming Clumps at $0.5 < z < 5$ in JWST CANUCS: Implications for Clump Formation and Destruction*.
- Bradley, Larry и др. (2024). *astropy/photutils: 1.13.0*. Веп. 1.13.0.
- Erwin, Peter (2015). *IMFIT: A Fast, Flexible New Program for Astronomical Image Fitting*. *The Astrophysical Journal* 799, c. 226.

- Moré, Jorge J. (1978). *The Levenberg-Marquardt Algorithm: Implementation and Theory*. B: *Numerical Analysis*. Под ред. G. A. Watson. Berlin, Heidelberg: Springer, с. 105—116.
- de la Vega, Alexander и др. (2025). *The Fraction of Clumpy Galaxies in JWST Surveys over \$2*.
- Melia, Fulvio и Manoj K. Yennapureddy (2018). *The Maximum Angular-Diameter Distance in Cosmology*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 480, с. 2144—2152.
- Whitney, A., C. J. Conselice, K. Duncan и L. R. Spitler (2020). *Surface Brightness Evolution of Galaxies in the CANDELS GOODS Fields up to $z \sim 6$: High-z Galaxies Are Unique or Remain Undetected*. *The Astrophysical Journal* 903, с. 14.
- Hathi, Nimish P. (2024). *ACS Data Handbook v. 13.0*. B: *ACS Data Handbook v. 13.0*. Т. 13, с. 13.
- Madau, Piero и Mark Dickinson (2014). *Cosmic Star-Formation History*. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 52, с. 415—486.
- McGaugh, Stacy S. и James M. Schombert (2014). *Color-Mass-to-light-ratio Relations for Disk Galaxies*. *The Astronomical Journal* 148, с. 77.
- Dekel, Avishai и др. (2023). *Conditions for Clump Survival in High-z Disc Galaxies*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 521, с. 4299—4322.
- Fukugita, M. и др. (1996). *The Sloan Digital Sky Survey Photometric System*. *The Astronomical Journal* 111, с. 1748.
- Kajisawa, M. и T. Yamada (2005). *Evolution of the Dependence of Rest-Frame Color and Morphology Distribution on Stellar Mass for Galaxies in the Hubble Deep Field-North*. *The Astrophysical Journal* 618, с. 91—107.
- Santini, P. и др. (2014). *The Evolution of the Dust and Gas Content in Galaxies*. *Astronomy and Astrophysics* 562, A30.
- Conroy, Charlie (2013). *Modeling the Panchromatic Spectral Energy Distributions of Galaxies*. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 51, с. 393—455.
- Johnson, Benjamin D., Joel Leja, Charlie Conroy и Joshua S. Speagle (2021). *Stellar Population Inference with Prospector*. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 254, с. 22.
- Conroy, Charlie и James E. Gunn (2010). *FSPS: Flexible Stellar Population Synthesis*. *Astrophysics Source Code Library*, ascl:1010.043.
- Marchuk, Alexander A. и др. (2024). *Galaxies Decomposition with Spiral Arms - II. A Multiwavelength Case Study of M 51*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 528, с. 1276—1295.
- Sellwood, J. A. и Karen L. Masters (2022). *Spirals in Galaxies*. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 60.
- Pacifci, Camilla и др. (2023). *The Art of Measuring Physical Parameters in Galaxies: A Critical Assessment of Spectral Energy Distribution Fitting Techniques*. *The Astrophysical Journal* 944, с. 141.
- Battisti, A. J., E. da Cunha, S. Jin и J. A. Hodge (2025). *Avoiding (Photo-z) Catastrophe*. *Research Notes of the American Astronomical Society* 9, с. 157.
- Claeyssens, Adélaïde и др. (2023). *Star Formation at the Smallest Scales: A JWST Study of the Clump Populations in SMACS0723*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 520, с. 2180—2203.

Clumps in galaxies at $z \lesssim 3$ and their connection with spiral armsI.V. Chugunov¹, A.A. Marchuk¹¹ The Central Astronomical Observatory of the RAS at Pulkovo

Received 1 December 2025 / Accepted 4 December 2025

Abstract

Star formation in distant galaxies, unlike the local Universe, often does not produce spiral structure, but rather is concentrated in separate clumps. Studies devoted to clumps rarely consider spiral arms as well, and the connection between clumps and spiral structures is not studied well. In our work, we used a sample of 159 spiral galaxies at $0.1 \leq z \leq 3.3$ observed by HST and JWST for which decomposition with spiral arms was done previously. Using corresponding residual images, we identified separate clumps and measured their properties and also checked their connection with the parameters of spiral arms. In particular, we found that, if spiral arms are accounted for, clumps' luminosities, masses and sizes become smaller. Clumps themselves are spatially concentrated towards spiral arms and their colors are closer to spirals than to discs.

key words: High- z galaxies, spiral structure, clumps