

УДК 524.82-17

КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ТЕСТЫ В ЭПОХУ JWST. II: ТЕСТ ТОЛМЕНА

© 2026 В. В. Цымбал^{1, 2}, А. А. Райков^{3, 4}, Н. Ю. Ловягин^{5, 6*}¹Институт астрономии Российской академии наук, Москва, 119017 Россия²Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, Нижний Архыз, 369167 Россия³Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук, Санкт-Петербург, 196140 Россия⁴Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук, Санкт-Петербург, 196140 Россия⁵Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия⁶Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, 190008 Россия

Поступила в редакцию 24 сентября 2025 года; после доработки 9 июня 2026 года; принята к публикации 19 июля 2026 года

В данной работе рассматривается космологический тест: зависимость поверхностной яркости от красного смещения z (тест Толмена). Анализ наблюдаемых величин выполнен на базе каталога ASTRODEEP–JWST. Для расчетов использованы 6860 галактик с надежно определенным спектральным красным смещением. Полученные результаты анализа подтверждают уменьшение средней поверхностной яркости галактик с расстоянием. Однако наблюдаемый тренд существенно отличается от предсказанного стандартной космологической моделью: вместо ожидаемого закона убывания $(1+z)^{-4}$ на больших z наблюдается линейная зависимость.

Ключевые слова: космология: ранняя Вселенная — космология: расширение — космология: наблюдения

1. ВВЕДЕНИЕ

В предыдущей работе (Raikov et al., 2025) мы рассматривали космологический тест «угловой размер — красное смещение». Была отмечена значимость подобных исследований в свете нерешенных проблем в стандартной космологической модели (Λ CDM) и появления новых наблюдательных данных (Dolgov, 2018; Aghanim et al., 2020; Di Valentino et al., 2021; Kamionkowski and Riess, 2023; Melia, 2024; Muñoz et al., 2024), а также в контексте классических и современных работ (Geller and Peebles, 1972; Sandage, 1988; Weinberg, 2008; Orlov and Raikov, 2016), рассматривающих различные космологические модели. Недавняя работа Leauthaud and Riess (2025) описывает текущий статус нерешенных проблем в контексте необходимости подготовки к возможному пересмотру концепций Λ CDM.

Данная работа посвящена более сложному в реализации тесту, предложенному Tolman (1930).

Суть теста состоит в том, что в локальных масштабах поверхностная яркость источника излучения не меняется с расстоянием. Но в космологии это не так: яркость должна зависеть от расстояния до источника, причем вид этой зависимости отличается в разных космологических теориях. Так, в стандартной космологической Λ CDM-модели яркость излучения падает в результате действия следующих факторов:

- 1) уменьшения энергии регистрируемых фотонов из-за красного смещения, что приводит к падению яркости пропорционально $(1+z)^{-1}$;
- 2) увеличения угловых размеров источника, что приводит к уменьшению яркости пропорционально $(1+z)^{-2}$;
- 3) временной задержки регистрируемых фотонов из-за космологического замедления времени, что приводит к падению яркости пропорционально $(1+z)^{-1}$.

Таким образом, в рамках Λ CDM яркость регистрируемого излучения должна падать пропорционально $(1+z)^{-4}$, тогда как, например, в рамках

*E-mail: n.lovagin@spbu.ru

теории «усталого света» или при применении линейного закона Хаббла (наивной Евклидовой модели) на уменьшение наблюдаемой яркости влияет только первый фактор.

Практическая реализация теста Толмена существенно сложнее, чем теста «угловой размер — красное смещение». Это связано с тем, что мы не можем измерять болометрическую яркость космологических источников и не имеем источников с одинаковой яркостью при разных значениях z . Более того, даже в небольшом диапазоне красных смещений излучаемая яркость различных галактик в конкретном интервале длин волн может существенно отличаться друг от друга.

В силу этого количество известных нам работ по исследованию теста Толмена невелико. Прежде всего стоит отметить длительный цикл работ (Lubin and Sandage, 2001a,b,c; Sandage and Lubin, 2001; Sandage, 2010), в которых показано падение поверхностной яркости эллиптических галактик с увеличением расстояния до них. К сожалению, в силу того, что авторы имели доступ к наблюдениям на сравнительно небольших z , проведение полного теста Толмена в космологических масштабах было затруднительно.

Как и в нашей предыдущей работе, здесь мы анализируем тест Толмена на основе данных каталога ASTRODEEP—JWST (Merlin et al., 2024), содержащего более 500 000 галактик на больших красных смещениях (до $z \lesssim 20$). Для этого нами отобраны 6860 объектов этого каталога с надежно определенными спектральными красными смещениями ($z \lesssim 14$).

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Каталог ASTRODEEP—JWST (Merlin et al., 2024) включает сведения о 531 173 галактиках. Для каждого объекта приведены фотометрические наблюдения в 16 фильтрах (восемь фильтров HST и восемь — JWST) в диапазоне длин волн 4300–45 000 Å, погрешность полученных данных, а также фотометрические красные смещения, измеренные четырьмя способами. Для объектов с известным спектроскопическим красным смещением, соответствующие значения также приведены. Совокупная площадь обзора на небесной сфере составляет примерно 0.2 квадратных градуса. Каталог ASTRODEEP—JWST однороден по представленным в нем данным, так как авторы свели изображения HST и JWST в общую систему мозаик и заново провели калибровку. Фотометрические потоки измерены как сумма яркостей пикселей, содержащихся в пределах так называемой эффективной (оптимальной) апертуры. Для вычисления потоков Merlin et al. (2024) использовали апертурную фотометрию, выбирая для каждого объекта

наилучшую из девяти апертур с угловыми размерами от 0".2 до 5".30. Соответствующие значения радиусов апертур приведены в каталоге.

Среднюю поверхностную яркость в каждом фильтре мы рассчитывали как отношение потока в этом фильтре к площади апертуры.

Альтернативно поверхностную яркость можно определять через площадь круга или эллипса, вычисляемую по эффективному радиусу (радиусу, содержащему 50% регистрируемого света) либо по большой и малой полуосям эллипса объекта, также приведенным в каталоге. Расчеты показывают, что результаты, полученные двумя способами, практически совпадают. Однако использование радиусов апертур представляется нам более корректным.

Такие факторы, как функция рассеяния точки (PSF) и потеря внешних областей более слабых (далеких) объектов в шумах, несомненно, оказывают влияние на форму распределения яркости по диску, но не затрагивают величину суммарной яркости внутри апертуры (потока), которую мы берем для вычисления средней поверхностной яркости. Разумеется, значение оптимальной апертуры уменьшается на больших z , но и регистрируемый поток также падает. Кроме того, при вычислении потоков в фильтрах авторы каталога учитывали измеренные PSF, поэтому мы не ожидаем искусственного падения средней яркости из-за используемого метода.

Как и в нашей предыдущей работе, мы исключали из анализа галактики с низким качеством измерений, объекты, блендируемые соседними источниками, а также расположенные у краев мозаик и классифицируемые как точечные (критерий $flags < 80$). В выборку вошли только галактики с надежно определенными спектроскопическими красными смещениями и наблюдениями JWST. Такой подход, хотя и ограничивает объем выборки и максимально доступные значения z , позволяет избежать систематических ошибок, характерных для фотометрических красных смещений. В итоге было отобрано 6860 галактик с подтвержденными спектроскопическими красными смещениями.

На рис. 1 представлены значения поверхностной яркости всех галактик выборки во всех фильтрах каталога в логарифмическом масштабе. Поверхностная яркость определена как отношение потока в фильтре к эффективной апертуре. Также приведены эффективные длины волн фильтров (см. Merlin et al., 2024).

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЯРКОСТИ

Как отмечалось в разделе 1, практически невозможно отобрать из имеющихся данных галактики

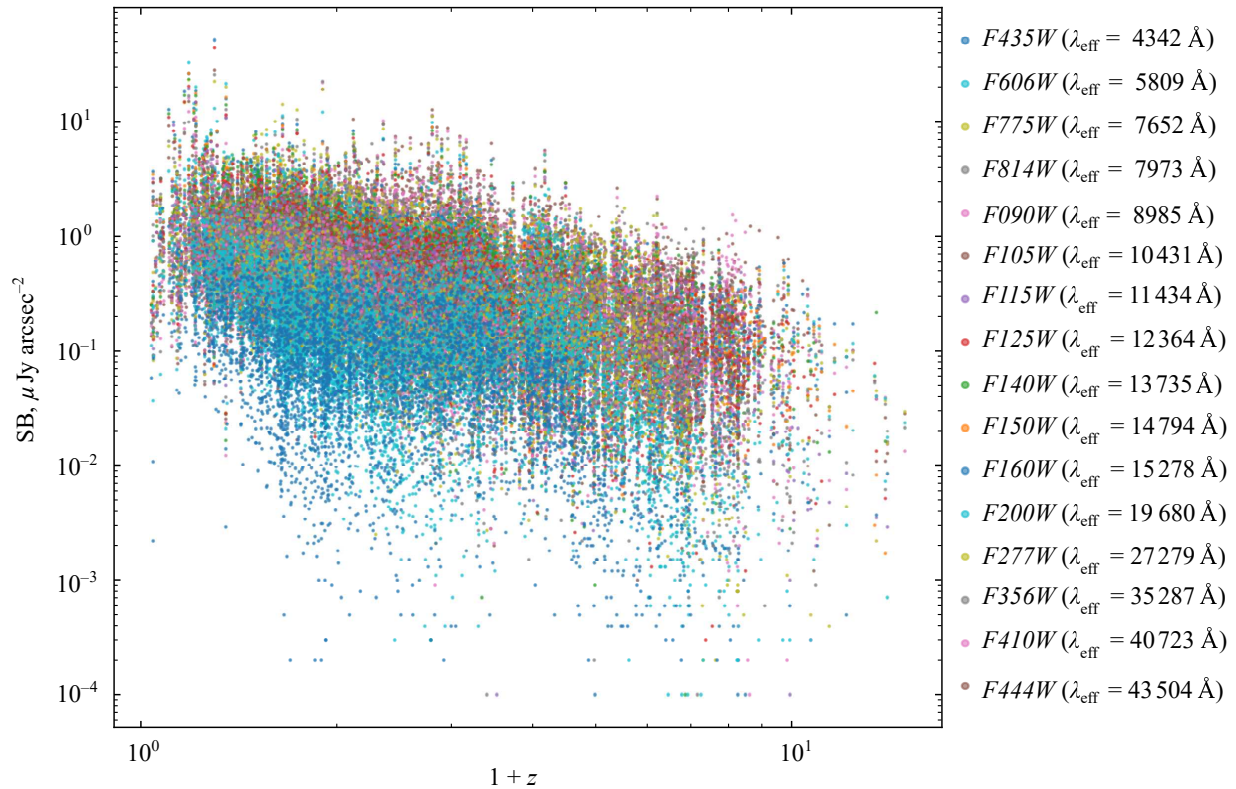


Рис. 1. Поверхностная яркость 6860 галактик в 16 фильтрах каталога ASTRODEEP–JWST в логарифмическом масштабе. Видно, что имеет место падение средней поверхностной яркости с увеличением красного смещения.

с одинаковой интенсивностью излучения в конкретном диапазоне и при этом расположенные на разных z . Это связано не только с наблюдательной селекцией, разнообразием галактик и их спектров, но и с тем, что для объектов на разных z одни и те же диапазоны спектра (в системе покоя галактики), попадают в разные фильтры приемника. В связи с этим мы используем несколько физически обоснованных подходов для оценки тренда изменения средней поверхностной яркости от z .

Первый подход состоит в усреднении поверхностной яркости галактики по всему диапазону длин волн, доступному в каталоге. Фильтры, в которых поверхностная яркость не определена, исключаются из расчета среднего значения. Так мы максимально приближаем наблюдаемую величину к понятию болометрической яркости, использованному в работе Толмена.

Во втором подходе в качестве характеристики поверхностной яркости галактики выбирается ее максимальное значение среди всех 16 наблюдаемых цветов. Такая выборка отражает наиболее интенсивные участки поверхности галактики, которые могут эволюционировать с изменением z . Не ставя перед собой задачу исследовать природу формирования конкретных участков спектров галактик, отметим, что их интенсивность примерно

одинакова независимо от основных источников излучения. Это означает, что используемый метод не приводит к завышению или занижению оценки наблюдаемой поверхностной яркости как функции z .

Для обоих подходов построены диаграммы рассеяния галактик в координатах $(1+z, SB)$, где SB — поверхностная яркость, выраженная в $\mu\text{Jy arcsec}^{-2}$. Аппроксимация выполнена простым невзвешенным методом наименьших квадратов в логарифмическом масштабе. Результаты представлены на рис. 2. На графике также показаны теоретические зависимости поверхностной яркости для стандартной и стационарной космологических моделей. В рамках этих моделей яркость галактик при данном красном смещении определяется относительно ее среднего значения при $z \rightarrow 0$ множителями $(1+z)^{-4}$ и $(1+z)^{-1}$ соответственно. Видно, что, начиная с $z \sim 4$, наблюдаемое падение яркости существенно меньше, чем предсказывает стандартная космологическая модель.

Третий подход — анализ зависимости от z поверхностной яркости, приведенной к системе покоя (rest frame). Для каждой отобранной галактики рассчитывается распределение средней поверхностной яркости как функции эффективной длины волны каждого фильтра, редуцированной к системе покоя. Затем для разных z выбирается общий

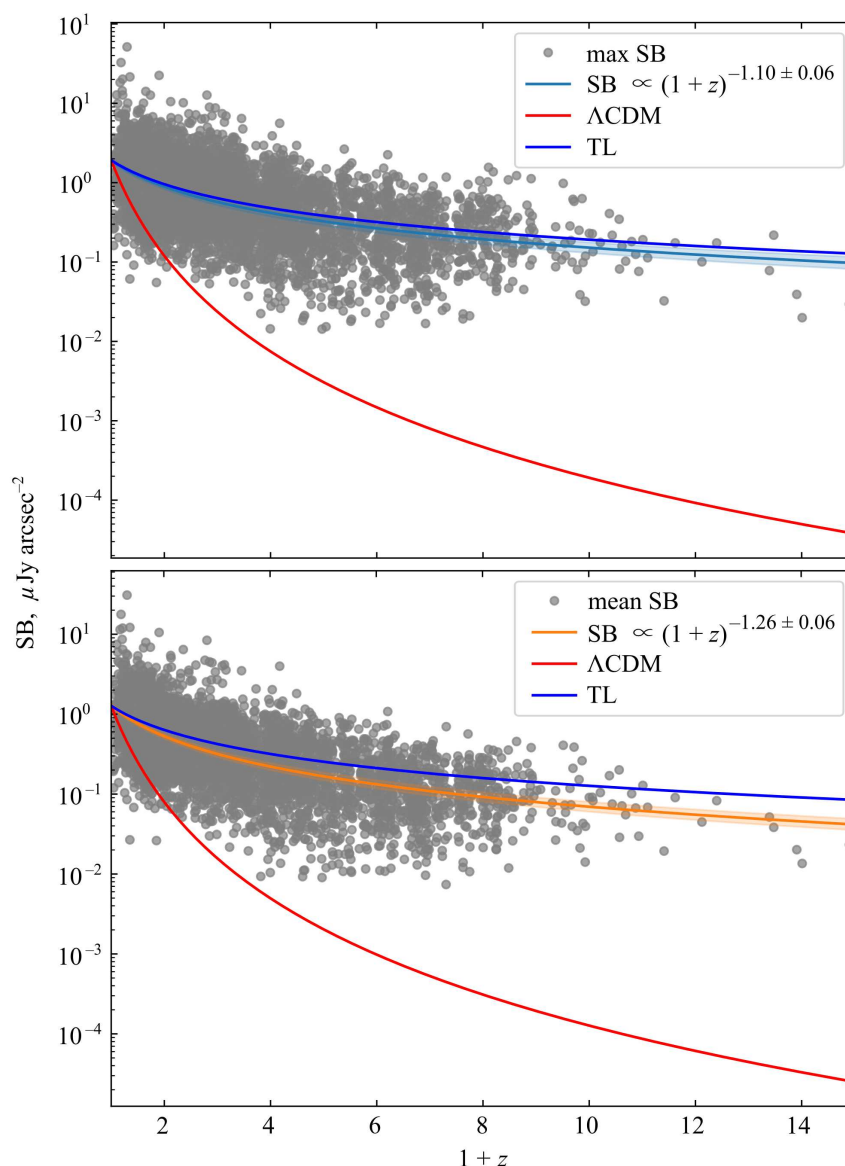


Рис. 2. Поверхностная яркость 6860 галактик в зависимости от красного смещения: (а) — максимальная, (б) — средняя яркость по 16 фильтрам каталога ASTRODEEP–JWST. Наблюдаемые значения обозначены точками. Сплошными линиями показаны кривая наилучшей аппроксимации с полосой формальных ошибок, а также теоретические зависимости для стандартной космологической модели $SB \propto (1+z)^{-4}$ и модели «усталого света» $SB \propto (1+z)^{-1}$.

интервал длин волн в системе покоя и вычисляется среднее значение поверхностных яркостей по фильтрам, попавшим в данный диапазон в системе приемника. Фильтры, в которых поверхностная яркость не определена, исключают из расчета среднего значения.

Поскольку галактики в каталоге имеют большой разброс по z , общий интервал длин волн может быть определен только для ограниченного диапазона z . Как видно из рис. 1 и 2, эффект падения яркости с расстоянием особенно заметен на больших z . Кроме того, на этих z выборка наблюдаемых галактик должна становиться более однородной вследствие эволюции. Поэтому мы выбрали диапа-

зон $3 < z < 14$ и интервал длин волн $1500\text{--}2000\text{ \AA}$ в системе покоя. В полученной выборке из 1507 галактик этот интервал соответствует преимущественно излучению молодых звезд. Несмотря на возможную неоптимальность выбора такого интервала, он продиктован необходимостью обеспечить общую спектральную область в максимально широком диапазоне z . Заметим, что интенсивность излучения молодых звезд не зависит от z и, следовательно, мы достигаем поставленной задачи — выбора кваzystандартного источника излучения.

Результаты представлены на рис. 3. Из диаграммы видно, что наблюдаемое падение яркости с

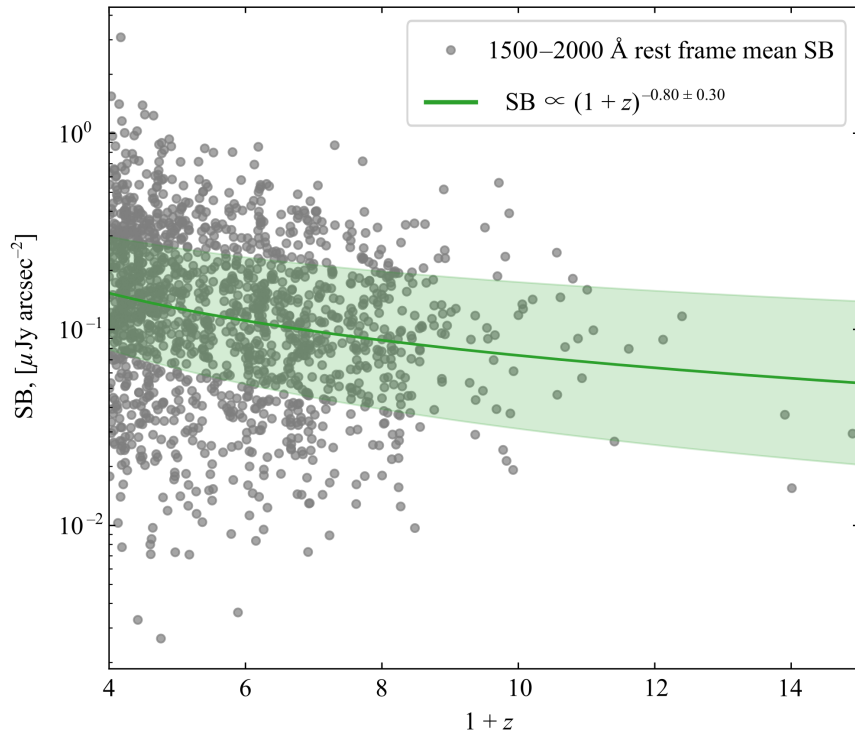


Рис. 3. Средняя поверхностная яркость в диапазоне длин волн 1500–2000 Å для 1507 галактик в зависимости от красного смещения. Сплошной линией показана кривая наилучшей аппроксимации с полосой формальных ошибок.

расстоянием до галактики несколько слабее, чем на рис. 2, и разброс значений больше.

К сожалению, поскольку работа посвящена тестированию космологических моделей, мы не можем применить отбор значений, например, по абсолютным звездным величинам (M_{UV}), так как они определяются в рамках конкретной космологической модели.

Для ограниченного нивелирования эффекта наблюдательной селекции мы провели следующий анализ.

Весь диапазон значений по z разбили на бины. В каждом бине построили гистограмму распределения поверхностной яркости и определили на ней бин с максимальным количеством галактик N (моду). Исходя из предположения пуассоновского характера распределения поверхностных яркостей, отобрали бины по SB , в которых количество галактик превышает $N - \sqrt{N}$. Разброс значений в этих бинах гистограммы приняли за оценку ошибки, а средневзвешенное по числу галактик значение поверхностной яркости — за ее характерное значение для данного z (соответствует центру бина по z).

Выбранная таким образом поверхностная яркость с физической точки зрения может считаться яркостью наиболее типичной (наиболее часто встречающейся) галактики на данном z . Такой подход позволяет значительно уменьшить влияние наблюдательной селекции и частично проверить

устойчивость метода к разнообразию спектров галактик и их красных смещений при определении поверхностной яркости в фильтре системы приемника.

На рис. 4 представлены гистограммы максимальной по всем фильтрам поверхностной яркости в бинированном диапазоне $0.1 < z < 8.5$ (вне этого диапазона в каждом бине содержится слишком мало галактик для надежного анализа). Использовано 25 бинов для разбиения диапазона z и по 25 для гистограмм поверхностной яркости внутри каждого такого бина. Все бины — как по поверхностной яркости, так и по z — вычислялись в логарифмических координатах: $\log SB$, $\log(1+z)$.

Далее полученные зависимости мы аппроксимировали с помощью взвешенного метода наименьших квадратов для определения коэффициента пропорциональности в соотношении $SB \propto (1+z)^\alpha$. На рис. 5 показаны результаты анализа гистограмм для средней и максимальной поверхностной яркости (соответствуют первому и второму способам определения, описанным выше).

Выбор «наиболее типичной» галактики в бинах по z позволяет исключить неравномерный вклад слабых галактик, отсеиваемых из-за наблюдательной селекции на разных z , в соответствии с коррекцией на смещение Малмквиста. Это дает еще один способ оценки эталонного источника. Фактически рис. 5 представляет собой сглаженный вариант

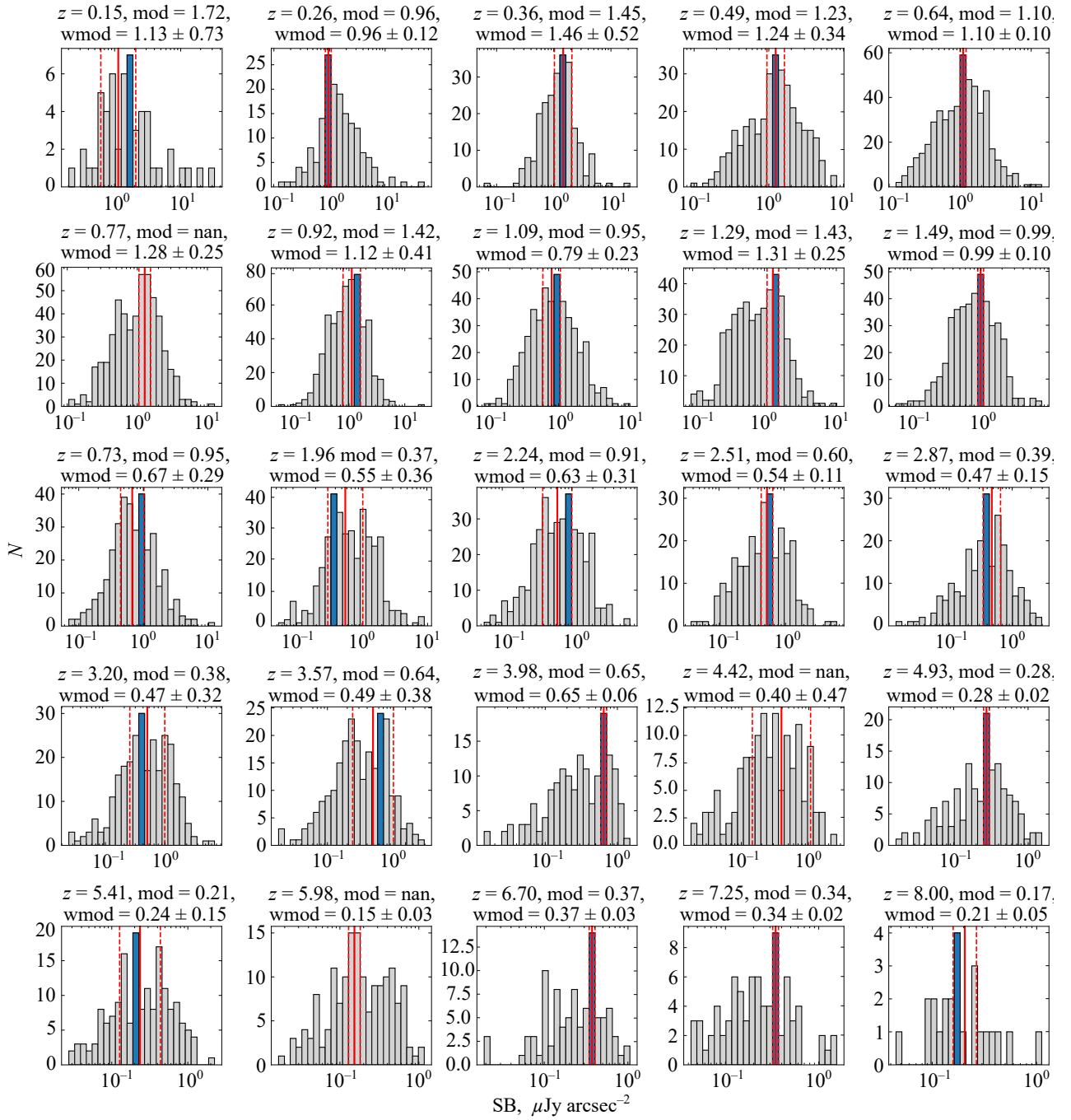


Рис. 4. Гистограммы поверхностной яркости в бинах по z . Приведены середины бинов по z , модальные значения поверхностной яркости (mod, столбец выделен цветом), взвешенное модальное значение (wmod) и разброс бинов, близких к модальным (ошибка wmod и вертикальные полосы). Поверхностная яркость каждой галактики определялась как максимальная среди всех фильтров каталога.

рис. 2 и нагляднее демонстрирует зависимость средней поверхностной яркости галактик от z .

Анализ различных методов показывает, что поверхностная яркость галактик убывает по закону $SB \propto (1+z)^\alpha$, где $\alpha \sim -1$. Полученные оценки согласуются в пределах погрешностей.

4. АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЯРКОСТИ

Рассмотрим эволюцию средней интенсивности излучения галактики в стандартной космологической модели. Оценим эту величину для нашей выборки в рамках двух сценариев: Λ CDM и эталонной статической модели «усталого света».

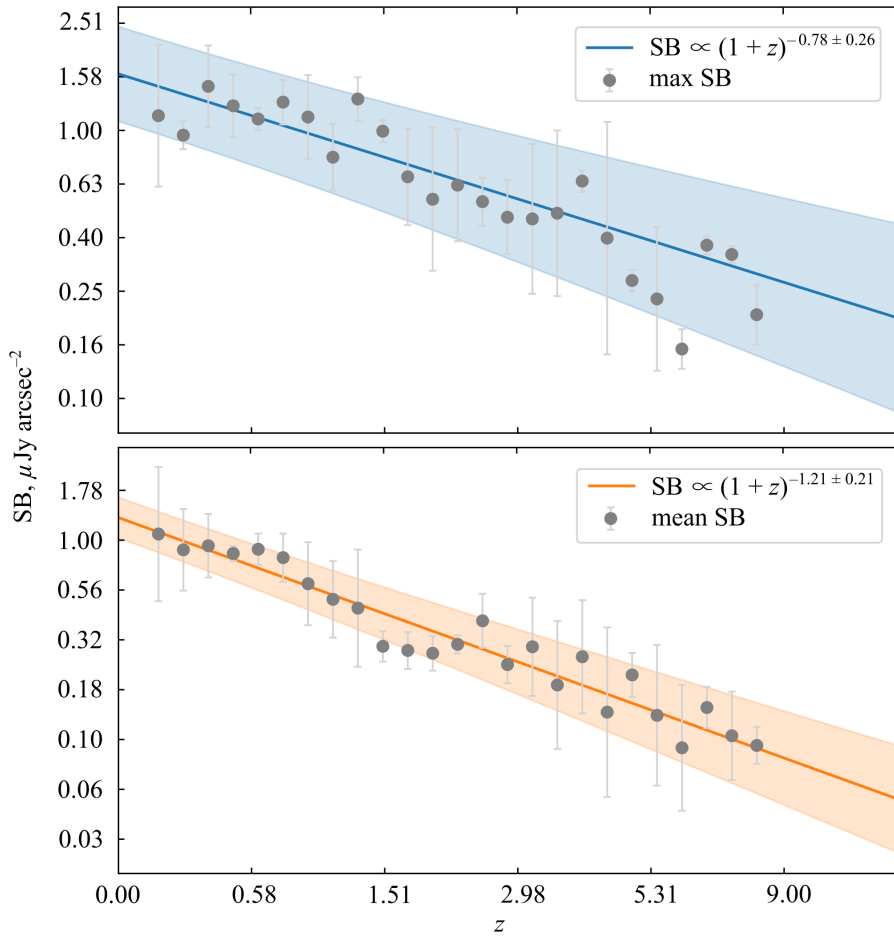


Рис. 5. Поверхностная яркость «наиболее типичной» галактики в сравнении с красным смещением (определяется как мода на гистограмме в диапазоне z). Панель (а) — максимальная, панель (б) — средняя яркость по 16 фильтрам каталога ASTRODEEP-JWST. Определенные значения обозначены точками. Сплошными линиями показана кривая наилучшей аппроксимации с полосой формальных ошибок. График приведен в логарифмическом масштабе осей.

Угловой размер θ галактики определяется как

$$\theta = \frac{R}{D_A},$$

где R — линейный размер галактики, D_A — расстояние по угловому размеру. Расстояние по светимости выражается формулой

$$D_L = \sqrt{\frac{L}{4\pi f_{\text{obs}}}},$$

где L — светимость галактики, f_{obs} — наблюдаемый поток. Наблюдаемая интенсивность излучения J_{obs} определяется как

$$J_{\text{obs}} = \frac{D_A^2}{R^2} f_{\text{obs}}.$$

При этом для модели Λ CDM $D_L = (1+z)^2 D_A$, а для модели «усталого света» — $D_L = \sqrt{1+z} D_A$.

Таким образом, проделав соответствующие подстановки, получаем

$$J_{\text{obs}}^{\Lambda\text{CDM}} = \frac{f_{\text{obs}} \frac{L}{4\pi f_{\text{obs}}}}{R^2 (1+z)^4},$$

$$J_{\text{obs}}^{\text{TL}} = \frac{f_{\text{obs}} \frac{L}{4\pi f_{\text{obs}}}}{R^2 (1+z)}.$$

Принимая среднюю интенсивность галактики $J_0 = \frac{L}{4\pi R^2}$ находим

$$J_0^{\Lambda\text{CDM}} = (1+z)^4 J_{\text{obs}},$$

$$J_0^{\text{TL}} = (1+z) J_{\text{obs}}.$$

Пересчитаем данные, представленные на рис. 2а (максимальную поверхностную яркость галактики по 16 фильтрам), в J_0 (поверхностную яркость SB_0)

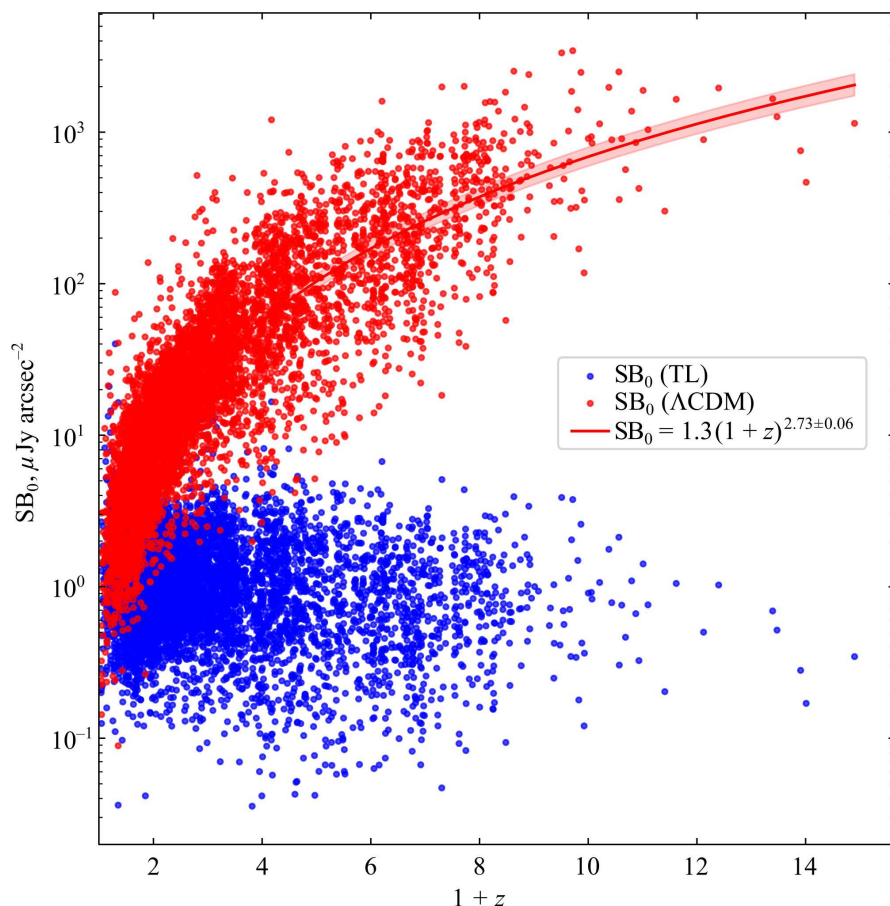


Рис. 6. Поверхностная яркость галактик SB_0 в двух моделях. Взята максимальная яркость по 16 фильтрам каталога ASTRODEEP–JWST. Определенные значения обозначены точками. Сплошными линиями показана кривая наилучшей аппроксимации с полосой формальных ошибок, иллюстрирующая эволюцию поверхностной яркости галактик в рамках Λ CDM-модели.

в рамках двух моделей по приведенным формулам. Результаты представлены на рис. 6.

В предыдущей работе мы показали, что эволюция линейных размеров галактик в рамках Λ CDM соответствует темпу расширения пространства $(1+z)$. Можно ожидать, что средняя интенсивность излучения будет расти с красным смещением как $(1+z)^2$ за счет роста звездной плотности. Соответственно, наблюдаемая поверхностная яркость должна убывать как $(1+z)^{-2}$ из-за эффектов красного смещения и замедления времени. Наши результаты демонстрируют некоторое отклонение от данной зависимости. Однако текущая точность, связанная со сложностью определения болометрической поверхностной яркости и учета наблюдательной селекции, не позволяет выявить однозначный эволюционный тренд, который должен включать в себя как эволюцию звездного населения, так и изменение звездной плотности галактик. Для прояснения этого вопроса необходимы дополнительные исследования и моделирование.

Другим фактором, влияющим на поверхностную яркость, является состав звездного населения галактики, то есть характерный поток источника. Так, в галактиках с преобладанием молодых О–В-звезд она оказывается выше. В частности, при анализе в диапазоне длин волн 1500–2000 Å в системе покоя фактически оценивается поверхностная яркость галактики, создаваемая именно молодыми О–В-звездами. При более высокой интенсивности звездообразования доля таких звезд возрастает, что приводит к увеличению истинной поверхностной яркости. Заметим, что именно для этого варианта анализа (рис. 3) наблюдается наименьшая скорость падения поверхностной яркости, что может свидетельствовать о снижении скорости звездообразования с возрастом. Однако данный вопрос лежит за пределами этого исследования.

Вместе с тем в рамках стационарной модели предполагается отсутствие значимой эволюции как интенсивности излучения, так и линейных размеров — что согласуется с нашими предыдущими результатами.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По сравнению с космологическим тестом «угловой размер — красное смещение» тест Толмена является более сильным, так как предсказываемая стандартной космологией зависимость от красного смещения предполагает падение поверхностной яркости пропорционально четвертой, а не первой степени ($1 + z$). В то же время тест Толмена сложнее реализовать на практике: он требует наличия идеального источника во всем диапазоне красных смещений. Выявить тренд, характеризующий искомую зависимость поверхностной яркости от красного смещения, можно лишь при наличии большого числа измерений в максимально широком диапазоне z . Именно поэтому практическая реализация теста Толмена стала возможной лишь с появлением наблюдений JWST.

Как показано в нашей работе, вне зависимости от применяемой методики анализа фотометрических наблюдений галактик общий тренд средней поверхностной яркости демонстрирует убывание с увеличением красного смещения. Выявленное падение поверхностной яркости с расстоянием на больших z близко к линейному по $(1 + z)$.

В рамках стандартной космологии такое падение поверхностной яркости с расстоянием может быть объяснено лишь значительной эволюцией поверхностной яркости — с темпом порядка $(1 + z)^3$. В то же время в рамках стационарной космологической модели значимой эволюции поверхностной яркости, как и линейных размеров галактик, не выявляется.

БЛАГОДАРНОСТИ

Каталог ASTRODEEP, использованный в этой работе, частично основан на наблюдениях, проведенных с помощью космического телескопа Джеймса Уэбба NASA/ESA/CSA в рамках программы JWST-ERS-1342. Данные были получены из архива Mikulski для космических телескопов при Научном институте космических телескопов, который управляется Ассоциацией университетов для исследований в астрономии по контракту NASA NAS 5-03127 для JWST. Этот каталог также включает данные наблюдений космического телескопа им. Хаббла NASA/ESA по программе HST-GO-17321, полученные от Научного института космических телескопов, который управляется Ассоциацией университетов для исследований в астрономии по контракту NASA NAS 5-26555.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

А. А. Райков и В. В. Цымбал выполнили работу в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

В. В. Цымбал также участвовал в выполнении государственного задания Института астрономии РАН. Н. Ю. Ловягин провел исследования без привлечения дополнительного финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. N. Aghanim et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **641**, id. A6 (2020). DOI:10.1051/0004-6361/201833910
2. E. Di Valentino, O. Mena, S. Pan, et al., *Classical and Quantum Gravity* **38** (15), id. 153001 (2021). DOI:10.1088/1361-6382/ac086d
3. A. D. Dolgov, *Physics-Uspekhi* **188** (2), 121 (2018). DOI:10.3367/UFNe.2017.06.038153
4. M. Geller and P. Peebles, *Astrophys. J.*, **174**, 1 (1972). DOI:10.1086/151462
5. M. Kamionkowski and A. G. Riess, *Annual Rev. Nuclear and Particle Science* **73** (1), 153 (2023). DOI:10.1146/annurev-nucl-111422-024107
6. A. Leauthaud and A. Riess, *Nature Astronomy* **9** (8), 1123 (2025). DOI:10.1038/s41550-025-02627-2
7. L. M. Lubin and A. Sandage, *Astron. J.* **121** (5), 2289 (2001a). DOI:10.1086/320401
8. L. M. Lubin and A. Sandage, *Astron. J.* **122** (3), 1071 (2001b). DOI:10.1086/322133
9. L. M. Lubin and A. Sandage, *Astron. J.* **122** (3), 1084 (2001c). DOI:10.1086/322134
10. F. Melia, *Astron. and Astrophys.* **689**, id. A10 (2024). DOI:10.1051/0004-6361/202450835
11. E. Merlin, P. Santini, D. Paris, et al., *Astron. and Astrophys.* **691**, id. A240 (2024). DOI:10.1051/0004-6361/202451409
12. J. B. Muñoz, J. Mirocha, J. Chisholm, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **535** (1), L37 (2024). DOI:10.1093/mnras/slae086
13. V. Orlov and A. Raikov, *Astronomy Reports* **60**, 477 (2016). DOI:10.1134/S1063772916030112
14. A. Raikov, V. Tsymbal, and N. Y. Lovyagin, *Astrophysical Bulletin* **80** (3), 337 (2025). DOI:10.1134/S1990341325600383
15. A. Sandage, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **26**, 561 (1988). DOI:10.1146/annurev.aa.26.090188.003021
16. A. Sandage, *Astron. J.* **139** (2), 728 (2010). DOI:10.1088/0004-6256/139/2/728
17. A. Sandage and L. M. Lubin, *Astron. J.* **121** (5), 2271 (2001). DOI:10.1086/320394
18. R. C. Tolman, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* **16** (7), 511 (1930). DOI:10.1073/pnas.16.7.511
19. S. Weinberg, *Cosmology* (Oxford University Press, Oxford, 2008).

Cosmological Observational Tests in the JWST Era. II: Tolman Test**V. V. Tsymbal^{1,2}, A. A. Raikov^{3,4}, and N. Yu. Lovyagin^{5,6}**¹Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia²Special Astronomical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia³Saint Petersburg Branch of the Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 196140 Russia⁴Central (Pulkovo) Astronomical Observatory, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 196140 Russia⁵St. Petersburg University, St. Petersburg, 199034 Russia⁶St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, 190008 Russia

We examine a cosmological test: the dependence of surface brightness on redshift z (the Tolman surface brightness test). The analysis of observed values was performed using the ASTRODEEP–JWST photometric catalog. The calculations were performed for 6860 galaxies with reliably determined spectroscopic redshifts. The results confirm a decrease in the average surface brightness of galaxies with distance. However, the observed trend differs significantly from that predicted by the standard cosmological model: a linear dependence is observed instead of the expected law of decrease with $(1+z)^{-4}$ at large z .

Keywords: *cosmology: early Universe, cosmology: expanding Universe, cosmology: observations*