

УДК 524.822-17

# КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ТЕСТЫ В ЭПОХУ JWST. I. УГЛОВОЙ РАЗМЕР – КРАСНОЕ СМЕЩЕНИЕ

© 2025 А. А. Райков<sup>1,2</sup>, В. В. Цымбал<sup>3,4</sup>, Н. Ю. Ловягин<sup>5,6\*</sup><sup>1</sup>Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН,  
Санкт-Петербург, 196140 Россия<sup>2</sup>Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия<sup>3</sup>Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия<sup>4</sup>Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, Нижний Архыз, 369167 Россия<sup>5</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия<sup>6</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург,  
190008 Россия

Поступила в редакцию 24 января 2025 года; после доработки 4 июня 2025 года; принята к публикации 17 июля 2025 года

В работе рассматривается космологический тест «угловой размер – красное смещение». Проведен анализ угловых и линейных размеров галактик нового каталога ASTRODEEP-JWST, содержащего более 500 000 объектов на больших красных смещениях (до  $z \lesssim 20$  фотометрически определенных и до  $z \lesssim 14$  спектрально определенных). Для расчетов использованы 6 860 галактик с надежно определенным спектральным красным смещением и 319 771 галактика с известным фотометрическим красным смещением. Линейные размеры галактик рассчитаны в рамках двух космологических моделей — стандартной ( $\Lambda$ CDM) и одной из стационарных моделей (так называемой модели «усталого света»). Показано, что в рамках  $\Lambda$ CDM-модели наблюдается значительная эволюция линейных размеров галактик, причем темп эволюции близок к темпу расширения пространства. При этом в стационарной модели характерный линейный размер галактики практически не эволюционирует с ростом  $z$ .

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

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Наблюдательные тесты являются ключевым инструментом определения параметров и проверки состоятельности космологических моделей. Их значимость подчеркивается, например, в работе Geller and Peebles (1972). С установлением  $\Lambda$ CDM-модели в качестве стандартной космологической модели и появлением «точной космологии», основанной на данных наблюдений микроволнового фона космическими обсерваториями WMAP (Spergel et al., 2003) и Planck (Aghanim et al., 2021), наблюдательные тесты, особенно по данным наблюдений локальной Вселенной, часто отходят на второй план и не рассматриваются как ключевое направление исследований в этой области.

Однако новые наблюдательные данные выявили широкий ряд проблем в стандартной космологической модели. В частности, значение постоянной Хаббла (Di Valentino et al., 2021; Kamionkowski and

Riess, 2023), определяемое по наблюдениям локальной Вселенной, и значение оптической толщины реионизации (количества ионизирующих фотонов на ранних стадиях эволюции Вселенной), определяемое по наблюдениям на телескопе JWST (Melia, 2024; Muñoz et al., 2024), существенно расходятся с данными «точной космологии» Planck (Aghanim et al., 2021). Ряд проблем, включая отсутствие модели, объясняющей формирование наблюдаемых на больших  $z$  галактик за время, соответствующее их возрасту, определенному в рамках  $\Lambda$ CDM-модели (описанных, в частности, в работе Dolgov (2018)), только усугубляются в свете результатов JWST. В этой связи снова возникает необходимость в проведении космологических тестов и, возможно, неизбежность рассмотрения космологических теорий, альтернативных стандартной модели, подобно тому, как это было сделано Orlov and Raikov (2016).

В данной работе рассматривается тест «угловой размер – красное смещение», основанный на том, что функциональная зависимость углового размера

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

стандартной линейки от красного смещения существенно различается в стандартной (расширяющаяся Вселенная) и стационарной космологических моделях — на фактор порядка  $(1+z)^1$ .

Тест был предложен в работе Hoyle (1959). Geller and Peebles (1972) привели сравнение результатов теста для стационарных моделей и моделей с расширением пространства. В публикациях Hoyle (1959) и Holwerda et al. (2020) представлены исследования размеров галактик в рамках стандартной космологической модели  $\Lambda$ CDM, в которых сделан вывод о значительной эволюции линейных размеров галактик. В работе López-Corredoira (2010) приведен сравнительный анализ теоретических предсказаний зависимости углового размера от красного смещения в различных космологических моделях, включая статические и модели с расширением пространства. Авторы показали, что лучше всего с имеющимися на тот момент (2010 год) наблюдательными данными согласуется модель с линейным законом Хаббла.

В работе Lovyagin et al. (2022) в тест «угловой размер — красное смещение» были включены первые наблюдения на телескопе JWST. Исследование проводилось на сравнительно малом объеме наблюдательных данных с использованием фотометрических красных смещений. Было показано, что результаты первых наблюдений JWST лучше согласуются со стационарной космологической моделью, чем с расширяющейся, если пренебречь эволюцией линейных размеров галактик (в качестве сравнения использовались модель  $\Lambda$ CDM и модель «усталого света»). LaViolette (2021) также было отмечено, что стационарная модель «усталого света» демонстрирует лучшее согласие с наблюдениями в рамках данного теста.

В настоящее время стал доступен уникальный каталог ASTRODEEP-JWST (Merlin et al., 2024), содержащий более чем 500 000 галактик на больших (до  $z \lesssim 20$ ) красных смещениях, открывающий недоступные ранее возможности для проверки космологических теорий. В данной работе тест «угловой размер — красное смещение» галактик выполнен на основе данных, содержащихся в этой базе.

Для анализа нами отобраны 6 860 галактик каталога с надежно определенными спектральными красными смещениями и 319 771 галактика с известными фотометрическими красными смещениями. Угловые и линейные размеры галактик анализируются в рамках теоретических предсказаний двух космологических моделей — стандартной ( $\Lambda$ CDM) и одной из стационарных.

В качестве стационарной модели выбрана так называемая модель «усталого света» в силу ее простоты и широкой известности. Мы не утверждаем здесь, что модель «усталого света» может являться

правильной. Наша цель — продемонстрировать разницу между стационарными моделями Вселенной и моделями, в которых космологическое красное смещение является следствием расширения пространства.

В настоящее время в ряде научных публикаций ведется активная дискуссия по проблемам и парадоксам  $\Lambda$ CDM, в частности по сложности объяснения скорости формирования галактик, а также по аргументации в пользу альтернативных объяснений наблюдений в рамках стационарных и других космологических моделей. Примеры можно найти в работах Dolgov (2018), López-Corredoira and Marmet (2022), Peebles (2022), Perivolaropoulos and Skara (2022).

Детальный обзор и анализ всего спектра современных альтернативных космологических моделей является отдельной задачей и выходит за рамки данной статьи.

## 2. ТЕСТ «УГЛОВОЙ РАЗМЕР — КРАСНОЕ СМЕЩЕНИЕ»

Формулы, приведенные в данном разделе, взяты из работ Hogg (1999), López-Corredoira (2010) и LaViolette (2021).

Зависимость углового размера  $\theta$  объекта от его линейного размера  $\delta$  и космологического красного смещения  $z$  выражается через расстояние по угловому размеру  $D_A(z)$ :

$$D_A(z) = \frac{\delta}{\theta(z)}. \quad (1)$$

В свою очередь, зависимость  $D_A(z)$  различна в разных космологических моделях. В стандартной ( $\Lambda$ CDM) космологической модели она имеет вид

$$D_A^{\Lambda\text{CDM}}(z) = \frac{c}{H_0} \frac{1}{1+z} \times \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{\Omega_M(1+z')^3 + \Omega_\Lambda}}, \quad (2)$$

где  $\Omega_M + \Omega_\Lambda = 1$ .

В случае линейного закона Хаббла («наивной евклидовой модели Вселенной») справедливо

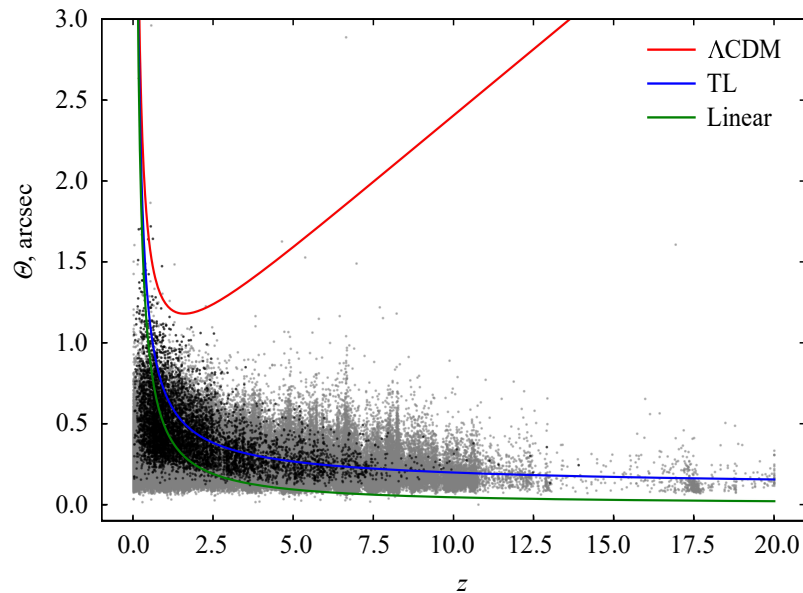
$$D_A^{\text{Linear}}(z) = \frac{c}{H_0} z. \quad (3)$$

В стационарной модели «усталого света»

$$D_A^{\text{TL}}(z) = \frac{c}{H_0} \ln(1+z). \quad (4)$$

На рис. 1 вместе с наблюдаемыми значениями представлены теоретические зависимости углового размера галактики, имеющей размер  $\delta = 10$  кпк, от красного смещения.

Если не оговорено иное, все расчеты выполнены для следующих значений параметров стандартной космологической модели:  $H_0 = 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.7$ ,  $\Omega_M = 0.3$ ,  $\Omega_K = 0$ .



**Рис. 1.** Зависимость углового размера от красного смещения. Точками представлены наблюдательные данные (галактики): черные — спектральные  $z$ , серые — фотометрические  $z$ . Сплошными линиями показаны теоретические расчеты для линейного размера  $\delta = 10$  кпк для космологических моделей:  $\Lambda$ CDM (красная линия), модели «усталого света» (синяя линия) и линейного закона Хаббла (зеленая линия). В качестве угловых размеров галактик были взяты удвоенные каталожные значения эффективного радиуса.

### 3. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Используемая база данных ASTRODEEP-JWST (Merlin et al., 2024) содержит информацию о 531 173 галактиках, включая экваториальные координаты, прямоугольные координаты в системе фиксированной мозаики, параметры фотометрических измерений, радиусы областей, содержащих 50% света галактики (также называемые «эффективными радиусами»), морфологические характеристики объектов, потоки в 16 фотометрических полосах, покрывающих диапазон примерно 4300–45 000 Å, и ошибки их измерений. Для каждого объекта измерены фотометрические красные смещения, полученные четырьмя способами, а также даны спектроскопические красные смещения галактик, для которых были проведены спектроскопические исследования. Кроме того, приведена характеристика данных в виде индекса (**flags**), задающего надежность определения наблюдательных характеристик. Суммарная площадь на небесной сфере данного обзора составляет примерно 0.2 квадратных градуса.

Основным преимуществом ASTRODEEP-JWST является однородность содержащейся в ней информации. Авторы базы данных использовали имеющиеся фотометрические каталоги наблюдений на HST и JWST, редуцировали изображения в фиксированную систему мозаик и выполнили заново калибровки изображений. Только после этого были сделаны измерения величин, представленных в базе данных.

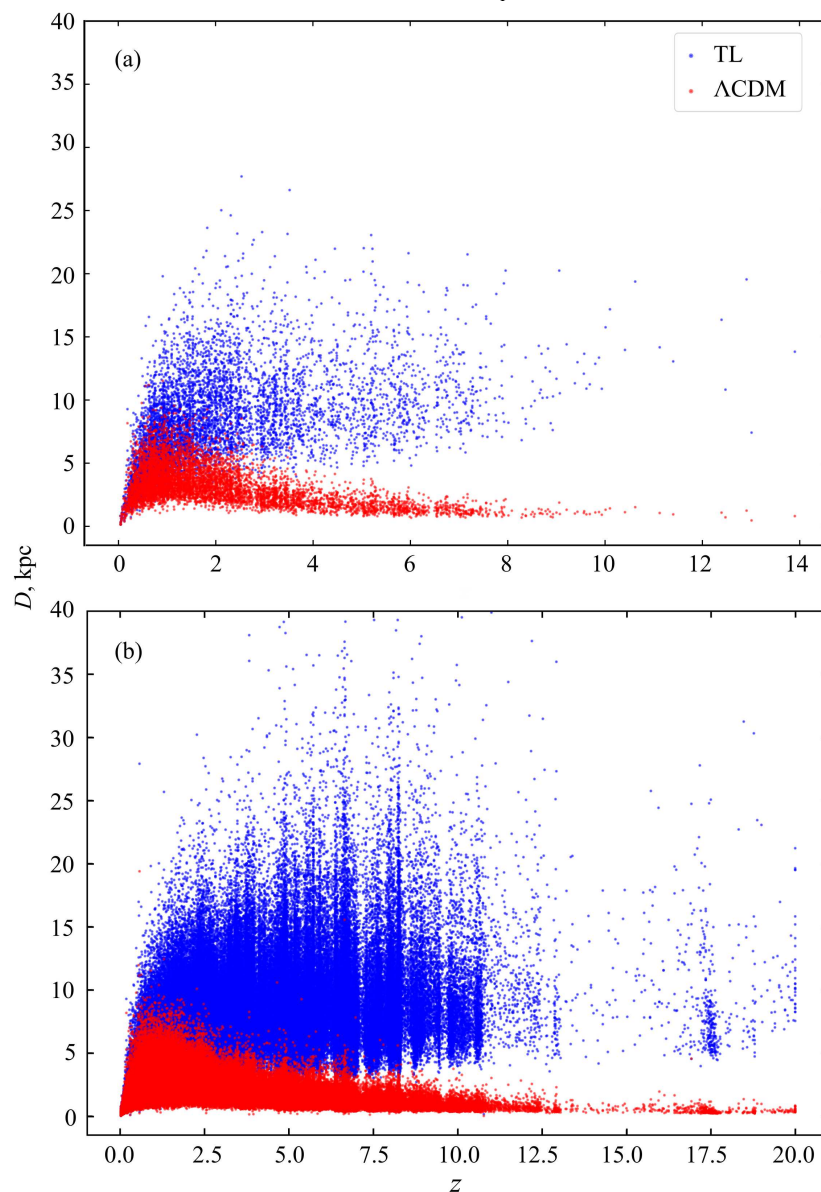
Для проведения теста мы решили в первую очередь использовать галактики с надежно определенным спектральным красным смещением. Несмотря на то что это сужает выборку и предельные  $z$ , полученные результаты свободны от известных рисков, связанных с использованием фотометрических красных смещений. Таким образом, результаты теста, сделанного по спектральным красным смещениям, являются наиболее надежными.

Кроме того, выбор был ограничен галактиками, для которых имеются наблюдения, выполненные на JWST. Были отброшены объекты с некачественными измерениями; изображения, блендируемые соседними объектами; объекты, близкие к краю мозаики, отождествляемые как точечные объекты и т. д. (установлен критерий **flags** < 80). В результате было отобрано 6860 галактик с надежно определенным спектроскопическим красным смещением и 319 771 галактика с определенным (надежно в рамках метода) фотометрическим красным смещением, для которых были взяты угловые размеры (удвоенное значение эффективного радиуса) и рассчитаны линейные размеры (соответствующие эффективные диаметры галактик) в двух рассматриваемых космологических моделях.

### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА КАТАЛОГА

#### 4.1. Диаграмма «угловой размер — красное смещение»

На рис. 1 приведены угловые размеры галактик в зависимости от красных смещений в сравнении



**Рис. 2.** Линейные размеры (эффективные диаметры) галактик в зависимости от красного смещения. Панель (а) — только галактики со спектральным красным смещением, панель (b) — фотометрические  $z$ . Красные точки — расчет в рамках  $\Lambda$ CDM-модели, синие точки — в рамках теории «усталого света».

с теоретическими зависимостями углового размера «галактики» с размером  $\delta = 10$  кпк (стандартной линейки) от красного смещения для космологических моделей  $\Lambda$ CDM, «усталого света» и случая линейного закона Хаббла.

Анализ рис. 1 показывает, что в рамках  $\Lambda$ CDM-модели наблюдается значительный темп эволюции линейных размеров галактик со временем, а в стационарной модели «усталого света» зависимость характерного углового размера галактик каталога от красного смещения соответствует теоретической зависимости углового размера стандартной линейки от  $z$ .

#### 4.2. Диаграмма «линейные размеры галактик — красное смещение»

На рис. 2 представлены результаты вычисления линейных размеров галактик в зависимости от красного смещения, выполненные в рамках  $\Lambda$ CDM-модели и модели «усталого света».

Видно, что в рамках стандартной космологической модели наиболее яркие галактики на больших  $z$ , представленные в используемом каталоге, имеют размеры 1–2 кпк, тогда как в рамках модели «усталого света» их размеры соответствуют гигантским галактикам в нынешнюю эпоху. Облако точек (черные точки на рис. 1) имеет характерный



для широкоугольных обзоров галактик Локальной Вселенной профиль, вызванный наблюдательной селекцией ярких объектов (смещение Малмквиста). Таким образом, линейные размеры галактик, рассчитанные в рамках стационарной модели «усталого света», эволюцию не показывают.

## 5. ЭВОЛЮЦИЯ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ ГАЛАКТИК

### 5.1. Анализ по диаграмме рассеяния

Сопоставление зависимости углового размера галактик с теоретическими предсказаниями (рис. 1) и линейных размеров галактик от  $z$  в двух моделях (рис. 2) демонстрирует, что при отсутствии расширения пространства явная эволюция линейных размеров галактик с ростом  $z$  не фиксируется. Кроме того, можно предположить, что в рамках стандартной космологической модели  $\Lambda$ CDM темп эволюции линейных размеров галактик имеет тот же порядок, что и темп расширения пространства, — пропорционален  $(1+z)^{-1}$ .

Для более точного определения темпа эволюции и качественной оценки влияния на результат наблюдательной селекции галактик по предельной поверхностной яркости и видимой звездной величине был рассмотрен ряд выборок галактик, из которых исключались объекты с красным смещением, меньшим некоторого порогового значения  $z_{\min}$  (включались галактики, удовлетворяющие условию  $z \geq z_{\min}$ ).

Для каждой выборки в логарифмических координатах ( $|\lg(1+z)|$ ,  $\lg D$ ) проводилась линейная регрессия, в ходе которой методом наименьших квадратов вычислялся коэффициент  $\alpha$ , характеризующий показатель темпа эволюции по зависимости  $D \propto (1+z)^\alpha$ , где  $D$  — эффективный диаметр галактики. Поскольку в каталоге не приводится ошибка определения эффективного радиуса, для определения параметров наилучшей аппроксимации использовался стандартный (невзвешенный) матричный метод наименьших квадратов. Формальная ошибка определения  $\alpha$  обуславливается разбросом (рассеянием) размеров галактик на диаграмме.

Результаты вычислений представлены в таблице 1, а на рис. 3 показаны графики кривых наилучшей аппроксимации для некоторых выборок.

Из таблицы и рисунка видно, что при малых значениях  $z_{\min}$  на определение коэффициента  $\alpha$  сильное влияние оказывают близкие галактики малых размеров, отсеиваемые наблюдательной селекцией на больших  $z$ . Начиная с  $z > 1$  темп эволюции галактик составляет 0.85–1.0. Анализ, проводимый по фотометрическим красным смещениям, в целом демонстрирует аналогичные значения темпа эволюции и продолжает его на большие  $z$ .

**Таблица 1.** Анализ темпа эволюции линейных размеров галактик в рамках  $\Lambda$ CDM-модели. Взяты ряд выборок галактик с  $z \leq z_{\min}$ . Приведено число объектов в выборке  $N_{\text{obj}}$  и значение коэффициента наилучшего приближения  $\alpha \propto D \propto (1+z)^\alpha$  с его формальной ошибкой на уровне  $3\sigma$ . Звездочкой отмечены строки выборки спектральных  $z$ , содержащие мало точек и имеющие слишком высокую ошибку определения  $\alpha$

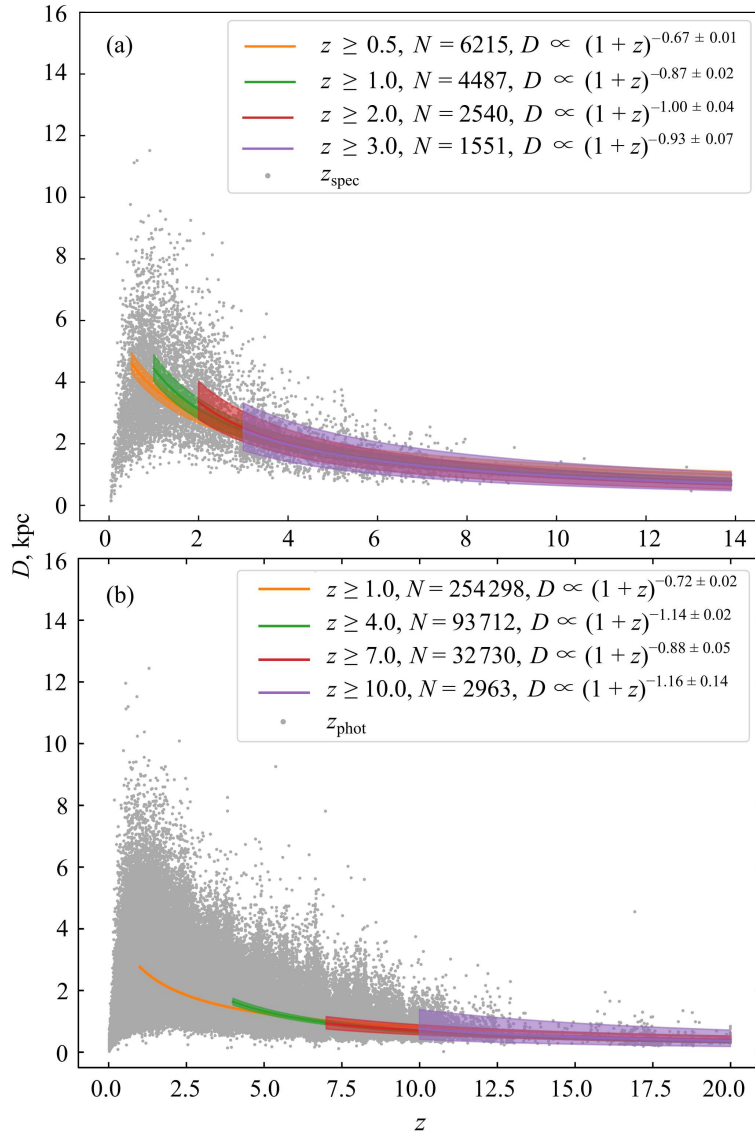
| $z_{\min}$ | Спектральное $z$ |                             | Фотометрическое $z$ |                             |
|------------|------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|
|            | $n_{\text{obj}}$ | $\alpha \pm 3\sigma_\alpha$ | $n_{\text{obj}}$    | $\alpha \pm 3\sigma_\alpha$ |
| 0.0        | 6860             | $-0.48 \pm 0.01$            | 319 722             | $-0.13 \pm 0.00$            |
| 0.5        | 6215             | $-0.67 \pm 0.01$            | 287 303             | $-0.59 \pm 0.00$            |
| 1.0        | 4487             | $-0.87 \pm 0.02$            | 254 298             | $-0.72 \pm 0.00$            |
| 1.5        | 3326             | $-0.97 \pm 0.03$            | 213 249             | $-0.85 \pm 0.00$            |
| 2.0        | 2540             | $-1.00 \pm 0.04$            | 176 191             | $-0.97 \pm 0.01$            |
| 2.5        | 1890             | $-0.95 \pm 0.06$            | 147 935             | $-1.02 \pm 0.01$            |
| 3.0        | 1551             | $-0.93 \pm 0.07$            | 130 626             | $-1.09 \pm 0.01$            |
| 3.5        | 1161             | $-0.88 \pm 0.10$            | 113 110             | $-1.09 \pm 0.01$            |
| 4.0        | 931              | $-0.86 \pm 0.13$            | 93 712              | $-1.14 \pm 0.02$            |
| 4.5        | 755              | $-0.86 \pm 0.17$            | 88 065              | $-1.10 \pm 0.02$            |
| 5.0        | 634              | $-0.82 \pm 0.20$            | 74 201              | $-1.06 \pm 0.02$            |
| 5.5        | 463              | $-0.76 \pm 0.24$            | 65 118              | $-1.03 \pm 0.03$            |
| 6.0        | 301              | $-0.67 \pm 0.32^*$          | 53 767              | $-0.83 \pm 0.03$            |
| 6.5        | 231              | $-0.74 \pm 0.38^*$          | 46 063              | $-0.72 \pm 0.04$            |
| 7.0        | 142              | $-0.51 \pm 0.50^*$          | 32 730              | $-0.88 \pm 0.05$            |
| 7.5        | 73               | $-0.61 \pm 0.72^*$          | 29 535              | $-0.84 \pm 0.05$            |
| 8.0        | 47               | $-0.33 \pm 0.88^*$          | 24 054              | $-0.73 \pm 0.06$            |
| 8.5        | 39               | $-0.60 \pm 0.97^*$          | 8597                | $-1.13 \pm 0.08$            |
| 9.0        | 24               | $-1.16 \pm 1.31^*$          | 5943                | $-1.18 \pm 0.10$            |
| 9.5        | 18               | $-1.17 \pm 1.65^*$          | 4300                | $-1.07 \pm 0.11$            |
| 10.0       | 11               | $-2.19 \pm 2.69^*$          | 2963                | $-1.16 \pm 0.14$            |
| 10.5       | 8                | $-2.46 \pm 4.93^*$          | 1971                | $-1.24 \pm 0.16$            |
| 11.0       | 7                | $-1.61 \pm 6.54^*$          | 1033                | $-1.56 \pm 0.25$            |

### 5.2. Анализ по среднему размеру галактики в бине

Для дальнейшего анализа темпа эволюции нами была проведена статистика по бинам. Весь диапазон по  $z$  разбивался на 50 бинов, где вычислялся средний линейный диаметр галактики и его формальная ошибка:

$$s = \sigma_D / \sqrt{n}, \quad \text{при } \sigma_D^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (\bar{D} - D_k)^2,$$

где  $\bar{D}$  — средний размер галактики в бине, а  $n$  — число галактик в бине. Эта формальная ошибка бралась за вес бина в методе наименьших квадратов,  $W = 1/s^2$ , что обуславливает определение формальной ошибки параметра  $\alpha$  ( $D \propto (1+z)^\alpha$ ).



**Рис. 3.** Эволюция линейных размеров (эффективных диаметров) галактик в рамках  $\Lambda$ CDM-модели. Точками показаны галактики, линиями — кривые наилучшей аппроксимации для выборок с различным минимальным красным смещением, полосы показывают формальную ошибку аппроксимации на уровне  $3\sigma$ . Панель (a) — спектральные, панель (b) — фотометрические красные смещения.

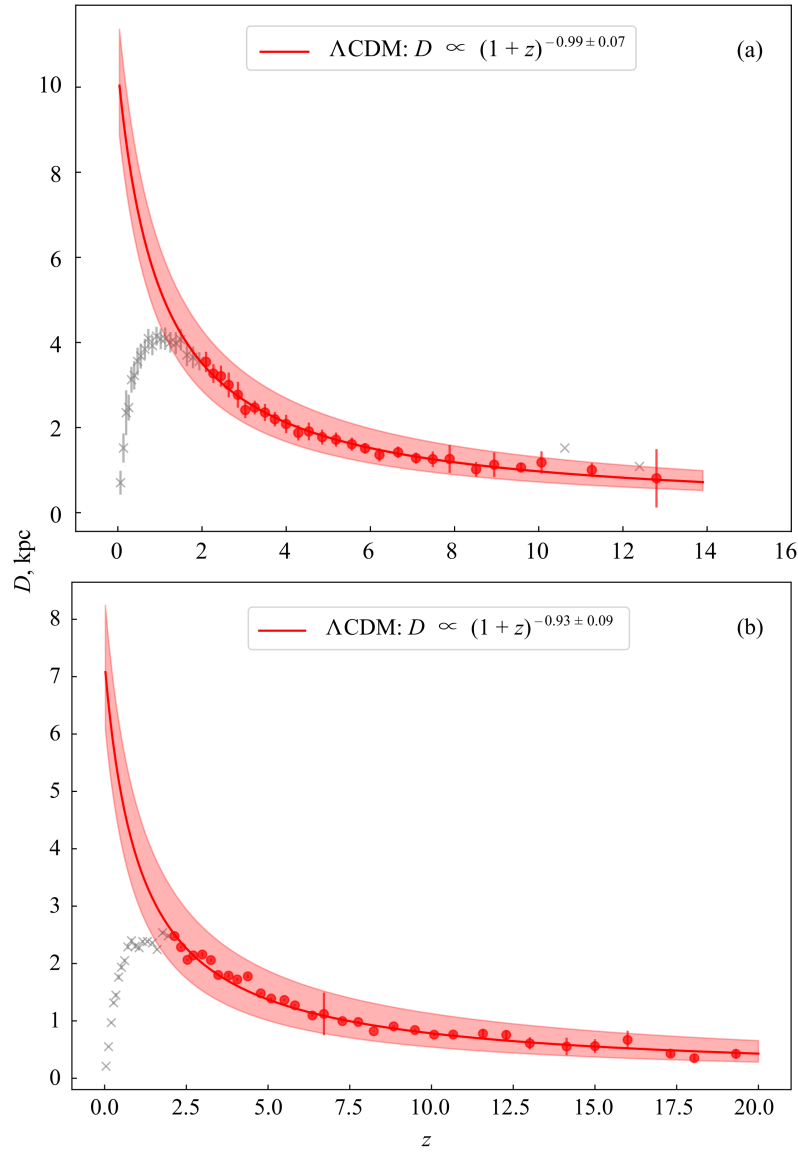
Бины брались равномерными в линейных координатах, но весовой МНК применялся к значениям в координатах  $(\lg(1+z), \lg D)$  с соответствующим пересчетом формальной ошибки  $s_{\lg} = 1/\ln 10 \times s/\bar{D}$ . Из подсчета исключались близкие ( $z < 2$ ) бины и бины, в которых оказалось слишком мало галактик ( $n < 2$ ). Результаты представлены на рис. 4.

Данная статистика также показывает аналогичный темп эволюции галактик:  $0.99 \pm 0.07$  (спектральные  $z$ ) и  $0.93 \pm 0.09$  (фотометрические  $z$ ). Результаты для определенных спектрально и фотометрически красных смещений не различимы в пределах ошибок.

### 5.3. Анализ полных по объему выборок

Используемый нами подход не исключает искажение результатов эффектом наблюдательной селекции.

Данный эффект можно частично нивелировать путем рассмотрения подвыборок с ограничением по минимальному красному смещению  $z_{\text{min}}$ . В каждой такой выборке наибольшее влияние на определение параметров регрессии оказывают именно ближайшие галактики выборки (сравнительно однородные), так как количество галактик с ростом  $z$  значительно падает, в то время как наклон остается устойчивым при значительном изменении  $z_{\text{min}}$ . В статистике с использованием разбиения по бинам,



**Рис. 4.** Эволюция линейных размеров (эффективных диаметров) галактик в рамках  $\Lambda$ CDM-модели; статистика по 50 бином по  $z$ . Точками показаны средние размеры галактик в бине с их стандартными ошибками среднего (серые точки — исключенные из рассмотрения бины по причине близости или малости количества объектов). Линиями показаны кривые наилучшей аппроксимации, полосы показывают формальную ошибку аппроксимации на уровне  $3\sigma$ . Панель (a) — спектральные, панель (b) — фотометрические красные смещения.

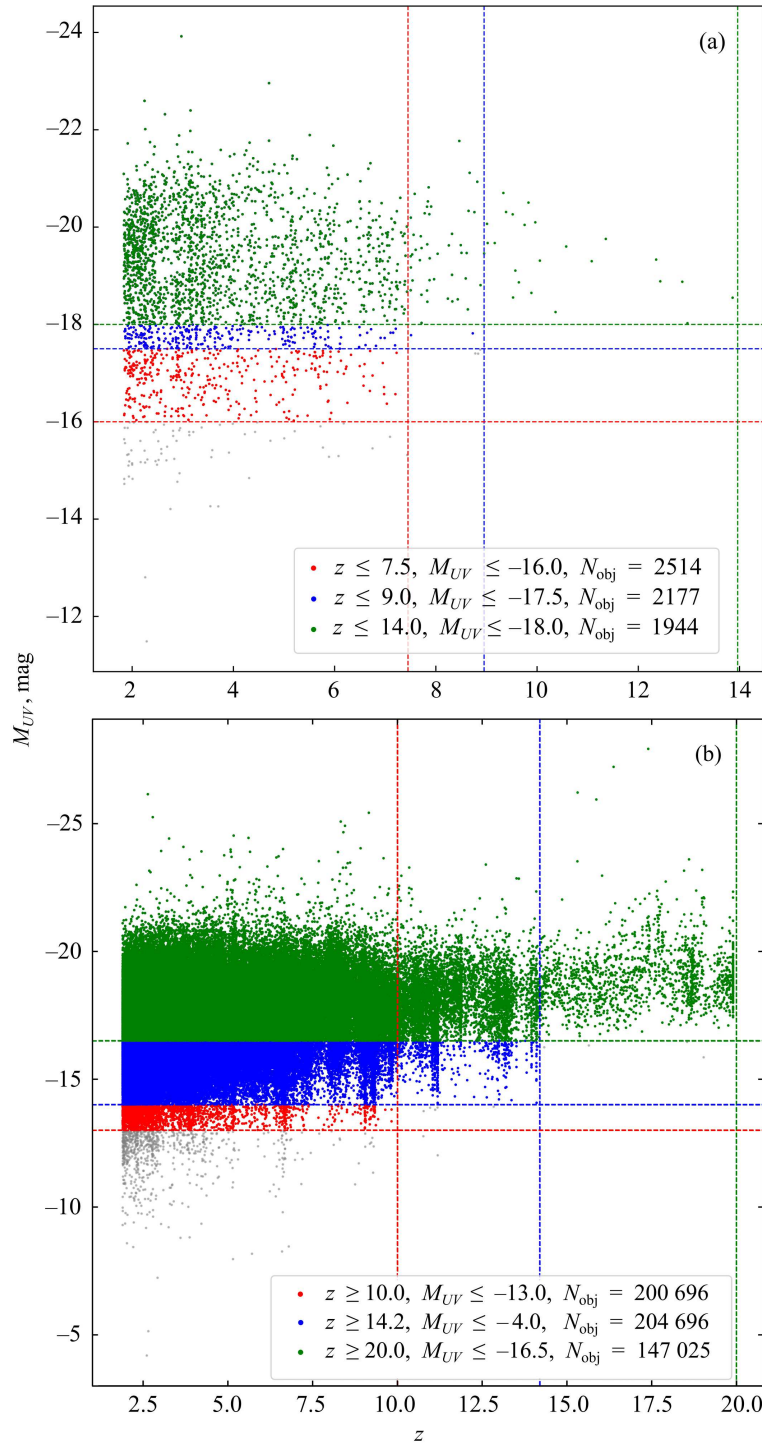
также подверженной воздействию наблюдательной селекции, но менее зависящей от влияния близких галактик, результат остается аналогичным; таким образом, метод демонстрирует устойчивость.

Для уменьшения влияния наблюдательной селекции использованы полные по объему выборки галактик, то есть ограниченные минимальной яркостью (максимальной абсолютной звездной величиной  $M_{\text{lim}}$ ) так, чтобы до заданного расстояния (красного смещения  $z_{\text{lim}}$ ) все объекты ярче  $M_{\text{lim}}$  были видны и, следовательно, включены в выборку. В качестве абсолютной звездной величины использовалась величина  $M_{UV}$ , определяемая по формуле

(Oke and Sandage, 1968; Hogg et al. 2002):

$$M_{UV} = m_{1500} - DM(z) - K(z),$$

где  $m_{1500}$  — наблюдаемая звездная величина для потока на  $1500 \text{ \AA}$  в системе покоя,  $DM(z)$  — модуль расстояния,  $K(z)$  —  $K$ -поправка. Величина  $m_{1500}$  вычислялась с использованием значений потоков в фильтрах каталога с учетом красного смещения. Для имеющихся фотометрических данных определение  $M_{UV}$  возможно только для галактик с  $z \geq 2$ . В выборке имеется 2659 таких галактик с надежным спектральным красным смещением и 209 128 галактик с известным фотометрическим



**Рис. 5.** Диаграмма « $z - M_{UV}$ » и полные по объему выборки в  $\Lambda$ CDM-модели. Панель (а) — фотометрические, панель (b) — спектральные красные смещения. Полные по объему выборки показаны цветом.

красным смещением. Модуль расстояния определяется как

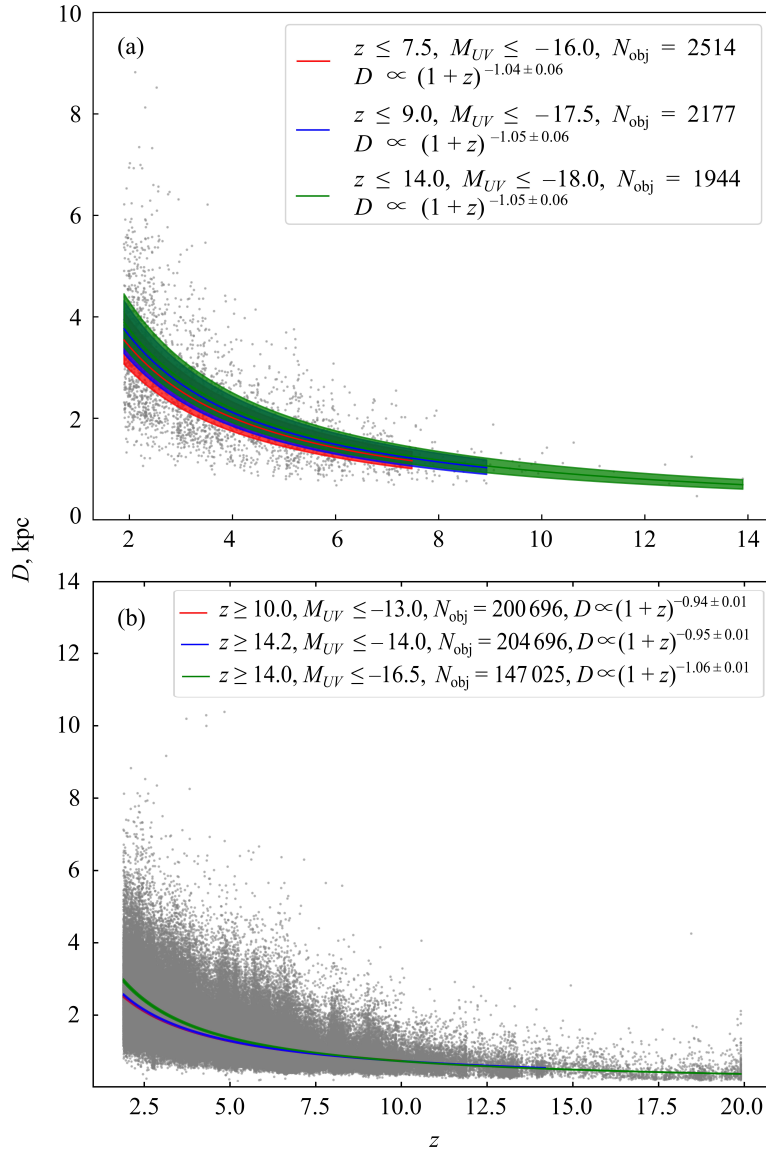
$$DM(z) = 5 \lg(D_L(z)/10 \text{ пк}),$$

где  $D_L$  — расстояние по светимости в соответствующей космологической модели (Hogg, 1999; López-Corredoira, 2010; LaViolette, 2021):

$$D_L^{\Lambda\text{CDM}}(z) = \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{\Omega_M(1+z')^3 + \Omega_\Lambda}},$$

$$D_L^{\text{TL}}(z) = \frac{c}{H_0} \ln(1+z) \sqrt{1+z}.$$

Значения  $M_{\text{lim}}$  и  $z_{\text{lim}}$  определялись исходя из



**Рис. 6.** Кривые наилучшей аппроксимации эволюции линейных размеров для полных по объему выборок, показанных на рис. 5, в рамках  $\Lambda$ CDM-модели. Панель (a) — фотометрические, панель (b) — спектральные красные смещения.

диаграммы  $(z, M)$ . Соответствующие диаграммы и взятые полные по объему выборки показаны на рис. 5. Всего в каждом случае использовалось три таких выборки. Анализ темпов эволюции в полных по объему выборках был проведен в соответствии с методикой, описанной в разделе 5.1. Коэффициенты темпов роста приведены в таблице 2.

Найденные оценки линейных размеров (см. рис. 6) согласуются с ранее полученными. Однако использование полных по объему выборок уменьшает формальную ошибку и делает результат более надежным.

#### 5.4. Основные выводы

Итоги регрессионного анализа подтверждают предположение авторов о том, что в рамках стан-

дартной космологической модели  $\Lambda$ CDM темп эволюции линейных размеров галактик соответствует темпу расширения пространства. Такой темп эволюции наблюдается как минимум до  $z \sim 10$  (спектральные) или до  $z \sim 20$  (фотометрические). Вывод представляется парадоксальным для  $\Lambda$ CDM-модели, в которой гравитационно связанные галактики не должны расширяться вследствие расширения пространства. Увеличение размеров может быть обусловлено только другими механизмами, не связанными с космологией, такими как звездообразование и аккреция. Это требует дальнейшего анализа.

Наши результаты качественно согласуются с данными наблюдений, полученными до запуска JWST (Allen et al. (2017), см. рис. 4; Holwerda

**Таблица 2.** Анализ темпа эволюции линейных размеров галактик в полных по объему выборках для двух моделей. Приведены параметры выборки (предельные абсолютная звездная величина  $M_{UV}$  и  $z$ ), число объектов выборки и темп эволюции линейных размеров галактик  $\alpha$  — значение коэффициента наилучшего приближения  $D \propto (1+z)^\alpha$  с его формальной ошибкой на уровне  $3\sigma$

| Модель, $z$                       | $z_{\text{lim}}$ | $M_{\text{lim}}$ | $N_{\text{obj}}$ | $\alpha \pm 3\sigma$ |
|-----------------------------------|------------------|------------------|------------------|----------------------|
| $\Lambda$ CDM,<br>фотометрическое | 10               | −13              | 200 696          | $-0.94 \pm 0.01$     |
|                                   | 14.2             | −14              | 204 696          | $-0.95 \pm 0.01$     |
|                                   | 20               | −16.5            | 147 025          | $-1.06 \pm 0.01$     |
| $\Lambda$ CDM,<br>спектральное    | 7.5              | −16              | 2514             | $-1.04 \pm 0.06$     |
|                                   | 9                | −17.5            | 2177             | $-1.05 \pm 0.06$     |
|                                   | 14               | −18              | 1944             | $-1.05 \pm 0.06$     |

et al. (2020), см. рис. 5), а также с работами Ormerod et al. (2024) и Yang et al. (2025), использующими другие выборки галактик и методики (или методики, если в обеих работах использовалась одна методика) и не проводящими сопоставление космологических моделей.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важно отметить, что галактики не могут рассматриваться в качестве «стандартной линейки» по двум причинам: в силу большого разнообразия размеров и в силу эволюции. Первая проблема может быть снята большим объемом выборки и рассмотрением некоторых общих тенденций имеющихся данных. Тогда изменение характерных линейных размеров галактик с красным смещением следует интерпретировать как характерный темп их эволюции в рамках той космологической модели, в которой рассчитывается линейный размер.

В данной работе взята выборка значимого объема и по полученным графикам можно делать вывод о наличии вполне определенного вида зависимости угловых и линейных размеров галактик от  $z$ . Видно, что в рамках  $\Lambda$ CDM-модели наблюдается значительный темп их эволюции, практически совпадающий с темпом расширения пространства. В то же время в рамках стационарной модели явной эволюции линейных размеров галактик не наблюдается: размеры далеких ( $z > 5$ –10) галактик соответствуют гигантским галактикам в нынешнюю эпоху.

Разрешение данной дилеммы требует разработки методики оценки физических размеров и масс галактик, независимой от космологической модели. Например, можно использовать наблюдаемые ширины линий для оценки гравитационного потенциала галактик (идея метода описана в работе Raikov et al., 2024).

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны Е. Merlin за консультации по данным каталога ASTRODEEP-JWST и анонимным рецензентам за ценные замечания и полезные советы, позволившие существенно улучшить данную работу.

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

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

А. А. Райков выполнил работу в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, остальные соавторы — без привлечения дополнительного финансирования.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. N. Aghanim et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **652**, id. C4 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/201833910e
2. R. J. Allen, G. G. Kacprzak, K. Glazebrook, et al., *Astrophys. J.* **834** (2), article id. L11 (2017). DOI:10.3847/2041-8213/834/2/L11 <https://doi.org/10.3847/2041-8213/834/2/L11>
3. E. Di Valentino, O. Mena, S. Pan, et al., *Classical and Quantum Gravity* **38** (15), id. 153001 (2021). DOI:10.1088/1361-6382/ac086d
4. A. D. Dolgov, *Physics Uspekhi* **61** (2), 115 (2018). DOI:10.3367/UFNe.2017.06.038153
5. M. J. Geller and P. J. E. Peebles, *Astrophys. J.* **174**, 1 (1972). DOI:10.1086/151462
6. D. W. Hogg, arXiv e-prints astro-ph:9905116 (1999). DOI:10.48550/arXiv.astro-ph/9905116



7. D. W. Hogg, I. K. Baldry, M. R. Blanton, and D. J. Eisenstein, arXiv e-prints astro-ph:0210394 (2002). DOI:10.48550/arXiv.astro-ph/0210394
8. B. W. Holwerda, J. S. Bridge, R. L. Steele, et al., *Astron. J.* **160** (4), id. 154 (2020). DOI:10.3847/1538-3881/aba617
9. F. Hoyle, *Proc. IAU Symp. No. 9*, Ed. by R. N. Bracewell (Stanford University Press, Stanford, 1959), pp. 529–532
10. M. Kamionkowski and A. G. Riess, *Annual Review of Nuclear and Particle Science* **73**, 153 (2023). DOI:10.1146/annurev-nucl-111422-024107
11. P. A. LaViolette, *Intern. J. Astron. and Astrophys.* **11** (2), 190 (2021). DOI:10.4236/ijaa.2021.112011
12. M. López-Corredoira, *Intern. J. Modern Physics D* **19** (3), 245 (2010). DOI:10.1142/S0218271810016397
13. M. López-Corredoira and L. Marmet, *Intern. J. Modern Physics D* **31** (8), id. 2230014 (2022). DOI:10.1142/S0218271822300142
14. N. Lovyagin, A. Raikov, V. Yershov, and Y. Lovyagin, *Galaxies* **10** (6), id. 108 (2022). DOI:10.3390/galaxies10060108
15. F. Melia, *Astron. and Astrophys.* **689**, id. A10 (2024). DOI:10.1051/0004-6361/202450835
16. E. Merlin, P. Santini, D. Paris, et al., *Astron. and Astrophys.* **691**, id. A240 (2024). DOI:10.1051/0004-6361/202451409
17. J. B. Muñoz, J. Mirocha, J. Chisholm, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **535** (1), L37 (2024). DOI:10.1093/mnras/slac086
18. J. B. Oke and A. Sandage, *Astrophys. J.* **154**, 21 (1968). DOI:10.1086/149737
19. V. V. Orlov and A. A. Raikov, *Astronomy Reports* **60** (5), 477 (2016). DOI:10.1134/S1063772916030112
20. K. Ormerod, C. J. Conselice, N. J. Adams, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **527** (3), 6110 (2024). DOI:10.1093/mnras/stad3597
21. P. J. E. Peebles, *Annals of Physics* **447**, id. 169159 (2022). DOI:10.1016/j.aop.2022.169159
22. L. Perivolaropoulos and F. Skara, *New Astronomy Reviews* **95**, article id. 101659 (2022). DOI:10.1016/j.newar.2022.101659
23. A. Raikov, V. Yershov, and N. Lovyagin, in *Proc. All-Russian Conf. on Modern Astronomy: From the Early Universe to Exoplanets and Black Holes (VAK2024)*, Nizhny Arkhyz, Russia, 2020, Ed. by Yu. Yu. Balega, A. M. Cherepashchuk et al. (RIOR, Moscow, 2024), pp. 248–254. DOI:10.26119/VAK2024.038
24. D. N. Spergel, L. Verde, H. V. Peiris, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **148** (1), 175 (2003). DOI:10.1086/377226
25. L. Yang, J. S. Kartaltepe, M. Franco, et al., arXiv e-prints astro-ph:2504.07185 (2025). DOI:10.48550/arXiv.2504.07185

## Cosmological Observational Tests in the JWST ERA. I. Angular Size–Redshift

A. A. Raikov<sup>1,2</sup>, V. V. Tsybal<sup>3,4</sup>, and N. Yu. Lovyagin<sup>5,6</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Branch of the Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 196140 Russia

<sup>2</sup>Central (Pulkovo) Astronomical Observatory, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 196140 Russia

<sup>3</sup>Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

<sup>4</sup>Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

<sup>5</sup>St. Petersburg University, St. Petersburg, 199034 Russia <sup>6</sup>St. Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, 190008 Russia

This study is devoted to the cosmological “angular size–redshift” test. An analysis was performed of the angular and linear sizes of galaxies from the new ASTRODEEP–JWST catalog containing over 500 000 objects at high redshifts (up to  $z \sim 20$  photometrically determined and up to  $z \sim 14$  spectroscopically determined). For calculations, 6860 galaxies with reliably determined spectroscopic redshifts and 319 771 galaxies with known photometric redshifts were used. The linear sizes of galaxies were computed within the framework of two cosmological models—the standard ( $\Lambda$ CDM) model and one of the static models (the so-called “tired light” model). We have shown that within the framework of the  $\Lambda$ CDM model, a significant evolution of the linear sizes of galaxies is observed, with the evolutionary rate closely matching the rate of the cosmic expansion. In contrast, in the static model, the characteristic linear sizes of galaxies exhibit almost no evolution with increasing  $z$ .

Keywords: *cosmology: early Universe—cosmology: expanding—cosmology: observation*