

УДК 524.822-17

КЛАССИЧЕСКИЕ КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ ТЕСТЫ ДЛЯ ГАЛАКТИК СВЕРХГЛУБОКОГО ХАББЛОВСКОГО ПОЛЯ

© 2008 Н. В. Набоков^{1*}, Ю. В. Барышев^{1**}

¹ Санкт-Петербургский Государственный Университет, Астрономический институт им. В. В. Соболева
Поступила в редакцию 6 ноября 2007 г.; принята в печать 18 января 2008 г.

В результате обработки изображений сверхглубокого хаббловского поля получен каталог галактик, для которых определены угловые размеры, поверхностные яркости, фотометрические красные смещения, абсолютные звездные величины. Каталог содержит около 4000 галактик, выделенных с высоким отношением сигнал/шум, что позволяет провести анализ классических космологических соотношений: угловой размер — красное смещение и поверхностная яркость — красное смещение. Для сетки космологических моделей, имеющих различные параметры плотности (Ω_V ; Ω_m), получены оценки параметров эволюции линейных размеров и поверхностной яркости далеких галактик в интервале красных смещений 0.5 — 6.5. Проведен анализ распределения галактик по фотометрическим красным смещениям, в результате которого обнаружены возможные сверхбольшие неоднородности в радиальном распределении галактик с масштабами, достигающими 2000 Мпк.

Key words: теоретическая и наблюдательная космология

1. ВВЕДЕНИЕ

В программе наблюдательной космологии, впервые сформулированной Хабблом и Толманом [1] и развитой Сэндиджем [2, 3], были предложены космологические тесты — $N(m)$, $N(z)$, $m(z)$, $J(z)$, $\Theta(z)$, $t(z)$, использующие подсчеты объектов, звездные величины, поверхностные яркости, угловые размеры и возрасты объектов. Эти тесты, называемые также классическими, основаны на сравнении эмпирических зависимостей между непосредственно наблюдаемыми величинами с теоретическими соотношениями между этими величинами, предсказываемыми различными космологическими моделями.

Современный подход к анализу классических космологических тестов состоит в том, что необходимо одновременно учитывать как параметры космологической модели, так и эволюцию галактик. Однако, надежной модели эволюции галактик до сих пор нет, и построение такой модели остается главной нерешенной проблемой современной космологии.

Обычно оценка величины эволюции галактических характеристик проводится для “стандартных” величин космологических параметров $\Omega_m = 0.3$ и $\Omega_V = 0.7$, со ссылкой на данные WMAP. Однако, как отмечается в работе [4], интерпретация наблюдений флуктуаций микроволнового фонового

излучения включает 15 параметров стандартной модели, и только 6 из них оцениваются независимо, при этом параметр плотности вакуума Ω_V не входит в их число. Для оценки Ω_V привлекается совокупность других наблюдательных данных, таких как диаграмма Хаббла для SN Ia и корреляционные свойства крупномасштабного распределения галактик.

Следует отметить, что величины космологических параметров, полученные разными методами, могут значительно отличаться от “стандартных”. Действительно, в работе [5] по наблюдениям SNIa в проекте “High - Z Supernova Search” получена следующая оценка космологических параметров: $\Omega_m = 0.79 \pm 0.15$ и $\Omega_V = 1.57 \pm 0.25$. А согласно данным “The Supernova Cosmology Project” [6], используя кривые блеска сверхновых типа Ia одновременно в нескольких фильтрах, получена оценка $\Omega_m = 1.26 \pm 0.4$, $\Omega_V = 2.20 \pm 0.5$. Таким образом, оценки космологических параметров Ω_m, Ω_V могут меняться в большом диапазоне.

В настоящей работе проведено количественное исследование зависимости характеристик эволюции галактик от величины параметров космологических моделей Ω_m, Ω_V . Основываясь на наблюдениях ультраглубокого хаббловского поля, построены диаграммы угловой размер — красное смещение ($\Theta(z)$) и поверхностная яркость — красное смещение ($J(z)$) для галактик в диапазоне красных смещений 0.5 — 6.5, и изучено влияние изменения

*E-mail: NabokovNikita@yahoo.com

**E-mail: yuba@astro.spbu.ru

космологических параметров на оценку характеристик эволюции галактик.

Кроме этого, мы проводим анализ распределения галактик по фотометрическим красным смещениям — тест $dN(z)/dz$, для выборки, ограниченной по видимым звездным величинам. Используемый нами метод позволяет выделять крупномасштабные флуктуации плотности числа галактик, превышающие пуассоновский шум.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В задачах, связанных с космологическими тестами, необходимо иметь надежно определяемые характеристики галактик, т.е. контролировать значения многочисленных параметров фотометрической обработки и выделения далеких галактик, а также иметь достаточное отношение сигнал/шум. Для этого нами был создан каталог галактик сверхглубокого хаббловского поля, в который вошли объекты с отношением сигнал/шум больше 5.

2.1. Выделение галактик

Сведения о сверхглубоком хаббловском поле (HUDF) приведены на сайте <http://www.stsci.edu/hst/udf>. Мы использовали изображения в 4-х фильтрах из http://archive.stsci.edu/prepds/udf/udf_hlsp.html, где начальные редукции уже были проделаны, что позволило сразу перейти к выделению объектов на снимках. Для их обнаружения использовалось программное обеспечение sExtractor [7]. В качестве входных данных использовались конфигурационный файл и файлы снимков в четырех фильтрах (B, V, i, z). В конфигурационном файле задавались параметры, с помощью которых и происходило выделение объектов в данном поле.

Для выбранного поля значение PIXEL_SCALE принято равным 0.03". На процесс выделения объектов в значительной мере влияет параметр DETECT_THRESH. Данный параметр задает уровень потока, выше которого sExtractor интерпретирует сигнал как часть галактики.

В качестве критерия выделения объектов использовались предположения:

- 1) все пиксели регистрируют сигнал выше заданного DETECT_THRESH;
- 2) данные пиксели находятся в группе (“сгучены”);
- 3) число пикселей в данной группе больше заданного минимального числа.

В данной работе в качестве предельного задавался уровень (в σ) отклонений от среднего значения. Таким образом, пиксели, у которых значение потока превышало 3σ от среднего, считались частью объекта.

“Сгученность” пикселей задается параметром DETECT_MINAREA. Если в группе пикселей отсчет находится над уровнем выше 3σ и их количество превышает DETECT_MINAREA, то делается предположение о детектировании галактики.

Оценка среднего значения проводилась усреднением не всего поля, а его определенного участка. Размеры данной области усреднения составляли 100×100 пикселей. Определение области усреднения фона — важный момент, т.к. если рассматривать слишком малые области, то расчет среднего значения даст частичное значение, а если указывать большие области, то значительное влияние будут оказывать детектируемые объекты.

Дополнительно было проделано сглаживание изображения. Эта процедура проводится до того, как начинается непосредственное детектирование галактик поля. В данной работе в качестве функции сглаживания использовалась Гауссиана. Размеры области сглаживания составляли 3×3 пикселей. В частности, область 3×3 представляет собой квадратную матрицу (оси X, Y), хранящую в каждой ячейке нормированное значение потока (координата Z). Таким образом, моделируется трехмерная модель сглаживающей функции, где X и Y — соответствуют координатам в пикселях, а Z — величине потока.

В условия поиска и разделения объектов также включался параметр, учитывающий влияние ярких объектов. Все объекты, которые были детектированы, проверялись на соседство с ними. И в случае “засвечивания” ярким объектом, применяется формула профиля Моффата :

$$\frac{J(r)}{J(0)} = \frac{1}{(1 + k \times r^2)^\beta}, \quad (1)$$

где β задается в конфигурационном файле sExtractor, а J — поверхностная яркость. Изменение параметра β существенно влияет на фотометрию и детектирование объектов поля.

2.2. Определение параметров выделенных объектов

Помимо выделения объектов, были определены и их основные параметры.

2.2.1. Фотометрические параметры

Фотометрические параметры характеризуются потоком излучения, собранным с данной площадки объекта. Существует несколько возможностей выделения площадки, с которой должен собираться поток. В данной работе использовалось приближение, задаваемое в конфигурационном файле sExtractor как "isophotal". С помощью данного метода контуры площадки определяются по уровню отсчета, зависящего от среднего потока на данной площадке. На Рис. 1 показана изофота одной из галактик HUDF.

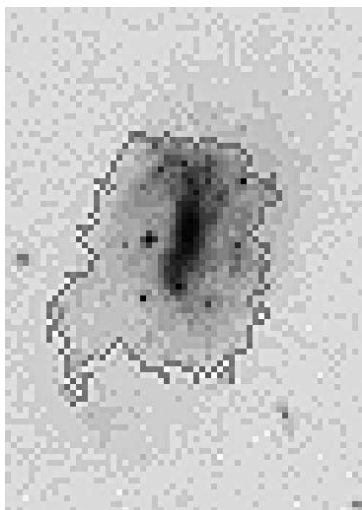


Рис. 1. Изофота одной из галактик HUDF.

При построении каталога объектов, делались попытки использования различных методов определения потоков. Но существенной разницы результатов фотометрии галактик (в зависимости от метода) не было найдено. Предположительно это связано с тем, что большая часть галактик в исследуемом поле имеет небольшие размеры и иррегулярную структуру.

Связь между инструментальным потоком и видимыми звездными величинами определяется согласно формуле:

$$m = 2.5 \times \lg(F) + m_{zp}, \quad (2)$$

где F — поток излучения в инструментальных единицах, m_{zp} — средняя звездная величина фона для каждого фильтра. Также были определены величины максимальной поверхностной яркости объекта, которая была доступна через параметр MU_MAX в единицах измерения зв. вел./□''

Выходной каталог объектов содержит следующую фотометрическую информацию:

- инструментальная величина потока с ошибкой;
- видимая звездная величина объекта с ошибкой;
- максимальная поверхностная яркость галактики;
- эффективные радиусы, соответствующие 25%, 50% и 75% потока от всей галактики.

2.2.2. Астрометрические параметры галактик

В качестве координат объектов брались барицентрические, которые считаются в sExtractor по формуле:

$$X = \bar{x} = \frac{\sum I_i \times x_i}{\sum I_i}, \quad (3)$$

где I_i — моменты, в качестве которых выступает значение потока галактики в данном пикселе.

Координаты объектов посчитаны как в экваториальной системе координат на эпоху 2000.0, так и в относительной. Относительная система определяется координатами галактик через пиксели изображения.

2.2.3. Геометрические параметры

Геометрические параметры описывают размеры и вид объектов. Эллиптичность галактик представлена малой и большой полуосями (a и b соответственно), а также позиционным углом Θ_{se} . Значения малой и большой полуоси были посчитаны с помощью моментов второго порядка.

Формулы моментов второго порядка имеют вид:

$$\overline{x^2} = \frac{\sum I_i \times x_i^2}{\sum I_i} - \bar{x}^2 \quad (4)$$

$$\overline{y^2} = \frac{\sum I_i \times y_i^2}{\sum I_i} - \bar{y}^2 \quad (5)$$

$$\overline{xy} = \frac{\sum I_i \times x_i \times y_i}{\sum I_i} - \bar{x} \times \bar{y}. \quad (6)$$

Тогда полуоси находятся по формулам:

$$a^2 = \frac{\overline{x^2} + \overline{y^2}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\overline{x^2} - \overline{y^2}}{2}\right)^2 + \overline{xy}^2} \quad (7)$$

$$b^2 = \frac{x^2 - y^2}{2} + \sqrt{\left(\frac{x^2 - y^2}{2}\right)^2 + xy^2}. \quad (8)$$

Позиционный угол Θ_{se} ориентирован по отношению к направлению на север в эпоху 2000.0.

Вытянутость объекта характеризуется эллиптичностью $(1 - \frac{b}{a})$ или элонгацией $(\frac{a}{b})$.

Также вычислялась площадь объекта на уровне детектирования DETECT_THRESH.

2.2.4. Размеры галактик

Для космологических тестов обычно используются эффективные размеры галактик на половине профиля потока, так называемые FWHM (Full Width at Half-Maximum). В качестве функции, описывающей профиль потока, использовалась гауссиана.

2.3. Процесс отождествления объектов

После задания параметров в файле конфигурации программы sExtractor, был создан файл, который служил основой для отождествления объектов всего поля. Он был получен путем сложения FITS файлов (снимки исследуемого поля в четырех фильтрах) с пакета MIDAS. Это было сделано в связи с тем, что объекты в фильтрах i и z имеют большие размеры, чем в фильтрах B и V . Для создания первичного каталога объектов в каждом фильтре использовался файл для детектирования объектов и сам файл с изображением. В результате было обнаружено больше 4300 объектов.

Далее формировалась выборка объектов, для чего использовались следующие ограничения. Во-первых, отношение сигнал/шум (S/N) должно быть не меньше 5. Все объекты, S/N которых было меньше 5, исключались из выборки. Далее исключались объекты, для которых отсутствует измеренный поток хотя бы в одном из 4-х фильтров. В результате был получен каталог, насчитывающий 4125 галактик.

2.4. Определение красных смещений

После отождествления объектов и создания первичного каталога в четырех фильтрах, были определены фотометрические красные смещения z и абсолютные звездные величины галактик.

Для определения фотометрических красных смещений галактик используют их звездные величины в различных фильтрах. Эффективность данного метода основана на тождественности фотометрических точек участку непрерывного спектра галактики. Точность фотометрических

оценок хуже спектральных и зависит от набора фильтров и точности фотометрических данных. Но для многих космологических и внегалактических задач фотометрические красные смещения вполне подходят. Данный метод получения z последнее время становится важным для наблюдательной космологии.

Хотя для определения фотометрических красных смещений не требуется спектральных данных, все же приходится доверять шаблонным спектрам галактик, которые берутся за основу сравнения.

Определение фотометрических красных смещений осуществлялось с помощью программы HyperZ [8].

В качестве входных данных для программы HyperZ служили:

- видимые звездные величины объектов и их ошибки в фильтрах B , V , i и z ;
- шаблоны спектрального распределения энергии (SED);
- закон покраснения объектов;
- космологические параметры.

2.4.1. Метод определения красных смещений

Процедура получения фотометрических красных смещений основана на сравнении наблюдаемого распределения энергии в спектре галактики с шаблонным. Наблюдаемое распределение (полученное по фотометрическим данным) сравнивается с различными шаблонными спектрами галактик, используя ту же фотометрическую систему.

Фотометрическое красное смещение z для данного объекта находилось по лучшему приближению наблюдаемого распределения к шаблонному. Процедура приближения основывалась на минимизации χ^2 . Наблюдаемое распределение сравнивалось с шаблонным согласно формуле:

$$\chi^2(z) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{F_{obs,i} - b \times F_{temp,i}(z)}{\sigma_i} \right]^2, \quad (9)$$

где $F_{obs,i}$ — наблюдаемый поток, F_{temp} — шаблонный поток, σ_i — колебания потока в данном фильтре, b — константа нормировки. Таким образом, минимизируя χ^2 находится красное смещение.

В состав программного пакета HyperZ в качестве шаблонных спектров входят как наблюдаемые [9], так и синтетические. Шаблонные спектры могут меняться и задаваться в конфигурационном файле.

В качестве синтетических моделей спектров галактик используется набор данных GISSSEL98

(Galaxy Isochrone Synthesis Evolution Library), где спектры представлены в широком диапазоне: от УФ до далекого ИК, с возможностью эволюции до больших z .

Следует отметить, что при расчетах фотометрических красных смещений использовались шаблоны спектров для галактик E/S0, Sa, Sb, Sc, Sd, Im, Burst типов.

2.4.2. Различные поправки и редукции

Металличность. В программе NuregZ существует возможность учитывать эволюцию металличности галактик. Для этого следует указать специальные шаблонные спектры галактик, где учитывается данный фактор. В процессе определения фотометрических z были варианты использования шаблонных спектров как с учетом эволюции металличности, так и без учета таковой. В результате был сделан вывод, что на определение фотометрических z эволюция металличности не влияет. В связи с этим, эволюция металличности не учитывалась при определении z .

Закон покраснения. Недавнее изучение галактик на больших z показало важность учета “покраснения” для оценки красных смещений из-за влияния галактической пыли в изучаемом объекте. Закон Калцетти [10] хорошо описывает поглощение излучения для объектов на больших красных смещениях, в связи с этим и была выбрана данная модель в текущей работе. В статье [10] описываются эмпирические результаты для группы молодых галактик, которые и были использованы при определении z :

$$k(\lambda) = 2.659 \left(-2.156 + \frac{1.509}{\lambda} - \frac{0.198}{\lambda^2} + \frac{0.011}{\lambda^3} \right) + R_V, \quad 0.12\mu m \leq \lambda \leq 0.63\mu m$$

$$k(\lambda) = 2.659 \left(-1.857 + \frac{1.040}{\lambda} \right) + R_V, \quad 0.63\mu m \leq \lambda \leq 2.20\mu m, \quad (10)$$

где $R_V = 4.05$ — полное поглощение в V-фильтре.

Данный закон соответствует центральным областям звездообразования, и, следовательно, его можно применять для галактик с большими красными смещениями. Заметим, что в УФ области спектра поглощение излучения играет существенную роль. В результате чего, эффект поглощения будет значительно проявляться для галактик с $z \geq 3$ в видимом диапазоне, куда сместился УФ участок спектра.

Дополнительные поправки. Излучение далеких галактик “искажено” также поглощением излучения в областях нейтрального водорода, находящегося на луче зрения, которое проявляется на участке спектра короче Ly α ($\lambda = 1216\text{\AA}$). Программа NuregZ учитывает данный эффект и вносит поправки согласно закону, предложенному авторами в статье [11].

2.4.3. Параметры, использованные при нахождении красных смещений

Для определения фотометрических красных смещений программе NuregZ следовало задать конфигурационный файл, в котором содержатся:

- различные космологические модели с $H_0 = 72 \text{ км/с} \times \text{Мпк}^{-1}$ для расчета абсолютных звездных величин M в фильтре В;
- звездные величины входного каталога галактик в разных фильтрах;
- характеристики фильтров пропускания в полосах В, V, i, z, соответствующие данным HST;
- шаг, с которым считается красное смещение z , $\Delta z = 0.1$.

2.5. Определение профилей поверхностной яркости галактик

Процесс нахождения профилей поверхностной яркости галактик осуществлялся с помощью метода последовательных приближений по формуле:

$$\chi^2 = \sum_{x=1}^{nx} \sum_{y=1}^{ny} \left[\frac{(flux_{x,y} - model_{x,y})^2}{\sigma_{x,y}^2} \right], \quad (11)$$

где $flux_{x,y}$ и $model_{x,y}$ соответствуют наблюдаемому и модельному потоку, σ — весовому значению фона. Значение χ^2 минимизировалось по всему изображению (координаты x, y). Вычисления проводились с помощью программы GALFIT [12].

В качестве аппроксимирующей функции поверхностной яркости указывалась гауссиана. Более сложную модель распределения поверхностной яркости использовать не имело смысла. Это связано с тем, что галактики исследуемого поля в своем большинстве не подчиняются стандартной классификации по типам и имеют иррегулярный вид.

Модельный профиль поверхностной яркости галактики брался в виде:

$$J_r = J_0 \times \exp\left(\frac{-r^2}{2\sigma^2}\right), \quad (12)$$

где J_0 — центральная поверхностная яркость, r — расстояние от центра, а $\sigma = FWHM_{sb}/2.345$. ($FWHM_{sb}$ — полуширина гауссианы на половине максимума). J_0 находится по формуле:

$$J_0 = \frac{F_{tot} \times R(c)}{2\pi\sigma^2q}, \quad (13)$$

где F_{tot} — полный поток излучения исследуемого объекта, q — один из выходных параметров приближения программы GALFIT,

$$R(c) = \frac{\pi(c+2)}{4\beta(1/(c+2), 1+1/(c+2))}, \quad (14)$$

β — Бета функция, c — параметр эллиптичности галактик. В качестве входных параметров для нахождения профилей поверхностной яркости задавались:

- область поля, содержащая объект (FITS файл);
- размеры области поля, где требуется проводить аппроксимацию;
- уровень фона в звездных величинах;
- значение σ фона для каждого пикселя данной области поля (весовое изображение, FITS файл);
- масштаб пикселя в секундах дуги.

В качестве начальных данных (нулевое приближение теоретической модели распределения поверхностной яркости) входили:

- координата центра объекта;
- полный поток от всего объекта, выраженный в звездных величинах;
- $FWHM$ профиля поверхностной яркости объекта;
- отношение осей b/a галактики;
- позиционный угол галактики.

Профиль поверхностной яркости определялся только для галактик с абсолютной звездной величиной M в диапазоне от -20 до -18 и вероятностью фотометрических значений $z(z_{phot})$ 99-100% (один из параметров в общем каталоге объектов). После выделения объектов из каталога согласно данному критерию выборки, проводилось дополнительное выделение объектов — исследовались объекты

с $FWHM_{flux} > 10$ пикселей. Данное дополнительное ограничение на выборку связано с тем, чтобы сходимость метода определения профиля поверхностной яркости была лучше.

В результате был получен каталог параметров для определения профиля поверхностной яркости в приближении гауссианы для каждого объекта данной выборки.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫБОРКИ ГАЛАКТИК

3.1. Построение основного каталога

Как было сказано выше, после обработки поля HUDF был построен общий каталог объектов. Но в дальнейшем он был модифицирован и из него были сделаны различные выборки. С целью систематизации материала, в данном параграфе делается обзор выборок и каталогов.

После отождествления объектов программой sExtractor, был построен первичный каталог данных C_i_{bviz} . Он содержит в себе основные параметры (координаты, размеры, эллиптичность, потоки и т.д.) для каждого объекта в четырех фильтрах B, V, z, i .

Для нахождения фотометрических красных смещений был составлен входной каталог данных, включающий в себя звездные величины галактик в 4-х фильтрах и их показатели цвета. Выходные данные, включающие в себя z_{ph} (фотометрические красные смещения), M (абсолютные звездные величины), Galaxy Type (тип галактик), были добавлены в общие каталоги данных $C_i_{bviz_mod1}$, $C_i_{bviz_mod2}$, $C_i_{bviz_mod3}$ и $C_i_{bviz_mod4}$, соответствующие космологическим моделям $\Omega_V = 0.0 \Omega_m = 0.0$, $\Omega_V = 0.0 \Omega_m = 1.0$, $\Omega_V = 0.7 \Omega_m = 0.3$ и $\Omega_V = 1.0 \Omega_m = 0.0$. В зависимости от того, объекты какой абсолютной звездной величины выбирались из каталога, к его названию приписывалось указание интервала величин: $M18_20$ (галактики с абсолютной величиной M в интервале от -20 до -18) или $M20_22$.

Из полученного каталога объектов исключались галактики, которые имели неправильно посчитанные потоки хоть в одном из фильтров (программа sExtractor в этом случае выводит значение потока в звездных величинах равным 99), а также вероятность определения $z_{ph} < 90\%$.

3.2. Распределения наблюдаемых параметров галактик HUDF

Распределение наблюдаемых величин параметров объектов полученного каталога в фильтре i

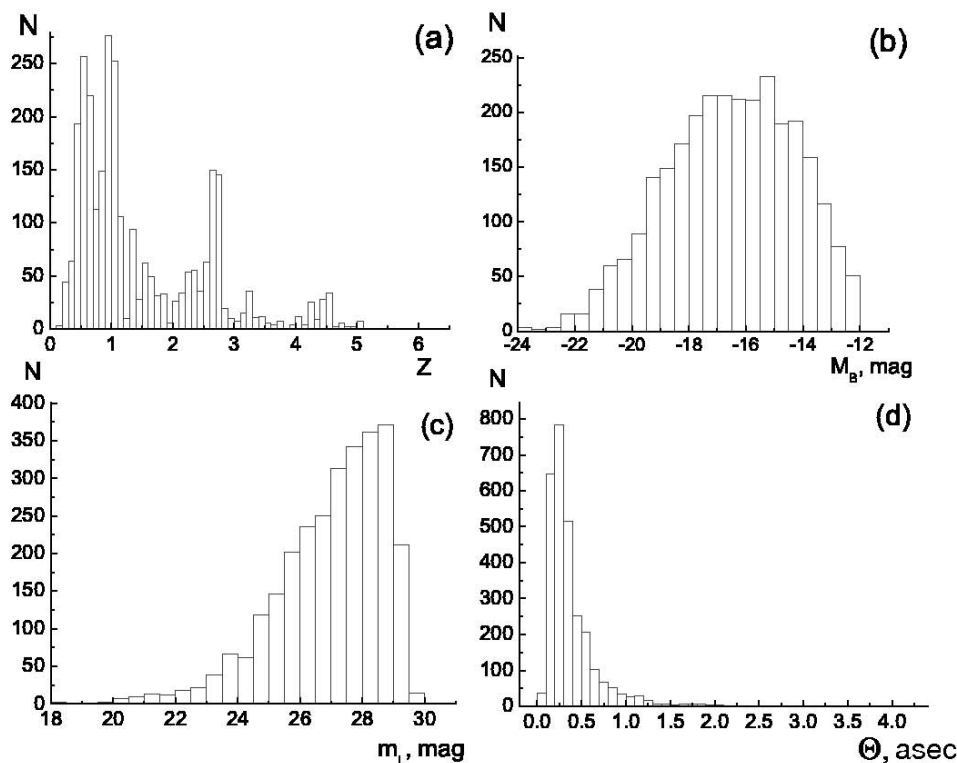


Рис. 2. Распределение наблюдаемых величин галактик каталога $C_i_bviz_mod3$, где (a) — распределение по фотометрическим красным смещениям, (b) — распределение по абсолютным звездным величинам в фильтре B, (c) — распределение по видимым звездным величинам в фильтре i, (d) — распределение угловых размеров.

приводится на Рис. 2. Гистограммы распределения величин Θ , m , M и z построены для выборки галактик каталога $C_i_bviz_mod3$ с числом объектов 4125.

Как видно из Рис. 2, распределение по фотометрическим красным смещениям имеет существенно неоднородный характер (a), распределение по M находится в интервале от -24 до -12 (b), число галактик растет с уменьшением потока вплоть до 29^m , что соответствует полноте каталога (c), характерный угловой размер Θ составляет $0.3''$ (d).

3.3. Ограничение по абсолютным величинам

На Рис. 3 приведена диаграмма абсолютная величина — линейные размеры галактик. В качестве размеров галактик использовались значения $FWHM_{flux}$, что соответствует полуширине профиля потока данной галактики.

Так как для ярких галактик наблюдается замедление роста линейных размеров, то для уменьшения систематического сдвига точек на диаграмме

$\Theta(z)$ необходимо сделать ограничения по абсолютным звездным величинам галактик. Распределение по линейным размерам для слабых галактик равномерное, поэтому для уменьшения систематических ошибок они убираются. Вертикальная линия на Рис. 3 соответствует границе абсолютных величин галактик, включаемых в выборку, в которую входят галактики с абсолютной звездной величиной ярче -18 .

Для расчета абсолютных звездных величин используется формула (31), где уже заложена фиксированная космологическая модель и SED галактик. Поэтому для оценки параметра эволюции k мы используем такие подвыборки галактик, в которых проведено ограничение по абсолютным звездным величинам в соответствии с каждой конкретной космологической моделью.

3.4. Разбиение на подвыборки

Для определения параметра эволюции линейных размеров галактик в зависимости от их типа было

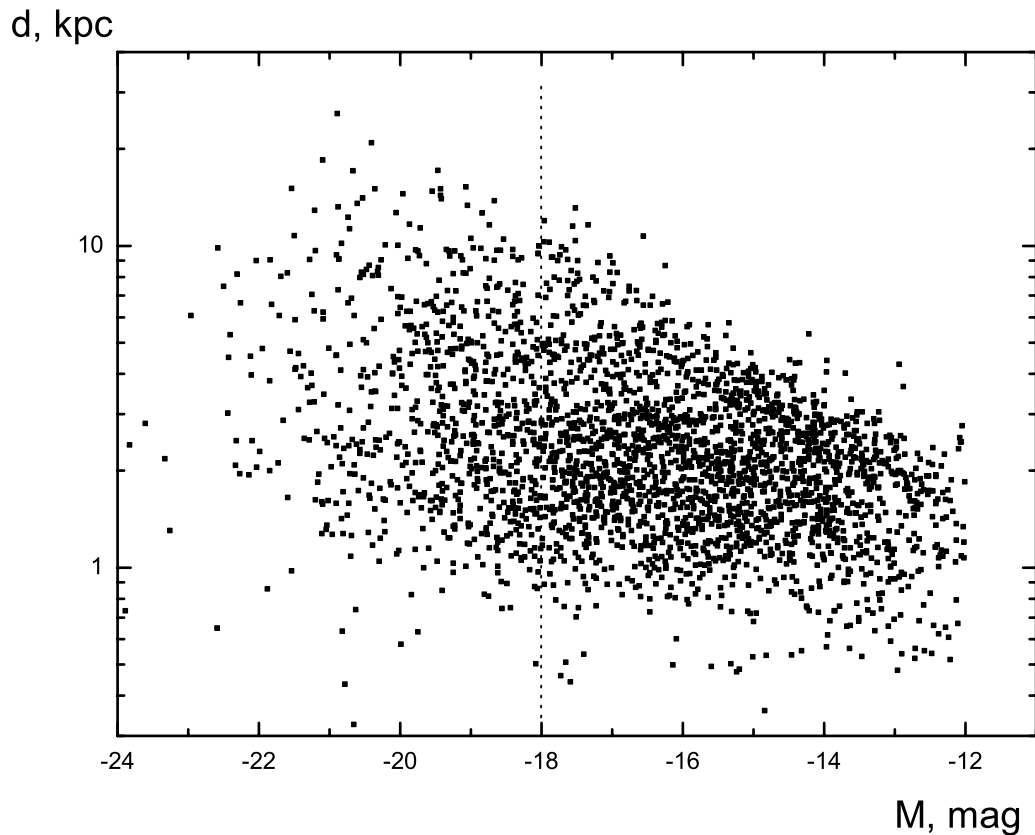


Рис. 3. Соотношение абсолютная величина - линейный размер для всех галактик выборки $C_i_bviz_mod3$ с параметрами стандартной космологической модели.

проведено разделение на спиральные и эллиптические. Тип галактик определялся по виду спектра, что делает программа NuserZ, когда рассчитывает фотометрические красные смещения. Для различных диапазонов абсолютных звездных величин выделялись ярчайшие галактики каталога. Для каждой космологической модели абсолютная звездная величина M считалась отдельно. Далее каталог C_i_bviz делился на 4 подвыборки (согласно каждой космологической модели), где происходило деление на подкаталоги: $-20 \leq M \leq -18$; $-22 \leq M \leq -20$.

4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ $\Theta(z)$ И $J(z)$

Обсуждению наблюдательных тестов космологических моделей посвящена обширная литература (см., например, обзоры [2, 3, 13]). Современные данные указывают на необходимость использования космологических моделей, включающих как

темное вещество, так и темную энергию. В настоящем разделе мы приведем общие теоретические соотношения используемые для анализа классических космологических тестов.

4.1. Соотношение метрическое расстояние — красное смещение

В рамках космологических двухкомпонентных моделей Фридмана, включающих холодное темное вещество (CDM) и темную энергию (Dark Energy), полный параметр плотности равен сумме

$$\Omega = \Omega_m + \Omega_V, \quad (15)$$

где $\Omega_m = \rho_m/\rho_{crit}$ — параметр плотности темного вещества, и $\Omega_V = \rho_V/\rho_{crit}$ — параметр плотности темной энергии, для которой $p_V = w\rho_V c^2$, и $w \leq 0$. В частном случае $w = -1$ темная энергия соответствует космологическому вакууму или космологической постоянной Эйнштейна.

Уравнение Фридмана в общем случае имеет вид:

$$\Omega = 1 - \Omega_k, \quad (16)$$

или

$$H^2 - \frac{8\pi G}{3}\rho = -\frac{kc^2}{S^2}, \quad (17)$$

где $\Omega = \varrho/\varrho_{crit}$ определяется полной плотностью $\varrho = \varrho_m + \varrho_V$, критическая плотность $\varrho_{crit} = 3H^2/8\pi G$, параметр плотности кривизны $\Omega_k = kc^2/S^2H^2$. Параметр Хаббла $H = \dot{S}/S$, а масштабный фактор $S(t)$ задается 4-интервалом Робертсона-Уолкера, имеющего вид:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - S^2(t) d\chi^2 - S^2(t) I_k^2(\chi) (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2), \quad (18)$$

где $I_k(\chi) = \sin(\chi)$, χ , $\text{sh}(\chi)$, для $k = +1, 0, -1$ соответственно.

Собственное метрическое расстояние r от наблюдателя до галактики с безразмерной сопутствующей координатой χ в метрике (18) дается выражением

$$r(t, \chi) = S(t)\chi, \quad (19)$$

при этом собственное метрическое расстояние r (измеряемое внутри трехмерной гиперсферы) и масштабный фактор S имеют физическую размерность длины: $[r] = [S] = [cm]$.

В наблюдательной космологии для описания соотношения угловой размер-красное смещение используется "внешнее" метрическое расстояние l

$$l(t, \mu) = S(t)\mu, \quad (20)$$

где безразмерное сопутствующее расстояние μ входит явно в 4-интервал

$$ds^2 = c^2 dt^2 - S^2(t) \frac{d\mu^2}{1 - k\mu^2} - S(t)^2 \mu^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2). \quad (21)$$

Согласно выражению (21), расстояние $l = S\mu$ измеряется в объемлющем внешнем евклидовом четырехмерном пространстве. Используя связь между χ и μ ($\chi = I_k^{-1}(\mu)$, $\mu = I_k(\chi)$) можно записать соотношения между метрическими расстояниями (19) и (20) в виде

$$r = S(t)I_k^{-1}(l/S), \quad l = S(t)I_k(r/S), \quad (22)$$

где I_k^{-1} есть обратная функция для I_k . Для $k = 0$ имеем $r = l$.

Общее выражение для метрического расстояния в модели Фридмана имеет вид:

$$r(z) = \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{h(z')}, \quad (23)$$

где $h(z)$ может быть выражено из уравнения Фридмана в виде:

$$h(z) = \sqrt{\tilde{\rho}(z)\Omega_0 + (1 - \Omega_0)(1 + z)^2}, \quad (24)$$

где $\Omega_0 = \rho_{tot}^0/\rho_{crit}^0$ параметр плотности в настоящую эпоху, $\tilde{\rho}(z) = \rho/\rho_0$ нормированная полная плотность всех компонент.

В случае двухжидкостной модели пыль + вакуум (без взаимодействия) собственное метрическое расстояние дается выражением

$$r(z) = \frac{c}{H_0} \times \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{(\Omega_V^0 + \Omega_m^0(1 + z')^3 - \Omega_k^0(1 + z')^2)}}, \quad (25)$$

а внешнее метрическое расстояние будет для $k = -1$

$$l(z) = \frac{c}{H_0} \frac{1}{(-\Omega_k^0)^{1/2}} \times \text{sh} \left(\int_{\frac{1}{1+z}}^1 \frac{(-\Omega_k^0)^{1/2} dy}{y \sqrt{(\Omega_m^0/y - \Omega_k^0 + \Omega_V^0 y^2)}} \right), \quad (26)$$

в случае $k = 0$

$$l(z) = \frac{c}{H_0} \int_{\frac{1}{1+z}}^1 \frac{dy}{y \sqrt{(\Omega_m^0/y + \Omega_V^0 y^2)}}, \quad (27)$$

и в случае $k = +1$

$$l(z) = \frac{c}{H_0} \frac{1}{(\Omega_k^0)^{1/2}} \times \sin \left(\int_{\frac{1}{1+z}}^1 \frac{(\Omega_k^0)^{1/2} dy}{y (\Omega_m^0/y - \Omega_k^0 + \Omega_V^0 y^2)^{1/2}} \right). \quad (28)$$

4.2. Соотношение угловой размер — красное смещение

Соотношение между метрическим расстоянием $l(z)$ и угловым размером Θ имеет вид:

$$\Theta(z) = d \left(\frac{1+z}{l(z)} \right) = \frac{d}{R_{H_0}} \left(\frac{1+z}{x(z)} \right), \quad (29)$$

где d — фиксированный размер галактики, $x(z) = l(z)/R_{H_0}$, $R_{H_0} = c/H_0$, $H_0 = 72$ (км/с)/Мпк. Если Θ перевести в секунды дуги, а d измерять в кпк, то формула (29) примет вид:

$$\Theta(z) = 0.0481 \times d \times \left(\frac{x(z)}{1+z} \right)^{-1}. \quad (30)$$

Для различных комбинаций Ω_m и Ω_V метрическое расстояние $l(z)$ вычисляется по формулам (26–28).

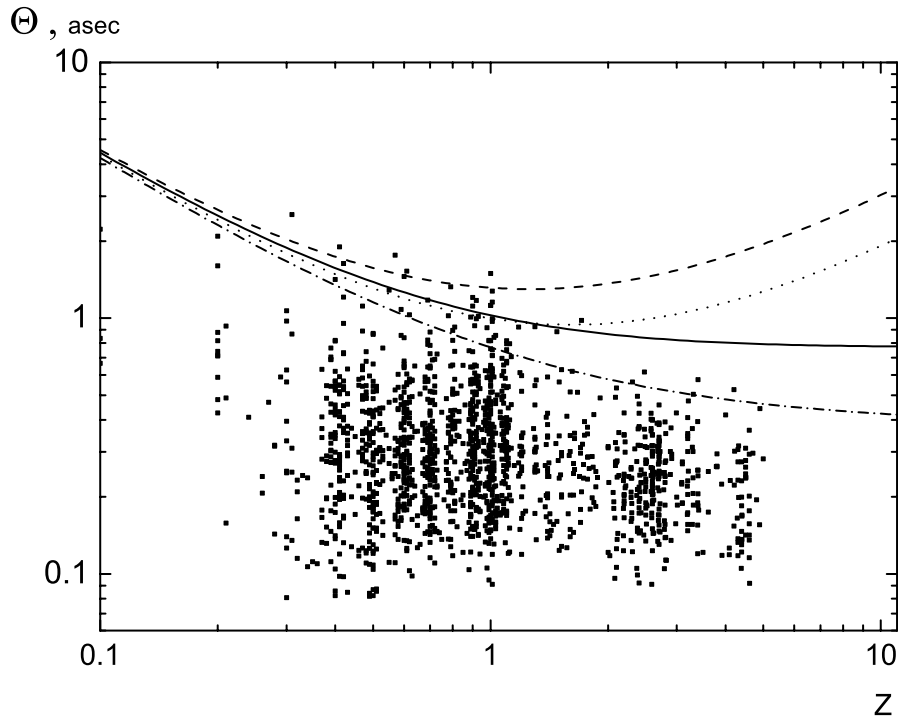


Рис. 4. Сравнение теоретических моделей с наблюдательными данными галактик в интервале M от -18 до -22 выборки $C_i_bviz_el_M18_22$. Штриховой линией представлена теоретическая модель $\Omega_m = 1.0$ и $\Omega_V = 0.0$, сплошной — $\Omega_m = 0.0$ и $\Omega_V = 0.0$, пунктирной $\Omega_m = 0.3$ и $\Omega_V = 0.7$, штрих-пунктирной $\Omega_m = 0.0$ и $\Omega_V = 1.0$.

4.3. Абсолютные звездные величины

Для того чтобы иметь возможность рассмотреть фиксированные интервалы светимостей галактик необходимо также вычислить абсолютные звездные величины галактик. В рамках моделей Фридмана это делается с помощью болометрического расстояния, определяемого как $l_{bol} = l(z) \times (1 + z)$. Тогда абсолютная величина галактики M_j в фильтре j может быть найдена из общего соотношения:

$$M_j = m_j - 5 \log\{l(z)(1 + z)\} - 25 - \Delta M_j, \quad (31)$$

где расстояние $l(z)$ в Мпк, $\Delta M_j = A_j + K_j + E_j$ — поправка к абсолютной звездной величине галактики за поглощение, красное смещение и эволюцию светимости.

4.4. Тест поверхностная яркость — красное смещение

Космологический тест “поверхностная яркость — красное смещение” относится к критическим космологическим тестам, поскольку зависимость $J(z)$ является универсальной для всех

фридмановских моделей, на что впервые обратил внимание Толмен [1].

Из определения поверхностной яркости объекта следует, что:

$$J_{bol} = \frac{F_{bol}}{\Theta^2} = \frac{J_0}{(1 + z)^4}, \quad (32)$$

где J_{bol} — болометрическая поверхностная яркость, F_{bol} — болометрический поток излучения, J_0 — поверхностная яркость галактики на $(z = 0)$. В случае фотометрии в полосе i следует говорить не о болометрической поверхностной яркости, а о наблюдаемой в данном диапазоне длин волн. Поэтому далее под J_{bol} будет подразумеваться J_{obs} (наблюдаемая в фильтре i), тогда:

$$\mu = \mu_0 + 2.5 \log(1 + z)^4 + K_i(z) + E_i(z) = \mu_0 + 2.5 \log(1 + z)^n, \quad (33)$$

где μ — поверхностная яркость, измеряемая в зв. вел./ \square'' , $K_i(z)$ — K-поправка к поверхностной яркости в фильтре i , $E_i(z)$ — эволюционная поправка к поверхностной яркости в фильтре i , $n = 4 + p = 4 + e_k + e_e$, p — комбинированный параметр эволюции поверхностной яркости.

5. ЭВОЛЮЦИЯ РАЗМЕРОВ И ПОВЕРХНОСТНОЙ ЯРКОСТИ

5.1. Параметр эволюции линейных размеров галактик

На Рис. 4 сравнены наблюдательные данные галактик из выборки *C_i_bviz_el* (где “el” означает, что галактики выборки эллиптические), с теоретическими моделями в диапазоне M от -22 до -18 .

На Рис. 4 видно, что ни одна модель не проходит через медианные значения данной выборки. Обычно данный факт объясняют эволюцией линейных размеров галактик. Поэтому, вводится функция $f(z)$:

$$\Theta(z)_{obs} = f(z) \times \Theta(z)_{theor}, \quad (34)$$

где $\Theta(z)_{obs}$ — наблюдаемые угловые размеры, $\Theta(z)_{theor}$ — теоретические угловые размеры в рамках исследуемой модели. Обычно $f(z) = (1+z)^k$, где k — параметр эволюции.

В соответствии с формулой (29), для каждой модели был получен параметр эволюции размеров галактик. На Рис. 5 представлено несколько графиков для моделей $\Omega_m=1.0, \Omega_V=0.0$ и $\Omega_m=0.3, \Omega_V=0.7$. Параметр k находился с помощью метода наименьших квадратов как по значениям всей выборки, так и по медианным точкам. Вычисление проводилось в математическом пакете Microsoft Origin 7.0. Стоит отметить, что *медиана* является более статистически устойчивой характеристикой, чем *среднее*.

В итоге, параметр эволюции размеров галактик был найден для 4-х моделей как для выборки с M от -20 до -18 , так и для объектов с M от -22 до -20 . В Табл. 1 представлены результаты для угловых размеров.

Следует отметить, что для выборки объектов с M от -22 до -20 параметр d принят равным 12 кпк (по сравнению с $d=8$ кпк, принятым для галактик с M от -20 до -18). Это связано с тем, что более яркие галактики (по сравнению с галактиками с M от -20 до -18) имеют немного большие размеры. В связи с этим “фиксированный размер галактики” и был немного увеличен.

5.2. Эволюция поверхностной яркости

Распределение поверхностной яркости галактик характеризуется профилем $J(\Theta, z)$ для каждого z . В настоящей работе изучалась эволюция поверхностной яркости галактик, т.е. рассматривалось центральное значение профиля $J(z)_{\Theta=0}$, которое определялось с помощью программ sExtractor и GALFIT.

Нормировочная постоянная J_0 находилась методом усреднения значений поверхностной яркости

для галактик с z от 0 до 0.5. Параметр поверхностной яркости $n = 4 + p = 4 + k + e_J$ определяется следующим выражением:

$$J_{norm} = \frac{1}{(1+z)^n}, \quad (35)$$

где J_{norm} — нормированная поверхностная яркость = J/J_0 (J_0 — центральная поверхностная яркость данной галактики), p — параметр эволюции. Параметр n находился методом наименьших квадратов как по всем точкам, так и по медианным значениям нормированной поверхностной яркости. На Рис. 6 сравнены кривые теоретической и наблюдаемой эволюций поверхностной яркости.

Для большей наглядности их можно представить в иных осях. Используя формулу (35) перейдем к поверхностной яркости μ :

$$\begin{aligned} -2.5 \lg(J_{obs} \Delta x^{-2}) = \\ -2.5 \lg(J_0 \Delta x^{-2}) + 2.5 \lg(1+z)^n, \end{aligned} \quad (36)$$

откуда

$$\mu_{obs} = \mu_0 + 2.5 n \lg(1+z), \quad (37)$$

где Δx — масштабный коэффициент для перехода от пикселей к секундам дуги. На Рис. 7 представлены графики с различными параметрами эволюции p в осях $\mu - \lg(1+z)$, а $\mu_0 = 17.89$ зв. вел./ \square'' .

Результаты анализа эволюции поверхностной яркости для галактик исследуемого поля HUDF показывают, что параметр эволюции поверхностной яркости $p = -0.83 \pm 0.1$ ($n = 4 + p = 3.17 \pm 0.1$) при использовании всех точек выборки и $p = -0.11 \pm 0.1$ ($n = 3.79 \pm 0.1$) — при использовании только медианных точек, для галактик в диапазоне M от -18 до -20 .

6. ОБНАРУЖЕНИЕ ВОЗМОЖНЫХ СВЕРХБОЛЬШИХ СТРУКТУР В РАДИАЛЬНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ГАЛАКТИК HUDF

Распределение галактик HUDF по фотометрическим красным смещениям в интервале значений от 0.1 до 6.5 позволяет провести поиск сверхбольших структур, проявляющихся в виде флуктуаций числа галактик в соответствующих интервалах данного распределения.

6.1. Распределение галактик по фотометрическим красным смещениям

В качестве модельного распределения галактик, с которым проводилось сравнение наблюдаемого распределения, выступало однородное распределение точек в сфере единичного радиуса. Каждой

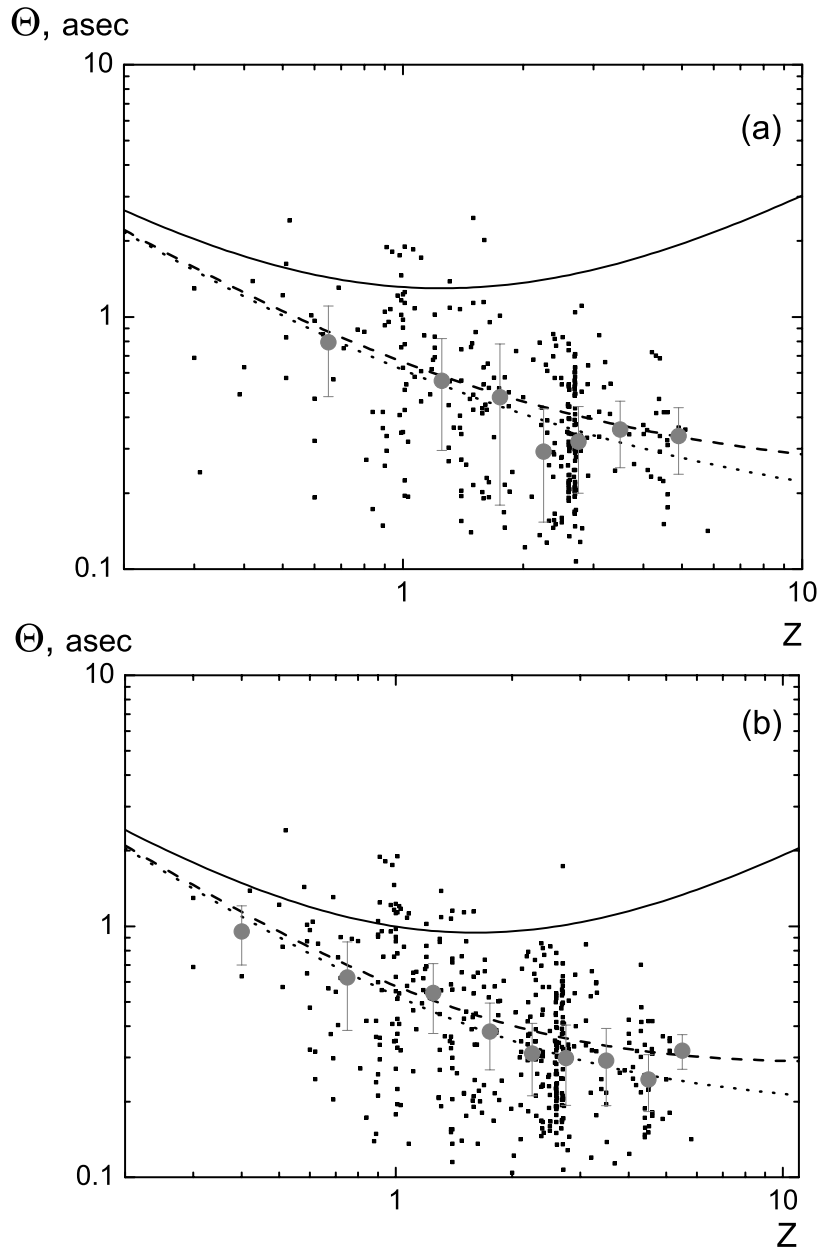


Рис. 5. Нахождение параметров эволюции для различных моделей галактик с M от -20 до -18 выборок $C_i_{bviz_mod3_M18_20}$ (a) и $C_i_{bviz_mod4_M18_20}$ (b). Сплошная линия на графиках (a) — модель $\Omega_m = 1.0, \Omega_V = 0.0$, (b) — модель $\Omega_m = 0.3, \Omega_V = 0.7$, штриховая линия — приближение по всей выборке, пунктирная — приближение по медианным точкам.

точке случайным образом была приписана абсолютная звездная величина согласно шехтеровской функции светимости:

$$\phi(L)dl = \phi^* \left(\frac{L}{L^*} \right)^\alpha \exp \left(-\frac{L}{L^*} \right) d \left(-\frac{L}{L^*} \right). \quad (38)$$

Следующим шагом было получение красных смещений моделируемых точек. Для этого следовало перейти от радиального единичного расстояния к метрическому. Внешнее и внутреннее метрические расстояния при $k = 0$ (пространство с нулевой кривизной) совпадают $l(z) = r(z)$. Таким образом

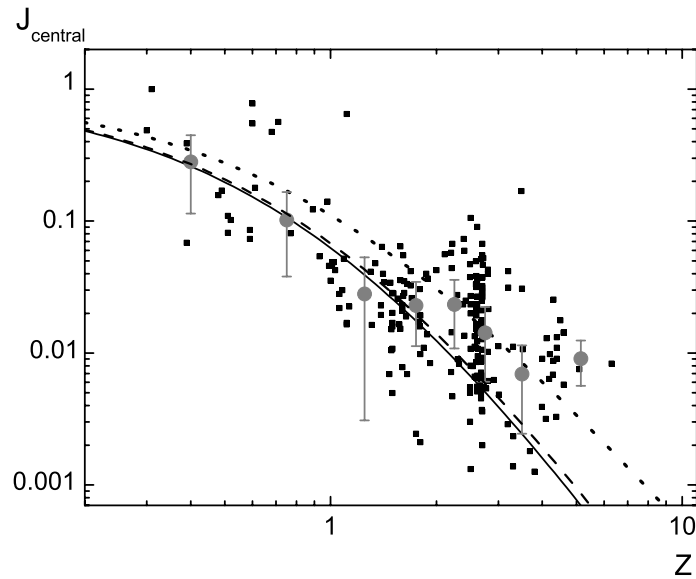


Рис. 6. Эволюция поверхностной яркости с изменением z для выборки $C_i_bviz_mod3_M20_22$. Штриховая линия — усреднение по всем точкам выборки, пунктирная линия — усреднение по медианным точкам, сплошная линия — теоретическая эволюция поверхностной яркости, вертикальные бары — ошибки медианных значений.

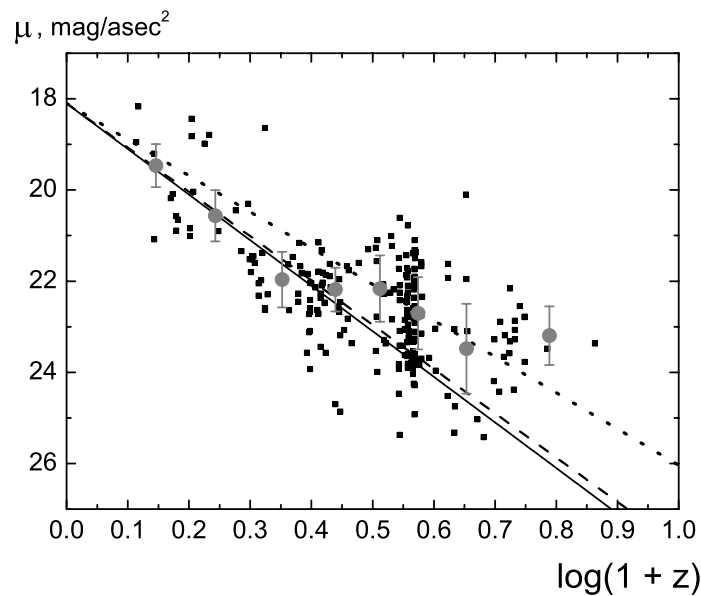


Рис. 7. Эволюция поверхностной яркости с изменением z для выборки $C_i_bviz_mod3_M20_22$. Штриховая линия — усреднение по всем точкам выборки, $p = -0.8251$; Пунктирная линия — усреднение по медианным точкам, $p = -0.1144$; сплошная линия — теоретическая эволюция поверхностной яркости, $p = 0$; вертикальные бары — ошибки медианных значений.

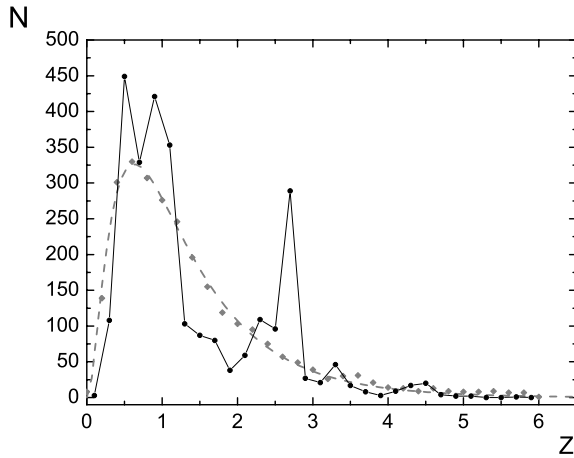


Рис. 8. Наблюдаемое (сплошная линия) и моделируемое (штриховая линия) распределение фотометрических красных смещений по бинам $\Delta z = 0.2$.

для расчета красного смещения использовалось обратное соотношение $z = l^{-1}(z)$ и формула (27). Для учета эффекта селекции, связанного с предельной чувствительностью телескопа, проводилось ограничение по видимой звездной величине — она не должна превышать 29^m .

Полученное модельное распределение аппроксимировалось выражением:

$$dN = Ax^\alpha \exp\left(-\frac{x}{x_0}\right)^\beta dz, \quad (39)$$

где свободные параметры α , β , x_0 находились методом наименьших квадратов, A — нормировочная постоянная.

6.2. Сравнение ожидаемого распределения с наблюдаемым

На Рис. 8 представлено наблюдаемое и модельное (согласно (39)) распределения по красным смещениям галактик поля HUDF. Параметры модельного распределения $\alpha = 2.84$, $\beta = 0.48$, $x_0 = 0.015$.

В качестве меры отклонения наблюдаемого числа галактик от теоретически ожидаемых вычисляется величина:

$$\sigma_{obs} = \frac{|N_{obs} - N_{theor}|}{N_{theor}}, \quad (40)$$

где N_{theor} — ожидаемое (согласно (39)) число галактик в интервале от z до $z + \Delta z$, N_{obs} — число наблюдаемых галактик в том же интервале.

Теоретически ожидаемая величина флуктуаций характеризуется дисперсией пуассоновских шумов $\sigma_P = 1/N_{theor}$, а также дисперсией, связанной с

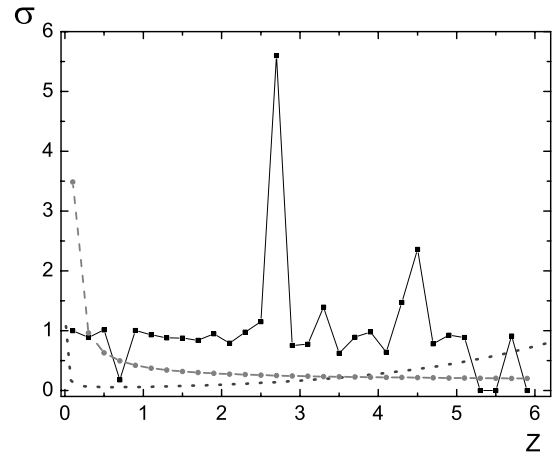


Рис. 9. Наблюдаемые (сплошная линия), теоретические (штриховая линия) и пуассоновские (пунктирная линия) отклонения фотометрических красных смещений по бинам $\Delta z = 0.2$.

коррелированными структурами, которая вычислялась по формуле [15]:

$$\sigma_{theor}^2 = \frac{J_2}{1+z} \left(\frac{r_0}{r_{eff}}\right)^\gamma, \quad (41)$$

где $\gamma = 1.8$, $J_2 = 72.0/[2^\gamma(3-\gamma)(4-\gamma)(6-\gamma)] = 1.865$, $r_0 = 5$ Мпк, $r_{eff} = (3/4\pi r^2 \Delta r S)^{1/3}$ — эффективный радиус, соответствующий объему интервала, Δr соответствует слою dz , а S — телесный угол поля HUDF.

На Рис. 9 приведен график наблюдаемых величин отклонений σ_{obs} и теоретически ожидаемых σ_P , σ_{theor} отклонений от однородного распределения галактик.

7. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Проведенный анализ классического космологического теста $\Theta(z)$ показал, что выбор космологических моделей сильно влияет на величину параметра эволюции линейных размеров галактик.

Как видно из Табл. 1, для галактик с абсолютными звездными величинами от -20 до -18 параметр эволюции линейных размеров меняется в диапазоне от $k = -0.40 \pm 0.03$ для модели с $\Omega_m = 0.0$ и $\Omega_V = 1.0$, до $k = -1.09 \pm 0.06$ для модели с $\Omega_m = 1.0$ и $\Omega_V = 0.0$. Для галактик, светимость которых находится в пределах от -22 до -20 , этот же параметр меняется в диапазоне от -0.49 ± 0.06 до -1.32 ± 0.12 . Найденные значения k находятся в согласии с результатами [14] для других выборок галактик из HDF-S, HDF-N, GOODS и HUDF, где использовалась модель с параметрами $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_V = 0.7$. Для галактик со

Таблица 1. Результаты нахождения параметра эволюции k угловых размеров галактик для различных космологических моделей.

N	Модель	Параметр эволюции k		M (зв. вел.)
		по всем точкам	по медианным точкам	
I.1	$\Omega_m = 0.0, \Omega_V = 1.0$	-0.40 ± 0.03	-0.58 ± 0.09	-20 -18
I.2	$\Omega_m = 1.0, \Omega_V = 0.0$	-0.99 ± 0.04	-1.09 ± 0.05	-20 -18
I.3	$\Omega_m = 0.3, \Omega_V = 0.7$	-0.79 ± 0.03	-0.91 ± 0.05	-20 -18
I.4	$\Omega_m = 0.0, \Omega_V = 0.0$	-0.67 ± 0.03	-0.89 ± 0.18	-20 -18
II.1	$\Omega_m = 0.0, \Omega_V = 1.0$	-0.49 ± 0.06	-0.60 ± 0.08	-22 -20
II.2	$\Omega_m = 1.0, \Omega_V = 0.0$	-1.14 ± 0.10	-1.32 ± 0.12	-22 -20
II.3	$\Omega_m = 0.3, \Omega_V = 0.7$	-0.90 ± 0.08	-1.07 ± 0.06	-22 -20
II.4	$\Omega_m = 0.0, \Omega_V = 0.0$	-0.75 ± 0.08	-0.85 ± 0.12	-22 -20

светимостями в интервале M от -22.38 до -21.07 была найдена величина параметра эволюции размеров галактик $k = -1.05 \pm 0.21$. Для нашей выборки, в случае $\Omega_m = 0.3, \Omega_V = 0.7$ параметр $k = -1.07 \pm 0.06$. Отметим, что если будет разработана надежная модель эволюции размеров галактик, то диаграмма $\Theta(z)$ может стать эффективным космологическим тестом.

Определенный параметр эволюции поверхностной яркости $p = -0.11 \pm 0.1$ ($n = 3.79 \pm 0.1$) по медианным точкам для галактик в диапазоне M от -18 до -20 требует дополнительного исследования. Это связано с тем, что в K -поправку для поверхностной яркости входит комбинация K -поправки потока и K -поправки углового размера.

Анализ радиального распределения галактик HUDF показал, что имеются сильные отклонения наблюдаемого числа галактик от ожидаемого в случае однородного распределения галактик. Наблюдаемые неоднородности соответствуют масштабам около 2000 Мпк. Это может быть связано как с реальными сверхбольшими структурами, так и со скрытыми эффектами селекции, проявляющимися при определении фотометрических красных смещений. Этот вопрос требует дополнительного исследования.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Н. Ловягину за предоставление результатов расчетов радиальных распределений галактик в искусственных каталогах, а также за частичную финансовую поддержку фондам Научная школа и Рособразование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Hubble and R. Tolman, *Astrophys. J.* **82**, 302 (1935).
2. A. Sandage, *Astrophys. J.* **133**, 355 (1961).
3. A. Sandage, *In The Deep Universe* (Berlin, Springer-Verlag, 1995).
4. D. N. Spergel, R. Bean, O. Dore, and M. R.olta, *Astrophys. J. Suppl.* **170**, 377 (2007).
5. A. Clocchiatti, P. Schmidt, and A. Filippenko, *Astrophys. J.* **642**, 1 (2006).
6. A. Conley, G. Goldhaber, L. Wang, and G. Aldering, *Astrophys. J.* **644**, 1 (2006).
7. E. Bertin and S. Arnouts, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **117**, 393 (1996).
8. M. Bolzonella, J.-M. Miralles, and R. Pello', *Astronom. and Astrophys.* **363**, 476 (2000).
9. G. D. Coleman, C. C. Wu, and D. W. Weedman, *Astrophys. J. Suppl.* **43**, 393 (1980).
10. D. Calzetti, L. Armus, R. C. Bohlin, and A. L. Kinney, *Astrophys. J.* **533**, 682 (2000).
11. J. B. Oke and D. G. Korycansky, *Astrophys. J.* **255**, 11 (1982).
12. Y. Peng Chien, Steward Observatory, University of Arizona, User's manual, GALFIT v2.0.
13. Yu. V. Baryshev, F. Sylos Labini, M. Montuori, and L. Pietronero, *Vistas in Astronomy* **38**, 419 (1994).
14. R. J. Bouwens, G. D. Illingworth, L. P. Blakeslee, and T. J. Broadhurst, *Astrophys. J.* **611**, L1 (2004).
15. J. E. Peebles, *The large-scale structures of the Universe* (Princeton University Press, 1980).

CLASSICAL COSMOLOGICAL TESTS FOR GALAXIES OF THE HUBBLE ULTRA DEEP FIELD**N. V. Nabokov, Yu. V. Baryshev**

Images of the Hubble Ultra Deep Field are analyzed to obtain a catalog of galaxies for which the angular sizes, surface brightness, photometric redshifts, and absolute magnitudes are determined. The catalog contains a total of about 4000 galaxies identified at a high signal-to-noise ratio, which allows the cosmological relations angular size — redshift and surface brightness — redshift to be analyzed. The parameters of the evolution of linear sizes and surface brightness of distant galaxies in the redshift interval 0.5–6.5 are estimated in terms of a grid of cosmological models with different density parameters (Ω_V ; Ω_m). The distribution of photometric redshifts of galaxies is analyzed and possible superlarge inhomogeneities in the radial distribution of galaxies are found with scale lengths as large as 2000 Mpc.