

ФЛУКТУАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЛАКТИК В ГЛУБОКОМ ОБЗОРЕ COSMOS НА МАСШТАБАХ В ГИГАПАРСЕКИ

С. И. Широков, Д. И. Теханович, Ю. В. Барышев

Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9

В статье проводится анализ радиального распределения галактик в глубоком обзоре COSMOS. Получена оценка величины «космической дисперсии» (cosmic variance) используя большие бины по красному смещению ($\Delta z = 0.1 \div 0.3$), которые содержат большое число галактик ($N(z, dz) \sim 10000$), так что шум Пуассона ($\sim 1/N^{1/2}$) оказывается малым ($\sigma_P \sim 0.01$). Точность фотометрической оценки красных смещений ($\delta z \sim 0.012(1+z)$) позволяет исследовать крупномасштабные неоднородности в распределении галактик на масштабах, превышающих размер бина $\Delta z \geq 0.1$, т. е. $\Delta R \geq 300$ Мпк/h. LCDM-модель предсказывает для глубокого обзора COSMOS амплитуду космической дисперсии темной материи $\sigma(z)_{dm} = 0.039$ для $z = 1.7$ и $\Delta z = 0.2$ (Moster et al., *Astrophys. J.*, 731, 113 (2011)). Однако наблюдаемая амплитуда флуктуаций чисел галактик на $z = 1.7$ для $\Delta z = 0.2$ составляет $\sigma(z)_{obs} = 0.37$, что на порядок больше предсказаний LCDM-модели для небарионной темной материи. Для согласования наблюдаемых флуктуаций с модельными необходимо значение байеса должно быть $b \approx 10$. Наблюдаемые радиальные размеры неоднородностей достигают 1500 Мпк, тогда как предсказываемая LCDM корреляционная функция $\xi_{dm} = 0$ на масштабе $r = 174$ Мпк независимо от величины байеса. Наши результаты согласуются с недавними наблюдениями поля COSMOS в обзоре ALHAMBRA и в обзорах рентгеновского и субмиллиметрового диапазонов (SPT, ALMA). Библиогр. 24 назв. Ил. 4. Табл. 2.

Ключевые слова: космология, крупномасштабная структура Вселенной, глубокие обзоры галактик, COSMOS, ALHAMBRA, SPT, ALMA.

1. Введение. Для построения согласованной с наблюдениями модели эволюции крупномасштабной структуры Вселенной необходимо исследовать зависимость амплитуды и масштаба флуктуаций чисел галактик от космологического красного смещения. В последние годы такая возможность появилась благодаря глубоким обзорам галактик (см., например, [1], гл. 12; [2]). Флуктуации чисел галактик в рассматриваемом объеме обусловлены как наличием пуассоновского шума, так и наличием крупномасштабной структуры, приводящей к «космической дисперсии» (cosmic variance), которая играет важную роль при сопоставлении LCDM-моделей с наблюдениями.

В нашей работе мы рассматриваем самый большой (более 600 000 галактик) и глубокий (z достигает 5) на сегодняшний день многополосный обзор COSMOS, с помощью которого можно исследовать крупномасштабные флуктуации концентрации галактик, используя большие бины по красному смещению ($\Delta z = 0.1 \div 0.3$). В этом случае размер бинов превышает точность фотометрической оценки красного смещения $\delta z \sim 0.012(1+z)$, они содержат большое число галактик ($N(\Delta z) \sim 10000$), так что шум Пуассона ($\sim 1/N^{1/2}$) будет мал ($\sigma_P \sim 0.01$), и флуктуации, связанные с крупномасштабными неоднородностями в распределении галактик, могут быть обнаружены с контрастом, значительно превышающим уровень пуассоновского шума.

Амплитуда флуктуаций, соответствующих космической дисперсии, существенно зависит от геометрии рассматриваемого объема и определяется интегралом от пространственной корреляционной функции галактик [3, 4]. В ряде работ [5–8] проводилась оценка величины космической дисперсии для некоторых глубоких обзоров

галактик, а также были получены предсказания численных Λ CDM-моделей для различной геометрии и глубины искусственных выборок. Однако, в этих работах вид корреляционной функции считался фиксированным и зависимость космической дисперсии от вариаций формы корреляционной функции галактик не исследовалась. В наблюдательных оценках величины космической дисперсии использовались параметры корреляционной функции $\gamma = 1.8$ и $r_0 = 5$ Мпк/h, а также приближенная формула для сферического объема выборки.

В настоящей работе проводится расчет размеров и амплитуд неоднородностей радиального распределения галактик обзора COSMOS [9, 10] с учетом вариации формы пространственной корреляционной функции галактик и существенно не сферической геометрии выборки. Проведено сравнение наблюдаемых флуктуаций с предсказаниями Λ CDM-модели и сделан вывод о наличии существенно больших размеров и амплитуд коррелированных структур, чем ожидалось в теоретических моделях эволюции крупномасштабной структуры Вселенной. Полученные в нашей работе результаты подтверждаются недавно опубликованными данными глубокого обзора галактик ALHAMBRA [11], в котором поле AL-4 находится внутри области обзора COSMOS. Они также согласуются с результатами наблюдений поля COSMOS в субмиллиметровом диапазоне [12].

2. Выборка галактик. Глубокий обзор COSMOS (Hubble Space Telescope Cosmic Evolution Survey) [9, 10] является самым большим карандашным (1.3×1.3 кв. градуса) многополосным обзором галактик и содержит фотометрические данные для более 600 000 галактик с видимой звездной величиной $m_i < 26.6$. Благодаря совместным наземным и космическим наблюдениям были измерены звездные величины галактик в 30 фильтрах и найдены фотометрические красные смещения z_{phot} для 607 617 галактик. В работе [13] была опубликована выборка 385 065 галактик с $i < 25$, имеющих точность измерения фотометрических красных смещений $\delta z < 0.04$ для $z < 1.25$ и $\delta z < 0.1 \div 0.2$ для $z > 1.25$. В настоящей работе, в отличие от [7], использовались более сильные ограничения на качество фотометрических красных смещений, так что полное число галактик в нашей выборке составляет 304 897.

3. Метод оценки амплитуды и масштаба флуктуаций. Мы используем метод оценки крупномасштабных флуктуаций, предложенный в работах [5, 6]. Существенным развитием метода является точный учет геометрии выборки и изменение формы пространственной корреляционной функции.

Поскольку в обзоре COSMOS галактики имеют большие красные смещения, необходимо использовать точные формулы для расчета метрического расстояния и возраста галактик. В рамках стандартной Λ CDM-модели эти величины даются формулами [1, гл. 7]

$$r(z) = \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{dy}{h(y)}, \quad (1)$$

где c — скорость света, $H_0 = 72$ км/с/Мпк, параметры плотности для материи и вакуума $\Omega_m^0 = 0.3$ и $\Omega_v^0 = 0.7$, и возраст $t(z)$ объекта (галактики) дается формулой

$$t(z) = \frac{1}{H_0} \int_z^\infty \frac{dy}{(1+y)h(y)}, \quad (2)$$

где

$$h(y) = \sqrt{\Omega_v^0 + \Omega_m^0(1+y)^3 - (1 - \Omega_{tot}^0)(1+y)^2}. \quad (3)$$

Для глубоких обзоров, ограниченных предельной звездной величиной, распределение галактик по красному смещению обычно аппроксимируется эмпирическим выражением [14, 15]

$$N_{mod}(z, \Delta z) = Az^\alpha e^{(-z/z_0)^\beta} \Delta z, \quad (4)$$

где $N_{mod}(z, \Delta z)$ — число галактик с красным смещением в интервале $(z, z + \Delta z)$. Свободные параметры α , β и z_0 находятся методом наименьших квадратов, A — нормировочная постоянная из условия равенства интеграла полному числу галактик: $\int N_{mod} dz = N_{tot}$. Выражение (4) также подтверждается на модельных выборках галактик, построенных с учетом функции светимости Шехтера и ограниченных предельной видимой звездной величиной [16]. В формуле (4) содержится 3 свободных параметра ($z_0; \alpha; \beta$). Именно это обстоятельство дает возможность получить гибкую форму аппроксимации, которая дает минимум квадрата отклонений. Модификации аппроксимирующей формулы относятся, как правило, к введению дополнительного слагаемого с экспонентой для подгонки далекого хвоста распределения, что слабо влияет на наличие локальных немонотонных отклонений.

Глубокие обзоры галактик представляют собой узкие конические сечения глобального пространственного распределения галактик. Для каждого бина по красному смещению $(z, z + \Delta z)$ теоретически ожидаемая дисперсия относительных флуктуаций σ^2 равна сумме двух дисперсий: определяемых коррелированными структурами σ_{corr}^2 и шумом Пуассона, σ_p^2 [4, 5, 8], т. е.

$$\sigma^2(z, \Delta z) = \sigma_{corr}^2 + \sigma_p^2. \quad (5)$$

Для случая однородного (пуассоновского) распределения число галактик N в объеме бина ΔV характеризуется флуктуациями с относительной величиной ($\sim 1/N^{1/2}$). Из-за достаточно большого количества наблюдаемых галактик обзора COSMOS в рассматриваемых бинах по красному смещению $N_{mod}(z, \Delta z) \sim 10000$ вклад шума Пуассона в наблюдаемые флуктуации ограничен малым уровнем $\sigma_p \sim 0.01$.

Наличие крупномасштабной корреляции структур создает наблюдаемую в глубоких обзорах космическую дисперсию σ_{corr}^2 в каждом бине по красному смещению. Дисперсия таких флуктуаций может быть найдена с помощью пространственной корреляционной функции $\xi(r)$ по формуле [3, 4]

$$\sigma_{corr}^2(V) = \frac{1}{(1+z)V^2} \int_V dV_1 \int_V dV_2 \xi(|r_1 - r_2|), \quad (6)$$

где $V = V(z, \Delta z)$ — объем интегрируемой области, связанный с рассматриваемым бином $(z, z + \Delta z)$, а фактор $(1+z)$ учитывает рост амплитуды флуктуаций со временем.

В случае сферического объема V и степенного закона корреляционной функции $\xi(r) = \left(\frac{r_0}{r}\right)^\gamma$ выражение (6) для дисперсии σ_{corr}^2 принимает вид [3]

$$\sigma_{corr}^2(z, \Delta z) = \frac{J_2}{1+z} \left(\frac{r_0}{r}\right)^\gamma, \quad (7)$$

где $J_2 = \frac{72}{2^\gamma(3-\gamma)(4-\gamma)(6-\gamma)}$, r_0 и γ — параметры корреляционной функции, $(1+z)$ есть фактор, принимающий во внимание рост амплитуды неоднородностей. Для $\gamma = 1.8$ константа $J_2 = 1.865$.

Для не сферической выборки галактик в формуле (7) часто используют эффективный радиус $r = r_{eff}$ сферического объема, эквивалентного объему бина

$V(z, z + \Delta z)$. Однако, как показали наши расчеты в случае конического обзора COSMOS, приближенная формула завышает оценку космической дисперсии в $1.5 \div 2$ раза.

Для каждого бина в качестве меры отклонения наблюдаемого распределения галактик по красным смещениям $N_{obs}(z, \Delta z)$ от модельного однородного распределения $N_{mod}(z, \Delta z)$ (даваемого формулой (4)) используется выражение

$$\delta_{obs}(z, \Delta z) = \frac{\Delta N_{obs}}{N_{mod}} = \frac{N_{obs} - \langle N_{mod} \rangle}{\langle N_{mod} \rangle}, \quad (8)$$

которое дает оценку наблюдаемой дисперсии флуктуаций $\sigma_{obs} = |\delta_{obs}|$ в данном бине Δz на данном красном смещении z .

Поскольку рассматриваемые размеры бинов превышают 300 Мпк, а предсказываемая в Λ CDM-модели корреляционная функция обращается в ноль на 174 Мпк и не зависит от величины байеса [17], соседние бины по красному смещению можно считать независимыми. Для независимых соседних бинов знаки флуктуаций должны чередоваться, а наличие протяженных структур большого размера будет приводить к сохранению знака флуктуаций. Оценка линейного размера неоднородности может быть получена из подсчета количества соседних бинов с одинаковым знаком отклонения от однородности.

4. Результаты расчета. На рис. 1 приведено наблюдаемое распределение числа объектов $N_{obs}(z, \Delta z)$ в обзоре COSMOS по красному смещению z_{phot} (и метрическому расстоянию в Гпк) для бинов $\Delta z = 0.1; 0.2; 0.3$. Аппроксимирующая кривая (4) для бина $\Delta z = 0.3$ имеет следующие параметры, найденные методом наименьших квадратов: $A = 304897$, $\alpha = 1.00$, $\beta = 1.06$, $z_0 = 0.60$; полное число галактик 304897.

Наблюдаемое распределение отклонений (8) от однородного распределения для этих же бинов приведено на рис. 2.

В таблице 1 представлены численные значения амплитуд отклонений и расчетные значения σ_{corr} для бинов $\Delta z = 0.3$, $\Delta z = 0.2$, $\Delta z = 0.1$, разделенные в таблице горизонтальными чертами. Границы области неоднородности z_0 и z_f представляют собой пересечения нуля для соответствующих графиков из рис. 2. Размеры области неоднородности определяются как разность двух метрических расстояний $r(z_0)$ и $r(z_f)$, вычисленных по формуле (1). Амплитуда отклонения от однородности (contrast) вычислена с помощью формулы (8), пуассоновский шум $\sigma_p = 1/N^{1/2}$. В последних четырех столбцах приводятся результаты численного интегрирования выражения (6) для параметров корреляционной функции $(\gamma; r_0) = (1.8; 5); (1; 5); (1; 10); (1; 20)$.

Предсказания Λ CDM-модели для величины космической дисперсии в обзоре COSMOS приводятся в работе [8], величина флуктуаций темной материи дается формулой

$$\sigma_{dm}(z, \Delta z = 0.2) = \frac{\sigma_a}{z^\beta + \sigma_b}, \quad (9)$$

где a , b и β — это параметры, связанные с угловыми размерами каталога COSMOS, соответствующие им стандарты равны $\sigma_a = 0.069$, $\sigma_b = 0.234$, $\sigma_\beta = 0.834$ [8]. Для других бинов существует формула перехода

$$\sigma_{dm}(z, \Delta z) = \sigma_{dm}(z, \Delta z = 0.2) \sqrt{\frac{0.2}{\Delta z}}. \quad (10)$$

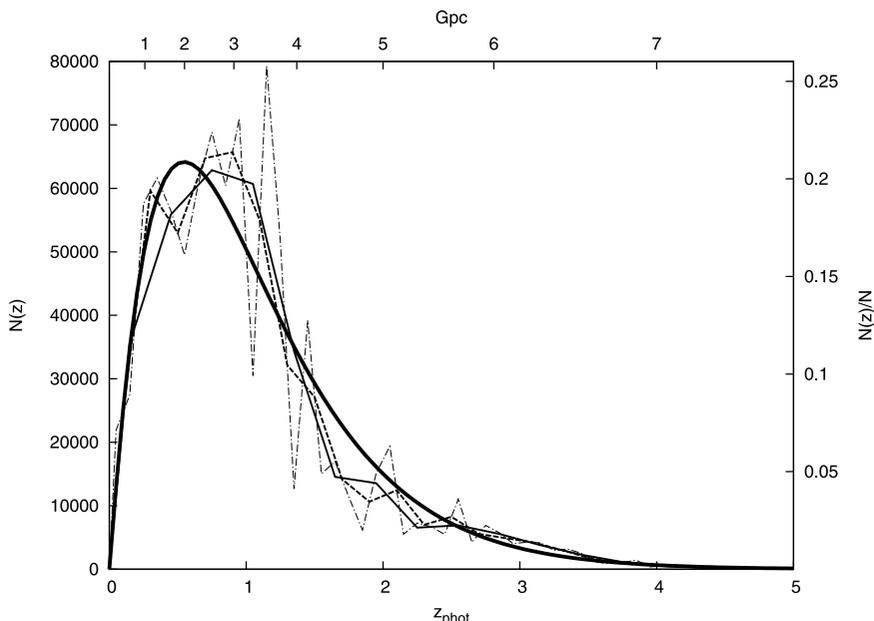


Рис. 1. Распределение числа объектов $N(z, \Delta z)$ в обзоре COSMOS по красному смещению z_{phot} (и метрическому расстоянию в Гпк) для бинов $\Delta z = 0.3$ (сплошная), $\Delta z = 0.2$ (штриховая), $\Delta z = 0.1$ (штрихпунктирная) и аппроксимирующей кривой (жирная сплошная). Левая ось соответствует распределению с бинном $\Delta z = 0.3$. Правая ось представляет собой нормированное распределение.

Следует отметить, что наблюдаемой величиной являются флуктуации чисел галактик (светящееся барионное вещество), а непосредственно моделируемыми в рамках Λ CDM величинами являются флуктуации небарионной темной материи. Для описания наблюдаемого распределения галактик (видимое барионное вещество) обычно принимается дополнительная гипотеза о связи корреляционной функции небарионного вещества ξ_{dm} с корреляционной функцией галактик ξ_{gal} в виде соотношения

$$\xi_{gal}(r, z, \pi) = b^2(z, \pi)\xi_{dm}(r, z), \quad (11)$$

где $b^2(z, \pi)$ называется параметром смещения (байес), который в общем случае может зависеть от набора переменных $\pi = (L, m_*, T, \dots)$. В работе [8] таким параметром предлагается взять звездную массу галактик. Поскольку эффект Малмквиста приводит к тому, что на более далеких расстояниях функция светимости обрезается снизу, может появиться систематическое увеличение байеса с красным смещением. Например, в обзоре COSMOS на $z \sim 1$ характерная масса галактик составляет $\lg m_*/M_\odot \sim 10.25$ и $\sigma_{gal} \approx 0.095$ при $\sigma_{dm} \approx 0.060$, т.е. байес составляет $b = 1.60$ (табл. 2 в [8]). При этом наблюдаемая амплитуда флуктуаций составляет $\delta_{obs} = 0.20$, т.е. требуемое значение байеса $b = 3.33$ более чем в два раза превышает значение, полученное в [8] для данной звездной массы галактик.

Как показывают расчеты по формуле (6), амплитуду относительных флуктуаций в 20% в обзоре COSMOS можно объяснить, если параметры пространственной корреляционной функции составляют $(\gamma; r_0) = (1; 5 \div 10)$. Отметим, что именно такие параметры степенного закона корреляционной функции найдены в современных широкоугольных обзорах красных смещений галактик 2dF и SDSS [18].

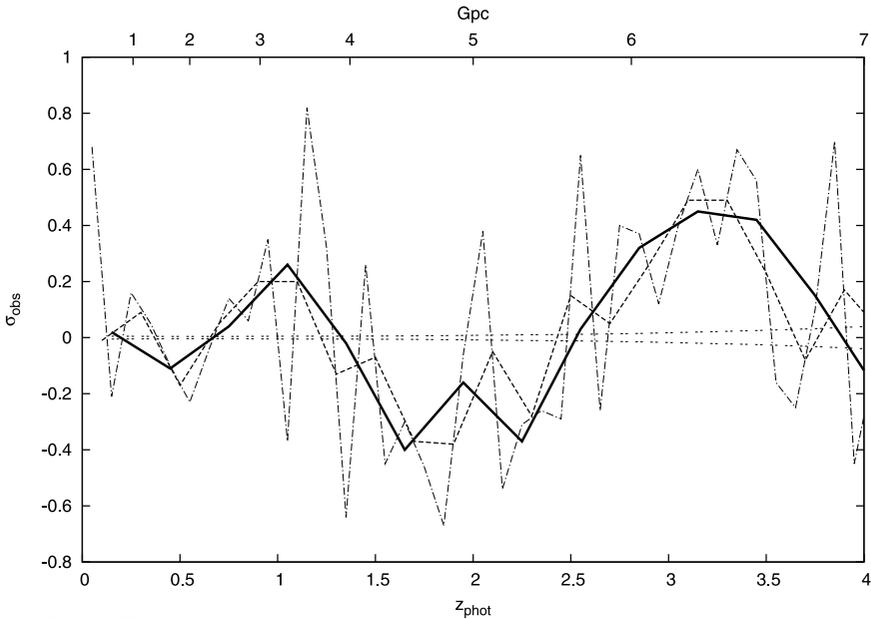


Рис. 2. Наблюдаемое распределение отклонений от однородного распределения для радиального распределения по красному смещению галактик для бинов $\Delta z = 0.3$ (сплошная), $\Delta z = 0.2$ (штриховая), $\Delta z = 0.1$ (штрихпунктирная) и шум Пуассона σ_p для $\Delta z = 0.3$ (двойной пунктир).

Линейные размеры неоднородностей в радиальном распределении галактик оцениваются как размеры между пересечениями нуля для флуктуаций одного знака (рис. 2). В отличие от предсказания LCDM-модели, где соседние бины с размерами $\Delta z > 0.1$ являются независимыми ($\xi_{dm} = 0$ на масштабе 174 Мпк), наблюдаемые в обзоре COSMOS отклонения от однородного радиального распределения сохраняют знак на протяжении нескольких бинов, что соответствует масштабам порядка тысячи Мпк (таблица 1).

5. Заключение. Уникальность глубокого обзора COSMOS состоит в том, что он содержит около полумиллиона однородно отобранных галактик с измеренными потоками в 30 фильтрах, что позволяет измерить фотометрические красные смещения с точностью $\delta z < 0.1$. Этого достаточно для изучения неоднородностей распределения галактик в масштабах $\Delta z > 0.1$ т.е. $\Delta R > 300$ Мпк/h. Вследствие большого числа галактик в каждом бине по красному смещению можно пренебречь пуассоновским шумом и получить оценку космической дисперсии (cosmic variance) непосредственно из наблюдаемого радиального распределения галактик.

В настоящей работе продолжено исследование глубокого обзора COSMOS, начатое в работах [6, 7]. Мы использовали более жесткие критерии отбора красных смещений галактик, что уменьшило выборку на 26%. При этом обнаруженные структуры сохранили свои размеры и амплитуды, что подтверждает устойчивость результата к изменению объема выборки. Существенно новым результатом является получение теоретической величины дисперсии коррелированных структур для несферических выборок, а также, с учетом изменения формы корреляционной функции галактик. Впервые проведено сравнение наблюдаемой величины флуктуаций концентрации га-

Таблица 1. Наблюдаемые и расчетные параметры радиального распределения галактик глубокого обзора COSMOS

Δz	z_0	z_f	σ_p	size	contrast	1.8; 5	1; 5	1; 10	1; 20
0.3	0.21	0.65	0.0034	1461	-0.11	0.07	0.15	0.22	0.31
	0.69	1.31	0.0031	1476	0.26	0.05	0.12	0.16	0.23
	1.34	2.52	0.0037	1745	-0.40	0.03	0.09	0.12	0.17
	2.54	3.89	0.0089	1185	0.45	0.03	0.08	0.12	0.16
0.2	0.12	0.36	0.0052	886	0.09	0.12	0.21	0.30	0.42
	0.37	0.64	0.0042	857	-0.17	0.09	0.18	0.25	0.35
	0.66	1.21	0.0032	1358	0.20	0.05	0.12	0.17	0.25
	1.22	2.42	0.0034	1873	-0.38	0.03	0.09	0.12	0.17
	2.43	3.64	0.0083	1130	0.49	0.03	0.08	0.12	0.17
	3.65	3.76	0.0507	81	-0.08	0.11	0.18	0.25	0.35
	3.77	4.10	0.0352	227	0.17	0.07	0.13	0.19	0.26
	4.11	4.69	0.0387	349	-0.25	0.05	0.11	0.15	0.22
0.1	0.13	0.20	0.0107	269	-0.21	0.27	0.35	0.50	0.70
	0.21	0.39	0.0056	643	0.16	0.13	0.22	0.32	0.45
	0.40	0.67	0.0042	842	-0.23	0.08	0.17	0.25	0.35
	0.68	1.00	0.0041	833	0.35	0.07	0.15	0.22	0.31
	1.00	1.08	0.0088	185	-0.37	0.15	0.25	0.35	0.50
	1.08	1.28	0.0060	427	0.82	0.09	0.18	0.25	0.36
	1.29	1.42	0.0081	252	-0.64	0.11	0.20	0.29	0.41
	1.42	1.48	0.0127	111	0.26	0.16	0.25	0.36	0.51
	1.49	1.96	0.0054	755	-0.67	0.05	0.12	0.18	0.25
	1.96	2.09	0.0126	180	0.38	0.11	0.19	0.27	0.38
	2.09	2.48	0.0087	483	-0.54	0.06	0.13	0.19	0.26
	2.48	2.62	0.0179	155	0.65	0.10	0.18	0.25	0.36
	2.62	2.69	0.0274	74	-0.26	0.14	0.21	0.30	0.42
	2.69	3.52	0.0110	751	0.67	0.04	0.10	0.14	0.20
	3.53	3.72	0.0361	144	-0.25	0.09	0.15	0.22	0.31
	3.72	3.91	0.0422	135	0.70	0.09	0.15	0.22	0.31
3.91	4.10	0.0494	128	-0.45	0.08	0.15	0.21	0.30	
4.10	4.18	0.0854	52	0.14	0.12	0.18	0.26	0.36	
4.18	4.69	0.0427	304	-0.31	0.05	0.11	0.16	0.23	

Примечание. Численные значения амплитуд отклонений приведены для бинов $\Delta z = 0.3$, $\Delta z = 0.2$, $\Delta z = 0.1$. Столбцы содержат: границы области неоднородности z_0 и z_f , пуассоновскую сигму σ_p , размер области неоднородности в Мпк, амплитуду относительного отклонения (contrast), в последних четырех столбцах приводятся расчетные значения σ_{corr} , полученные в результате численного интегрирования выражения (6) для четырех комбинаций параметров степенной корреляционной функции $(\gamma; r_0) = (1.8; 5); (1; 5); (1; 10); (1; 20)$.

лактик на сверхбольших масштабах с предсказаниями LCDM-моделей для обзора COSMOS.

Анализ выборки галактик каталога COSMOS, содержащей 304 897 наиболее точно измеренных фотометрических красных смещений, приводит к следующим выводам.

- Амплитуда наблюдаемых флуктуаций чисел галактик в больших бинах по красному смещению ($\Delta z = 0.1; 0.2; 0.3$) в интервале красных смещений $0.1 < z < 4$ превосходит в несколько раз значения, предсказываемые LCDM-моделью для небарионной темной материи. В частности, на красном смещении $z \sim 1.7$ амплитуда наблюдаемых флуктуаций имеет величину $\sim 37\%$, тогда как для темной материи предсказывается на порядок меньшее значение $\sim 3.9\%$.
- Для согласования наблюдаемой амплитуды флуктуаций чисел галактик с амплитудой флуктуаций модельного распределения небарионной материи в рам-

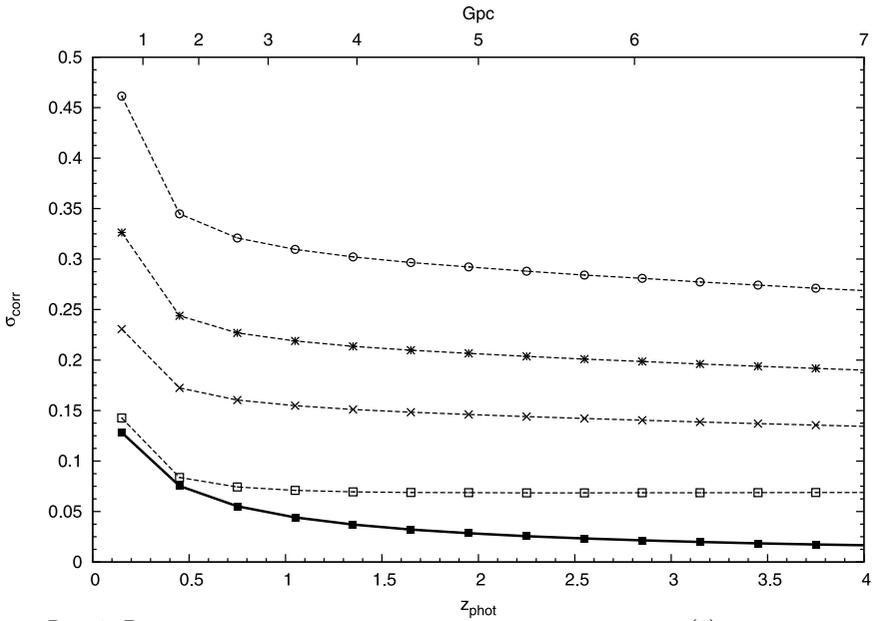


Рис. 3. Результаты численного интегрирования выражения (6) для значений $(\gamma; r_0)$ (снизу вверх пунктиром): квадраты — (1.8; 5), кресты — (1; 5), звезды — (1; 10), круги — (1; 20) и сплошной линией — предсказание LCDM σ_{dm} для бинов $\Delta z = 0.3$.

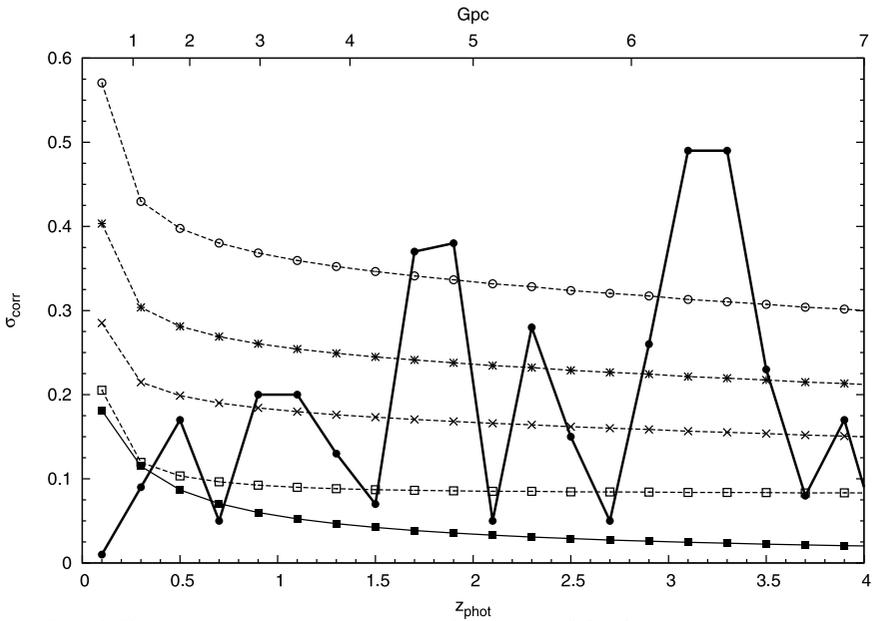


Рис. 4. Рассчитанные σ_{corr} и σ_{dm} для бина $\Delta z = 0.2$, обозначения соответствуют тем же параметрам, что и на рис. 3. Сплошная ломаная линия — наблюдаемые флуктуации. Значения точек графиков представлены в таблице 2.

Таблица 2. Сравнение расчетных значений σ_{corr} и σ_{dm} с наблюдаемыми амплитудами δ_{obs}

z	1.8; 5	1; 5	1; 10	1; 20	σ_{dm}	δ_{obs}
0.1	0.205	0.285	0.403	0.570	0.181	-0.01
0.3	0.120	0.215	0.304	0.430	0.115	+0.09
0.5	0.104	0.199	0.281	0.398	0.087	-0.17
0.7	0.096	0.190	0.269	0.380	0.071	+0.05
0.9	0.092	0.184	0.260	0.368	0.060	+0.20
1.1	0.090	0.180	0.254	0.360	0.052	+0.20
1.3	0.088	0.176	0.249	0.352	0.047	-0.13
1.5	0.087	0.173	0.245	0.346	0.042	-0.07
1.7	0.086	0.171	0.241	0.341	0.039	-0.37
1.9	0.086	0.168	0.238	0.336	0.036	-0.38
2.1	0.085	0.166	0.235	0.332	0.033	-0.05
2.3	0.085	0.164	0.232	0.328	0.031	-0.28
2.5	0.085	0.162	0.229	0.324	0.029	+0.15
2.7	0.084	0.160	0.227	0.320	0.027	+0.05
2.9	0.084	0.159	0.224	0.317	0.026	+0.26
3.1	0.084	0.157	0.221	0.313	0.025	+0.49
3.3	0.084	0.155	0.220	0.310	0.023	+0.49
3.5	0.084	0.154	0.217	0.307	0.022	+0.23
3.7	0.083	0.152	0.215	0.304	0.021	-0.08
3.9	0.083	0.151	0.213	0.302	0.021	+0.17

Примечание. Столбцы со 2 по 5 соответствуют σ_{corr} для четырех комбинаций параметров $(\gamma; r_0) = (1.8; 5); (1; 5); (1; 10); (1; 20)$. Размер бина по красному смещению $\Delta z = 0.2$.

как стандартной Λ CDM-модели необходимо принять значение параметра байеса $b \sim 10$. Принимая гипотезу о зависимости байеса от звездной массы галактик, расхождение может быть уменьшено в 2–3 раза.

- Независимо от параметра байеса линейные размеры наблюдаемых неоднородностей в радиальном распределении галактик на порядок больше предсказываемых Λ CDM-моделью максимальных размеров неоднородностей небарионной темной материи. В частности, наблюдаются размеры структур ~ 1500 Мпк, а корреляционная функция, предсказываемая стандартной Λ CDM-моделью, должна обращаться в ноль на 174 Мпк.

Отметим, что для получения достоверной физической информации о свойствах крупномасштабной структуры Вселенной необходимо в первую очередь развивать методы оценки флуктуаций плотности видимого вещества, что и делается в нашей работе. В последнее десятилетие наблюдения крупномасштабной структуры Вселенной приводят к открытию неоднородностей все больших размеров, образованных галактиками и их скоплениями [1]. Начиная с групп и скоплений галактик, имеющих размеры порядка 1 Мпк, современные исследования переместились на структуры с размерами 100–200 Мпк (SDSS сверхскопления, в частности, Слоановская Великая Стена размером 420 Мпк [19]).

Поскольку наше исследование неоднородностей пространственного распределения галактик на сверхбольших масштабах является новым направлением наблюдательной космологии, сравнение наших результатов с результатами других групп будет проведено в ближайшем будущем, когда появятся данные новых глубоких обзоров (таких как ALHAMBRA, BOSS, GAMA, VVDS, VIPERS совместно с обзорами в других диапазонах длин волн). Однако уже сейчас, существуют некоторые свидетельства наличия сверхбольших неоднородностей на больших красных смещениях.

В частности, в работе [20] из анализа спектрального обзора 10k zCOSMOS сделан вывод о существовании «a very large structure in the zCOSMOS, centered at $z \sim 0.9$ and extending in radial direction over $\Delta z \sim 0.2$ ». Эта же область выделена в нашей работе с большим уровнем значимости (см. рис. 2 и табл. 1).

В обзоре ALHAMBRA [11] одно из полей (AL-4) находится внутри области обзора COSMOS, и для него обнаружены флуктуации, совпадающие как по амплитуде, так и по размеру с полученными нами в интервале красных смещений 0.2–1.2. Наблюдения поля COSMOS в субмиллиметровом диапазоне [12] обнаружили избыток числа галактик в интервале красных смещений $2.5 < z < 3.5$, что совпадает с соответствующей неоднородностью в исследуемой нами области. Таким образом, наши результаты согласуются с размерами и амплитудами отдельных неоднородностей, найденных другими исследователями для рассматриваемого поля COSMOS в спектральном обзоре 10k-zCOSMOS ([20], [21]), фотометрическом обзоре ALHAMBRA ([11]), а также в субмиллиметровом диапазоне [12] и в рентгеновском диапазоне [22].

Обнаружение флуктуаций чисел галактик, проявляющихся одинаковым образом в независимых наблюдениях, использующих независимые методики обработки данных, значительно уменьшает возможность неизвестных систематических ошибок. Это позволяет предполагать с большой степенью определенности, что наблюдаемые в обзоре COSMOS флуктуации действительно относятся к космической дисперсии и, таким образом, являются свидетельством наличия положительных корреляций в пространственном распределении галактик с масштабами в тысячи Мпк.

Наблюдаемые в обзоре COSMOS большие амплитуды и линейные размеры флуктуаций чисел галактик (рис. 2 и табл. 2) указывают на необходимость пересмотра амплитуд и размеров первичных флуктуаций плотности и/или существенно большей скорости роста возмущений, чем в стандартной Λ CDM модели. Последнее означает, что кроме известных трудностей Λ CDM-модели на малых масштабах (галактики и гало с размерами 10–100 кпс [23, 24]) существуют также проблемы Λ CDM-модели на сверхбольших масштабах, связанные с наличием крупномасштабных неоднородностей пространственного распределения галактик с размерами порядка 1500 Мпк и амплитудой более 20%.

Авторы статьи благодарны СПбГУ за частичную финансовую поддержку (гранты № 6.38.18.2014 и 6.38.669.2013).

Литература

1. *Baryshev Yu. V., Teerikorpi P.* Fundamental questions of practical cosmology. New York: Springer, 2012.
2. *Решетников В. П.* Обзоры неба и глубокие поля наземных и космических телескопов // УФН. 2005. Т. 175, № 11. С. 1163–1183.
3. *Публс Ф. Дж. Э.* Структура Вселенной в больших масштабах. М.: Мир, 1983.
4. *Gabrielli A., Sylos Labini F., Joice M., Pietronero L.* Statistical physics for cosmic structures. Berlin: Springer, 2005.
5. *Somerville R. et al.* Cosmic Variance in the Great Observatories Origins Deep Survey // Astrophys. J. 2004. Vol. 600. Iss. 2. P. L171–L174.
6. *Набоков Н. В., Барышев Ю. В.* Метод анализа пространственного распределения галактик на масштабах в гигапарсеки. I. Исходные принципы // Астрофизика. 2010. Т. 53, № 1. С. 105–116.
7. *Набоков Н. В., Барышев Ю. В.* Метод анализа пространственного распределения галактик на масштабах в гигапарсеки. II. Применение к сетке обзоров HUDF-FDF-COSMOS-HDF // Астрофизика. 2010. Т. 53, № 1. С. 117–130.
8. *Moster B. et al.* Cosmic Variance Cookbook // Astrophys. J. 2011. Vol. 731. Iss. 2. article id. 113. 8 P.
9. <http://cosmos.astro.caltech.edu/>

10. *Massey R., Rhodes J., Ellis R., et al.* Dark Matter Maps Reveal Cosmic Scaffolding // *Nature*. 2007. Vol. 445. Iss. 7125. P. 286–290.
11. *Molino A. et al.* The ALHAMBRA Survey: Bayesian Photometric Redshifts with 23 bands for 3 squared degrees // ARXIV.ORG. 2013. URL: <http://arxiv.org/abs/1306.4968>.
12. *Koprowski M. et al.* A reassessment of the redshift distribution and physical properties of luminous (sub-)millimetre galaxies // ARXIV.ORG. 2013. URL: <http://arxiv.org/abs/1312.1173>.
13. *Ilbert O., Capak P., et al.* COSMOS photometric redshifts with 30-bands for 2-deg² // *Astrophys. J.* 2009. Vol. 690. Iss. 2. P. 1236–1249.
14. *Massey R., Rhodes J., Leauthaud A. et al.* COSMOS: Three-dimensional Weak Lensing and the Growth of Structure // *Astrophys. J.* 2007. Vol. 172. Iss. 1. P. 239–253.
15. *Percival W. J., Robert N. C., Eisenstein D. J. et al.* The shape of the Sloan Digital Sky Survey Data Release 5 Galaxy Power Spectrum // *Astrophys. J.* 2006. Vol. 657. Iss. 2. P. 645–663.
16. *Ловязгин Н. Ю.* Статистические свойства пространственного распределения галактик // *Астрофизический Бюллетень САО РАН*. 2009. Т. 64, № 3. С. 223–235.
17. *Sylos Labini F., Vasilyev N. L.* Extension and estimation of correlations in cold dark matter models // *Astron. Astrophys.* 2008. Vol. 477. Iss. 2. January II. P. 381–395.
18. *Sylos Labini F.* Inhomogeneities in the universe // *Classical and Quantum Gravity*. 2011. Vol. 28. Iss. 16. id. 164003.
19. *Gott III J. R., Juric M., Schlegel D.* A map of the Universe // *Astrophys. J.* 2005. Vol. 624. Iss. 2. P. 463–484.
20. *Kovac K. et al.* The density field of the 10k zCOSMOS Galaxies // *Astrophys. J.* 2010. Vol. 708. Iss. 1. P. 505–533.
21. *Meneux B. et al.* The zCosmos Survey. The dependence of clustering on luminosity and stellar mass at $z = 0.2 - 1$ // *Astron. Astrophys.* 2009. Vol. 505. Iss. 2. P. 463–482.
22. *Maimieri V. et al.* Black hole accretion and host galaxies of obscured quasars in XMM-COSMOS // *Astron. Astrophys.* 2011. Vol. 535. id. A80. 27 P.
23. *Tasitsiomi A.* The State of the Cold Dark Matter Models on Galactic and Subgalactic Scales // *International Journal of Modern Physics D*. 2003. Vol. 12. Iss. 07. P. 1157–1196.
24. *Кroupа П. et al.* The Failures of the Standard Model of Cosmology Require a New Paradigm // *International Journal of Modern Physics D*. 2012. Vol. 21. Iss. 14. id. 1230003.

Статья поступила в редакцию 26 июня 2014 г.

Сведения об авторах

Широков Станислав Игоревич — студент; lakronous@mail.ru

Теханович Даниил Игоревич — аспирант; foobat@yandex.ru

Барышев Юрий Викторович — доктор физико-математических наук; yubaryshev@mail.ru

FLUCTUATIONS OF THE SPATIAL GALAXY DISTRIBUTION IN THE COSMOS DEEP SURVEY AT GIGAPARSEC SCALES

Stanislav I. Shirokov, Daniil I. Tekhanovich, Yuriy V. Baryshev

St.Petersburg State University, Universitetskaya nab., 7-9,
St.Petersburg, 199034, Russian Federation; lakronous@mail.ru, foobat@yandex.ru, yubaryshev@mail.ru

We analyse the radial galaxy distribution of the deep survey COSMOS. The value of “cosmic variance” is estimated by using large redshift bins ($\Delta z = 0.1 \div 0.3$) that contain a sufficiently large number of galaxies for the Poisson noise ($\sim 1/N^{1/2}$) to be small ($\sigma_P \sim 0.01$). The accuracy of photometric redshifts ($\delta z \sim 0.012(1+z)$) allows the study of spatial inhomogeneities with sizes larger than the bin size $\Delta z \geq 0.1$, i.e., $\Delta R \geq 300$ Mpc/h. The LCDM model predicts for the COSMOS survey the value of cosmic variance of dark matter $\sigma(z)_{dm} = 0.039$ for $z = 1.7$ and $\Delta z = 0.2$ (Moster et al., *Astrophys. J.*, 731, 113 (2011)). Our analysis of the COSMOS survey shows that at $z = 1.7$, with redshift bins $\Delta z = 0.2$, the amplitude of the galaxy number fluctuations is $\sigma(z)_{obs} = 0.37$, i.e., an order of magnitude larger than LCDM prediction for non-baryonic dark matter. In order to reconcile the observed amplitude with the LCDM model, the bias factor should be $b \approx 10$. Observed radial sizes of detected inhomogeneities extend to 1500 Mpc, while the predicted LCDM correlation function $\xi_{dm} = 0$ on a scale of $r = 174$ Mpc, independent of bias. Our results are consistent with recent observations of the COSMOS field by ALHAMBRA, as well as X-ray and sub-millimetre surveys (SPT, ALMA). Refs 24. Figs 4. Tables 2.

Keywords: cosmology, large scale structure of the Universe, deep galaxy surveys, COSMOS, ALHAMBRA, SPT, ALMA.