

МЕТОД АНАЛИЗА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЛАКТИК НА МАСШТАБАХ В ГИГАПАРСЕКИ. I. ИСХОДНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Н.В.НАБОКОВ, Ю.В.БАРЫШЕВ

Поступила 30 июня 2009

Принята к печати 25 ноября 2009

Представлены исходные принципы метода анализа пространственного распределения видимого вещества во Вселенной с размерами структур, достигающими тысяч Мпк. Метод основан на анализе распределений фотометрических красных смещений галактик $N(z)$ в глубоких полях, используя большие бины $\Delta z = 0.1 + 0.3$. Флуктуации чисел галактик в рассматриваемых бинах по красным смещениям обусловлены пуассоновским шумом, коррелированными структурами и систематическими ошибками оценки фото- z . Данный метод включает покрытие покрытые достаточно большой области небесной сферы сеткой глубоких многополосных обзоров с ячейкой порядка $10^\circ \times 10^\circ$, в узлах которой находятся глубокие поля размером $\sim 10' \times 10'$, наблюдаемые на телескопах класса 3-10 м. Распределение фотометрических красных смещений галактик внутри каждого глубокого поля будет давать информацию о протяженности сверхбольших структур в радиальном направлении, а сопоставление радиальных распределений в соседних полях даст информацию о протяженности структур в тангенциальном направлении. Необходимым элементом метода является анализ возможных искажений радиальных распределений галактик, связанных с методикой оценки фотометрических красных смещений.

Ключевые слова: *космология:глубокие поля:далекие галактики:
крупномасштабная структура Вселенной*

1. *Введение.* Для построения реалистичной модели эволюции крупномасштабной структуры Вселенной необходимо развивать методы наблюдательной оценки размеров и контраста неоднородностей в распределении галактик в широком интервале красных смещений. В наблюдениях крупномасштабной структуры Вселенной за последние два десятилетия заметна тенденция к открытию все больших размеров структур, образуемых галактиками и скоплениями галактик [1-3].

Уже в первом широкоугольном обзоре красных смещений галактик 1980-х годов (CfA) были обнаружены структуры с характерным масштабом 30 Мпк/ h , который долгое время считался масштабом неоднородности Вселенной [4,2]. Однако в глубоких "карандашных" спектральных обзорах [5,6] были открыты структуры с характерным размером 130 Мпк/ h . Существование структур с характерными размерами в сотни Мпк подтверждено также недавними широкоугольными спектральными обзорами галактик 2dF и SDSS [3,7,8]. В этих обзорах с глубиной $z < 0.6$, неожиданно для

теоретических моделей, обнаружены неоднородности с размером порядка 500 Мпк/н (например, Sloan Great Wall [9]). Последнее указывает на необходимость получения прямых наблюдательных ограничений на возможное наличие сверхбольших структур в пространственном распределении галактик также и на больших красных смещениях, доступных на основе наблюдений глубоких полей.

Современные многополосные глубокие обзоры галактик (см. обзор [10]), такие как COMBO-17 [11], COSMOS [12], FDF [13], HUDF [14], ALHAMBRA [15], открывают возможность прямой наблюдательной оценки размеров и контраста сверхбольших неоднородностей в распределении видимой материи во Вселенной на красных смещениях 0.5-5. Эти обзоры содержат $10^3 - 10^5$ галактик с измеренными звездными величинами в нескольких фильтрах, что позволяет исследовать радиальные распределения галактик на основе фотометрических красных смещений. Точность измерений z_{phot} зависит от используемой методики и обычно составляет $0.03(1+z)$, что позволяет изучать масштабы большие чем ~ 200 Мпк/н в интервале красных смещений, соответствующих глубине обзора.

Используя большие бины красных смещений ($\Delta z = 0.1 - 0.3$), в которых содержится большое число галактик ($\Delta N > 100$), пуассоновский шум ($\sim 1/\sqrt{\Delta N}$) оказывается малым ($\sigma_p < 0.1$), так что для обнаружения доступны флуктуации, соответствующие сверхбольшим неоднородностям в распределении галактик, с контрастом большим пуассоновского.

В настоящей работе мы предлагаем метод оценки размеров и контраста сверхбольших неоднородностей в наблюдаемом пространственном распределении галактик на масштабах в тысячи Мпк. В основе этого метода лежит анализ глубоких полей, находящихся в узлах сетки, покрывающей достаточно большую область небесной сферы, что позволяет получать информацию как о радиальных, так и тангенциальных размерах неоднородностей. В отличие от предложенных ранее наблюдений нескольких глубоких полей [6,15], где отдельные поля используются только для анализа радиальных распределений, мы предлагаем использовать сетку глубоких полей для поиска и измерения сверхбольших структур, как в радиальных, так и в тангенциальных направлениях. Таким образом, предлагается метод осуществления объемной космической томографии пространственного распределения видимой материи на масштабах в Гигапарсеки. Последнее необходимо для получения наблюдательных ограничений на модели эволюции крупномасштабной структуры и на характер первичных возмущений плотности во Вселенной.

В разделе 2 приводится описание метода и его основных составляющих. В разделе 3 обсуждаются фотометрические красные смещения и возможные систематические эффекты, приводящие к искажению радиальных

распределений фото- z . В разделе 4 даются основные выводы.

2. *Описание метода объемной космической томографии.*

Для задачи обнаружения и измерения параметров сверхбольших структур в видимом распределении вещества во Вселенной предлагается метод покрытия небесной сферы сеткой глубоких обзоров галактик. Оптимальным угловым размером сетки глубоких многополосных обзоров будет ячейка $\sim 10^\circ \times 10^\circ$, в узлах которой находятся глубокие поля размером $\sim 10' \times 10'$. В этом случае распределение галактик внутри каждого поля будет давать информацию о протяженности сверхбольших структур в радиальном направлении (используя бины $\Delta z = 0.1 + 0.3$), а сопоставление радиальных распределений в соседних полях даст информацию о протяженности структур в тангенциальном направлении с шагом ~ 500 Мпк (10 град. на $z \sim 1$).

Предлагаемый метод обнаружения возможных сверхбольших структур состоит из следующих этапов:

- построение для каждого поля наблюдаемого распределения по фотометрическим красным смещениям $\Delta N_{obs}(z, \Delta z)$ для выбранных бинов Δz ;
- построение теоретически ожидаемого распределения красных смещений $\Delta N_{mod}(z, \Delta z)$ для однородного пространственного распределения галактик в искусственной выборке, ограниченной фиксированной предельной видимой звездной величиной или для полной по объему выборки;
- построение относительных величин отклонений между наблюдаемым и ожидаемым распределениями в фиксированных бинах красных смещений;
- определение областей, где наблюдаемые флуктуации превышают пуассоновский уровень σ_p в соответствующих бинах красных смещений и следовательно могут относиться к коррелированным структурам;
- сопоставление отклонений в радиальных распределениях красных смещений для соседних направлений (α, δ) на небе.

2.1. *Масштабы, доступные наблюдениям для сетки глубоких полей.* Метрическое расстояние в рамках стандартной LCDM модели дается соотношением

$$r(z) = \frac{c}{H_0} \int_0^1 \frac{dy}{y \sqrt{(\Omega_m^0/y + \Omega_v^0 y^2)}}, \quad (1)$$

где c - скорость света, $H_0 = 72$ км/с/Мпк, что соответствует нормированному значению постоянной Хаббла $h = h_{100} = H_0/100 = 0.72$, параметры плотности вещества и вакуума составляют $\Omega_m^0 = 0.3$ и $\Omega_v^0 = 0.7$, а возраст объекта (галактики) $t(z)$ дается формулой

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

где

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

Линейный размер области на небе в момент t_0 , которая участвует в расширении пространства и соответствует наблюдаемому в момент t_0 угловому размеру $\Delta\theta$, дается выражением

$$r_l(z) = \Delta\theta \times r(z) \quad (4)$$

где $r(z)$ дается формулой (1).

Угловые размеры глубоких полей обычно составляют от нескольких минут до одного градуса, так что поперечные размеры структур, доступные наблюдениям внутри одного поля, в линейном масштабе не превышают нескольких десятков Мпк. Однако для сетки глубоких обзоров минимальные размеры структур в тангенциальном направлении соответствуют угловому размеру ячейки и могут меняться в интервале от сотен до тысяч Мпк (табл.1).

Таблица 1

ЛИНЕЙНЫЕ РАЗМЕРЫ Δr (Мпк) В ТАНГЕНЦИАЛЬНОМ НАПРАВЛЕНИИ, СООТВЕТСТВУЮЩИЕ УГЛОВЫМ РАЗМЕРАМ $\Delta\theta$ (УГЛОВОЙ РАЗМЕР ГЛУБОКОГО ПОЛЯ ИЛИ ЯЧЕЙКИ СЕТКИ ПОЛЕЙ) ЦЕНТРИРОВАННЫМ НА $z=1$ В РАМКАХ СТАНДАРТНОЙ КОСМОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ($h=0.72$, $\Omega_v=0.7$, $\Omega_m=0.3$)

$\Delta\theta$	3'	10'	1°	10°	30°	60°
Δr (Мпк)	2.8	9.3	55.7	557	1670	3341

Линейные масштабы, которые могут быть изучены в радиальном направлении, определяются размером бина по фотометрическому красному смещению (табл.2) и ограничиваются глубиной обзора. Линейный размер интервала $\Delta z = 1$ центрированного на $z=1$ составляет 2392 Мпк.

Таблица 2

ЛИНЕЙНЫЕ РАЗМЕРЫ Δr (Мпк) В РАДИАЛЬНОМ НАПРАВЛЕНИИ, СООТВЕТСТВУЮЩИЕ ИНТЕРВАЛАМ Δz (БИНАМ В РАДИАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯХ), ЦЕНТРИРОВАННЫМ НА $z=1$ В РАМКАХ СТАНДАРТНОЙ КОСМОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ($h=0.72$, $\Omega_v=0.7$, $\Omega_m=0.3$)

Δz	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.0
Δr (Мпк)	235	470	706	943	1180	2392

В радиальном направлении, благодаря большой глубине обзоров, оказывается возможным измерять неоднородности структур с масштабами в Гигапарсеки. Значение ошибки фото- z порядка $\sigma_z = 0.1$ на $z \sim 2$ позволяет

изучать структуры с радиальными размерами большими 300 Мпк/н в интервале красных смещений $0.5 + 5$, где можно оценивать флуктуации чисел галактик в бинах $\Delta z = 0.1 + 0.3$.

2.2. Ожидаемое распределение по красным смещениям. Для однородного распределения галактик в пространстве ожидается гладкое распределение по красным смещениям с возможными флуктуациями внутри пуассоновской относительной ошибки $\sim 1/\sqrt{\Delta N}$, соответствующей числу галактик в бине Δz . Глубокие обзоры являются ограниченными по звездной величине выборками, для которых распределение галактик по красным смещениям обычно аппроксимируется формулой (см., например, [17,18]):

$$N_{mod}(z, \Delta z) = Az^\alpha e^{-(z/z_0)^\beta} \Delta z, \quad (5)$$

где $N_{mod}(z, \Delta z)$ есть число галактик с красными смещениями в интервале $(z, z + \Delta z)$, свободные параметры α, β, z_0 находятся с помощью МНК, и A - параметр нормировки, который соответствует условию $\int N_{mod} = N_{total}$. Формула (5) была проверена также на модельных выборках далеких галактик, ограниченных предельной видимой звездной величиной, в которых использовалось однородное пространственное распределение галактик со светимостями, распределенными по закону Шехтера [19].

В случае достаточно большого числа галактик в исходной выборке возможно также построение полных по объему подвыборок в ограниченном интервале z . Для однородного пространственного распределения галактик наблюдаемое распределение по красным смещениям будет определяться моделью эволюции числа и светимости галактик.

Второй возможностью получения теоретического распределения типа (5) является численное моделирование распределения галактик в рамках LCDM модели. Например, в работах [20,21] получено пространственное распределение галактик на световом конусе, из которого можно извлечь радиальное распределение темных гало (считающихся галактиками) в интервале красных смещений 0-6. В таком подходе оказывается возможным получить как форму среднего распределения $N(z)$, так и ожидаемое отклонение от гладкого поведения за счет коррелированных структур.

2.3. Ожидаемые отклонения от однородности. Глубокие обзоры представляют из себя узкие конические вырезы из глобального пространственного распределения галактик. Для каждого бина красных смещений $(z, z + \Delta z)$ теоретически ожидаемая дисперсия относительных отклонений σ^2 является суммой дисперсий обусловленных коррелированными структурами σ_{corr}^2 и пуассоновским шумом σ_p^2 [22,23]:

$$\sigma^2(z, \Delta z) = \sigma_{corr}^2 + \sigma_p^2. \quad (6)$$

Пуассоновский шум имеет дисперсию

$$\sigma_p^2 = \frac{\langle N^2 \rangle - \langle N \rangle^2}{\langle N \rangle^2} = \frac{1}{\langle N \rangle}, \quad (7)$$

где среднее число галактик $\langle N \rangle$ внутри объема, соответствующего каждому бину $(z, z + \Delta z)$, может быть найдено с помощью (4), так, что $\langle N \rangle = N_{mod}(z, \Delta z)$. Благодаря достаточно большому числу наблюдаемых галактик в рассматриваемых бинах красных смещений $N_{mod}(z, \Delta z) \sim 100$, вклад пуассоновского шума в наблюдаемые флуктуации ограничен малым значением $\sigma_p \sim 0.1$.

Согласно соотношению (6), в случае обнаружения отклонений, превышающих уровень σ_p^2 от пуассоновского шума, можно говорить о флуктуациях чисел галактик внутри соответствующего бина, обусловленных сверхбольшими коррелированными структурами. В этом случае, ожидаемая величина дисперсии "cosmic variance" σ_{corr}^2 , вызываемая структурами, может быть найдена с помощью корреляционной функции $\xi(r)$ по формуле [22,23]:

$$\sigma_{corr}^2(V) = \frac{1}{V^2} \int_V dV_1 \int_V dV_2 \xi(|\bar{r}_1 - \bar{r}_2|), \quad (8)$$

где $V = V(z, \Delta z)$ - объем интегрирования, соответствующий рассматриваемому бину $(z, z + \Delta z)$.

Для приближенной оценки величины ожидаемой дисперсии σ_{corr}^2 в случае степенной корреляционной функции $\xi(r) = (r_0/r)^\gamma$ используется формула [22,24]

$$\sigma_{corr}^2(z, \Delta z) = \frac{J_2}{1+z} \left(\frac{r_0}{r_{eff}} \right)^\gamma, \quad (9)$$

где $J_2 = 72/(2^\gamma(3-\gamma)(4-\gamma)(6-\gamma))$, r_0 - параметр корреляционной функции, $1+z$ фактор, учитывающий рост неоднородностей. Для значения $\gamma = 1.8$ постоянная $J_2 = 1.865$. Эффективный радиус r_{eff} сферического объема, эквивалентного вытянутому в радиальном направлении объему бина $(z, z + \Delta z)$, вычисляется по формуле $r_{eff} = \left(\frac{3}{4\pi} r^2 \Delta r \Omega \right)^{1/3}$, где $r = r(z)$ и $\Delta r = \Delta r(\Delta z)$.

В качестве меры отклонения наблюдаемого распределения красных смещений $N_{obs}(z, \Delta z)$ от ожидаемого $N_{mod}(z, \Delta z)$ для данного бина $(z, z + \Delta z)$ использовалась формула:

$$\sigma_{obs}(z, \Delta z) = \frac{\Delta N_{obs}}{N_{mod}} = \frac{N_{obs}(z, \Delta z) - \langle N \rangle}{\langle N \rangle}, \quad (10)$$

где среднее ожидаемое число галактик $\langle N \rangle = N_{mod}(z, \Delta z)$ дается формулой (5). На основе соотношения (10) выделяются области с повышенной (ODR_i или SLC_i) и пониженной (UDR_i или SLV_i) плотностью чисел галактик относительно пуассоновского уровня σ_p , т.е. области с относительной флуктуацией плотности $\Delta N/N > +\sigma_p$ и $\Delta N/N < -\sigma_p$.

3. Оценка фотометрических красных смещений.

3.1. *Фото- z в современной космологии.* В современной наблюдательной космологии наступает эпоха фотометрических красных смещений, главное преимущество которых перед спектральными измерениями z состоит в том, что становится возможной оценка расстояний до большого числа очень слабых галактик. В частности, это также дает уникальную возможность изучать сверхбольшие структуры в пространственном распределении галактик.

В последние годы оценка расстояний до далеких галактик с помощью измерений фотометрических красных смещений стала общепринятым методом в наблюдательной космологии. Много работ посвящено анализу точности фото- z и их сравнению со спектральными данными [25-28].

В процессе завершения находится наблюдательная программа ALHAMBRA [15], целью которой является измерение фото- z с точностью $0.03(1+z)$, в 8 глубоких полях размером 40×40 угл. мин., наблюдаемых в 20 оптических и 3 ИК-фильтрах на 3.5-м телескопе Calar Alto, что дает возможность изучения эволюции, как распределения галактик, так и их свойств, в радиальных направлениях от наблюдателя. В работе [15] был введен термин "космическая томография", где предполагалось изучение свойств галактик и структур в радиальном направлении, а поля в разных направлениях нужны только для набора статистики радиальных свойств. В настоящей работе мы предлагаем использовать сетку глубоких полей для изучения сверхбольших структур, как в радиальном, так и в тангенциальном направлении, что позволяет обнаруживать объемные структуры.

Фотометрические красные смещения были использованы для вычисления спектра мощности пространственного распределения LRG-галактик (глубина $z < 0.6$) из обзора SDSS [29]. Это позволило обнаружить продолжение степенного роста флуктуаций до волнового числа $k = 0.005/(\text{Мпк}/h)$, соответствующего масштабу $\lambda = 2\pi/k = 1256 \text{ Мпк}/h$, что указывает на наличие сверхбольших структур с размером в Гигапарсеки.

На основе измерений фото- z также было восстановлено распределение темной материи в глубоком обзоре галактик COSMOS, которое, как оказалось, повторяет распределение видимой материи [12]. Согласно [17], в распределении галактик по фотометрическим красным смещениям обзора COSMOS найдены сильные флуктуации, которые для $z < 1.2$ соответствуют известным скоплениям галактик. В работе [30] показано, что и для больших красных смещений пикам в распределении галактик по фото- z в поле COSMOS соответствуют действительные скопления галактик на z равном 1.3 и 1.5.

3.2. Точность метода фотометрических красных смещений.

Анализ точности измерений фотометрических z проводился во многих

работах [25-27,31,32]. Точность оценки z_{phot} зависит от ряда факторов:

- количество фильтров и покрываемый интервал длин волн;
- точность фотометрии в каждом фильтре;
- количество и качество шаблонных непрерывных спектров;
- используемое программное обеспечение для оценки фото- z .

Количество фильтров, используемых в разных глубоких обзорах, изменяется в широких пределах - от 2 до 30, и перекрывает спектральный интервал от УФ до ИК. Увеличение числа фильтров улучшает точность оценки фото- z , однако при этом падает проникающая способность обзора, так как уменьшается ширина пропускания фильтров. Анализ оптимального числа фильтров проведен в [27].

Согласно [31, табл.2], при наблюдениях в стандартных 5 фильтрах (*UBVR*) точность оценки фото- z (σ_z), в случае точности фотометрии $\Delta m = 0.1$, составляет 0.09 ($z=0.0-0.4$), 0.21 ($z=0.4-1.0$), 0.35 ($z=1.0-2.0$), 0.33 ($z=2.0-3.0$), 0.23 ($z=3.0-5.0$). Тогда как для оптимального числа фильтров, которое находится в пределах 15-20, точность оценки улучшается до $\sigma_z = 0.014(1+z)$ [27]. Включение ИК-фильтров уменьшает также число грубых ошибок (отскоков) в определении фото- z . Обычно считается, что величина ошибки определения фото- z составляет $\sigma_z = 0.03(1+z)$, хотя есть проекты достижения точности равной 0.01 и даже значений 0.003 [32]. Точность спектральных измерений z обычно составляет около 0.0001, что гораздо выше, чем точность фото- z , однако такие измерения недоступны для большого числа слабых галактик.

Существуют различные комплексы программ, используемых для получения оценки z_{phot} , которые дают разную точность оценок [25]. Эти программы используют разное число шаблонов распределения энергии в непрерывном спектре галактик, а также разные математические критерии подгонки спектров галактик.

Ключевую роль при определении фотометрических красных смещений играют спектральные шаблоны распределения энергии (SED). Например, SED библиотеки CWW [33], используемые программой *Huregz*, которая дает устойчивые результаты даже при малом числе фильтров для далеких галактик [31].

Важной особенностью задачи поиска сверхбольших структур является то, что требования к точности оценки фото- z являются минимальными. Поскольку элементарные бины, в которых ведется подсчет галактик, имеют величину $\Delta z = 0.1+0.3$, то и допустимая точность измерения фото- z находится на уровне $\sigma_z = 0.1+0.3$.

3.3. Эффекты селекции и систематические ошибки. Важной особенностью метода фотометрических красных смещений является то, что он основан на непрерывном распределении энергии в спектрах галактик

и, следовательно, не зависит от видимости спектральных линий в различных интервалах красных смещений. Так, для метода фото- z не существует эффекта "пустыни" в районе $z \cong 2$, связанного с отсутствием видимых в оптическом диапазоне линий, что, например, привлекается для интерпретации уменьшения числа спектрально наблюдаемых гамма-всплесков в этом интервале красных смещений [34-36].

Однако в методе фотометрических красных смещений существуют свои специфические эффекты селекции, связанные с видимостью определенных деталей непрерывных спектров и вырожденностью принятия решений в фиксированной системе фильтров данного обзора. Например, видимость бальмеровского (3646 Å) и лаймановского (912 Å) скачков. Это может приводить к систематическим ошибкам и проявлять себя как неоднородности в радиальном распределении галактик на больших масштабах.

Ошибки в измерении звездных величин в разных фильтрах различны и зависят от индивидуальных особенностей наблюдаемых спектров галактик, а также от точности редукции наблюдений, выполненных с разным угловым разрешением (например, при объединении оптических и инфракрасных данных). Кроме того, используемые в методе фото- z шаблоны распределений энергии в спектрах галактик (SED) могут отличаться от реальных непрерывных спектров. Таким образом, с учетом систематических эффектов формула для наблюдаемой дисперсии флуктуаций будет иметь вид:

$$\sigma^2(z, \Delta z) = \sigma_{corr}^2 + \sigma_P^2 + \sigma_{systematic}^2, \quad (11)$$

где последнее слагаемое относится к систематическим эффектам метода оценки фото- z .

Количественное изучение эффектов селекции в методе фотометрических красных смещений - сложная задача, от решения которой зависит надежность обнаружения сверхбольших структур в глубоких обзорах галактик. Возможный путь изучения вклада эффектов селекции в наблюдаемые флуктуации чисел галактик $\Delta N_{obs}(z, \Delta z)$ состоит в моделировании процедуры измерения фотометрических красных смещений для искусственного каталога однородно распределенных галактик с учетом особенностей каждого глубокого обзора. В этом методе модельные отклонения $\Delta N_{mod}(z, \Delta z)$ могут быть вычтены из наблюдаемых отклонений в соответствующих бинах красных смещений и избыток флуктуаций будет связан с неоднородностью в радиальном распределении галактик.

Другим способом уменьшения влияния эффектов селекции может служить поиск коррелированных отклонений в радиальных распределениях галактик для сетки глубоких обзоров. Когда наблюдения одних и тех же полей выполнены на разных инструментах, и при этом используются разные методики оценки фото- z , то распределения фотометрических красных смещений внутри одинаковых глубоких полей должны совпадать для

реальных структур и отличаться для случая действия систематических искажающих факторов.

4. *Заключение.* В качестве примера оценки необходимых ресурсов для выполнения программы поиска сверхбольших структур предложенным методом, рассмотрим наблюдения на 6-м телескопе БТА САО РАН. За основу возьмем программу изучения слабых родительских галактик отождествленных гамма-всплесов и галактик в глубоких полях вокруг них. Согласно [37], используя наблюдения на SCORPIO, в поле 4.3×4.3 угл.мин с центром в родительской галактике гамма-всплеска GRB 021004 за время экспозиции в фильтрах $B - 2600$ с, $V - 3600$ с, $R - 2700$ с, $I - 1800$ с, достигаются следующие предельные звездные величины на уровне $S/N > 3$: $26.0(B)$, $25.5(V)$, $25.0(R)$, $24.5(I)$. При этом отождествляются около 200 объектов, имеющих фотометрические z в интервале 0.1-4.

Для грубой оценки наблюдательного времени необходимого для $BVRI$ -фотометрии одного глубокого поля можно принять одну полную ночь. Таким образом, за 10 наблюдательных ночей можно покрыть область неба $20^\circ \times 20^\circ$ при размере ячейки сетки $10^\circ \times 10^\circ$, или $60^\circ \times 60^\circ$ при ячейке $30^\circ \times 30^\circ$. Возможное добавление фильтров U и z не изменит порядок величины наблюдательного времени, но повысит надежность определения фото- z .

Главной проблемой задачи обнаружения сверхбольших структур в глубоких обзорах галактик является количественный учет возможных эффектов селекции и систематических искажений распределения галактик по фотометрическим красным смещениям, связанных с методикой оценки фото- z . Поскольку эта задача пока остается нерешенной, то важную роль играют также дополнительные аргументы, такие как спектральные наблюдения далеких скоплений галактик.

В следующей работе этой серии мы рассмотрим применение представленного метода поиска сверхбольших структур к имеющимся данным по глубоким полям COSMOS, FDF, HUDF и HDF-N.

Мы благодарны рецензенту за полезные замечания, позволившие существенно улучшить изложение материала. Также благодарим за частичную финансовую поддержку фонды Ведущая Научная Школа НШ 1318.2008.2 и грант РФФИ 09-02-00-143.

Астрономический ин-т Санкт-Петербургского государственного университета, Россия,

e-mail: NabokovNikita@yandex.ru

yubaryshev@mail.ru

METHOD OF ANALYSIS OF THE SPATIAL GALAXY DISTRIBUTION AT GIGAPARSEC SCALES. I. INITIAL PRINCIPLES

N.V.NABOKOV, Yu.V.BARYSHEV

Initial principles of a method of analysis of the luminous matter spatial distribution with sizes about thousands Mpc are presented. The method is based on an analysis of the photometric redshift distribution $N(z)$ in the deep fields with large redshift bins $\Delta z = 0.1 + 0.3$. Number density fluctuations in the bins are conditioned by the Poisson's noise, the correlated structures and the systematic errors of the photo- z determination. The method includes covering of a sufficiently large region on the sky by a net of the deep multiband surveys with the cell size about $10^\circ \times 10^\circ$ where individual deep fields have angular size about $10' \times 10'$ and may be observed at telescopes having diameters 3-10 meters. The distributions of photo- z within each deep field will give information about the radial extension of the super large structures while a comparison of the individual radial distributions of the net of the deep fields will give information on the tangential extension of the super large structures. A necessary element of the method is an analysis of possible distortion effects related to the methodic of the photo- z determination.

Key words: *cosmology:deep fields:high redshift galaxies:large scale structure of the Universe*

ЛИТЕРАТУРА

1. J.Einasto, M.Gramann, *Astrophys. J.*, 407, 443, 1993.
2. Ю.В.Барышев, П.Теерикорпу, *Бюллетень САО РАН*, 59, 92, 2006.
3. J.Einasto, M.Einasto, E.Saar et al., *Astron. Astrophys.*, 459, L1, 2006.
4. P.J.E.Peebles, *Principles of physical cosmology*, Princeton Univ. Press, Princeton, NJ, 1993.
5. T.J.Broadhurst, R.S.Ellis et al., *Nature*, 343, 726, 1990.
6. A.S.Szalay, T.J.Broadhurst, N.Ellman et al., *PNAS*, 90, 4853, 1993.
7. J.Einasto, M.Einasto, E.Saar et al., *Astron. Astrophys.*, 462, 397, 2007.
8. F.Sylos Labini, L.N.Vasilyev, L.Pietronero, Y.V.Baryshev, *Europhys. Lett.*, 86, 49001, 2009.
9. J.R.Gott III, M.Juric, D.Schlegel, *Astrophys. J.*, 624, 463, 2005.
10. В.П.Решетников, УФН, т.175, 1163, 2005.
11. C.Wolf, K.Meisenheimer, M.Kleinheinrich et al., *Astron. Astrophys.*, 421,

- 913, 2004.
12. *R.Massey, J.Rhodes, R.Ellis et al.*, *Nature*, **445**, 286, 2007.
 13. *J.Heidt, I.Appenzeller, A.Gabasch, K.Jager*, *Astron. Astrophys.*, **398**, 49, 2003.
 14. *S.V.W.Beckwith, M.Stiavelli, A.M.Koekemoer et al.*, *Astrophys. J.*, **132**, 1729., 2006
 15. *M.Moles, N.Benitez, J.A.L.Aguerri et al.*, *Astrophys. J.*, **136**, 1325, 2008.
 16. *I.Appenzeller, R.Bender, A.Bohm et al.*, *Messenger*, **116**, 8, 2004.
 17. *R.Massey, J.Rhodes, A.Leauthaud et al.*, *Astrophys. J.*, **172**, 239, 2007.
 18. *W.J.Percival, N.C.Robert, D.J.Eisenstein et al.*, *Astrophys. J.*, **657**, 645, 2006.
 19. *Н.Ю.Ловягин*, *Астрофизический Бюллетень САО РАН*, **64**, 213, 2009
 20. *P.Heinamaki et al.*, *astro-ph/0507197*, 2005.
 21. *J.Kim, Ch.Park, J.R.Gott, J.Dubinski*, *Astrophys. J.*, **701**, 1547, 2009.
 22. *P.J.E.Peebles*, *The Large-Scale Structure of the Universe*, Princeton Univ. Press, Princeton, NJ, 1980.
 23. *A.Gabrielli, F.Sylos Labini, M.Joyce, L.Pietronero*, *Statistical Physics for Cosmic Structures*, Springer, 2005.
 24. *R.S.Somerville, K.Lee, H.C.Ferguson et al.*, *Astrophys. J.*, **600**, 171, 2004.
 25. *H.Hildebrandt, C.Wolf, N.Benitez*, *Astron. Astrophys.*, **480**, 703, 2008.
 26. *T.Budavari*, *astro/ph 0811.2600*, 2008.
 27. *N.Benitez, M.Moles, J.Aguerri et al.*, *Astrophys. J.*, **692**, 5, 2009.
 28. *R.Kotulla, U.Fritze*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **393**, 55, 2009.
 29. *N.Padmanabhan, D.J.Schlegel, U.Seljak et al.*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **378**, 852, 2007.
 30. *M.Zatloukal, H.-J.Roser, C.Wolf, H.Hippelein, S.Falter*, *Astron. Astrophys.*, **474**, 5, 2007.
 31. *M.Bolzonella, J.-M.Miralles, R.Pello*, *Astron. Astrophys.*, **363**, 476, 2000.
 32. *N.Benitez, E.Gaztanaga, R.Miquel et al.*, *Astrophys. J.*, **691**, 241, 2009.
 33. *G.D.Coleman, C.C.Wu, D.W.Weedman*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **43**, 393, 1980.
 34. *J.S.Bloom*, *Astron. J.*, **125**, 2866, 2003.
 35. *F.Flore, D.Guetta, S.Piranomonte, V.D'Elia, L.A.Antonelli*, *Astron. Astrophys.*, **470**, 515, 2007.
 36. *D.M.Coward, D.Guetta, R.R.Burman, A.Imerito*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **386**, 111, 2008.
 37. *И.В.Соколов и др.*, *Астрофиз. Бюлл.*, 2009 (в печати).