

На правах рукописи

Широков Станислав Игоревич

**Исследование крупномасштабного распределения галактик на
основе узкоугольных и широкоугольных обзоров**

01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

Научный руководитель:

Юрий Викторович Барышев,
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Макаров Дмитрий Игоревич,
доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией, Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук

Булига Станислава Дмитриевна,
кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник, Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук»

Защита состоится “29” мая 2018 г. в 17 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д212.232.15 на базе Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 28, математико-механический факультет, ауд. 405.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. М. Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9 и на сайте <https://disser.spbu.ru/disser/soiskatelyu-uchjonoj-stepeni/dis-list/form/14/1622.html>

Автореферат разослан “___” _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук, Миланова Ю.В., /_____/

Общая характеристика работы

Развитие техники наблюдений и увеличение вычислительных мощностей компьютеров позволили к концу XX – началу XXI века исследовать эволюцию крупномасштабной структуры Вселенной от момента зарождения галактик до современной эпохи. В ближайшее десятилетие предел чувствительности наблюдательной аппаратуры станет достаточным для обнаружения первых галактик (The James Webb Space Telescope¹, ALMA, SKA). Новые диапазоны и инструменты наблюдений необходимы для сопоставления физических свойств Локальной Вселенной со свойствами объектов на больших красных смещениях. Наблюдательная космология, опираясь на многоволновые данные, позволяет проверять существующие космологические модели, а также формулировать новые концепции, которые будут лучше соответствовать реальности. Адекватность теоретических моделей и правильность понимания эволюции Вселенной определяется с помощью различных космологических тестов [23, 11].

Одним из наиболее важных наблюдательных космологических тестов является получение данных о пространственном распределении галактик и его эволюции во времени (сравнение структур на различных красных смещениях). Стандартная космологическая модель (СКМ – Λ CDM) предполагает однородное распределение вещества во Вселенной, включая холодное темное вещество (Cold Dark Matter) и темную энергию (Dark Energy) или вакуум, имеющий отрицательное давление. В рамках СКМ средний масштаб неоднородности должен составлять ~ 10 Мпк, после которого амплитуда флуктуаций полной плотности вещества становится малой $\delta\rho/\rho \ll 1$ и рост структур происходит в линейном режиме [3].

Современные численные расчеты космологической задачи N-тел позволяют получить неоднородности с размерами ~ 300 Мпк [22] и кластеризацию галактик на больших z с байес фактором $b \sim 8$ [12]. Важной задачей наблюдательной космологии является оценка размеров и амплитуд реально наблюдаемых неоднородностей пространственного распределения галактик на максимально больших масштабах, что позволит уточнить физические процессы, связывающие кластеризацию небарионной темной материи с обычным барионным веществом галактик.

Актуальность темы

Современные наблюдения пространственного распределения видимого вещества (сверхскопления галактик, стены, филаменты) обнаруживают неоднородности с масштабами много большими стандартной длины корреляции элементов структуры ~ 10 Мпк. Так, например, the Sloan Great Wall имеет размер ~ 300 Мпк на $z \sim 0.07$ [16, 14], см. Рис.1). Квази-периодические неоднородности с размерами ~ 100 Мпк были обнаружены в работе [25]. Большие неоднородности недавно были обнаружены в распределении галактик

¹<https://www.jwst.nasa.gov/>

обзора SDSS/CMASS (the BOSS Great Wall, размер ~ 400 Мпк на $z \sim 0.47$ [18]). Для описания свойств крупномасштабного распределения вещества можно использовать анализ фрактальных свойств [4, 1, 15].

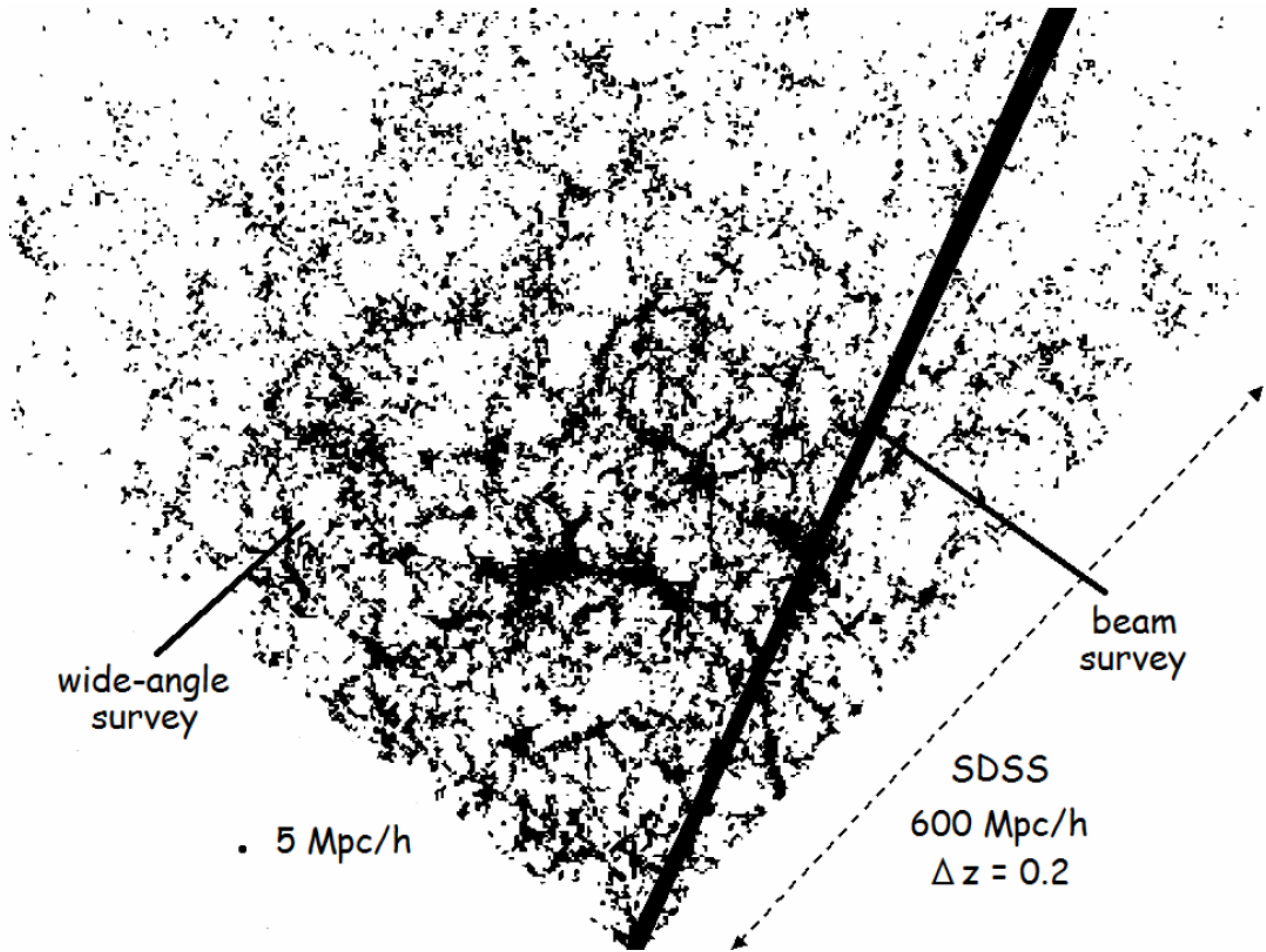


Рис. 1: Неоднородное распределение галактик согласно широкоугольному спектральному обзору красных смещений SDSS при $z < 0.2$: “Sloan Great Wall” ~ 300 Мпк/г. Схематично показано направление поля COSMOS/UltraVISTA размером 1×1 градус.

В последние годы появилась также возможность изучения неоднородного распределения массы в Локальной Вселенной, которая может быть независимо определена из анализа собственных движений галактик. Недавно в работе Тулли и др. [26] было обнаружено когерентное движение галактик, образующих сверх-скопление Ланиакеа диаметром 160 Мпк. Кроме того, степенной характер условной плотности распределения галактик $\Gamma(r) \propto r^{-1}$ на масштабах до 100 Мпк соответствует фрактальному характеру неоднородности распределения галактик с фрактальной размерностью $D \sim 2$ [16, 11, 7]

Широкоугольные спектральные обзоры (такие как SDSS, 2dF и т.п.) сильно ограничены по звёздной величине ($m_V < 19$) и содержат галактики только на малых красных смещениях, что не дает возможности исследовать характер флуктуаций пространственного распределения галактик на $z > 1$.

Узкоугольные (“карандашные”, beam survey) глубокие обзоры галактик дают такую

возможность благодаря большому времени накопления сигнала (см., например, [11] гл.12; [6]). Флуктуации числа 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 Λ CDM моделей с наблюдениями. Амплитуда флуктуаций, соответствующих космической дисперсии, существенно зависит от геометрии рассматриваемого объема и определяется интегралом от пространственной корреляционной функции галактик [5, 15].

Цель и задачи исследования

Целью работы является развитие методов анализа крупномасштабной структуры Вселенной, дополняющих классический метод двухточечной корреляционной функции, которая подвержена сильному влиянию искажающих факторов, связанных с геометрией выборок и формой функции светимости галактик.

Поиск больших структур галактик в независимых между собой каталогах разными методами. Анализ амплитуды и линейных размеров флуктуаций, сравнение с теорией в рамках Λ CDM модели, определение фрактальной размерности и сравнение статистических свойств между каталогом красных смещений и каталогом с независимыми от z оценками расстояний до галактик. Для верификации результатов необходимо реализовать комплекс тестов определения фрактальной размерности на модельных множествах с известными параметрами.

Основные задачи исследования:

- Определение амплитуды и линейных размеров флуктуаций числа галактик на красных смещениях $z \sim 1$ в полях COSMOS и HDF-N с помощью метода флуктуаций.
- Расчет теоретической космической дисперсии для рассматриваемых каталогов с последующим сравнением с реальными данными.
- Оценка коэффициента корреляции флуктуационной картины между независимыми каталогами на одном и том же участке неба.
- Сравнение методов условной плотности и попарных расстояний на модельных множествах разного типа.
- Определение фрактальной размерности ИГВ с помощью методов условной плотности и попарных расстояний.
- Построение модельных каталогов ИГВ с фрактальным и однородным распределением при последующем наложении селекционных эффектов.
- Определение фрактальной размерности каталога галактик CF-2 с помощью методов условной плотности и попарных расстояний.

Научная новизна

Приводятся новые аргументы в пользу реальности существования крупномасштабных флуктуаций плотности видимой материи в глубоких обзорах галактик. Проведен статистический анализ радиальных распределений галактик в двух глубоких полях – COSMOS и HDF-N. Для каждого поля существуют независимые спектральные и фотометрические обзоры, использующие разные диапазоны волн и разные методики наблюдений. Для поля COSMOS в интервале красных смещений $0.1 < z < 3.5$ были использованы каталоги фотометрических красных смещений в оптическом (COSMOS-Zphot) и инфракрасном (UltraVISTA) диапазонах, а также спектроскопические обзоры zCOSMOS (10kZ), XMMspec-COSMOS и другие обзоры фотометрических красных смещений: XMMphot-COSMOS и ALHAMBRA-F4. Для поля HDF-N использовались каталоги фотометрических красных смещений HDFN-Zphot и ALHAMBRA-F5.

Выполнен статистический анализ пространственного распределения источников гамма-всплесков (ИГВ) с известными красными смещениями методами условной плотности и парных расстояний. Впервые сделана оценка фрактальной размерности методом условной плотности для пространственного распределения ИГВ. Впервые рассматриваются приведенные графики плотности относительно однородного распределения, которые позволяют сравнить эффективность двух методов, а также более явно показывают степенную зависимость на большем интервале масштабов. Выборка ИГВ основана на данных миссии Swift и содержит потоки, координаты и красные смещения 384 источников ИГВ. Для учета эффектов селекции, искажающих истинное распределение источников ИГВ, проводится сравнение наблюдаемого распределения с модельными фрактальными и однородными каталогами. Для моделирования эффекта Малмквиста используется аппроксимация видимой функции светимости ИГВ. Также рассмотрен случай с учетом поглощения в плоскости Галактики. Данный подход позволяет изучать пространственную структуру сразу всей выборки без искусственных усечений.

В результате моделирования искусственных неоднородных распределений галактик впервые было установлено, что метод анализа распределения пар взаимных расстояний обладает устойчивостью ко многим эффектам селекции. Этот результат имеет большую значимость для дальнейшего его применения в других обзорах галактик.

Научная и практическая ценность работы

В рамках данной работы были впервые обнаружены с большой степенью достоверности неоднородности пространственного распределения галактик с масштабами до 1 000 Мпк и амплитудой порядка 20%. Эти выводы принципиально важны для дальнейшего развития моделей образования и эволюции крупномасштабной структуры Вселенной. В частности для объяснения таких неоднородностей в рамках Λ CDM модели требуется разработать механизм значительного роста байеса с красным смещением.

Полученные результаты по анализу крупномасштабных неоднородностей в глубоком поле COSMOS, необходимо использовать для разработки более совершенных моделей эволюции крупномасштабной структуры в теоретической космологии. Разработанная методика анализа совокупности глубоких полей может быть использована многими группами исследующими неоднородное распределение галактик вдоль луча зрения узкоугольных обзоров.

Исследование метода попарных расстояний показало его устойчивость к эффектам селекции и работоспособности даже с малыми объемами выборок. Это свойство данного метода особенно ценно для трудоемких обзоров, в которых предварительный анализ малого числа имеющихся объектов существенно определяет стратегию планируемых дальнейших наблюдений.

Основные результаты, выносимые на защиту

В настоящей работе проводится расчет размеров и амплитуд неоднородностей радиального распределения галактик обзора COSMOS [17] 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 небарионной темной материи, и, следовательно, о необходимости больших значений байеса на больших красных смещениях. Полученные результаты подтверждаются недавно опубликованными данными глубокого обзора галактик ALHAMBRA [20], в котором поле Field 4 находится внутри области обзора COSMOS. Также есть согласие с результатами наблюдений поля COSMOS в субмиллиметровом диапазоне [13].

Наличие положительной корреляции флуктуаций чисел галактик в независимых обзорах одного и того же глубокого поля указывает на реальность флуктуаций плотности видимой материи. Отсутствие корреляции между флуктуациями в разных полях свидетельствует о независимости структур, видимых в разных направлениях на небесной сфере. Это также указывает на отсутствие влияния универсальных систематических ошибок (типа “спектральной пустыни”), которые могли бы имитировать обнаруженные коррелированные структуры.

На защиту выносятся следующие основные результаты:

- Флуктуации плотности видимой материи (плотность числа галактик вдоль луча зрения) в глубоких обзорах галактик COSMOS, zCOSMOS, UltraVISTA, XMM-COSMOS, ALHAMBRA, HDF-N имеют размеры до 1 000 Мпк и амплитуду до 20% на красных смещениях $z \sim 2$.
- Коэффициент корреляции Пирсона между флуктуациями числа галактик, полученных в независимых выборках одного и того же поля COSMOS, достигает значения

$R = 0.70 \pm 0.16$, что является свидетельством реальности обнаруженных неоднородностей.

- Коэффициент корреляции между флуктуациями числа галактик в глубоком поле COSMOS и находящемся от него на угловом расстоянии в 60 градусов глубоком поле HDF-N имеет значение $R = -0.20 \pm 0.31$, что подтверждает независимость флуктуаций для сильно разнесенных направлений на небесной сфере, а также отсутствие одинаковых систематических ошибок фотометрических красных смещений, которые приводили бы к сильной корреляции флуктуаций в любых направлениях.
- Величина параметра галактического байеса относительно флуктуаций небарионной темной материи составляет $b \sim 8$, что требует развития Λ CDM теории образования крупномасштабной структуры, допускающей раннее формирование галактик.
- Создан комплекс программ для моделирования искусственных распределений галактик с учётом геометрии выборок и функции светимости, позволяющий оценивать точность определения фрактальной размерности.
- Фрактальная размерность ИГВ составляет $D = 2.55 \pm 0.06$ на масштабах $2 \div 6$ Гпк. Методы условной плотности и попарных расстояний дают взаимно согласующиеся результаты. Сравнение с оценкой фрактальной размерности галактик в обзоре CF-2 свидетельствует об эволюции корреляционных свойств распределения галактик.

Достоверность результатов

Результаты, полученные в работах [8] и [9] для оптических данных глубокого поля COSMOS, подтверждаются результатами исследований в других диапазонах волн: неоднородности, обнаруженные с использованием фотометрических красных смещений, совпадают с неоднородностями, обнаруженными в спектральных обзорах исследуемых полей в интервале общих масштабов.

Результаты работы [10] имеют высокую степень достоверности, так как согласуются с результатами, полученными ранее другими авторами другими методами. Достоверность выводов, полученных в работе [10], проверена моделированием искусственных распределений галактик с заранее заданными свойствами.

Апробация результатов

Результаты диссертации докладывались на следующих международных конференциях:

- The International Student Conference “Science and Progress”, Russia, Saint-Petersburg, SPbSU, 10-14 november 2014,
(<http://www.phys.spbu.ru/files/Book-of-abstracts-2014.pdf>);

- The International Conference “Sobolev-100 Conference, Radiation mechanisms of astrophysical objects”, Russia, Saint-Petersburg, Pulkovo (MAO RAS), 21-25 september 2015, (<http://www.astro.spbu.ru/Sobolev100/sites/default/files/Sobolev-100.pdf>);
- The International Conference “SN 1987A, Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy”, Russia, Terskol (BNO INR RAS), Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), 2-8 July 2017, (https://www.sao.ru/hq/grb/conf_2017/proceedings.html).

Содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации 95 страниц. Диссертация содержит 15 таблиц и 61 рисунок. Список литературы включает 76 наименований.

Во *Введении* обосновывается актуальность работы. Представлен обзор литературы на тематику крупномасштабной структуры Вселенной, результатов обработки современных наблюдений и новых методов анализа пространственных структур. Описывается постановка целей и задач диссертации, научная новизна, научная и практическая ценность исследования. Формулируются результаты, выносимые на защиту, приводятся сведения о публикациях и апробации работы с указанием личного вклада автора.

В *первой* главе подробно описываются используемые каталоги галактик в узкоугольных полях COSMOS и HDF-N. Затем следует описание метода флуктуаций, включающее в себя проверку альтернативных аппроксимаций, предсказания Λ CDM-модели на основе гипотезы о галактическом байесе, вводится понятие коэффициента корреляции и приведенной дисперсии.

Согласно [19, 24] распределение галактик в глубоких обзорах удачно аппроксимируется эмпирическим выражением

$$N_{mod}(z, \Delta z) = Az^\alpha e^{(-z/z_0)^\beta} \Delta z, \quad (1)$$

где $N_{mod}(z, \Delta z)$ – число галактик в интервале $(z, z + \Delta z)$. Параметры α , β и z_0 варьируются с помощью метода наименьших квадратов, а A – постоянная, нормирующая интеграл на полное число галактик ($\int N_{mod} dz = N_{tot}$). Формула (1) также подтверждается на модельных выборках галактик в [2].

Метод флуктуаций (Рис. 2) позволяет оценить масштабы неоднородностей по глубоким обзорам галактик, используя большие бины по красному смещению ($\Delta z = 0.05 \div 0.3$), превышающие точность фотометрической оценки красного смещения ($\delta z \sim 0.012(1 + z)$). Такие бины содержат большое число галактик ($N(\Delta z) \sim 10\,000$), благодаря чему шум Пуассона ($\sim 1/N^{1/2}$) будет мал ($\sigma_P \sim 0.01$), что позволяет обнаружить флуктуации, связанные с крупномасштабными неоднородностями в распределении галактик. Существен-

ным развитием метода является точный учёт геометрии выборки и изменение формы пространственной корреляционной функции.

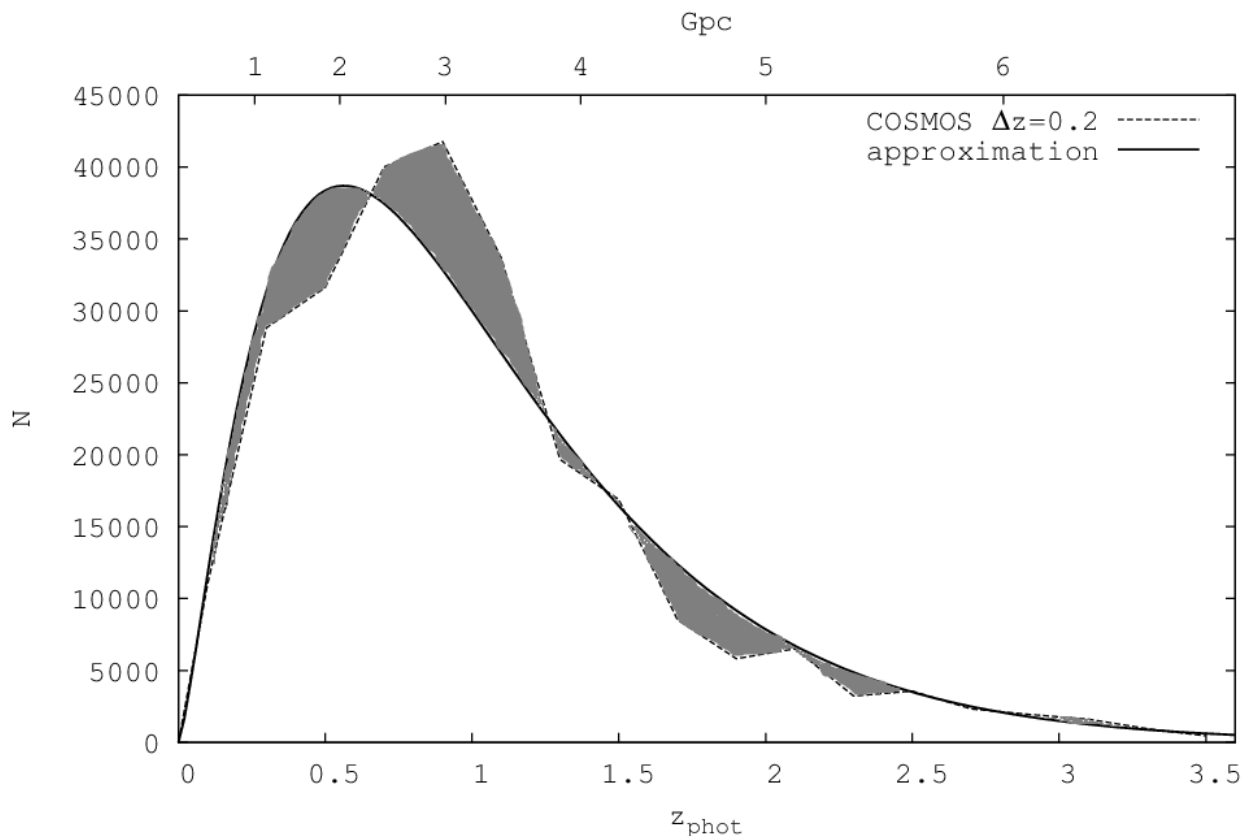


Рис. 2: Распределение $N(z)$ каталога COSMOS для $\Delta z = 0.2$ с аппроксимацией МНК по формуле (1).

Во *второй* главе представлены результаты применения метода флуктуаций на основе 8 таблиц и 29 рисунков с поясняющими комментариями. Отдельными пунктами показана корреляция между независимыми обзорами в оптическом и инфракрасном диапазоне, далее корреляция между флуктуационными картинками каталогов со спектроскопическими красными смещениями в оптике и рентгене. Далее производится сравнение характера флуктуаций между независимыми обзорами в поле HDF-N. Завершает главу сравнение с результатами других работ, где также приводятся ссылки на открытие больших скоплений галактик, которые были также получены методом флуктуаций и выделены в диссертации.

В таблице 1 представлены флуктуации плотности числа галактик для каталогов COSMOS и UVISTA в сравнении с предсказаниями Λ CDM модели [21], где также приведены значения галактического байеса, и флуктуациями соответствующей степенной корреляционной функции с параметрами r_0 и γ . Используемая модель байеса из статьи . Предсказываемые флуктуации плотности числа галактик σ_{gal} оказываются более, чем в два раза меньше σ_{obs} на красных смещениях $z \sim 0.5$, $z \sim 0.9$ и $z \sim 2$.

В каталоге COSMOS для наблюдаемых флуктуаций, превышающих флуктуации небарионной темной материи, требуется среднее значение галактического байеса $b = 6.2 \pm 3.5$,

Таблица 1: Сравнение наблюдаемых флуктуаций числа галактик, предсказаний Λ CDM модели и двух форм корреляционной функции для каталогов COSMOS и UVISTA.

z	ξ_{dm}		COSMOS			UVISTA				ξ_{corr}	
	σ_{dm}	lm_*	b	σ_{gal}	δ_{obs}	lm_*	b	σ_{gal}	δ_{obs}	5, 1.8	5, 1
0.100	0.181	7.88	-	-	- 0.047	7.68	-	-	+ 0.034	0.195	0.280
0.300	0.115	8.64	1.15	0.132	- 0.057	8.72	1.15	0.132	+ 0.014	0.114	0.211
0.500	0.087	9.19	1.25	0.109	- 0.164	9.16	1.25	0.109	- 0.189	0.099	0.195
0.700	0.070	9.45	1.33	0.093	+ 0.077	9.33	1.33	0.093	- 0.037	0.092	0.186
0.900	0.060	9.79	1.47	0.088	+ 0.277	9.49	1.43	0.086	+ 0.215	0.088	0.180
1.100	0.052	9.96	1.59	0.083	+ 0.247	9.50	1.54	0.080	+ 0.056	0.085	0.175
1.300	0.047	10.14	1.91	0.090	- 0.080	9.60	1.74	0.082	+ 0.050	0.084	0.172
1.500	0.042	10.34	2.11	0.089	+ 0.026	9.70	1.91	0.080	+ 0.094	0.082	0.169
1.700	0.039	10.43	2.34	0.091	- 0.311	9.85	2.13	0.083	- 0.098	0.082	0.166
1.900	0.036	10.48	2.62	0.094	- 0.367	9.95	2.37	0.085	- 0.081	0.081	0.163
2.100	0.033	10.61	3.82	0.126	- 0.034	9.96	2.66	0.088	- 0.207	0.080	0.161
2.300	0.031	10.76	4.38	0.136	- 0.340	10.02	3.30	0.102	- 0.173	0.080	0.159
2.500	0.029	10.84	5.02	0.146	+ 0.016	10.08	3.71	0.108	- 0.046	0.080	0.157
2.700	0.027	10.99	~ 7	0.189	- 0.072	10.09	4.17	0.113	+ 0.244	0.079	0.155

а с учетом логарифма звездной массы галактик (lm_*) байес необходимо дополнительно домножить на величину $b_* = 2.7 \pm 0.5$. В случае каталога UVISTA необходимый байес $b = 4.2 \pm 2.8$, а при учете звездной массы галактик дополнительный множитель составляет $b_* = 1.6 \pm 0.6$. Другими словами для объяснения отдельных наблюдаемых флуктуаций числа галактик необходимо значение байеса $b < 10$, а в среднем для этих каталогов $b \approx 5 \pm 3$. Если учитывать рост массы галактик на больших красных смещениях, то остается расхождение в $2 \div 3$ раза от модельных расчетов в [21].

В *третьей* главе описываются широкоугольные каталоги источников гамма-всплесков (ИГВ) Swift и каталог галактик с расстояниями, измеренными без использования красного смещения, Cosmicflows-2. Затем идет подробное описание методов оценки фрактальной размерности (условная плотность и попарные расстояния) с их модификациями, формулы для определения расстояния и светимости с учетом красного смещения, принцип построения модельных каталогов с фрактальным или однородным распределением, а также дается пояснение о проблемах старых подходов в оценке фрактальной размерности. Главной модификацией методов является рассмотрение усредненных распределений по различным реализациям датчика псевдослучайных чисел, что дает надежные результаты при малом количестве точек в рассматриваемых выборках.

В *четвертой* главе приведены результаты обработки каталогов. Показана практическая равная эффективность предложенных методов на средних масштабах выборки, составлена таблица самых близких пар гамма-всплесков, продемонстрировано сравнение модельных каталогов с распределением гамма-всплесков. Далее на примере каталога CF-2

представлен сравнительный анализ оценок фрактальной размерности для прямых расстояний и расстояний, рассчитанных по красным смещениям. Сделан промежуточный вывод о том, что оценка фрактальной размерности слабо меняется в этих двух случаях.

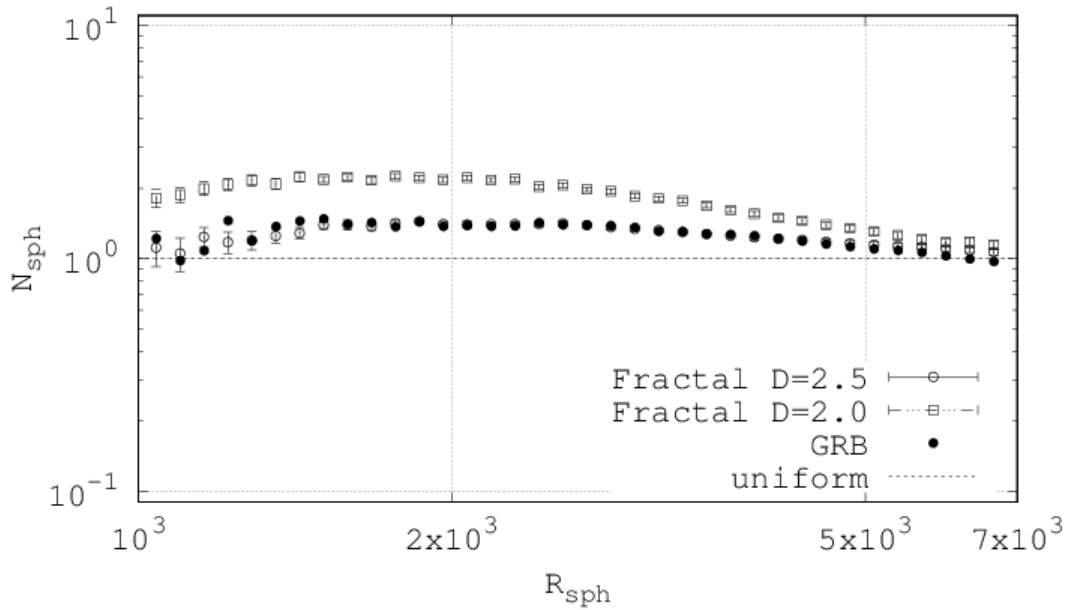


Рис. 3: Графики приведенной условной плотности для ИГВ (закрашенные круги) и МКФР $D = 2.0$ (квадраты) и $D = 2.5$ (круги) в случае полной небесной сферы. Единица соответствует однородному распределению.

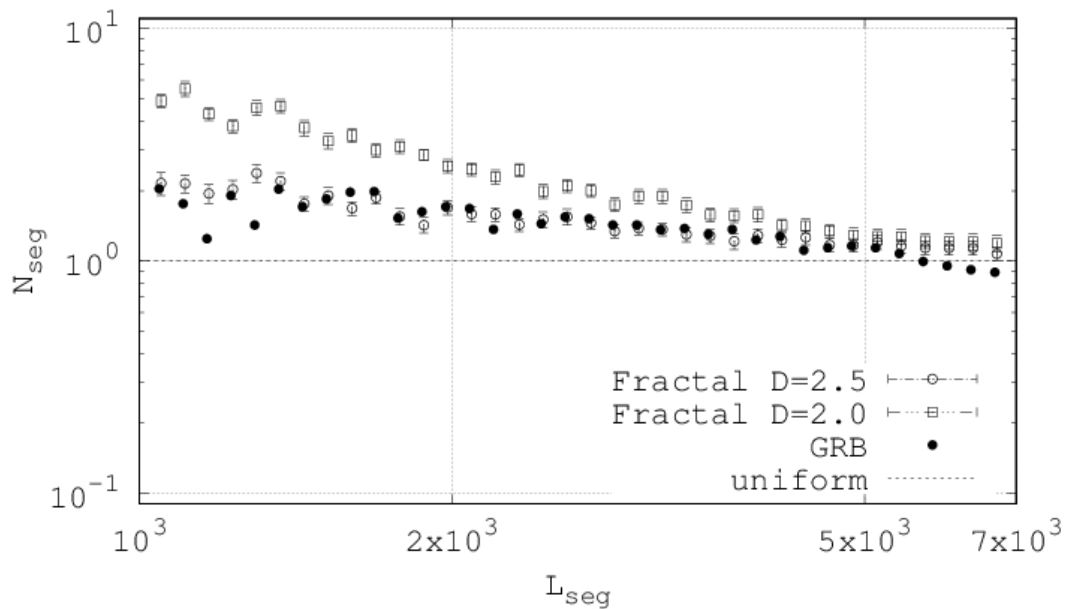


Рис. 4: Графики приведенных попарных расстояний для ИГВ (закрашенные круги) и МКФР $D = 2.0$ (квадраты) и $D = 2.5$ (круги) в случае усеченной небесной сферы. Единица соответствует однородному распределению.

На рисунке 3 продемонстрировано поведение условной плотности для каталога гамма-всплесков и модельных каталогов с фрактальным распределением (МКФР) для размер-

ностей $D = 2.0$ и $D = 2.5$. Начиная с масштабов $R = 1.5$ Гпк до $R = 5.0$ Гпк можно видеть полное совпадение с распределением для МКФР с размерностью $D = 2.5$, в то время как наклон графика в промежутке $3 \div 4$ Гпк соответствует размерности $D = 2.6$, т.е. в данном случае использование модельных каталогов повлекло завышение средней по реализациям фрактальной размерности. Аналогичная картина и на рисунке 4 для попарных расстояний.

В заключении отдельно излагаются основные результаты диссертации по методу флуктуаций и оценке фрактальной размерности.

Список публикаций автора по теме диссертации

- Широков С. И., Барышев Ю. В., Теханович Д. И. *Флуктуации пространственного распределения галактик в глубоком поле COSMOS на масштабах в гигапарсеки*, Вестник СПбГУ, Сер. 1. Математика, Механика, Астрономия, **59**, с. 659-669 (2014);
- Shirokov S. I. *Correlation of Radial Fluctuations in Deep Galaxy Redshift Surveys*, in Proceedings of The International Student Conference “Science and Progress”, Russia, Saint-Petersburg, SPbSU, 10-14 november 2014, В. 33 (2014);
- Shirokov S. I., Baryshev Yu. V. *Correlation of radial fluctuations in deep galaxy surveys*, in Proceedings of The International Conference “Sobolev-100 Conference, Radiation mechanisms of astrophysical objects”, Russia, Saint-Petersburg, Pulkovo (MAO RAS), 21-25 september 2015, 105 (2015);
- Широков С. И., Ловягин Н. Ю., Барышев Ю. В., Горохов В. Л. *Крупномасштабные флуктуации плотности галактик в независимых обзорах глубоких полей*, Астрон. Ж., **93**, с. 546-561 (2016),
(<https://arxiv.org/abs/1607.02596>);
- Широков С. И., Райков А. А., Барышев Ю. В. *Свойства пространственного распределения источников гамма-всплесков*, Астрофизика, **60**, с. 527-539 (2017);
(<https://arxiv.org/abs/1802.00953>);
- Shirokov S. I., Raikov A. A. *Spatial Distribution of GRB with Known Redshifts*, in Proceedings of The International Conference “SN 1987A, Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy”, Russia, Terskol (BNO INR RAS), Nizhniy Arkhyz (SAO RAS), 2-8 July 2017, 157 (2018).

Личный вклад автора

Материалы диссертации опубликованы в шести работах, из них три статьи – в рецензируемых журналах и три статьи опубликованы в сборнике трудов конференций, результа-

ты представлены на трех международных конференциях. Обработка каталогов галактик и подготовка необходимых подвыборок объектов, написание программных кодов и моделирование искусственных фрактальных распределений галактик, результаты которых представлены в опубликованных работах и на конференциях, были выполнены автором.

Список литературы

- [1] Барышев Ю.В., Теерикорпи П. Фрактальный анализ крупномасштабного распределения галактик. // Бюллетень САО РАН. – 2006. – Т. 59. – С.92.
- [2] Ловягин Н.Ю. Статистические свойства пространственного распределения галактик. // Астрофиз.Бюлл. САО РАН. – 2009. – Т. 64. – С.223.
- [3] Лукаш В.Н., Михеева Е.В. Физическая космология. // М.: «Физматлит», 2010. – 404 с.
- [4] Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. // М.: «Институт компьютерных исследований», 2002. – 676 с.
- [5] Пиблс Ф.Дж.Э. Структура Вселенной в больших масштабах. // Перевод с англ. – М: «Мир», 1983.
- [6] Решетников В.П. Обзоры неба и глубокие поля наземных и космических телескопов. // УФН. – 2005. – Т. 175. – С.1163.
- [7] Теханович Д.И., Барышев Ю.В. Глобальная структура Локальной Вселенной согласно обзору 2MRS. // АБ САО РАН. – 2016. – Т. 71. – С.167.
- [8] Широков С.И., Барышев Ю.В., Теханович Д.И. Флуктуации пространственного распределения галактик в глубоком поле COSMOS на масштабах в гигапарсеки. // Вестник СПбГУ. – 2014. – Т. 59. – С.659.
- [9] Широков С.И., Ловягин Н.Ю., Барышев Ю.В., Горохов В.Л. Крупномасштабные флуктуации плотности галактик в независимых обзорах глубоких полей. // Астрон.Ж. – 2016. – Т. 93. – С.546.
- [10] Широков С.И., Райков А.А., Барышев Ю.В. Свойства пространственного распределения источников гамма-всплесков. // Астрофизика. – 2017. – Т. 60. – С.527.
- [11] Baryshev Yu.V. and Teerikorpi P. Fundamental questions of practical cosmology. // Springer Science, Dordrecht, Astrophysics and Space Science Library, V. 383, 2012. – 332 p.

- [12] Bhowmick A.K., Matteo T.Di, Feng Y., Lanusse F. The clustering of $z > 7$ galaxies: Predictions from the BLUETIDES simulation. // *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* – 2018. – V. 474. – I. 4. P.5393.
- [13] Brusa M., et al. The XMM-Newton Wide-Field Survey in the COSMOS field (XMM-COSMOS): demography and multiwavelength properties of obscured and unobscured luminous AGN. // *Astrophys.J.* – 2010. – V. 716. – P.348.
- [14] Einasto M., et al. Sloan Great Wall as a complex of superclusters with collapsing cores. // *Astron.Astrophys.* – 2016. – V. 595. – A70.
- [15] Gabrielli A., Sylos Labini F., Joice M., Pietronero L. Statistical physics for cosmic structures. // Springer, Berlin, 2005. – 424 p.
- [16] Gott III J.R., Juric M., and Schlegel D. A Map of the Universe. // *Astrophys.J.* – 2005. – V. 624. – P.463.
- [17] Ilbert O., Capak P., et al. COSMOS photometric redshifts with 30-bands for 2-deg². // *Astrophys.J.* – 2009. – V. 690. – P.1236.
- [18] Lietzen H., Tempel E., Liivamägi L.J., et al. Discovery of a massive supercluster system at $z \sim 0.47$. // *Astron.Astrophys.* – 2016. – V. 588. – L4.
- [19] Massey R., Rhodes J., Ellis R., et al. Dark matter maps reveal cosmic scaffolding. // *Nature.* – 2007. – V. 445. – P.286.
- [20] Molino A., et al. The ALHAMBRA Survey: Bayesian photometric redshifts with 23 bands for 3 deg². // *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* – 2014. – V. 441. – I. 4. – P.2891.
- [21] Moster B., et al. A Cosmic Variance Cookbook. // *Astrophys.J.* – 2011. – V. 731. – P.113.
- [22] Park Changbom, Choi Yun-Young, Kim Juhan, Gott J. Richard III, Kim Sungsoo S., Kim Kap-Sung. The Challenge of the Largest Structures in the Universe to Cosmology. // *Astrophys.J.Lett.* – 2012. – V. 759. – N 1.
- [23] Peebles P.J.E. Principles of Physical Cosmology. // Princeton Univ.Press, 1993.
- [24] 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. – V. 657. – P.645.
- [25] Ryabinkov A.I., Kaurov A.A., Kaminker A.D. Quasi-periodical features in the distribution of Luminous Red Galaxies // *Astrophys.Space Sci.* – 2013 – V. 344. – I. 1. – P.219.
- [26] Tully R. Brent, Courtois H., Hoffman Yehuda, Pomarede D. The Laniakea supercluster of galaxies. // *Nature.* – 2014. – V. 513. – P.71.

Подписано в печать 16.03.2018 г.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Печать выполнена автором.