

СВОЙСТВА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ

С.И.ШИРОКОВ¹, А.А.РАЙКОВ¹, Ю.В.БАРЫШЕВ¹

Поступила 16 августа 2017

Принята к печати 3 октября 2017

Проводится анализ пространственного распределения источников гамма-всплесков (ГВ) с известными красными смещениями мегадами условной плотности и парных расстояний. Выборка ГВ основана на данных программы Swift и содержит потоки, координаты и красные смещения 384 источников ГВ. Для учета эффектов селекции, искажающих истинное распределение источников ГВ, проводится сравнение наблюдаемого распределения с модельными фрактальными и однородными каталогами. Для моделирования эффекта Малмквиста используется аппроксимация видимой функции светимости ГВ. Также рассмотрен случай с учетом поглощения в плоскости Галактики. Данный подход позволяет изучать пространственную структуру сразу всей выборки без искусственных усечений. Согласно результатам, оценка фрактальной размерности составляет $D = 2.55 \pm 0.06$ на масштабах $2 < 6$ Гпк.

Ключевые слова: *гамма-всплески; крупномасштабная структура Вселенной; фрактальная размерность*

1. *Введение.* Согласно современным наблюдательным данным, источниками гамма-всплесков (ГВ) являются взрывы массивных сверхновых звезд (длинные ГВ) и слияния нейтронных звезд (короткие ГВ) в далеких галактиках. Таким образом, пространственное распределение ГВ отражает крупномасштабное распределение галактик, поэтому анализ распределения гамма-всплесков в пространстве и времени является важной задачей в изучении эволюции крупномасштабной структуры Вселенной. Экстремальная светимость ГВ позволяет регистрировать их источники при больших красных смещениях, а имеющаяся полнота обзоров ГВ (например Swift) позволяет использовать выборки ГВ с известными красными смещениями для предварительного анализа их пространственного распределения в широком интервале масштабов.

Стандартная космологическая модель предполагает однородное распределение вещества во Вселенной, включая темное вещество и темную энергию. Однако наблюдения пространственного распределения видимого вещества (галактики) обнаруживают неоднородности с масштабами много большими стандартной длины корреляции ~ 10 Мпк (the Sloan Great Wall, размер ~ 300 Мпк на $z \sim 0.07$ [1,2]). Кроме того, степенной характер условной плотности распределения галактик $\Gamma(r) \sim r^{-1}$ на масштабах до 100 Мпк соответствует фрактальной

размерности $D \sim 2$ [3-5]. Большие неоднородности недавно были обнаружены в распределении галактик обзора SDSS/CMASS (the BOSS Great Wall, размер ~ 400 Мпк на $z \sim 0.47$ [6]), а также в глубоком обзоре галактик COSMOS (Super Large Clusters с размерами ~ 1000 Мпк на $z \sim 1$ [7-9]).

Анализ пространственного распределения ГВ проводился в ряде работ [10-13]. Так, в работе [10] анализировалось распределение 244-х ГВ в рамках миссии Swift методом ξ -функции. Длина корреляции составила $r_0 \approx 388 \text{ h}^{-1}$ Мпк, $\gamma = 1.57 \pm 0.65$ (при уровне 1σ), а масштаб однородности $r \geq 7700 \text{ h}^{-1}$ Мпк. Другим подходом к изучению корреляционных свойств пространственных структур является метод условной плотности [3,4] и метод парных расстояний [14]. В работе [11] он впервые был применен к 201-ому ГВ с известными на тот момент угловыми координатами и красным смещением. Была получена оценка фрактальной размерности $D \sim 2.2 \pm 2.5$. Метод также позволяет регистрировать близкие пары и тройки точек. Так, например, была зарегистрирована пространственно изолированная группа из пяти ГВ с координатами $23^{\text{h}}50^{\text{m}} < \alpha < 0^{\text{h}}50^{\text{m}}$, $5^\circ < \beta < 25^\circ$ и красным смещением $0.81 < z < 0.97$. Если расценивать события ГВ в качестве индикаторов наличия вещества в пространстве, то эта группа является косвенным указанием на сверхскопление галактик в данном интервале координат.

В [12] было обнаружено гигантское кольцо из ГВ диаметром 1720 Мпк на красных смещениях $0.78 < z < 0.86$. Вероятность того, что данная структура получилась случайно составляет 2×10^{-6} . В [13] 352 ГВ с оценкой размерности в рамках Λ CDM модели $D \approx 2.3 \pm 0.1$. В других моделях $D = 2.5$. Как показали последние результаты численных предсказаний в рамках Λ CDM модели в [15], на больших красных смещениях уже можно наблюдать кластеризацию вещества, поэтому обнаружение структур в распределении ГВ является актуальной задачей.

В данной работе впервые сделана оценка фрактальной размерности методом условной плотности для ГВ, которая сравнивается с оценкой, полученной методом парных расстояний. Для сравнения с каталогом ГВ моделируются искусственные фрактальные и однородные каталоги. Учитываются эффекты геометрии выборки, а именно: ограничение сферой максимального радиуса и вырезание галактического пояса. Учитывается эволюция светимости с ростом красного смещения. Впервые рассматриваются приведенные графики относительно однородного распределения, которые позволяют сравнить эффективность двух методов, а также более явно показывают степенную зависимость на большем интервале масштабов.

2. Выборка. За основу каталога ГВ взят он-лайн каталог The Swift Gamma-Ray Burst Mission [16], который был расширен работой [17] и онлайн каталогом [18]. Итого наш каталог источников ГВ с известными красными

сместениями содержит 384-е объекта. Наш подход позволяет использовать все точки для определения фрактальной размерности без дополнительных обрезаний и селекции. Единственным условием включения объектов в общий каталог является наличие угловых координат и красных смещений. Таким образом, в рабочей выборке (< 8 Гпк) остается 377 ГВ, из которых у 360-ти определены светимости. Общий каталог актуален на июнь 2017г.

Первые строки нашей рабочей выборки представлены в табл.1 и 2. Шапка таблиц: имя события, галактические координаты, оценка времени события, принятое излучение 10^{51} эргем⁻² за время события T_{90} в диапазоне 15 ÷ 150 кВ, красное смещение, миссия Swift, метрические координаты, расстояние до источника ГВ, логарифм потока и логарифм светимости.

Таблица 1

ИСХОДНЫЕ СТОЛБЦЫ КАТАЛОГА

Название	<i>l</i>	<i>b</i>	T_{90}	F_{obs}	<i>z</i>	Миссия
151215A	177.25358	8.55309	17.80	3.10	2.590	SWIFT
150423A	9.70821	59.24722	0.22	0.63	1.394	SWIFT
141121A	200.39117	26.85321	549.90	53.00	1.470	SWIFT

Таблица 2

ВЫЧИСЛЕННЫЕ СТОЛБЦЫ КАТАЛОГА

X_{gal}	Y_{gal}	Z_{gal}	R_{gal}	lgS_{obs}	lgL_s
-5862.4	281.2	882.7	5935.1	-0.75	51.97
2099.7	359.2	3580.2	4166.0	0.45	52.53
-3605.5	-1340.3	1947.5	4311.5	-1.01	51.11

3. Методы. Все модельные расчеты выполнены с помощью оригинального программного обеспечения Fractal Dimension Estimator, описанного в отдельной работе.

3.1. Условная плотность. Суть метода, подробно описанного в [3,4], состоит в подсчете количества точек в шарах разного радиуса. Условность заключается в том, что центр шара является точкой множества. Для корректной работы метода на больших масштабах необходимо учитывать эффекты границы множества [19]. Концентрация внутри шара с радиусом *r* дается формулой

$$n(r) = \frac{1}{N_s(r)} \sum_{i=1}^{N_s(r)} \frac{N_i(r)}{V(r)}, \tag{1}$$

где $N(r)$ - число шаров внутри выборки, $N(r)$ - число точек в шаре, $V(r)$ - объем шара. На средних масштабах данное распределение показывает степенную зависимость $D-3$.

$$G^*(r) = \langle n(r' < r) \rangle_p, \quad (2)$$

где $\langle \dots \rangle_p$ - усреднение по всем точкам выборки.

3.2. *Парные расстояния.* В книге [20] было рассмотрено распределение парных расстояний для множеств с целочисленной размерностью.

$$f(l) = D l^{D-1} (L/2)^{-D} I_{\mu} \left(\frac{D+1}{2}, \frac{l}{2} \right), \quad (3)$$

где D - целочисленная размерность множества, l - расстояние между парой точек, L - наибольшее расстояние внутри множества, $I_{\mu}(p, q)$ - неполная функция Бесселя с $\mu = 1 - l^2/L^2$. При $l \ll L$ имеет место асимптота

$$f(l) \sim l^{D-1}, \quad (4)$$

которая также сохраняется для множеств с дробной размерностью [21,22,14].

3.3. *Сравнение методов.* Для удобного сравнения результатов парных расстояний и условной плотности в конечном итоге рассматриваются графики отношения кривых для фрактала или ГВ к однородной выборке. При такой конфигурации наклон рабочего участка, определяемый условием наименьших квадратов отклонений, в каждом из методов в логарифмических координатах равен $D-3$.

Для бедных множеств $N < 10^3$ в распределениях условной плотности и парных расстояний характерны значительные случайные отклонения от степенной зависимости. Для уменьшения влияния этого эффекта производится усреднение кривых по достаточному числу реализаций данного множества. Осуществляется это путем задания разных нуль-пунктов датчика псевдослучайных чисел. Эта операция проводится как для распределений условной плотности, так и для распределений парных расстояний.

3.4. *Расчет расстояния и светимости.* Метрическое расстояние, выраженное через красное смещение, в стандартной космологической модели дается формулой [4]

$$R(z)_{Mpc} = \frac{c}{H_0} \int_0^z \left(\Omega_v^0 + \Omega_m^0 (1+z')^3 - \Omega_k^0 (1-z')^2 \right)^{1/2} dz', \quad (5)$$

где $H_0 = 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ - постоянная Хаббла, $c = 3 \times 10^{10} \text{ см с}^{-1}$ - скорость света, $\Omega_v^0 = 0.7$, $\Omega_m^0 = 0.35$, $\Omega_k^0 = 0$ - космологические параметры, z - красное смещение. Далее происходит переход от сферических координат к декартовым, поскольку пространство евклидово. Светимость в рамках Λ CDM модели

определяется по формуле

$$L(z) = 4\pi S_{obs} R(z)_{lim}^2 (1+z)^2, \quad (6)$$

где S_{obs} эргс⁻¹см⁻² - поток ГВ, равный отношению принятого излучения в диапазоне 15÷150 кэВ ко времени T_{90} , и z - красное смещение.

3.5. *Модельные каталоги.* Для сравнения с реальной выборкой были смоделированы фрактальные и однородные множества, аналогичные каталогу ГВ. Так как вблизи пояса Галактики имеет место сильное поглощение оптического излучения (приводящего к дополнительной селекции ГВ при наблюдениях их красного смещения), необходимо рассмотреть влияние этого эффекта на оценку фрактальной размерности. Соответственно, рассмотрено два случая, примеры которых на рис.6. В первом берется вся небесная сфера, во втором вырезается полоса от -10 до +10 градусов по галактической широте. Все рассматриваемые выборки ограничены сферой радиуса 8 Гпк.

Для определения фрактальной размерности сразу во всем объеме для всех точек нужно учесть наблюдаемые эффекты селекции, например, эффект Малмквиста. Для этого в качестве модельной видимой функции светимости взяты наблюдаемые профили в сферических слоях с шагом 1 Гпк, представленные на рис.4. Поскольку введение модельной селекции по светимости влияет на распределение условной плотности, рассматривается отношение кривых для фракталов и ГВ к однородным кривым.

4. Результаты.

4.1. *Общие свойства каталога источников ГВ.* Радиальные распределения каталога ГВ показаны на рис.1 (интегральное) и рис.2 (дифференциальное). Распределение времени регистрации события T_{90} в зависимости от красного смещения на рис.3. На данный момент все еще не наблюдается

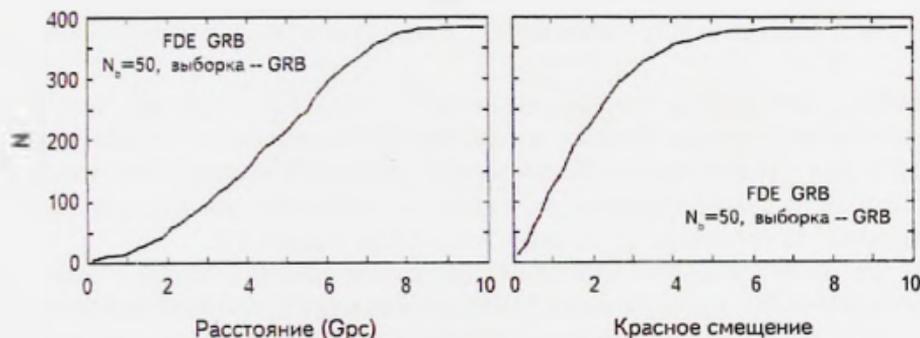


Рис.1. Интегральное распределение ГВ в зависимости от расстояния ($\Delta R = 200$ Мпк) и красного смещения ($\Delta z = 0.2$).

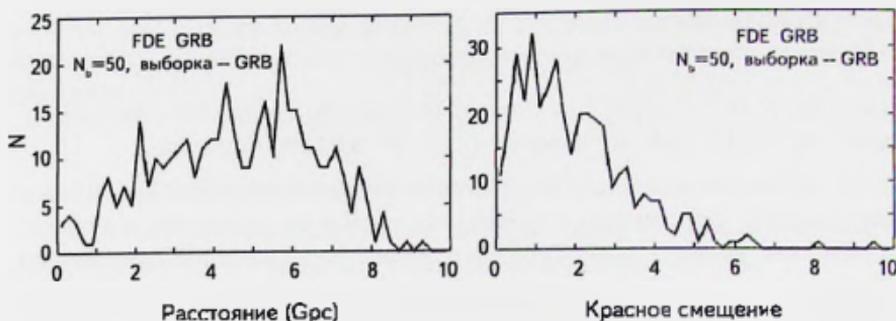


Рис.2 Дифференциальное распределение ГВ в зависимости от расстояния ($\Delta R = 200$ Мпк) и красного смещения ($\Delta z = 0.2$).

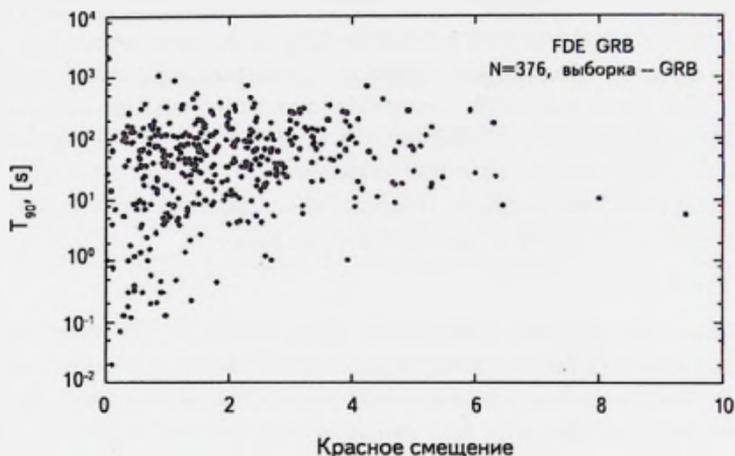


Рис.3. Распределение T_{90} в зависимости от красного смещения z всех гамма-всплесков.

дрейф с увеличением красного смещения в сторону уменьшения времени события, который предсказывает стандартная модель. Наш результат согласуется с [23]. Для определенности в данном вопросе требуется значительное увеличение числа ГВ на больших красных смещениях, а также необходимо исследовать зависимость параметра T_{90} от расстояния до источника ГВ.

ГВ могут служить индикаторами скоплений галактик, поэтому можно рассмотреть близкие пары в пространственном распределении источников ГВ в табл.3. Из 18 пар можно выявить пространственно обособленные структуры из трех и четырех ГВ, а также две пары, в которых расстояние между источниками меньше 100 Мпк на $z \approx 0.013$ и $z \approx 1.43$.

Таблица 3

ИСТОЧНИКИ ГВ С ПАРНЫМ РАССТОЯНИЕМ ДО 300 Мпк

№	Название	$d_{\text{пар}}$	l	b	z
175	111005A	79.4	338.33759	34.63886	0.013
4	100316D		266.91664	-19.78007	0.014
175	111005A	195.6	338.33759	34.63886	0.013
158	060218A		166.86303	-32.86884	0.033
4	100316D	150.1	266.91664	-19.78007	0.014
158	060218A		166.86303	-32.86884	0.033
158	060218A	293.1	166.86303	-32.86884	0.033
94	051109B		100.54662	-19.39992	0.080
234	060505A	264.9	22.09128	-53.71345	0.089
54	060614A		344.08607	-43.94594	0.130
32	061201A	206.0	315.71506	-38.23391	0.111
54	060614A		344.08607	-43.94594	0.130
117	130427A	261.1	206.48629	72.51440	0.340
18	130603B		236.47527	68.43758	0.356
13	110328A	299.3	86.71625	39.42626	0.354
84	151027A		90.49260	28.48382	0.380
25	140903A	276.7	44.40465	50.11996	0.351
89	101213A		37.17510	45.89511	0.414
27	070724A	282.8	184.32601	-73.81347	0.457
315	091127A		197.38677	-66.73665	0.490
22	141212A	242.7	155.24497	-38.01808	0.596
304	130215A		163.06996	-39.75075	0.597
104	150323A	189.0	174.83011	36.29286	0.593
168	110106B		172.91003	-40.47816	0.618
291	080916A	236.0	333.57758	-50.49415	0.689
124	150821A		329.53474	-52.37413	0.755
161	050824A	248.8	122.21283	-40.26635	0.830
77	080710A		116.98198	-43.17503	0.845
77	080710A	291.4	116.98198	-43.17503	0.845
271	060912A		113.49717	-41.34504	0.937
206	160131A	231.1	207.86277	-25.13766	0.970
116	120907A		208.46983	-29.19799	0.970
50	161108A	269.0	221.80332	78.92167	1.159
268	90530		212.46605	77.98286	1.266
48	050822X	77.0	255.27955	-54.45517	1.434
203	050318A		256.44382	-55.23286	1.440

4.2. *Фрактальная размерность.* На рис.5 дано сравнение распределения светимостей ГВ с модельным равномерным каталогом после применения функции селекции по светимости, изображенной на рис.4. Рис.6 демонстрирует визуальные отличия между реальной выборкой ГВ и модельными каталогами для двух геометрий. В случае усеченной небесной сферы выборка представляет

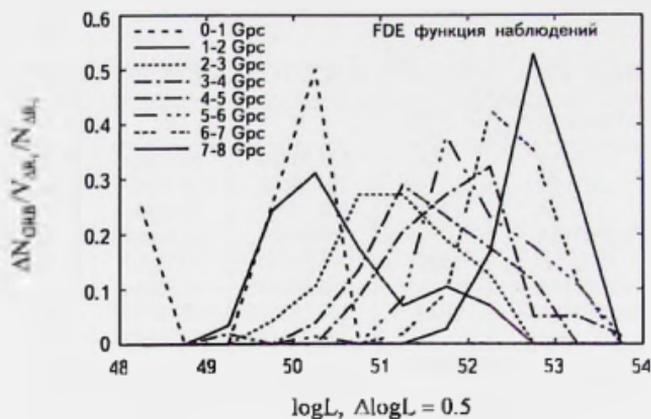


Рис.4. Наблюдаемые распределения светимости ГВ источников в фиксированных интервалах расстояний

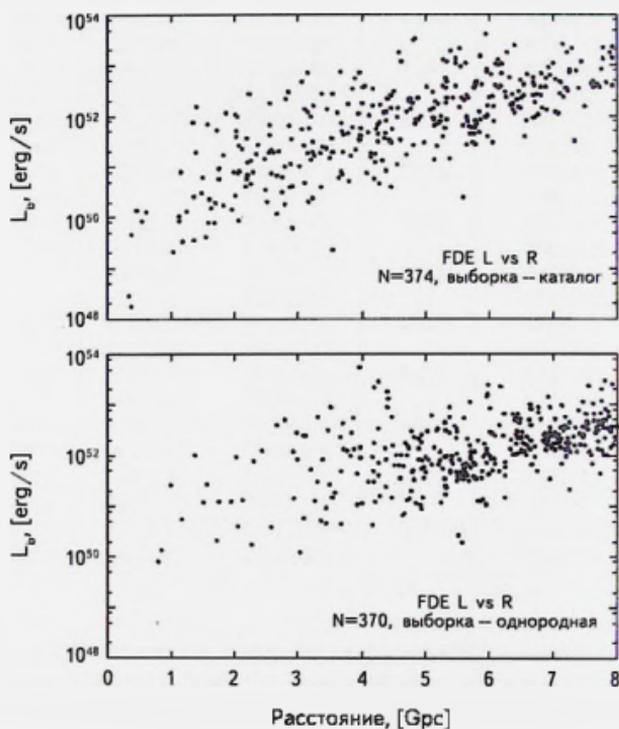


Рис.5. Распределение светимостей каталога ГВ и модельного однородного каталога в зависимости от расстояния.

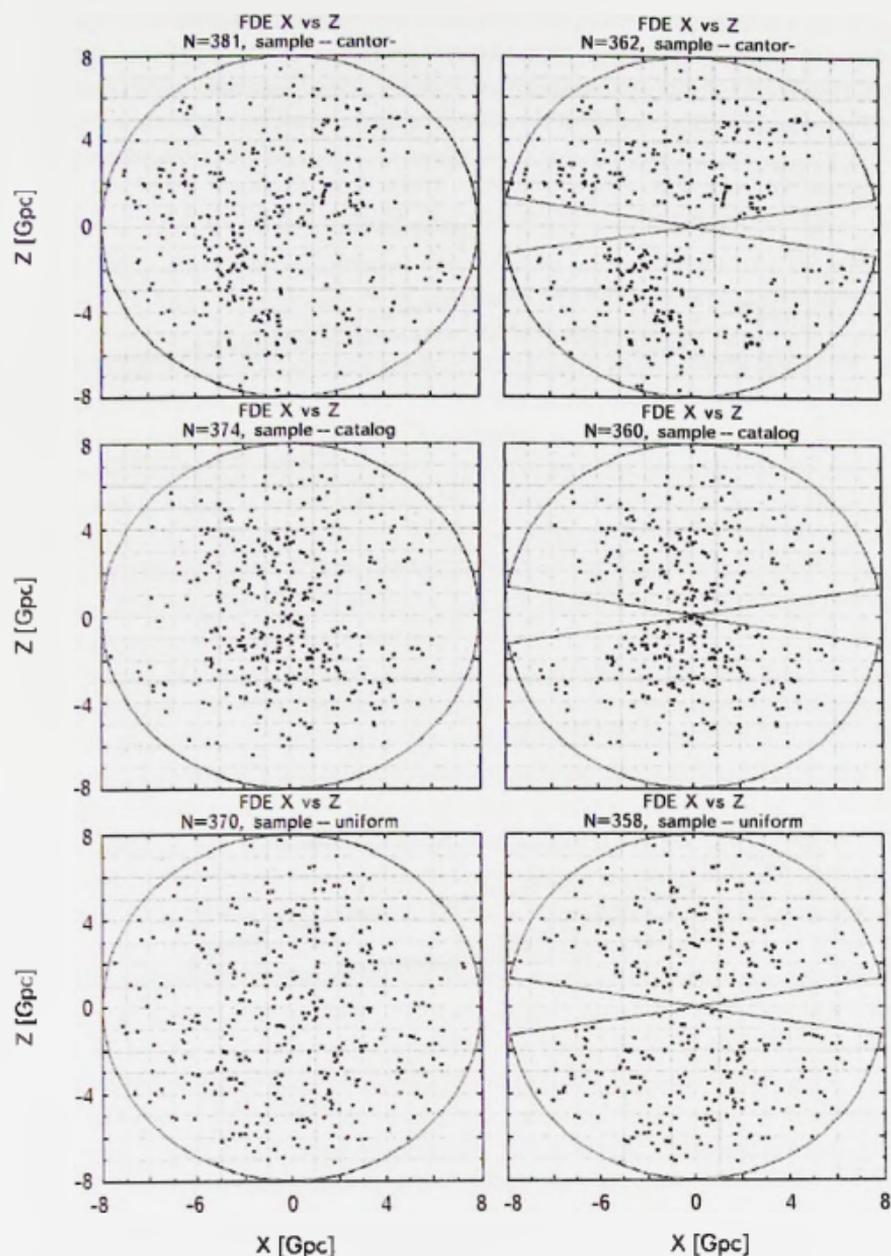


Рис.6. Проекция пространственного распределения на плоскость X-Z для двух случаев геометрической формы выборки. Сверху фрактал $D = 2.5$, в центре каталог ГВ, снизу равномерное множество.

собой суперпозицию двух полушарий. Графики условной плотности и взаимных расстояний приведены на рис.7 и рис.8, соответственно. Представленные графики фракталов есть усредненные кривые по 17 реализациям. Отсюда соответствующие отклонения для точек графиков. Амплитуда отклонений в

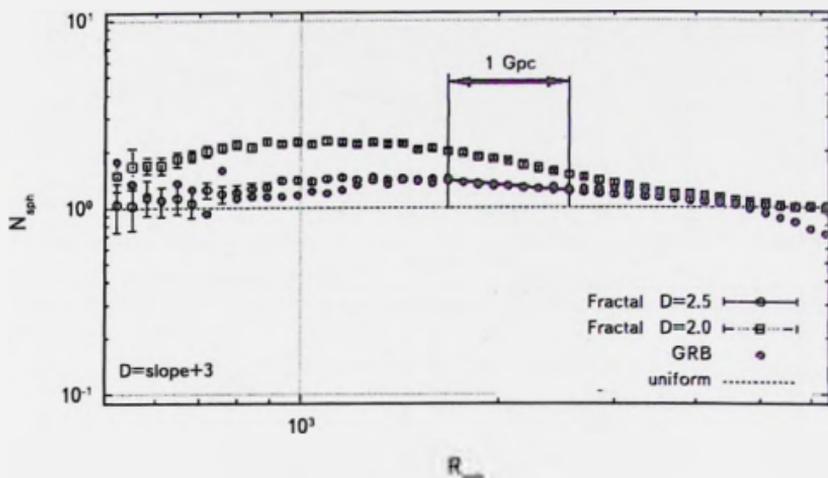


Рис.7. Графики приведенной условной плотности для ГВ (закрашенные круги) и фракталов $D=2.0$ (квадраты) и $D=2.5$ (круги) в случае полной небесной сферы. Единица соответствует однородному распределению.

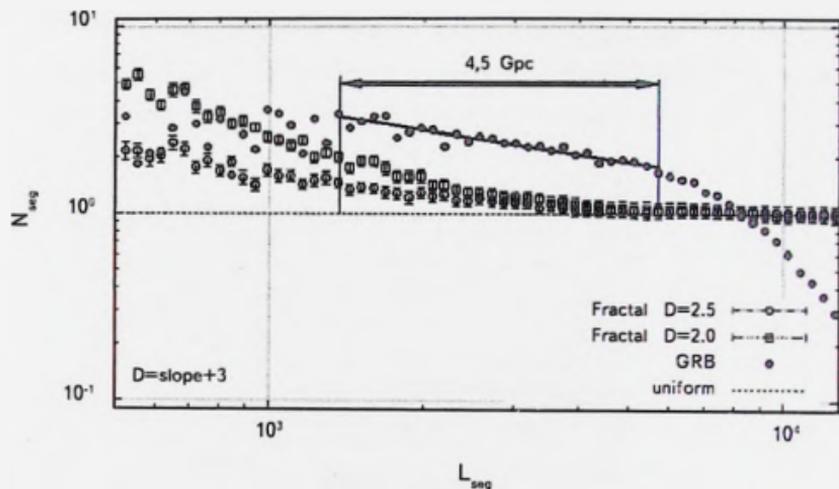


Рис.8. Графики приведенных парных расстояний для ГВ (закрашенные круги) и фракталов $D=2.0$ (квадраты) и $D=2.5$ (круги) в случае усеченной небесной сферы. Единица соответствует однородному распределению.

методе парных расстояний вдвое больше, чем в условной плотности. Во всех генерациях фрактальных и однородных выборок, к которым непосредственно применяются методы, число точек примерно равно числу ГВ. Это делается путем создания избытка точек в изначальной генерации, а затем их равномерного отбора.

Для более точного результата нужно учесть избыток наблюдаемого количества ГВ на малых радиальных масштабах, который обсуждается в [24].

5. *Выводы.* Для модельных множеств с числом точек $N < 10^3$ точность оценки фрактальной размерности достигает $\Delta D = 0.06$ для условной плотности и $\Delta D = 0.03$ для парных расстояний до введения модельной функции светимости и до вырезания галактического пояса. После введения ограничения по геометрии и по светимости при условии сохранения общего числа точек точность методов упала вдвое. Примечательно, что в условной плотности в качестве параметра рассматривается радиус шара, а не диаметр, поэтому при сравнении методов можно умножить горизонтальную ось на два. Главными параметрами, определяющими точность оценки фрактальной размерности, являются число точек и количество генераций. В процессе проверки точности также было выявлено преимущество метода парных расстояний перед условной плотностью на малых масштабах.

Таким образом, кривая парных расстояний выходит на степенную зависимость уже с масштаба, равного удвоенному размеру элементарной ячейки фрактальной структуры. В тот же момент условная плотность начинает работать с масштаба, который в 4-8 раз больше размера элементарной ячейки, в зависимости от представительности выборки и величины фрактальной размерности. На больших масштабах оба метода испытывают проблемы. В условной плотности происходит усреднение по малому числу шаров, а в парных расстояниях распределение ведет себя непредсказуемым образом или близким к однородному.

Для случая полной небесной сферы оценка фрактальной размерности распределения источников ГВ составила $D = 2.6 \pm 0.12$ на $R = 1.5 \div 2.5$ ($d = 3 \div 5$) Гпк для условной плотности и $D = 2.6 \pm 0.06$ для $l = 1.5 \div 6.0$ Гпк. В случае с вырезанным галактическим поясом условная плотность не дает однозначного результата, и ее распределение не отличимо от однородного. Парные расстояния демонстрируют устойчивую степенную зависимость $D = 2.6 \pm 0.06$ и практически не меняют интервал линейного участка $l = 1.5 \div 5.5$. Таким образом, на масштабах $\approx 3 \div 5$ Гпк есть степенная корреляция между методами.

На размерностях близких к $D = 3$ с учетом селекционных эффектов методы дают систематически завышенную оценку для модельных множеств примерно

на $\Delta D = 0.1$. С учетом данного смещения нужно сделать коррекцию результата для получения более адекватной оценки. Таким образом, оценка фрактальной размерности наблюдаемого распределения ГВ составляет $D = 2.55 \pm 0.06$.

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Университетский пр. 28, Санкт-Петербург, 198504, Россия, e-mail: arhath.sis@yandex.ru

² Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Пулковское шоссе д. 65 кор. 1, Санкт-Петербург, 196140, Россия

SPACE DISTRIBUTION PROPERTIES OF GAMMA-RAY BURST SOURCES

S.I.SHIROKOV¹, A.A.RAIKOV², Yu.V.BARYSHEV¹

Space distribution analysis of 384 gamma-ray burst sources (GRB) with known redshifts is performed. The GRB sample is based on the Swift program and includes fluences, coordinates and redshifts. The conditional density method and the pairwise distances method are used. The comparison of GRB space distribution with fractal and uniform model catalogs is applied for correction of visible selection effects. Malmquist bias is modeled by approximated apparent luminosity function of GRB. Also the case with absorption of Galactic belt is considered. This approach allows to study space structure of a whole sample without additional cuts. The fractal dimension estimation is $D = 2.55 \pm 0.06$ on scales $2+6$ Gpc.

Key words: *gamma-ray bursts: large scale structure: fractal dimension*

ЛИТЕРАТУРА

1. J.R.Gott III, M.Jurić, D.Schlegel et al., *Astrophys. J.*, **624**, 463, 2005.
2. M.Einasto et al., *Astron. Astrophys.*, **595**, A70, 2016.
3. A.Gabrielli, F. Sylos Labini, M.Joice, L.Pietronero, *Statistical Physics for Cosmic Structures* (Springer, Berlin, 2005).
4. Yu.V.Baryshev, P.Teerikorpi, *Fundamental Questions of Practical Cosmology, Astrophysics and Space Science Library*, **383** (Springer Science, Dordrecht, 2012).
5. Д.И.Теханович, Ю.В.Барышев, *Астроф. бюлл. САО РАН*, **71**, 167, 2016.

- (*Astroph. Bull.*, **71**, 155, 2016).
6. *H.Lietzen, E.Tempel, L.J.Liivamagi et al.*, *Astron. Astrophys.*, **588**, L4, 2016.
 7. *Н.В.Набоков, Ю.В.Барышев*, *Астрофизика*, **53**, 117, 2010, (*Astrophysics*, **53**, 101, 2010).
 8. *С.И.Широков, Д.И.Теханович, Ю.В.Барышев*, *Вестник СПбГУ*, **59**, 659, 2014.
 9. *С.И.Широков, Н.Ю.Довягин, Ю.В.Барышев, В.Л.Горахов*, *ЛЖ*, **93**, 546, 2016, (*Astron. Rep.*, **60**, 563, 2016).
 10. *Ming-Huo Li, Hai-Nan Lin*, *Astron. Astrophys.*, **582**, A111, 2015.
 11. *А.А.Райков, В.В.Орлов, О.Б.Бекетов*, *Астрофизика*, **53**, 396, 2010, (*Astrophysics*, **53**, 396, 2010).
 12. *L.G.Balazs, Z.Bagoly, J.E.Hakkila et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **452**, 2236, 2015.
 13. *Р.В.Герасим, В.В.Орлов, А.А.Райков*, *Астрофизика*, **58**, 2, 2015, (*Astrophysics*, **58**, 204, 2015).
 14. *А.А.Раиков, В.В.Орлов*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **418**, 2558, 2011.
 15. *A.K.Bhowmick, T. Di Matteo, Y.Feng, F.Lanusse*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 2017.
 16. https://swift.gsfc.nasa.gov/archive/grb_table/
 17. *J.S.Wang, F.Y.Wang, K.S.Cheng, Z.G.Dai*, *Astron. Astrophys.*, **585**, A68, 2016.
 18. <http://www.grbcatalog.org>
 19. *F.S.Labini, M.Montuori, L.Pietronero*, *Phys. Rept.*, **293**, 61, 1998.
 20. *M.G.Kendall, P.A.P.Moran*, *Geometrical Probability*, (Griffin, London 1963).
 21. *P.Grassberger, I.Procaccia*, *Phys. Rev. Lett.*, **50**, 346, 1983.
 22. *P.Grassberger, I.Procaccia*, *Physica D: Nonlinear Phenom.*, **9**, 189, 1983.
 23. *D.Kocevski, V.Petrosian*, *Astrophys. J.*, **765**, 116, 2013.
 24. *H.Yu, F.Y.Wang, Z.G.Dai, K.S.Cheng*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **218**, 12, 2015.

