

УДК 524.8

ГЛОБАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ЛОКАЛЬНОЙ ВСЕЛЕННОЙ СОГЛАСНО ОБЗОРУ 2MRS

© 2016 Д. И. Теханович*, Ю. В. Барышев**

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 198504 Россия

Поступила в редакцию 06.09.2016; принята в печать 24.02.2016

Приводятся результаты статистического анализа пространственного распределения галактик каталога 2MRS, содержащего сведения о 43533 красных смещениях галактик ИК-обзора всего неба 2MASS. Благодаря уникальным свойствам 2MRS-обзора, таким как покрытие 90% небесной сферы, отбор галактик в ИК-диапазоне, полнота включения старого звездного населения галактик, малость эффектов поглощения пылью, малость k - и e -поправок, получены статистические характеристики глобального распределения галактик Локальной Вселенной. Учтены важнейшие методические факторы, приводящие к искажению теоретически ожидаемых соотношений по сравнению с непосредственно наблюдаемыми. Для полных по объему (VL) выборок галактик построены радиальные подсчеты $N(R)$, статистика $SL(R, r)$ и полная корреляционная функция (условная плотность) $\Gamma(r)$. Наблюдаемая условная плотность $\Gamma(r)$ в пространстве красных смещений не зависит от светимости галактик и имеет вид степенной функции с наклоном $\gamma \approx 1.0$ в большом интервале масштабов от 0.1 Мпк до 100 Мпк. Статистические характеристики пространственного распределения галактик каталога 2MRS сравниваются с соответствующими характеристиками искусственных каталогов: стохастические фрактальные распределения и галактики каталога Millennium.

Ключевые слова: космология: крупномасштабная структура Вселенной — космология: наблюдения

1. ВВЕДЕНИЕ

Локальная Вселенная (Local Universe) — это область космического пространства радиусом $R < 300$ Мпк ($z < 0.1$) вокруг земного наблюдателя. Она является наиболее изученной частью Вселенной и представляет собой результат эволюции галактик и их систем за хаббловское время. В частности, реально наблюдаемое пространственное распределение галактик Локальной Вселенной дает возможность проверки предсказаний моделей образования и эволюции крупномасштабной структуры Вселенной [1, 2].

Современные исследования Локальной Вселенной открыли большое разнообразие систем галактик — группы, скопления, войды, сверхскопления, которые изучаются как индивидуальные объекты и как элементы глобального распределения галактик [3–11]. Наибольшие структурные образования имеют вид филаментов, стен и войдов между ними, а их линейные размеры достигают сотен мегапарсек [7, 11, 12].

Одной из наиболее фундаментальных статистических характеристик общего пространственного распределения галактик, содержащего сложные наблюдаемые структуры (филаменты, войды, оболочки, стены), является фрактальная размерность глобальной структуры в целом. Фрактальный подход к анализу распределения галактик впервые был применен в работах Мандельброта, Пиблса, Пиетронеро, Силоса Лабини и др. [1, 13–16]. Подробный обзор истории и перспектив фрактального подхода к исследованию крупномасштабного распределения галактик изложен в [17].

Фрактальная размерность, определённая из полной корреляционной функции в пространстве красных смещений, представляет собой простейшую напрямую определяемую величину, характеризующую пространственное, кинематическое и динамическое состояние Локальной Вселенной. Её оценка получается из степенного наклона полной корреляционной функции без использования априорных предположений об эволюции небарионной темной материи и её связи с барионной материей (галактиками), а также о виде распределения пекулярных скоростей галактик. Учет реальных пекулярных скоростей галактик требует дальнейшего развития методов измерения расстояний до

*E-mail: foobat@yandex.ru

**E-mail: yubaryshev@mail.ru

галактик, не зависящих от красных смещений, а также выполнения трудоемких наблюдательных программ массового измерения таких расстояний [18].

Отметим, что стохастические фрактальные структуры естественно возникают в физике как результат динамической эволюции сложных систем. Физические фракталы — это дискретные стохастические иерархические системы, характеризующиеся степенной корреляционной функцией. В частности, фрактальные структуры возникают в турбулентных потоках [19]. Детерминированный хаос нелинейных динамических систем характеризуется фрактальной размерностью, которая является мерой странности странных аттракторов [20]. Фазовые переходы и термодинамика самогравитирующих систем также характеризуются образованием фрактальных структур [21, 22], однако многие важные вопросы этих исследований пока остаются открытыми.

В настоящей работе мы приводим результаты статистического анализа пространственного распределения галактик каталога 2MRS [23], содержащего красные смещения 43533 галактик из ИК-обзора всего неба 2MASS. Особое внимание мы уделяем вопросам учета эффектов селекции, неизбежно присутствующих в наблюдательных данных и искажающих теоретически ожидаемые соотношения по сравнению с непосредственно наблюдаемыми. В частности, существенную роль играют такие характеристики обзоров, как угловой растров наблюдаемой непрерывной выпуклой области, предельная звездная величина обзора, полное количество галактик и среднее расстояние между ними, размер максимальной сферы, полностью погруженной в объеме выборки, число независимых сфер, помещающихся в объем выборки. Кроме того, необходимо учитывать исходные предположения о применимости используемых математических моделей интерпретации данных, таких как использование газодинамических непрерывных величин или использование дискретных фрактальных структур, а также эргодичность и стационарность реальных выборок галактик.

В разделе 2 описаны используемые наблюдательные данные и построены VL-выборки, необходимые для применяемых статистических методов анализа. В разделе 3 приводятся результаты статистики $N(R)$ и $SL(R, r)$. В разделе 4 рассмотрена полная корреляционная функция (условная плотность) $\Gamma(r)$ и результаты её применения к VL-выборкам. В разделе 5 рассмотрены аналогичные статистические характеристики для случая искусственных каталогов галактик — стохастических фрактальных распределений и выборок каталога Millennium. В разделе 6 обсуждаются результаты сравнения реально наблюдаемого распределения

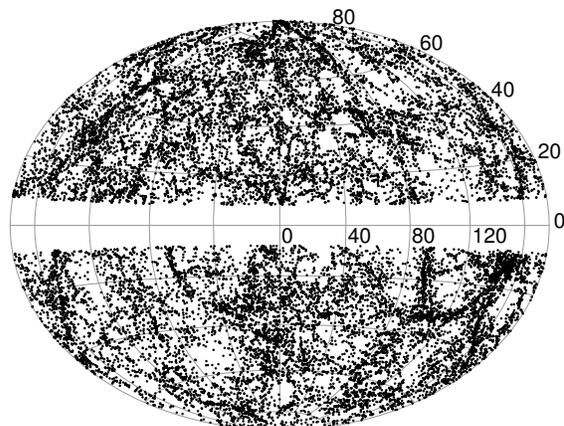


Рис. 1. Распределение галактик из каталога 2MRS на небесной сфере в галактической системе координат. Показаны только галактики в диапазоне $50 < R < 150$ Мпк и с $|b| > 8^\circ$.

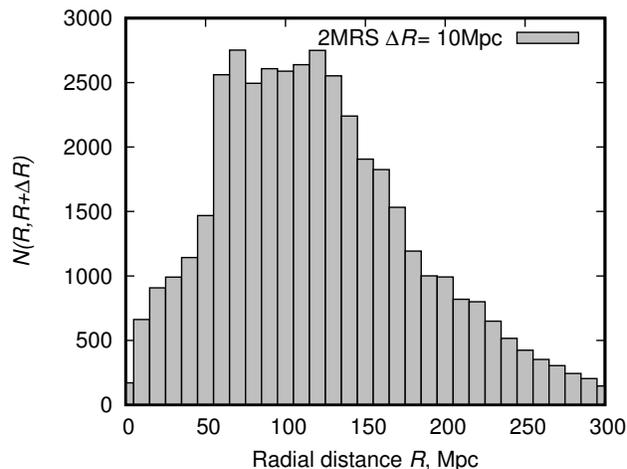


Рис. 2. Радиальное распределение галактик из каталога 2MRS в слоях толщиной $\Delta R = 10$ Мпк.

галактик 2MRS с искусственными каталогами и приводятся основные выводы.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В данной работе мы используем каталог 2MASS XSC Redshift Survey (2MRS) [23], который представляет спектральную часть самого большого ИК-обзора галактик Локальной Вселенной (2MASS). Каталог 2MRS содержит красные смещения и видимые звездные величины в инфракрасных полосах для всех галактики с видимой звездной величиной $K_s < 11^m 75$ и избытком цвета $E(B - V) < 1.0$ в области $|b| > 5^\circ$ (для центра Галактики, $l > 330^\circ$ или $l < 30^\circ$, $|b| > 8^\circ$) (рис. 1). Общее число галактик 43533, и, охватывая 90%

небесной сферы, каталог 2MRS имеет глубину порядка 300 Мпк. Благодаря отбору галактик в ИК-диапазоне, все эффекты межзвездного поглощения на порядок меньше, чем в оптическом. Кроме того, поправки за красное смещение (*k-correction*) и эволюцию (*e-correction*) внутри объема выборок в ИК-диапазоне для Локальной Вселенной оказываются несущественными. Полнота 2MRS-обзора до предельной звездной величины $K_s = 11.75$ составляет 97%. Таким образом, каталог 2MRS является статистически однородной выборкой галактик, которая покрывает почти всю небесную сферу и представляет собой «fair sample» (представительную выборку) пространственного распределения галактик в Локальной Вселенной¹.

Из каталога 2MRS мы использовали данные о положении (галактические координаты l, b), красном смещении (z , в барицентрической системе отсчета) и видимой звездной величине в полосе K (K_s). Для перехода к пространственным декартовым координатам красные смещения преобразовывались в метрические R с использованием стандартного соотношения:

$$R(z) = \frac{c}{H} \int_0^1 \frac{dy}{y\sqrt{\Omega_M/y + \Omega_\Lambda y^2}}, \quad (1)$$

где $H = 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$, $\Omega_M = 0.25$ и $\Omega_\Lambda = 0.75$. Из радиальных расстояний и видимых звездных величин были определены абсолютные звездные величины:

$$M_K = K_s - 5 \lg(R(z) \times (1 + z)) - 25. \quad (2)$$

Как отмечено выше, при вычислении абсолютной звездной величины мы не используем поправки за красное смещение и эволюцию, так как на рассматриваемых масштабах для нашего анализа они пренебрежимо малы. Малые поправки за поглощение в Галактике учитываются в самом каталоге 2MRS.

2.1. Полные по объему выборки каталога 2MRS

Наличие фиксированной предельной звездной величины в отборе галактик 2MRS-обзора приводит к сильной радиальной селекции относительно наблюдателя. Для устранения этого эффекта селекции мы использовали стандартный подход построения полных по объёму (VL) выборок, который применялся в работах [15, 24, 25].

¹Следует отметить, что полнота 2MRS-каталога, естественно, относится к набору его фиксированных внутренних ограничений. В частности, критерии отбора ИК-галактик исходного 2MASS-обзора приводят к ограниченной видимости галактик низкой поверхностной яркости и с преобладающим голубым населением.

Основные параметры VL-выборок из 2MRS: ограничения по радиальному расстоянию и абсолютной звездной величине в полосе K_s (R_{\max} и M_{\max}), общее число галактик N в таких пределах и в полушере $l > 8^\circ$ (S1) и $l < -8^\circ$ (S2), отношение числа галактик к объёму выборки и среднее расстояние до ближайшего соседа $\langle R_{\text{near}} \rangle$

	R_{\max} , Мпк	M_K	N	N/V , Мпк ⁻³	$\langle R_{\text{near}} \rangle$, Мпк
S1 VL0	50	-21.79	1749	$7.76e - 03$	1.54
S1 VL1	138	-24.02	5567	$1.17e - 03$	3.11
S1 VL2	200	-24.85	3205	$2.22e - 04$	5.99
S1 VL3	250	-25.37	1566	$5.56e - 05$	10.02
S2 VL0	50	-21.79	900	$3.99e - 03$	1.95
S2 VL1	138	-24.02	5333	$1.13e - 03$	3.12
S2 VL2	200	-24.85	3466	$2.40e - 04$	5.75
S2 VL3	250	-25.37	1814	$6.44e - 05$	9.58

На основе наблюдаемого соотношения абсолютная звездная величина–радиальное расстояние (рис. 3) выделяются значения M_{lim} и R_{lim} таким образом, чтобы все объекты ярче фиксированной светимости попадали в выборку до определенного расстояния. Всего мы выделили четыре набора M_{lim} и R_{lim} : $(-21.79, 50)$, $(-24.02, 138)$, $(-24.85, 200)$, $(-25.37, 250)$. Исходя из них, было построено восемь VL-выборок в северном и южном полушариях ($l > 8^\circ$ и $l < -8^\circ$, обозначенные S1 и S2 соответственно); основные их параметры представлены в таблице.

3. РАДИАЛЬНЫЕ ПОДСЧЕТЫ И SL-СТАТИСТИКА VL-ВЫБОРОК

Согласно определению дискретного фрактального распределения [13], среднее число объектов в сферах, описанных около точек p этого распределения, будет меняться по степенному закону в зависимости от радиуса r рассматриваемых сфер $\langle N(r) \rangle_p = (r/r_0)^D$. Показатель D не может превышать размерность пространства в которое помещено распределение, он называется фрактальной размерностью и является основной характеристикой фрактального распределения.

В определение фрактальной размерности входит осреднение по всем точкам множества, поэтому подсчёт точек только из одного центра (положение наблюдателя) может существенно отличаться от истинного поведения $\langle N(r) \rangle_p$. С другой стороны,

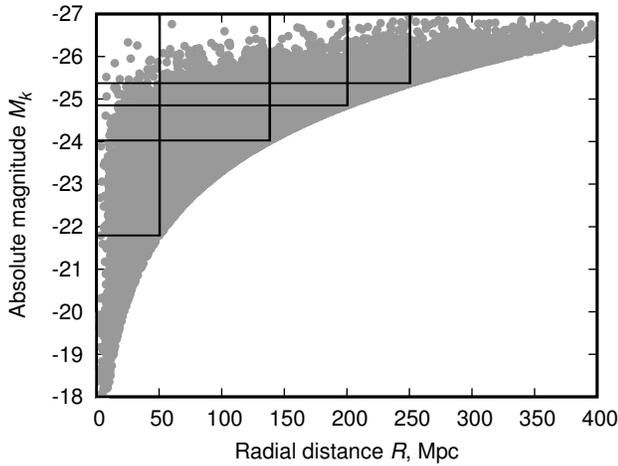


Рис. 3. Распределение галактик из каталога 2MRS в соотношении абсолютная звёздная величина—расстояние до наблюдателя. Черными линиями обозначены границы используемых нами VL-выборок.

изучение радиальных распределений вокруг наблюдателя позволяет сделать грубую оценку характера изменения $N(R) \propto R^\alpha$ при минимуме дополнительных предположений.

Мы рассмотрели радиальные распределения для разных полных по объему выборок, и подсчеты для выборки VL2 представим на рис. 4. Радиальные распределения вокруг наблюдателя в разных полусферах различаются на расстояниях до 100 Мпк, после чего их изменение становится схожим и близким к R^3 . Примечательно, что если рассмотреть радиальные подсчеты вокруг галактик, взятых из центральных областей VL-выборок, то оценка $N(R) \propto R^\alpha$ будет отличаться от полученной при рассмотрении подсчетов вокруг наблюдателя в нашей Галактике. Оценка α на масштабах 40–80 Мпк для галактик из центра в северной области VL2 оказывается равна $\alpha = 2.1$, а в южной — 3.1. Среднее значение показателя степени α близко к найденному ранее для выборки галактик KLUN [26]. рис. 4 показывает большие флуктуации в поведении радиальных подсчетов галактик из одной точки наблюдения.

В работе [27] предложена новая статистическая характеристика (масштаб—расстояние (SL)) неоднородных дискретных распределений, характеризующая флуктуации чисел галактик в тестовых шарах в зависимости от расстояния до наблюдателя. На рис. 5 представлена SL-статистика $N_i(R, r)$ (число точек в сфере радиуса r с центром в i -той точке, для которой расстояние до наблюдателя равно R) для VL2-выборки из северной полусферы и масштаба $r = 30$ Мпк. Дополнительно на этом рисунке обозначено изменение

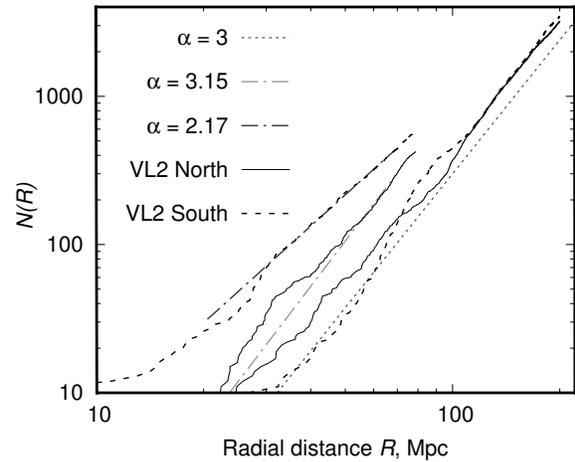


Рис. 4. Пример подсчета числа галактик в выборке VL2. Сплошной и штриховой линиями обозначены подсчеты в северном и южном полушариях. Для каждого полушария подсчеты выполнены вокруг нашей Галактики (до 200 Мпк) и вокруг ближайшей к центру выборки.

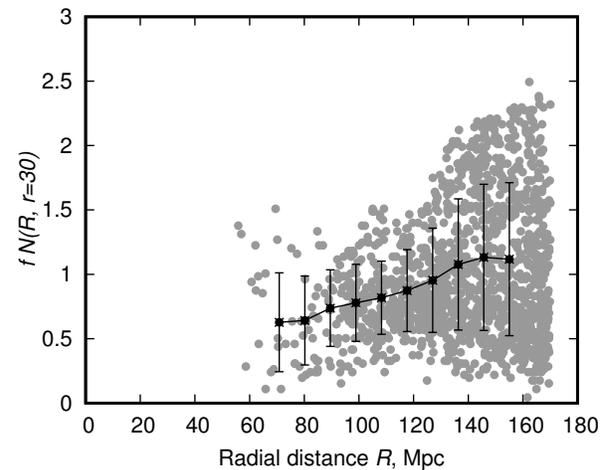


Рис. 5. Нормированная SL-статистика для VL2 из северного полушария. Дополнительно обозначено среднее значение $N_i(R, r = 30)$ в бинах по радиальному расстоянию с размером $\Delta R = 30$ Мпк. Усы ошибок соответствуют среднеквадратическому отклонению в каждом бине.

среднего значения $N_i(R, r = 30)$ с ростом R ; для набора значений R_k считалось среднее значение в области $R_k - 15 < R < R_k + 15$. Усы погрешности соответствуют среднеквадратическому отклонению в каждом бине.

SL-статистика проверяет также выполнение условия, необходимого для «self-averaging» (самоусреднения): наличие угловой и трансляционной инвариантности выборки и, в частности, отсутствие систематического изменения (в зависимости от расстояния R) числа точек в шарах, которое может

быть обусловлено наличием неоднородностей с размерами, превышающими размер выборки [27]. Рисунок 5 показывает наличие систематического роста среднего и разброса SL-статистики с расстоянием, что означает наличие больших структур в выборке 2MRS-галактик.

4. ПОЛНАЯ КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ФУНКЦИЯ VL-ВЫБОРОК

4.1. Общее описание

Для исследования корреляционных свойств распределения галактик мы используем полную корреляционную функцию (условную плотность), которая впервые была введена для описания распределения галактик в работе [14] и подробно изучена в монографии [16]. Она была использована для изучения многих каталогов галактик [15, 28, 29]. Полная корреляционная функция точечного стохастического множества в d -мерном пространстве задается соотношением:

$$\Gamma_d(\mathbf{r}_{12}) = \frac{\langle n(\mathbf{r}_1)n(\mathbf{r}_2) \rangle}{\langle n(\mathbf{r}) \rangle^2}, \quad (3)$$

где $n(\mathbf{r}_i)$ — концентрация частиц в объеме dV_i вокруг точки i с координатами \mathbf{r}_i , $\mathbf{r}_{12} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$ — вектор расстояния между точками 1 и 2, $\langle x \rangle$ — среднее по ансамблю от величины x .

4.1.1. Интегральная условная плотность

Для рассматриваемой выборки галактик статистическая оценка полной корреляционной функции, называемой также условной плотностью, определяется как

$$\Gamma_d(r) = \frac{1}{N_c(r)} \sum_{i=1}^{N_c(r)} \frac{N_i(r)}{V(r)}, \quad (4)$$

где $N_i(r)$ — это число точек в сферическом объеме $V_d(r)$ d -мерного пространства, описанном вокруг i -той точки, и $N_c(r)$ — это число центров тестовых шаров, т. е. точек около которых этот объем описывается. При этом важно учитывать, что при осреднении нельзя выходить за объем изначального распределения, что существенно сказывается на самых больших масштабах, т.е. для тестовых шаров максимальных размеров. Это условие сильно ограничивает доступные для изучения масштабы при рассмотрении распределений галактик, так как, строго говоря, для надежного вычисления условной плотности на некотором масштабе нам необходимо рассматривать на порядок большую сферическую непрерывную область.

4.1.2. Статистическая погрешность оценки условной плотности

Формула (4) фактически представляет выборочное среднее значение числа частиц во всех тестовых шарах рассматриваемого объема выборки. Если в качестве формальной меры погрешности оценки значений условной плотности рассматривать выборочную дисперсию оценки среднего, то боксы ошибок практически для всех значений масштабов меньше толщины соответствующих линий на графиках. Существенно более важным оказывается учет различных факторов, приводящих к искажению истинной формы условной плотности рассматриваемого пространственного распределения галактик.

4.2. Факторы, искажающие оценку полной корреляционной функции

При получении оценки условной плотности все точки рассматриваемой выборки галактик считаются статистически равнозначными. Однако вследствие явных и скрытых эффектов селекции, неизбежно присутствующих в наблюдательных данных, происходит искажение теоретически ожидаемых соотношений по сравнению с непосредственно наблюдаемыми.

Особенно важным оказывается эффект ограниченности рассматриваемого объема выборки галактик, из-за которого поведение условной плотности на масштабах, близких к размерам выборки, может существенно изменяться при рассмотрении более глубоких выборок. Причиной этому служит то, что для надежного определения условной плотности можно использовать только полностью включенные в границы выборки сферы, поскольку распределение галактик вне объема выборки неизвестно². Из-за этого, начиная с некоторых масштабов, число независимых сфер, по которым находится среднее значение, начинает быстро уменьшаться в зависимости от рассматриваемого масштаба и их центры покрывают всё меньшую область, а число независимых (непересекающихся) тестовых объемов убывает еще быстрее.

Важным искажающим фактором является также ограниченность выборки по направлениям на небесной сфере. Этот эффект приводит к отсутствию осреднения по угловым координатам. Поэтому обзоры всего неба дают существенно более надежные оценки статистических параметров распределений галактик, чем обзоры с малым покрытием неба.

²Отметим, что в методе Дэвиса—Пиблса [30] для вычисления приведенной корреляционной функции $\xi(r)$ используется предположение о постоянстве среднего как внутри, так и вне объема выборки.

Помимо этого, из-за дискретности и конечности числа точек в распределении, диапазон масштабов, доступных для исследования методом условной плотности, имеет и нижнюю границу. Естественной оценкой масштаба, начиная с которого оценка условной плотности становится значимой, является среднее расстояние до ближайшего соседа $\langle R_{\text{near}} \rangle$. Нижняя граница надежного определения условной плотности будет определяться долей пустых сфер в шарах малых масштабов.

В общем случае, т.е. для произвольного распределения, нет аналитических соотношений, определяющих достоверность оценки условной плотности. Из опыта рассмотрения искусственных фрактальных распределений можно использовать жесткий критерий «надёжности» определения условной плотности: необходимо, чтобы число сфер $N_c(r)$, по которым происходит осреднение, составляло не менее половины от общего числа точек в рассматриваемой выборке. Величину, которая бы характеризовала отношение $N_c(r)$ к N , мы определили как $\nu(r) = N_c(r)/N$. Очевидно, что существенный вклад в изменение $\nu(r)$ и в ошибку определения условной плотности оказывает геометрия используемой выборки. Так, если рассмотреть равномерно заполненную сферу с радиусом $R = 300$ Мпк, то условию $\nu(r) > 0.5$ будут удовлетворять масштабы, меньшие чем $r_{\text{max}} \approx 61$ Мпк, в то время как если рассматривать только полусферу, то это значение уменьшится до $r_{\text{max}} \approx 38$ Мпк, а для $1/8$ сферы — $r_{\text{max}} \approx 23$ Мпк.

Таким образом, существенными параметрами выборок, которые необходимо контролировать при корреляционном анализе пространственного распределения галактик, являются:

- угловой раствор наблюдаемой непрерывной области, в которой определена выборка галактик;
- предельная звездная величина обзора, обрезание сверху и снизу функции светимости, влияние малости объема на малых расстояниях от наблюдателя;
- полное количество галактик и среднее расстояние между ними;
- размер максимальной сферы, полностью погруженной в объеме выборки, число сфер в зависимости от масштаба и число независимых сфер;
- учет исходных предположений используемых статистических методов анализа данных, в частности, необходимость выполнения условия представительности статистических средних величин («self-averaging»)[27].

4.3. Трехмерная условная плотность

Для VL-выборок 2MRS-галактик была оценена условная плотность (4). Результат для восьми VL-выборок представлен на рис. 6. Степенной наклон условной плотности $\Gamma(r) \sim r^{-\gamma}$ имеет одну и ту же величину для совокупности всех выборок с показателем γ , близким к 1 в области масштабов, покрываемых соответствующей VL-выборкой. Этот наклон соответствует фрактальной размерности $D \approx 2$.

Поведение условной плотности на малых масштабах искажается из-за конечного среднего расстояния между ближайшими соседями, которое увеличивается в пределах примерно от 1.5 Мпк для VL0 до 10 Мпк для VL3. Численный эксперимент с фрактальными структурами различной размерности показал, что корректный наклон условной плотности на малых масштабах виден с радиусов тестовых шаров $r \sim 0.1R_{\text{near}}$. Таким образом, степенное поведение условной плотности наблюдается с масштабов порядка 0.1 Мпк.

На больших масштабах поведение условной плотности искажается вследствие резкого уменьшения числа независимых тестовых шаров из-за требования полного погружения шара в объем выборки. Это ограничение начинает сильно влиять с масштабов $r \sim 10$ Мпк для выборки VL0, достигая $r \sim 70$ Мпк для выборки VL3. Такое поведение условной плотности согласуется с продолжением истинного наклона $\gamma = 1$ вплоть до масштабов порядка 100 Мпк.

Для каждой выборки выделены масштабы, превышающие среднее расстояние до ближайшего соседа в данной выборке, и одновременно для которых $\nu(r) > 50\%$. Важнейшим результатом, следующим из сравнения Γ для выборок с разной пороговой светимостью, является параллельность соответствующих графиков. Это свидетельствует о независимости степенного наклона (т.е. характера кластеризации) от рассматриваемого интервала ИК-светимостей галактик.

На рис. 7 условная плотность для VL-выборок представлена только в описанном диапазоне и нормирована таким образом, что $\Gamma(r = 10) = 1$. Если явным образом аппроксимировать условную плотность для каждой выборки степенной функцией, то средний показатель получается $\gamma_{\text{ave}} = 1.03 \pm 0.05$.

Формальный наклон условной плотности на масштабах $25 < r < 60$ Мпк и $40 < r < 80$ Мпк для VL2 и VL3 соответственно оказывается равен $\gamma_{\text{ave}} = 0.46 \pm 0.08$. Однако, как отмечено выше, на этих масштабах становится существенным эффект ограниченности объема. Кроме того, для соответствующих выборок условная плотность в северном и южном полушариях изменяется

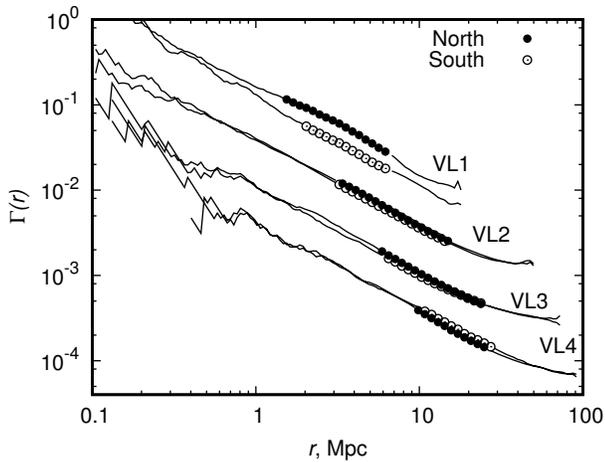


Рис. 6. Условная плотность для VL-выборок галактик 2MRS. Крупными точками выделены значения в диапазоне масштабов $r > \langle R_{\text{near}} \rangle$ и $\nu(r) > 50\%$.

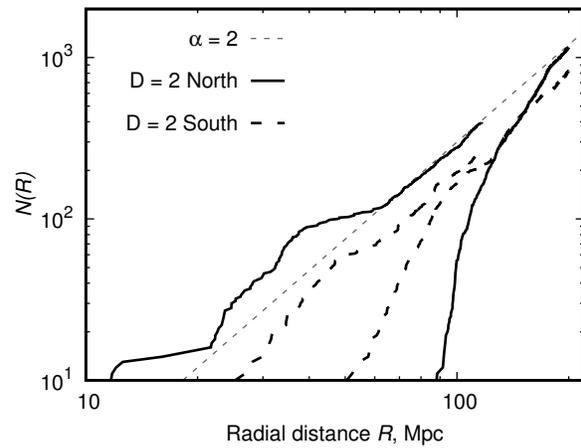


Рис. 8. Радиальное распределение для реализации распределения Кантора с размерностью $D = 2$ в двух независимых полусферах аналогично тому, что рассмотрено для VL2 из 2MRS.

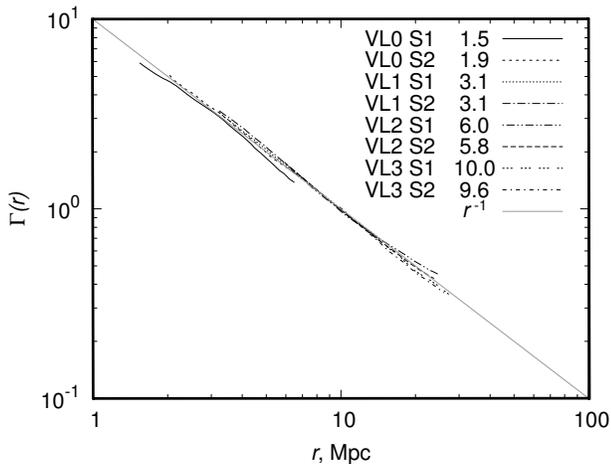


Рис. 7. Условная плотность для VL-выборок галактик 2MRS из выделенного диапазона масштабов и нормированная на 10 Мпк. Числа в легенде обозначают среднее расстояние до ближайшего соседа.

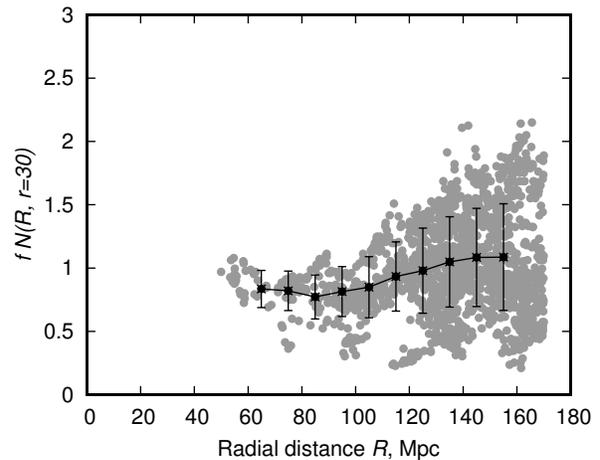


Рис. 9. Нормированная SL-статистика ($r = 30$ Мпк) для одной реализации распределения Кантора с размерностью $D = 2$.

идентичным образом, что говорит в пользу искажения наклона вследствие ограниченности глубины выборки. Таким образом, можно сделать вывод, что наблюдаемый наклон степенной условной плотности с учетом искажений на малых и больших масштабах вполне согласуется с единым показателем степени $\gamma \approx 1$ на всем интервале масштабов $0.1 < r < 100$ Мпк.

5. ИСКУССТВЕННЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЛАКТИК

5.1. Стохастические фрактальные распределения

В качестве простейшего искусственного распределения галактик, моделирующего статистиче-

ские характеристики реального распределения галактик, мы рассмотрели канторовские стохастические структуры с различной фрактальной размерностью. Анализ искусственных распределений важен для изучения искажающих факторов, влияющих на измеряемый наклон степенной условной плотности. Так как трехмерную условную плотность для галактик из каталога 2MRS мы рассматривали только в полных по объёму выборках, то у нас не было необходимости моделировать функцию светимости. Анализ стохастических канторовских распределений с учетом функции светимости проведен в работе [31].

В качестве примера мы рассмотрели стохастическое трехмерное распределение Кантора с размерностью $D = D_{\text{crit}} = 2$. Надо иметь в виду,

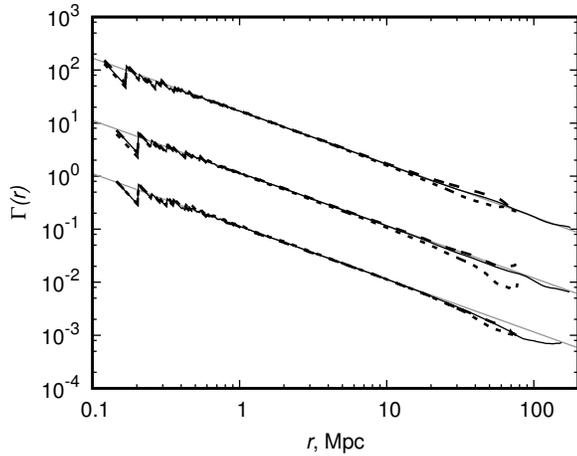


Рис. 10. Условная плотность трёх поколений распределения Кантора с фрактальной размерностью $D = 2$ в полной сфере (сплошные линии) и полусферах (штриховые линии) с радиусом $R = 200$ Мпк. Значения $\Gamma(r)$ для разных поколений домножены на коэффициенты, кратные 10. Серым цветом проведены линии с наклоном $\gamma = 1$.

что мы рассматриваем фрактальную размерность, близкую к наблюдаемой в обзоре 2MRS, однако используемое искусственное распределение не является однозначной моделью распределения галактик. Дело в том, что одна лишь фрактальная размерность не может однозначно характеризовать распределение объектов в пространстве, и для построения более адекватной модели необходимо учитывать также лакуарность фрактальной структуры. На рис. 8 и рис. 9 приводятся $N(R)$ - и $SL(R, r)$ -статистики для одной из реализаций стохастического канторовского фрактального распределения, которое по геометрии и количеству точек повторяет выборку S1 VL2 из каталога 2MRS.

На рис. 10 приведены результаты расчета условной плотности для трёх независимых поколений распределения Кантора с фрактальной размерностью $D = 2$ в полной сфере радиусом $R = 200$ Мпк и в двух полусферах. Для сравнения значений $\Gamma(r)$ условная плотность для разных поколений домножена на коэффициенты, кратные 10. Измеренные наклоны условной плотности для разных поколений равны соответственно $\gamma = 0.995 \pm 0.002$, $\gamma = 0.990 \pm 0.002$, $\gamma = 1.009 \pm 0.003$. Отклонения от степенной зависимости на самых малых и самых больших масштабах обусловлены искажающими факторами конечного объема выборки.

5.2. Распределение галактик каталога Millennium

Также мы рассматривали распределение галактик из полуаналитического распределения

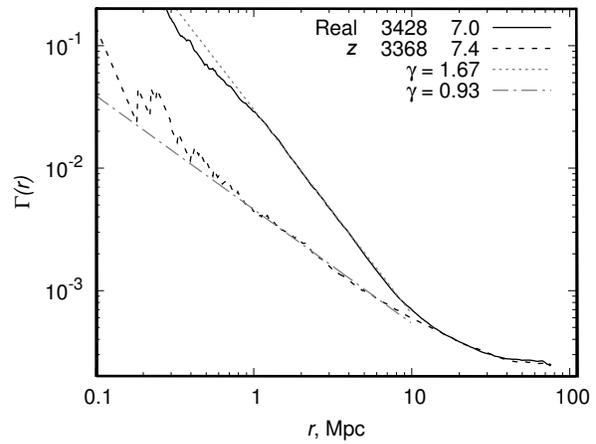


Рис. 11. Условная плотность галактик из каталога Millennium в выборке, подобной S1VL2, как функция масштаба в реальном и z -пространстве. Наклоны оценены в диапазоне $1 < r < 10$ Мпк.

галактик, полученного на основе численного моделирования Millennium [32]. Галактики из этого каталога заполняют куб со стороной в $500 \text{ Мпк } h^{-1}$ (где h — безразмерный масштабный множитель, который для значения постоянной Хаббла $H = 100 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ равен единице). Для дальнейшего использования мы взяли подвыборку из этого каталога, выделяя только галактики из сферы радиусом $200 \text{ Мпк } h^{-1}$ вокруг ближайшей к центру куба. После чего мы поместили в эту галактику наблюдателя и, используя данные о скоростях галактик, составили новый каталог, содержащий расстояния от галактик до наблюдателя в пространстве красных смещений, посчитанные с параметром $h = 0.7$, который соответствует постоянной Хаббла $H = 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$, использованной нами при анализе каталога 2MRS.

Существенная разница между распределением галактик с внесением поправки за пекулярные скорости и без неё видна на рис. 11. Показатель степени условной плотности в пространстве истинных расстояний (real space) $\gamma = 1.669 \pm 0.005$, а в пространстве красных смещений (redshift space) $\gamma = 0.930 \pm 0.006$. Таким образом, в рамках LCDM-модели «истинное» распределение галактик полностью скрыто дисперсией пекулярных скоростей и становится однородным начиная с масштабов $10\text{--}30$ Мпк. Есть также отличие в наклоне условной плотности 2MRS и Millennium, которое становится заметным на большом интервале масштабов.

На рис. 12 представлена SL-статистика каталога Millennium для выборки, подобной по геометрии и плотности выборке S1VL2 из каталога 2MRS.

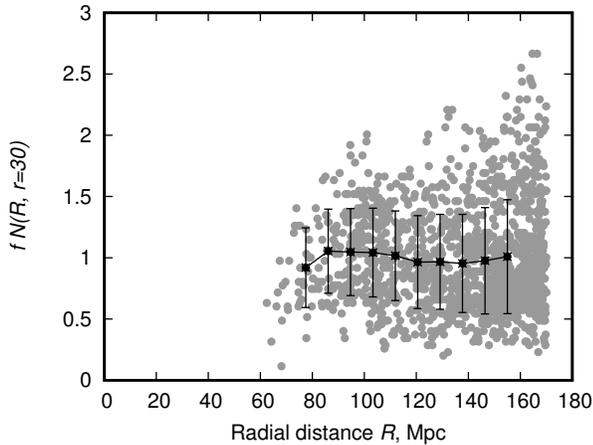


Рис. 12. Нормированная SL-статика для шаров с радиусом $r = 30$ Мпк в выборке из каталога Millennium, подобной по геометрии и плотности выборке VL2 в северной полусфере 2MRS.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно работе [23], целью обзора красных смещений галактик 2MRS является составление полной трехмерной карты распределения галактик в ближайшей Вселенной («to map the full three-dimensional distribution of galaxies in the nearby Universe»). 2MRS-обзор красных смещений 2MASS-галактик обладает уникальными свойствами по сравнению с SDSS-обзорами в оптическом диапазоне.

Во-первых, исследуемые выборки 2MRS-обзора равномерно покрывают 90% всей небесной сферы. Сферическая геометрия обзора принципиально раздвигает геометрические границы выборок и обеспечивает условия осреднения по направлениям.

Во-вторых, в ближнем инфракрасном диапазоне (K -полоса) обзора 2MASS эффекты межзвездного поглощения на порядок меньше, чем в оптическом диапазоне. Кроме того, k -поправки и поправки за эволюцию внутри объема выборок в ИК-диапазоне оказываются несущественными. Полнота 2MRS-обзора до предельной звездной величины $K_s = 11^m75$ составляет 97%.

В-третьих, спектральное распределение энергии большинства галактик имеет пик в ближнем ИК-диапазоне, а светимости в K -полосе являются хорошим приближением к величине барионной массы, так как соотношение «звездная масса — светимость» является почти постоянным для галактик разных типов на этих длинах волн. Это обстоятельство позволяет анализировать пространственное распределение всего населения галактик в целом [23].

Используя эти уникальные свойства 2MRS-обзора красных смещений галактик, на основе метода полных корреляционных функций мы получили оценку характера наблюдаемого глобального пространственного распределения галактик Локальной Вселенной. Статистика $N(R)$ показывает большой разброс поведения, поскольку использует только одну точку, в которой находится наблюдатель. $SL(R, r)$ -статистика показывает похожее поведение в случае 2MRS и стохастических канторовских фракталов с критической фрактальной размерностью.

Отметим, что полная корреляционная функция $\Gamma(r)$ (условная плотность) имеет существенное преимущество перед редуцированной корреляционной функцией $\xi(r)$ (двухточечная корреляционная функция Пиблса), состоящее в том, что вычисление условной плотности не требует предположения об однородности анализируемого пространственного распределения галактик. Сравнение (рис. 13) полных корреляционных функций для выборок 2MRS-галактик с корреляционными функциями искусственных распределений показывает, что

- Наблюдаемое глобальное пространственное распределение 2MRS-галактик с учетом факторов, искажающих условную плотность на самых малых и самых больших масштабах, описывается полной корреляционной функцией степенного вида $\Gamma(r) = kr^{-\gamma}$ с наклоном $\gamma \approx 1$ в широком интервале масштабов от 0.1 Мпк до 100 Мпк и согласуется с простой стохастической фрактальной моделью, имеющей критическую размерность $D \approx D_{\text{crit}} = 2$.
- Степенной наклон $\gamma \approx 1$ условной плотности Γ не зависит от интервала светимости галактик, что следует из параллельного поведения условной плотности для разных VL-выборок.
- Согласно предсказанию Λ CDM-модели (каталог [32]), условная плотность имеет степенной вид $\Gamma(r) = kr^{-\gamma}$ в интервале масштабов $0.1 < r < 20$ Мпк с выходом на однородность с 20 Мпк. При этом наклон γ имеет два существенно разных значения: для случая реального пространства $\gamma = 1.67$, а для случая пространства красных смещений $\gamma = 0.93$, что обусловлено дисперсией пекулярных скоростей галактик. Масштаб порядка 10 Мпк отделяет нелинейный режим кластеризации от линейного роста возмущений в однородной среде.
- Наблюдаемое продолжение (до 100 Мпк) единой фрактальной размерности $\gamma \approx 1$ из области с нелинейной кластеризацией ($r < 10$ Мпк) в область линейного роста структур ($r > 10$ Мпк)

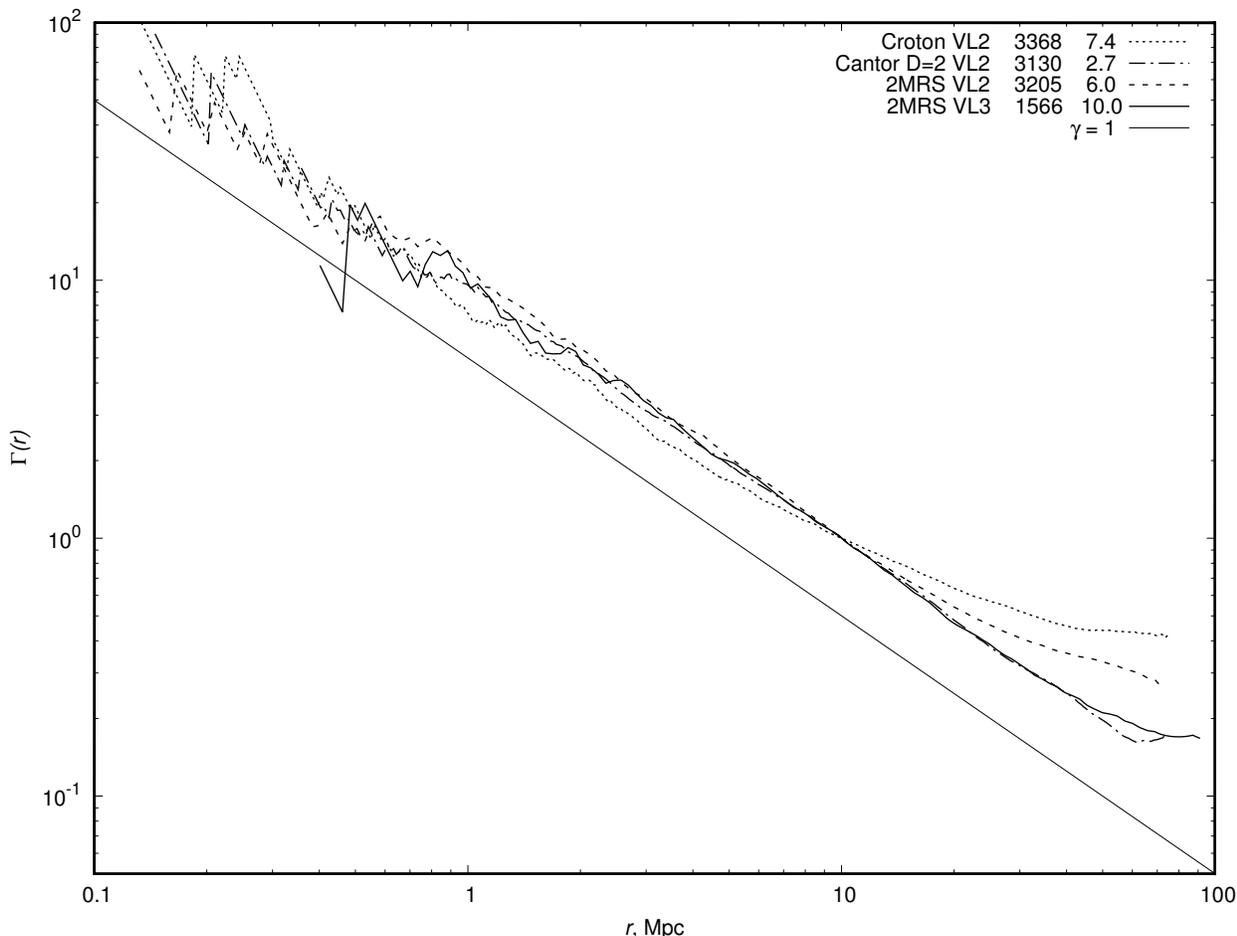


Рис. 13. Сравнение условной плотности для VL-выборок из каталога 2MRS и выборок идентичной геометрии из искусственных каталогов.

является признаком «космической конспирации» («cosmic conspiracy»), когда действие предполагаемого распределения пекулярных скоростей на измеряемый наклон полной корреляционной функции приводит к единому наклону независимо от того принадлежат ли эти масштабы нелинейной стадии кластеризации или относятся к линейному режиму роста возмущений.

Следует отметить, что наличие наблюдаемых структур в Локальной Вселенной с размерами в несколько сотен мегапарсек находится в естественном согласии с глобальным стохастическим фрактальным распределением галактик до масштаба в 100 Мпк. В заключение отметим, что в работе [17] обсуждались физические аргументы в пользу выделенности критической фрактальной размерности $D_{\text{crit}} = 2$ в различных физических системах с самогравитацией. Также важным вопросом теоретического анализа пространственного распределения галактик является вопрос о применимости классического регулярного описания

гладкими аналитическими функциями гидродинамических соотношений, связывающих поля пекулярных скоростей с полями плотности массы, тогда как в случае дискретных стохастических иерархических распределений требуется развитие новых математических методов анализа [16]. Возможность ответить на многие вопросы физики крупномасштабного распределения галактик будет связана с прогрессом в области массовых измерений расстояний до галактик методами, не зависящими от их красных смещений. Это позволит измерить реальные пекулярные скорости галактик и выяснить их влияние на измеряемые корреляционные свойства пространственного распределения галактик Локальной Вселенной.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта СПбГУ No. 6.38.18.2014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. Peebles, *The Large-Scale Structure of the Universe* (Princeton University Press, Princeton, 1980; Mir, Moscow, 1983).
2. Yu. Baryshev and P. Teerikorpi, *Fundamental Questions of Practical Cosmology: Exploring the Realm of Galaxies* (Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 2012).
3. D. Makarov and I. Karachentsev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **412**, 2498 (2011).
4. A. A. Elyiv, I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, et al., *Astrophysical Bulletin* **68**, 1 (2013).
5. H. M. Courtois, Y. Hoffman, R. B. Tully, and S. Gottlöber, *Astrophys. J.* **744**, 43 (2012).
6. H. M. Courtois, D. Pomarède, R. B. Tully, et al., *Astron. J.* **146**, 69 (2013).
7. R. B. Tully, H. Courtois, Y. Hoffman, and D. Pomarède, *Nature* **513**, 71 (2014).
8. A. I. Kopylov and F. G. Kopylova, *Astrophysical Bulletin* **70**, 243 (2015).
9. M. Einasto, L. J. Liivamägi, E. Tempel, et al., *Astrophys. J.* **736**, 51 (2011).
10. M. Einasto, H. Lietzen, E. Tempel, et al., *Astron. and Astrophys.* **562**, A87 (2014).
11. M. Einasto, P. Heinämäki, L. J. Liivamägi, et al., *ArXiv:1506.05295v2* (2015).
12. J. R. Gott, III, M. Jurić, D. Schlegel, et al., *Astrophys. J.* **624**, 463 (2005).
13. B. B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature* (W. H. Freeman and Company, San Francisco, 1982).
14. L. Pietronero, *Physica A* **144**, 257 (1987).
15. F. Sylos Labini, M. Montuori, and L. Pietronero, *Phys. Rep.* **293**, 61 (1998).
16. A. Gabrielli, F. Sylos Labini, M. Joyce, and L. Pietronero, *Statistical Physics for Cosmic Structures* (Springer, Berlin, 2005).
17. Yu. Baryshev and P. Teerikorpi, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **59**, 92 (2006).
18. R. B. Tully, H. M. Courtois, A. E. Dolphin, et al., *Astron. J.* **146**, 86 (2013).
19. U. Frisch, P.-L. Sulem, and M. Nelkin, *J. Fluid Mech.* **87**, 719 (1978).
20. P. Grassberger and I. Procaccia, *Physica D* **9**, 189 (1983).
21. H. J. de Vega, N. Sánchez, and F. Combes, *Nature* **383**, 56 (1996).
22. H. J. de Vega, N. Sánchez, and F. Combes, *Astrophys. J.* **500**, 8 (1998).
23. J. P. Huchra, L. M. Macri, K. L. Masters, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **199**, 26 (2012).
24. P. H. Coleman and L. Pietronero, *Phys. Rep.* **213**, 311 (1992).
25. I. Zehavi, Z. Zheng, D. H. Weinberg, et al., *Astrophys. J.* **630**, 1 (2005).
26. P. Teerikorpi, M. Hanski, G. Theureau, et al., *Astron. and Astrophys.* **334**, 395 (1998).
27. F. Sylos Labini, N. L. Vasilyev, and Yu. V. Baryshev, *Astron. and Astrophys.* **508**, 17 (2009).
28. F. Sylos Labini, *Classical Quant. Gravity* **28**, id. 164003 (2011).
29. F. Sylos Labini, D. Tekhanovich, and Yu. V. Baryshev, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **7**, 035 (2014).
30. M. Davis and P. J. E. Peebles, *Astrophys. J.* **267**, 465 (1983).
31. N. Yu. Lovyagin, *Astrophysical Bulletin* **64**, 217 (2009).
32. D. J. Croton, V. Springel, S. D. M. White, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **365**, 11 (2006).

Global Structure of the Local Universe According to 2MRS Survey

D. I. Tekhanovich and Yu. V. Baryshev

We present results of statistical analysis of spatial galaxy distribution of the 2MRS catalogue, which contains 43533 galaxy redshifts from IR all sky survey 2MASS. Thanks to unique features of the 2MRS survey, such as galaxy selection in IR, completeness for the old stellar population of galaxies, smallness of effects related to the dust extinction, small k- and e-corrections, we get statistical characteristics of the global galaxy distribution of the Local Universe. We take into account main methodical factors of correlation analysis, which distort theoretically expected relations in comparison with practically observed ones. For the Volume Limited galaxy samples we construct radial number counts $N(R)$, $SL(R,r)$ statistics and complete correlation function (conditional density) $\Gamma(r)$. Observed conditional density $\Gamma(r)$ in redshift space does not depend on galaxy luminosity and has power law shape with exponent $\gamma \approx 1.0$ within large interval of scales from 0.1 Mpc up to 100 Mpc. Statistical characteristics of the 2MRS spatial galaxy distribution are compared with corresponding ones of artificial catalogues: stochastic fractal distributions and galaxies from Millennium mock catalogue.

Keywords: cosmology: large-scale structure of the Universe; cosmology: observations