

УДК 524.72-33; 524.77

СТРУКТУРЫ НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ В МЕСТНОЙ ВСЕЛЕННОЙ. I. ДИФФУЗНЫЕ АГЛОМЕРАТЫ ГАЛАКТИК

© 2012 И. Д. Караченцев¹, В. Е. Караченцева²,
О. В. Мельник^{3,4}, А. А. Элыив^{2,4}, Д. И. Макаров¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 03680 Украина

³Астрономическая обсерватория Киевского национального университета
им. Тараса Шевченко, Киев, 04053 Украина

⁴Institut d'Astrophysique et de Geophysique, Université de Liège, B5C Belgium

Поступила в редакцию 30 августа 2012 года; принята в печать 7 сентября 2012 года

Эта статья — первая в цикле работ, где рассматриваются особенности распределения близких галактик в областях низкой плотности. Среди 7596 галактик с лучевыми скоростями $V_{LG} < 3500$ км/с и абсолютными величинами $M_K < -18^m$ на галактических широтах $|b| > 15^\circ$ имеется 3168 галактик поля (42%), не входящих в пары, группы и скопления Местной вселенной. В этой выборке методом перколяции с радиусом $r_0 = 2.8$ Мпк выделено 226 диффузных агломератов с числом членов $n \geq 4$. Обсуждается структура восьми наиболее населенных ($n \geq 25$) объектов среди них. Эти невириализованные агломераты имеют характерную дисперсию лучевых скоростей около 170 км/с, линейный размер примерно 6 Мпк, интегральную K -светимость приблизительно $3 \times 10^{11} L_\odot$ и формальное отношение вириальной массы к светимости на уровне $700 M_\odot/L_\odot$. Средний контраст плотности у рассматриваемых агрегатов составляет всего $\langle \Delta n / \bar{n} \rangle \sim 5$, а время пересечения — примерно 30–40 миллиардов лет.

Ключевые слова: космология: крупномасштабная структура Вселенной

1. ВВЕДЕНИЕ

Массовые фотометрические и спектральные обзоры неба: 2MASS [1], SDSS [2], 2MRS [3], 6dF [4] и др. демонстрируют, что основным элементом крупномасштабной структуры Вселенной являются космические пустоты (войды), обрамляемые волокнами и стенками, к которым концентрируются галактики. В узлах, на пересечении стенок и волокон, формируются богатые скопления галактик. Свечение горячего межгалактического газа в богатых скоплениях делает их выдающимися объектами на рентгеновских картах неба. Численное моделирование формирования и эволюции крупномасштабной структуры хорошо подтверждает эту картину [5–8]. В современную эпоху ($z = 0$) вириализованные области групп и скоплений галактик, а также коллапсирующие зоны вокруг них сосредотачивают в себе около 74% всех галактик, или примерно 90% звездной массы. Но эти динамически “продвинутые” области занимают всего около 5% общего объема [9]. На остальные 95% объема приходится около четверти всех галактик (или 10%

звездной массы), которые участвуют в бесконечном космическом расширении.

В настоящее время сложилась несколько парадоксальная ситуация: богатые скопления галактик, их структуры и эволюция, исследованы уже достаточно детально, а свойства основных элементов космического объема (войдов, филаментов, стенок) известны пока в самых общих чертах. Упор в исследовании “вершков” крупномасштабной структуры и пренебрежение ее “корешками” делает сложившийся подход весьма асимметричным. Одной из причин этой асимметрии является скудность имеющихся данных об индивидуальных расстояниях галактик. Как показывает Extragalactic Distance Database (<http://edd.ifa.hawaii.edu>), создаваемая Талли и др. [10], относительное число галактик с измеренными расстояниями быстро падает с увеличением самого расстояния, составляя небольшой процент уже на $D \sim 10$ Мпк.

Чтобы изучить свойства близкой части крупномасштабной структуры, нами была сформирована выборка 10 500 галактик с лучевыми скоростями $V_{LG} < 3500$ км/с относительно центра Местной

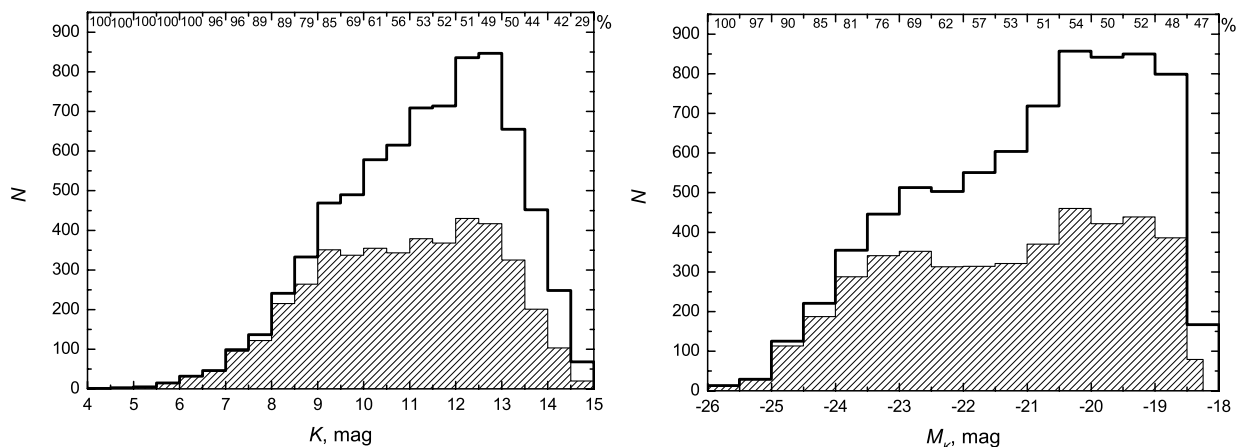


Рис. 1. Распределение числа галактик с лучевыми скоростями $V_{LG} < 3500$ км/с по видимым (K) и абсолютным (M_K) величинам в K -полосе. Кластеризованные галактики заштрихованы, их относительное число в каждом интервале показано в процентах у верхней кромки.

группы, которая охватывает все небо за исключением низких галактических широт $|b| < 15^\circ$. Для всех галактик этой выборки были определены или уточнены морфологические типы, данные о лучевых скоростях и видимых величинах. С использованием нового алгоритма кластеризации, который учитывал различия галактик по светимостям, были составлены каталоги 509 пар [11], 168 тройных систем [12] и 395 групп галактик [13]. Кроме того, в отдельный каталог были выделены 520 наиболее изолированных галактик этого объема [14].

Поскольку наилучшим индикатором звездной массы галактики является ее светимость в K_s -полосе, видимые K_s -величины галактик были взяты нами из обзора 2MASS [1]. В случае их отсутствия K -величины галактик определялись по известным B -величинам и средним показателям цвета $\langle B - K \rangle$ в зависимости от морфологического типа галактики. Из исходной выборки 10 500 галактик с $V_{LG} = [0-3500]$ км/с мы исключили объекты слабее $K = 15^m0$, а также карликовые галактики с абсолютными величинами $M_K > -18^m4$ при постоянной Хаббла $H_0 = 73$ км/с/Мпк. Последнее условие соответствует тому, чтобы галактики со светимостью ярче светимости Малого Магелланова Облака были видны как вблизи, так и на дальней границе ($m - M = 33^m4$) рассматриваемого объема. Пожертвовав 2906 карликовыми галактиками (28% населения выборки), мы в значительной степени ослабили эффект селекции по расстоянию, который ставил в неравные условия близкие и далекие объемы. Скорректированную таким образом выборку 7596 галактик мы используем далее для анализа элементов крупномасштабной структуры Местной вселенной на экстремально низких значениях плотности.

2. ГАЛАКТИКИ “ПОЛЯ” И КЛАСТЕРИЗОВАННОЕ НАСЕЛЕНИЕ

Распределение 7596 галактик нашей выборки по видимым (K) и абсолютным (M_K) величинам представлено на левой и правой панелях Рис. 1. Максимум распределения $N(K)$ приходится на $K \simeq 12.5$, из чего можно заключить, что у многих галактик этого объема с $K = 12.5-15.0$ остаются не измеренными их лучевые скорости. Кластеризованные галактики выделены на обеих панелях штриховкой. Используемый алгоритм кластеризации предполагал, что звездная масса каждой галактики определяется ее K -светимостью, а полная масса ее темного гало в $\kappa = 6$ раз больше звездной массы. Критерий включения галактик в пару или группу основывался на двух очевидных соображениях: 1) чтобы полная энергия предполагаемой системы была отрицательной и 2) чтобы члены виртуальной системы были причинно связаны между собой (их взаимные расстояния находились внутри “сферы нулевой скорости”, которая отделяет потенциальную группу от общего хаббловского расширения). Последнее условие необходимо как дополнение к первому, поскольку мы не знаем полные (пространственные) расстояния и скорости галактик. Фактически, в нашем алгоритме присутствует единственный произвольный параметр κ , принятый равным 6 независимо от светимости галактики и ее окружения. Заметим, что глобальное отношение плотности темной материи к барионной плотности составляет $\Omega_m/\Omega_b \simeq 6$ [15].

Применение нашего алгоритма привело к объединению в системы 4428 галактик из 7596, т.е. процентное отношение кластеризованных галактик и членов общего “поля” составило 58:42. Оно

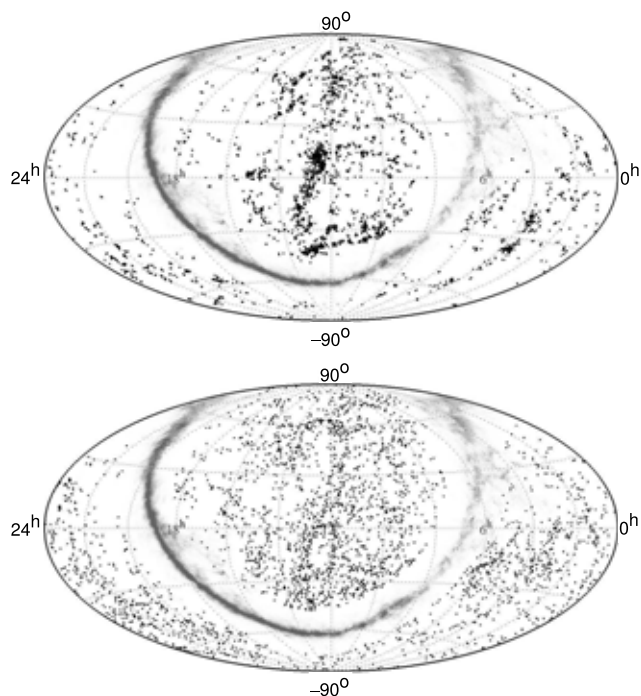


Рис. 2. Распределение кластеризованных (вверху) и некластеризованных (внизу) галактик с $V_{LG} < 3500$ км/с в экваториальных координатах. Зона сильного поглощения с $A_g > 2^m0$ изображена серой клочковатой полосой.

оказалось несколько выше, чем для всей исходной выборки, 52:48, из которой не исключались карликовые объекты. Эти цифры говорят о том, что нормальные галактики проявляют тенденцию к сгущиванию в большей мере, чем карликовые.

Распределение по небу 4428 кластеризованных и 3168 некластеризованных галактик Местной вселенной приведено на верхней и нижней панелях Рис. 2 в экваториальных координатах. Серая полоса на них соответствует зоне сильного поглощения в Млечном Пути. Как видим, члены систем различной кратности обнаруживают сильную концентрацию к экватору Местного сверхскопления, центром которого является скопление Virgo ($12^h30^m + 12^\circ$). Популяция некластеризованных галактик такой концентрации практически не показывает. Вместе с тем, распределение галактик “поля” выглядит не совсем равномерно-случайным. В разных областях неба видны слабоконтрастные структуры, наличие которых не связано с клочковатым галактическим поглощением.

Рис. 3 представляет распределение галактик нашей выборки по лучевым скоростям в системе центроида Местной группы. Кластеризованные галактики выделены штриховкой. Их относительное число возле дальней границы объема заметно

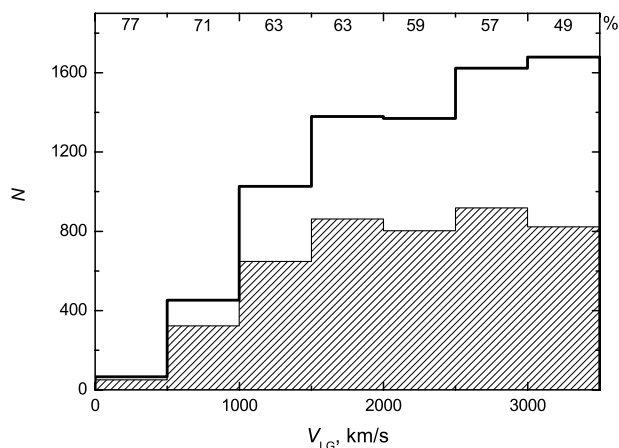


Рис. 3. Распределение галактик Местной вселенной по лучевым скоростям. Кластеризованные галактики выделены штриховкой, их относительное число в каждом интервале скоростей указано в процентах у верхней кромки.

падает из-за недобора галактик с измеренными скоростями среди далеких объектов.

Как известно, галактики ранних морфологических типов (E, S0, Sa) демонстрируют более высокую степень сгущивания, чем галактики поздних типов. Ожидаемый эффект морфологической сегрегации проявляется также и в наших выборках. На Рис. 4 представлено распределение галактик нашего объема по морфологическим типам в шкале Вокулера. Кластеризованные галактики выделены штриховкой, их процент для каждого типа показан у верхней кромки. Как видим, галактики с развитыми балджами ($T < 4$) присутствуют среди кластеризованных галактик в заметно большей пропорции, чем среди галактик поля.

3. ПЕРКОЛЯЦИЯ И АГЛОМЕРАТЫ ГАЛАКТИК НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ

Чтобы продвинуться в понимании особенностей распределения 3168 некластеризованных галактик, мы попытались выделить среди них неслучайные структуры. Сделать это можно разными способами. Мы использовали простейший метод перколяции. Оценивая расстояния до галактик по их лучевой скорости, $D = V_{LG}/H_0$ при $H_0 = 73$ км/с/Мпк и пренебрегая пекулярными скоростями галактик, мы определили для каждой из них пространственные расстояния r_{12} до ближайшего соседа. Распределение числа галактик по интервалам r_{12} представлено на Рис. 5 в логарифмической шкале. Две трети галактик имеют расстояния до ближайшего соседа в пределах $r_0 = 2.8$ Мпк. Мы выбрали это значение в качестве радиуса перколяции методом “friends of friends” [16].

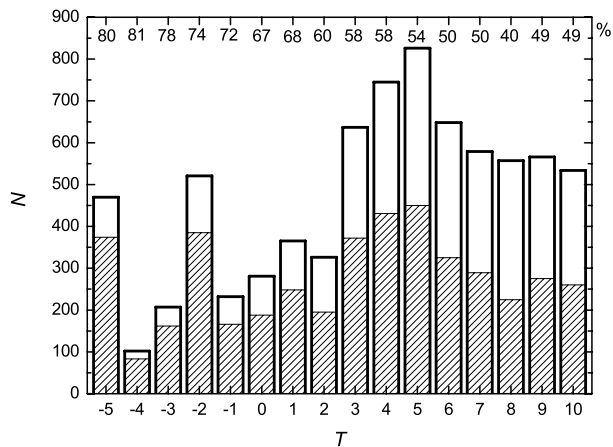


Рис. 4. Распределение числа галактик по морфологическим типам. Кластеризованные галактики заштрихованы, их процентное содержание в каждом типе указано на верхней кромке.

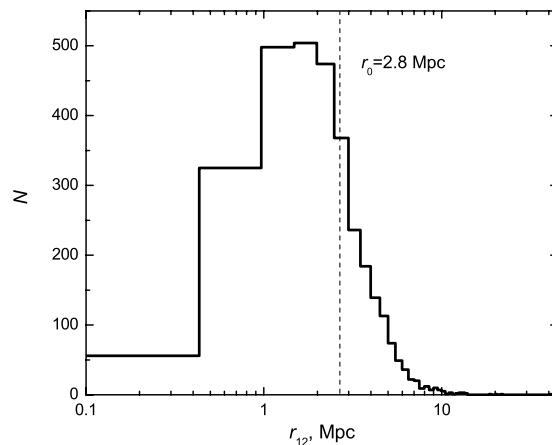


Рис. 5. Распределение некластеризованных галактик по расстоянию до ближайшего соседа.

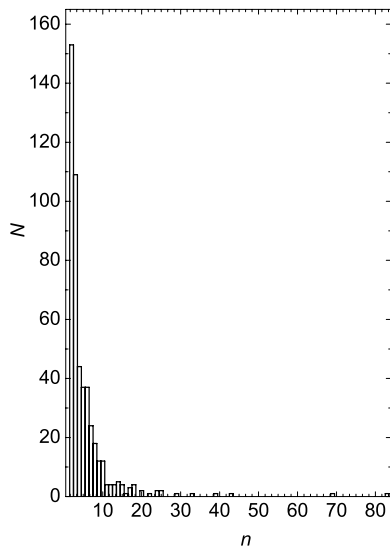


Рис. 6. Число агломератов низкой плотности, выделенных перколяцией, в зависимости от числа галактик в них.

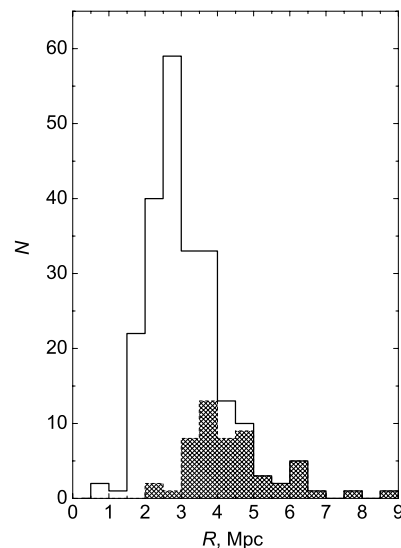


Рис. 7. Распределение агломератов с числом членов $n \geq 4$ по среднему взаимному расстоянию галактик. Наиболее населенные структуры с $n \geq 10$ выделены штриховкой.

Объединяя галактики с взаимными расстояниями $r_{12} < 2.8$ Мпк в агломераты разной населенности n , мы получили следующий результат: число неперколерированных, т.е. очень обособленных галактик оказалось равным 543. Остальные галактики сгруппировались в агломераты с числом членов от 2 до 84. Распределение количества таких структур по числу членов приведено на Рис. 6. Легко видеть, что по сравнению с пуассоновским это распределение имеет длинный хвост, наличие

которого указывает на неслучайное объединение галактик в большие ассоциации.

Рис. 7 показывает распределение 226 агломератов с числом членов $n \geq 4$, а также 54 наиболее населенных структур с $n \geq 10$ по средним значениям взаимного расстояния их членов. Медианы этих распределений составляют, соответственно, 2.9 Мпк и 4.2 Мпк, т.е. линейные размеры этих структур сопоставимы с вириальным радиусом богатых скоплений галактик.

Распределение по небу 989 галактик, входящих в агломераты с числом членов $n \geq 10$, изображе-

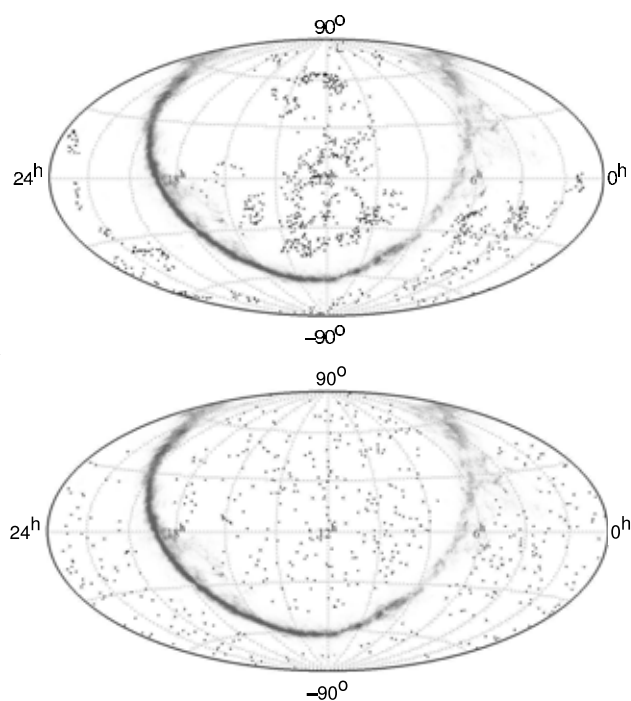


Рис. 8. Распределение на небе в экваториальных координатах галактик, входящих в агломераты с числом членов $n \geq 10$ (верхняя панель) и галактик, не подвергшихся перколяции (нижняя панель).

но на верхней панели Рис. 8. Для сравнения, на нижней панели воспроизведено аналогичное распределение 543 одиночных галактик, которые не подверглись перколяции ($n = 1$). Характер этих распределений разительно отличается друг от друга, еще раз свидетельствуя, что в областях низкой плотности существуют невириализованные протяженные структуры, куда входит значительное количество галактик.

Клочковатый характер распределения галактик, принадлежащих агломератам с населением $n \geq 10$, хорошо заметен также на Рис. 9, где использованы декартовы экваториальные координаты. Частично пятнистость этих проекционных распределений обусловлена наличием зоны поглощения в Млечном Пути. Однако, волокнистая структура многих агломератов не может быть результатом только эффекта галактического поглощения.

4. САМЫЕ НАСЕЛЕННЫЕ АГЛОМЕРАТЫ ГАЛАКТИК

Сводка восьми диффузных агломератов в Местной вселенной с числом галактик $n \geq 25$ представлена в таблице. Столбцы таблицы содержат: (1) название созвездий, где расположен агломерат, (2) экваториальные координаты его центроида, (3)

число членов с измеренными лучевыми скоростями, (4) среднюю лучевую скорость относительно Местной группы, (5) дисперсию лучевых скоростей, (6) среднее взаимное пространственное расстояние между членами агломерата, (7) интегральную светимость в K -полосе (или же суммарную звездную массу), (8) формальное значение вириальной массы, (9) формальное отношение вириальной массы к K -светимости (или же отношение массы темной и светлой материи), (10) число членов агломерата с морфологическими типами E и S0. Как видим, относительное число галактик ранних типов в этих структурах составляет всего 10%.

Панели Рис. 10 и 11 показывают распределение галактик восьми самых населенных агломератов в проекциях декартовых экваториальных координат (в Мпк). Как следует из этих рисунков, формы агломератов весьма разнообразны и, как правило, далеки от сферически-симметричной. В половине случаев ее можно было бы условно назвать волокнистой или уплощенной.

Медианная дисперсия лучевых скоростей в богатых агломератах (170 км/с) и медианная K -светимость ($3.0 \times 10^{11} L_{\odot}$) близки к соответствующим медианным значениям для МК-групп в том же объеме Местной вселенной [13], однако линейные размеры агломератов на порядок превосходят типичный размер МК-группы. Медиана формального значения вириальной массы у богатых агломератов, $1.6 \times 10^{14} M_{\odot}$, сравнима с массой бедных скоплений, но медиана формального отношения вириальной массы к K -светимости, равная примерно $700 M_{\odot}/L_{\odot}$, на порядок превышает соответствующую величину для самых богатых скоплений.

Следует подчеркнуть, что рассматриваемые агломераты являются чрезвычайно рыхлыми образованиями без явных признаков концентрации галактик к их геометрическим центрам. Средняя плотность числа галактик в них лишь приблизительно в пять раз выше средней плотности числа галактик в рассматриваемом объеме Местной вселенной. При указанных в таблице размерах и дисперсии лучевых скоростей характерное время пересечения в этих агрегатах составляет 30–40 миллиардов лет, т.е. значительно больше возраста Вселенной.

5. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Рассмотренный объем Местной вселенной диаметром почти 100 Мпк является вполне репрезентативной выборкой, которая включает в себя все Местное сверхскопление, а также отроги других соседних сверхскоплений. В этом объеме представлены как группы и скопления, так и космические пустоты. Выполняя поиски диффузных ассоциаций галактик в областях низкой плотности, мы

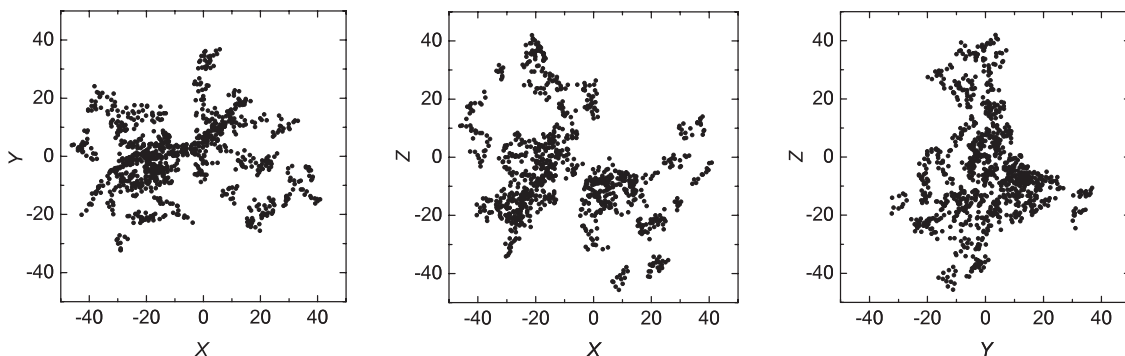


Рис. 9. Пространственное распределение галактик, входящих в агломераты низкой плотности с $n \geq 10$, в трёх плоскостях декартовых экваториальных координатах (в Мпк).

Параметры самых населенных агломератов в Местной вселенной

Агломерат	RA	Dec	n	$\langle V_{LG} \rangle$, км/с	σ_v , км/с	$\langle r_{12} \rangle$, Мпк	L_K , $10^{11} L_{\odot}$	M_{vir} , $10^{14} M_{\odot}$	M_{vir}/L_K	$n(E, S0)$
(1)	(2)	(3)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Leo-Virgo	11 ^h 7	+4°	83	+1210	158	8.7	3.4	2.4	700	9
Eridanus-Columba	4 ^h 3	-36°	69	+1080	273	7.6	3.0	6.2	2050	13
Centaurus	13 ^h 3	-32°	43	+2310	182	6.5	4.3	1.6	360	4
Microscopium	21 ^h 0	-39°	39	+2670	110	6.2	3.0	0.8	270	3
Crater-Corvus	11 ^h 9	-17°	33	+1510	180	4.8	1.7	1.7	1000	1
Libra-Hydra	15 ^h 1	-20°	29	+2300	153	6.2	2.3	1.6	690	2
Virgo	12 ^h 4	+2°	25	+2070	217	4.7	2.0	2.4	1210	1
Tucana-Grus	22 ^h 5	-59°	25	+3170	109	4.1	5.1	0.6	110	2

использовали только кинематические расстояния галактик, $D = V_{LG}/H_0$, т.е. пренебрегали их пекулярными скоростями. До недавнего времени существовало представление, что большие пекулярные скорости галактик встречаются только в “горячих” вириальных областях скоплений, а у галактик поля отклонения от хаббловского соотношения $V = H_0 D$ невелики. Однако, по современным данным галактики поля, окружающие Местную группу, участвуют в коллективном движении по направлению к скоплению Virgo со скоростью, составляющей примерно 180 км/с, и в движении от центра Местного войда со скоростью около 260 км/с, вызванном расширением войда [17]. Многочисленные моделирования эволюции крупномасштабной структуры [5, 6] показывают наличие когерентных движений у галактик поля с амплитудами в несколько сотен км/с на шкале приблизительно равной (10–50) Мпк. Наблюдательные данные о больших пекулярных движениях галактик в обла-

сти Coma I дают указания на возможное существование там “темного аттрактора” с массой около $10^{14} M_{\odot}$ на расстоянии 15 Мпк от нас [18].

Крупномасштабные течения галактик, связанные с движением волокон и стенок, могут приводить к фиктивным фазовым группировкам галактик, если для их кластеризации используются сугубо кинематические расстояния. Такие ложные “фазовые каустики” легко спутать с рассеянными физическими группировками галактик. Поэтому некоторые или даже многие из обсуждаемых агломератов в областях низкой плотности могут оказаться фантомными структурами.

Очевидно, что для проверки того, насколько реальны обнаруженные нами диффузные агломераты, нужны измерения расстояний до галактик методом Талли-Фишера [19] или любым другим способом, независимым от лучевых скоростей.

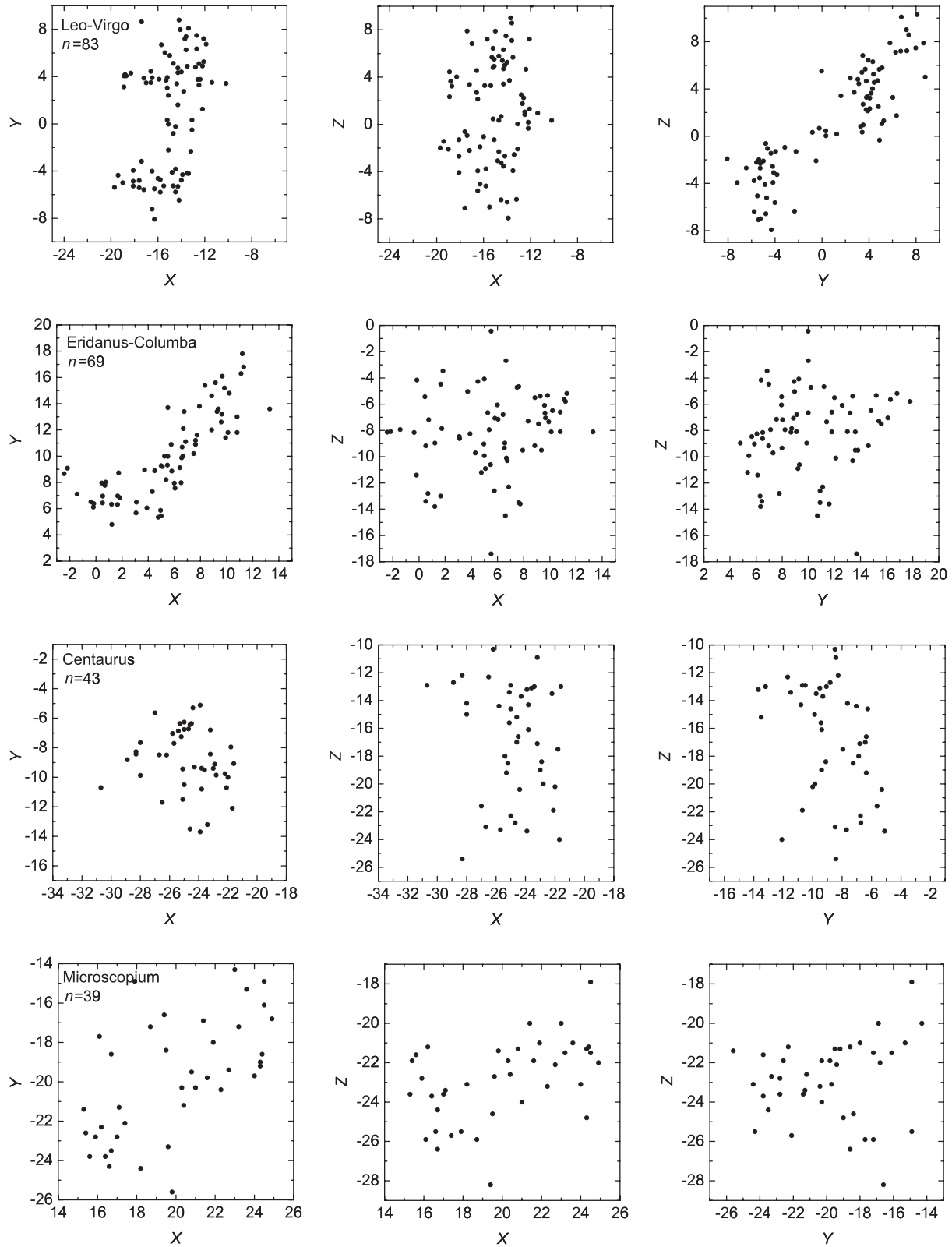


Рис. 10. Структура восьми самых населенных агломератов низкой плотности в проекциях декартовых экваториальных координат (в Мпк). Первая часть, продолжение — на Рис. 11.

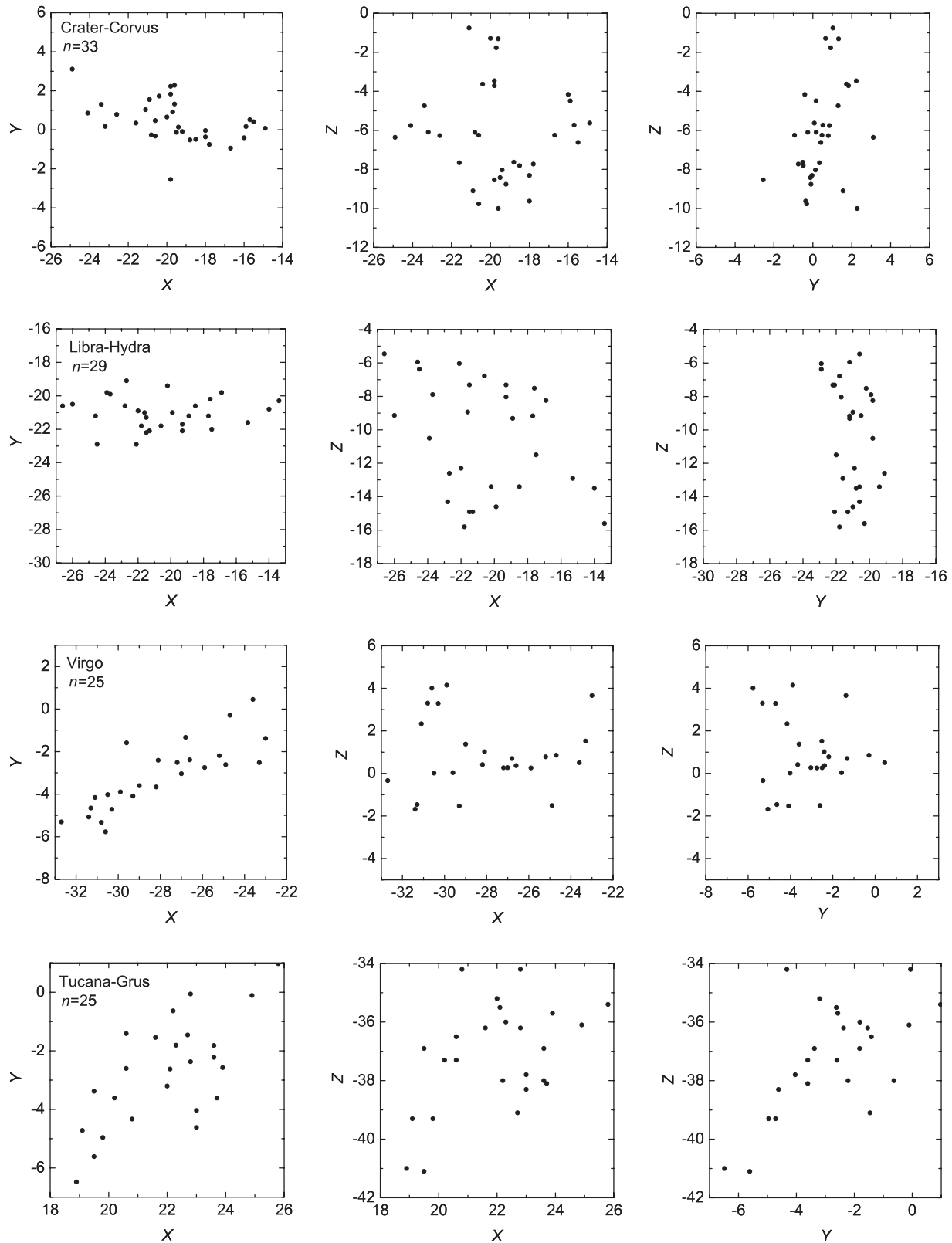


Рис. 11. Структура восьми самых населенных агломератов низкой плотности в проекциях декартовых экваториальных координат (в Мпк). Вторая часть, начало — на Рис. 10.

БЛАГОДАРНОСТИ

Эта работа поддержана грантами РФФИ 11-02-90449-Укр-ф-а, 12-02-91338-ННИО, ГФФИ Украины Ф40.2/49, программой НАН Украины “Космомикрофизика”, а также грантом Министерства образования и науки РФ (госконтракт 14.740.11.0901).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T. N. Jarrett, T. Chester, R. Cutri, et al., *Astronom. J.* **119**, 2498 (2000).
2. K. N. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agüeros, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **182**, 54 (2009).
3. J. P. Huchra, L. M. Macri, K. L. Masters, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **199**, 26 (2012).
4. D. H. Jones, M. A. Read, W. Saunders, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **399**, 683 (2009).
5. A. Klypin, Y. Hoffman, A. V. Kravtsov, and S. Gottloeber, *Astrophys. J.* **596**, 19 (2003).
6. W. Schaap, PhD Thesis (Groningen Univ., 2007).
7. S. Shandarin, S. Habib, and K. Heitmann, arXiv:1111.2366 (2011).
8. A. A. Klypin, S. Trujillo-Gomez, and J. Primack, *Astrophys. J.* **740**, 102 (2011).
9. I. D. Karachentsev, *Astrophysical Bulletin* **67**, 123 (2012).
10. R. B. Tully, L. Rizzi, E. J. Shaya, et al., *Astronom. J.* **138**, 323 (2009).
11. I. D. Karachentsev and D. I. Makarov, *Astrophysical Bulletin* **63**, 299 (2008).
12. D. I. Makarov and I. D. Karachentsev, *Astrophysical Bulletin* **64**, 24 (2009).
13. D. I. Makarov and I. D. Karachentsev, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **412**, 2498 (2011).
14. I. D. Karachentsev, D. I. Makarov, V. E. Karachentseva, and O. V. Melnyk, *Astrophysical Bulletin* **66**, 1 (2011).
15. M. Fukugita and P. J. E. Peebles, *Astrophys. J.* **616**, 643 (2004).
16. J. P. Huchra and M. J. Geller, *Astrophys. J.* **257**, 423 (1982).
17. R. B. Tully, E. J. Shaya, I. D. Karachentsev, et al., *Astrophys. J.* **676**, 184 (2008).
18. I. D. Karachentsev, O. G. Nasonova, and H. M. Courtois, *Astrophys. J.* **743**, 123 (2011).
19. R. B. Tully and R. J. Fisher, *Astronom. and Astrophys.* **54**, 661 (1977).

Low Density Structures in the Local Universe. I. Diffuse Agglomerates of Galaxies

I.D. Karachentsev, V.E. Karachentseva, O.V. Melnyk, A.A. Elyiv, D.I. Makarov

This paper is the first of a series considering the properties of distribution of nearby galaxies in the low density regions. Among 7596 galaxies with radial velocities $V_{LG} < 3500$ km/s, absolute magnitudes $M_K < -18^m4$, and Galactic latitudes $|b| > 15^\circ$ there are 3168 field galaxies (i.e. 42%) that do not belong to pairs, groups or clusters in the Local universe. Applying to this sample the percolation method with a radius of $r_0 = 2.8$ Mpc, we found 226 diffuse agglomerates with $n \geq 4$ number of members. The structures of eight most populated objects among them ($n \geq 25$) are discussed. These non-virialized agglomerates are characterized by a median dispersion of radial velocities of about 170 km/s, the linear size of around 6 Mpc, integral K -band luminosity of $3 \times 10^{11} L_\odot$, and a formal virial-mass-to-luminosity ratio of about $700 M_\odot/L_\odot$. The mean density contrast for the considered agglomerates is only $\langle \Delta n / \bar{n} \rangle \sim 5$, and their crossing time is about 30–40 Gyr.

Keywords: *cosmology: large-scale structure of Universe*