

УДК 524.77

ТРЕХМЕРНАЯ КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ФУНКЦИЯ БОГАТЫХ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК

А. А. КЛЫПИН и А. И. КОПЫЛОВ

Показано, что в диапазоне расстояний $5h^{-1}$ Мпс $< r < 100h^{-1}$ Мпс ($h = H/50$ км/с/Мпс) трехмерная корреляционная функция скоплений галактик из каталога Эйбла аппроксимируется степенным законом $\xi(r) = (50h^{-1} \text{ Мпс}/r)^{1.6}$. Для оценки корреляционной функции использованы измерения красных смещений скоплений, расположенных в области $|r| < 480$ Мпс и $|b^1| \geq 30^\circ$. Значительное различие между корреляционной функцией скоплений галактик и корреляционной функцией самих галактик представляет собой трудность для объяснения и, вероятно, свидетельствует о том, что существует выделенный масштаб сгущивания.

THE SPACE CORRELATION FUNCTION OF RICH CLUSTERS OF GALAXIES, by A. A. Klypin and A. I. Kopylov. It is shown that the space correlation function of Abell clusters of galaxies is approximated by the power law $\xi(r) = (50h^{-1} \text{ Мпс}/r)^{1.6}$ in the range of distances $5h^{-1}$ Мпс $< r < 100h^{-1}$ Мпс ($h = H/50$ км/с/Мпс). Results on redshifts determinations for rich clusters in the region $\{|r| < 480$ Мпс and $|b^1| \geq 30^\circ\}$ are used to estimate the correlation function. A considerable difference between the correlation function of clusters of galaxies and that of galaxies themselves is difficult to be explained and probably evidences the existence of a preferable scale of clustering.

Со времени опубликования Эйблом (1958) каталога богатых скоплений галактик неоднократно предпринимались попытки тем или иным способом описать пространственное распределение этих объектов. Одна из причин, почему эта проблема привлекает внимание, состоит в том, что, исследовав относительно небольшое количество галактик, удается охарактеризовать огромную область пространства. Так, в каталог Эйбла вошли скопления, расстояние до которых меньше ~ 1300 Мпс (мы принимаем постоянную Хаббла равной $H = 50$ км/с/Мпс), а эффективная глубина, например, Ликского каталога галактик равна «всего» ~ 440 Мпс. Наиболее достоверные результаты о сгущенности скоплений были получены Хаузером и Пиблсом (1973). Ими была вычислена угловая корреляционная функция распределения скоплений на небе (использовано ~ 1400 скоплений) и с ее помощью сделаны оценки пространственной корреляционной функции. Ввиду того, что глубина каталога скоплений большая, а содержит он относительно немного объектов (2712), при проектировании на небесную сферу пространственное распределение сильно «замывается» и в результате оценки пространственной корреляционной функции становятся ненадежными.

Прямой расчет объемной корреляционной функции возможен, если известны расстояния до скоплений. Иными словами, необходима достаточно большая и полная в некоторой области пространства выборка скопления галактик с измеренными красными смещениями. Желая получить такую выборку, мы собрали имеющиеся данные о красных смещениях скоплений Эйбла и дополнили их нашими собственными измерениями. Это позволило составить достаточно полный каталог, включающий 158 скопле-

Таблица 1

Скопление	z	n	Скопление	z	n
A71	0.0724	1	A1177	0.0316	2
A75	0.0654	2	A1267	0.0321	2
A102	0.0632	2	A1275	0.0603	2
A116	0.0665	3	A1783	0.0766	1
A117	0.0550	1	A1825	0.0603	1
A134	0.0694	2	A1836	0.0363	1
A358	0.0576	2	A1873	0.0776	1
A595	0.0666	3	A1890	0.0570	2
A757	0.0515	3	A1899	0.0536	2
A999	0.0318	2	A2020	0.0578	1
A1016	0.0321	2	A2271	0.0568	1
A1100	0.0455	2	A2665	0.0547	2

Таблица 2

Скоп-ление	z	Литература	Скоп-ление	z	Литература
A86	0.0610	Нунан, 1981	A1216	0.0524	Хоссел и др., 1980
A114	0.0566	Нунан, 1981	A1383	0.0597 *	Фетисова, 1981
A133	0.0600	Рейхерт и др., 1981	A1631	0.0530	Дреслер, 1980
A246	0.0753	Хоссел и др., 1980	A1644	0.0456	Хоссель и др., 1980
A419	0.0409	Сэндидж, 1978	A2147	0.0357	Таренги и др., 1980
A514	0.0697	Хоссел и др., 1980	A2151	0.0371	Таренги и др., 1980
A644	0.0781	Хинцен и др., 1980	A2152	0.0374	Таренги и др., 1980
A690	9.0788	Фанти и др., 1978	A2184	0.0546	Хинцен и др., 1980
A744	0.0768	Нунан, 1981	A2462	0.0669	Валентийн, 1981
A1190	0.0738	Нунан, 1981	A2622	0.0615	Нунан, 1981

* В каталоге Фетисовой в этом месте опечатка (приведено $z = 0.0557$).

ний всех классов богатства по Эйблу. Границы каталога определяются условиями $z \lesssim 0.08$ и $|b^I| \geq 30^\circ$.

На основе этого каталога рассчитана объемная корреляционная функция скоплений Эйбла. Оказалось, что эта функция в диапазоне расстояний $5 < r < 100$ Мпс хорошо аппроксимируется степенным законом $(50 \text{ Мпс}/r)^{1.6}$.

2. В последние годы достигнут значительный прогресс в измерении красных смещений скоплений галактик (Нунан, 1981; Фетисова, 1981). Но все же данные полны только для относительно близких скоплений (до четвертого класса расстояний по Эйблу включительно). Известно также, что на низких галактических широтах каталог Эйбла неполон из-за внутригалактического поглощения. Все это обусловило выбор границ каталога.

Красные смещения основной части скоплений каталога совпадают со значениями, приведенными в работе Фетисовой (1981). Для 24 скоплений красные смещения были измерены нами на 6-метровом телескопе Специальной астрофизической обсерватории АН СССР. Подробное описание методики наблюдений и измерений можно найти в работе Караченцева и Копылова (1981). В табл. 1 даны исправленные за движение Солнца красные смещения исследованных 24 скоплений и число измеренных галактик в каждом из них. В табл. 2 содержатся красные смещения тех скоплений, для которых использованные нами данные расходятся с данными, приведенными в работе Фетисовой (1981), а также приведены красные смещения скоплений, не вошедших в ее список. Кроме того, скопления A2055, A2301 и A2440 не были включены в каталог, поскольку, по уточненным данным для них $z > 0.08$. В каталог не включены скопления A150 и A2506, для которых приведенные у Фетисовой красные смещения, вероятнее всего, относятся к галактикам фона.

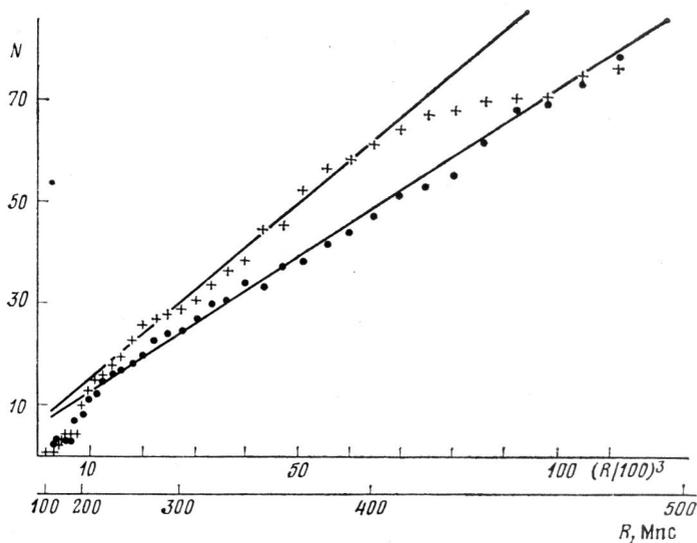


Рис. 1. Зависимость полного числа скоплений, расстояние до которых меньше R , от R^3 . Крестики относятся к скоплениям нулевого класса богатства, точки ко всем остальным скоплениям

Дополнительные измерения красных смещений были проведены нами в основном для скоплений нулевого класса богатства, с большой вероятностью попадающих в выбранную область пространства. Необходимо отметить, что вполне допустимо рассматривать скопления богатства 0, поскольку неполнота каталога Эйбла для этих скоплений сказывается только на больших расстояниях. Так, доля бедных скоплений (0-го класса богатства) составляет 30% во всем каталоге Эйбла, а для скоплений от 0-до 4-го классов расстояния — 55%.

О полноте составленного нами каталога можно судить, если рассмотреть зависимость полного числа скоплений N , расстояние до которых меньше заданного, от куба этого расстояния $R^3 = (cz/H)^3$. На рис. 1 крестики соответствуют скоплениям нулевого класса богатства, а точки — более богатым скоплениям. В случае, если скопления равномерно распределены (в среднем) во всем пространстве, зависимость N от R^3 должна быть линейной. Систематическое отклонение от линейности заметно только у скоплений 0-го класса богатства на расстояниях больше 420 Мпс, что говорит о неполноте данных на этих расстояниях. Наблюдается также скачок в обеих кривых на расстоянии ~ 200 Мпс, что связано с относительно небольшой неоднородностью в распределении скоплений (избыток в 11—13 скоплений). Эта флуктуация отмечалась в работе Киришнера и др. (1978), и в основном обусловлена двумя большими группами скоплений в северной галактической полусфере.

Для всего каталога полнота составляет примерно 85%. Практически полная, но несколько меньшая выборка реализуется в области с $z \lesssim 0.067$ и $|b^I| \geq 40^\circ$ (всего 92 скопления).

3. Для расчета двухточечной корреляционной функции $\xi(r)$ обычно используют выражение (Пиблс, 1980, разд. 47):

$$\xi(r) = \frac{2N_p(r)}{\bar{n}N\Delta V} - 1, \quad (1)$$

где $N_p(r)$ — число пар скоплений, расстояние между которыми заключено в пределах от r до $r + \Delta r$, \bar{n} — средняя плотность скоплений ($\bar{n} = N/V = 9.1 \cdot 10^{-7}$ Мпс $^{-3}$), $V = \pi/2 R^3 = 1.74 \cdot 10^8$ Мпс 3 — объем каталога (сферический сегмент с углом раствора 120° в северной галактической

кой полусфере и половина такого сегмента — в южной), $\Delta V = 4\pi/3 ((r + \Delta r)^3 - r^3)$. Соотношение (1) справедливо лишь при том условии, что влиянием границ каталога можно пренебречь. Оценивая ξ при r , сопоставим с глубиной каталога R , мы применяли выражение

$$\xi(r) = \frac{N_p(r)}{N_p'(r)} = 1, \quad (2)$$

где $N_p'(r)$ — число пар частиц в каталоге со случайным равномерным распределением, причем средняя плотность и, что наиболее существенно, его

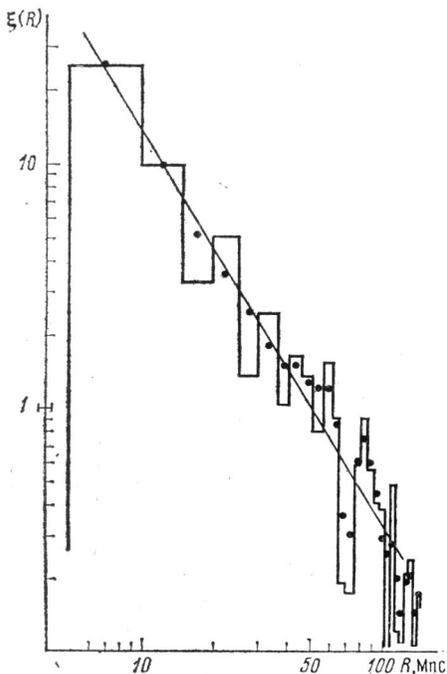


Рис. 2. Трехмерная корреляционная функция богатых скоплений галактик ξ . Гистограмма представляет оценки ξ , полученные по сферическим слоям, которые отстоят друг от друга на $\Delta r = 5$ Мпс. Точки — значения ξ , усредненные по трем соседним интервалам (кроме первых двух точек). Прямая линия соответствует аппроксимационному закону $\xi \approx (50/r)^{1.6}$

границы выбирались точно такими же, как и в каталоге скоплений. Оценка с помощью (2) позволяет использовать все объекты каталога и учитывает сложные границы области. Отметим, что на расстоянии ~ 100 Мпс поправка на границы каталога довольно существенна: в среднем $\sim 30\%$ поверхности сферы с радиусом 100 Мпс находится вне границ каталога.

Результаты расчета корреляционной функции ($\Delta r = 5$ Мпс) приведены на рис. 2 (гистограмма). Точками на этом рисунке представлены значения ξ , усредненные с некоторыми весами по трем соседним интервалам (исключая первые два интервала). Корреляционная функция изображена только до 120 Мпс, так как при $r \geq 120$ Мпс слишком большая часть сферы радиусом r , проведенная вокруг скопления, попадает за границы каталога, и, следовательно, расчет корреляционной функции становится ненадежным. Прямая линия на рис. 2 соответствует аппроксимационному закону $\xi = (50/r)^{1.6}$ ($5 < r < 100$ Мпс).

Поскольку каталог Эйбла, быть может, отчасти неполно представляет скопления, галактическая широта которых равна $30-40^\circ$, необходимо проверить, как изменится $\xi(r)$, если анализировать скопления, находящиеся на больших галактических широтах, т. е. в наиболее представительной области. С этой целью были изучены две выборки из каталога. Обе выборки включают только те скопления, у которых $|b^I| \geq 40^\circ$. Первая выборка охватывает лишь северное галактическое полушарие, и в нее входят скопления (всего 88) до 480 Мпс. Корреляционная функция, определенная по этой выборке, представлена на рис. 3, а крестиками. Во вторую выборку были включены скопления северного и южного галактического полушария, расстояние до которых меньше 400 Мпс (92 скопления). На рис. 3, а треугольники отвечают корреляционной функции второй выборки. Для сравнения на рис. 3, а представлены также результаты полного каталога (точки и верхняя прямая) и корреляционная функция галактик ($\xi_G \approx (8/r)^{1.8}$, $r \lesssim 20$ Мпс).

Из рис. 3, а видно, что хотя разброс оценок ξ по выборкам очень большой, результаты, полученные по всему каталогу (158 скоплений) и по отдельным выборкам, не противоречат друг другу. (Выборки сильно пере-

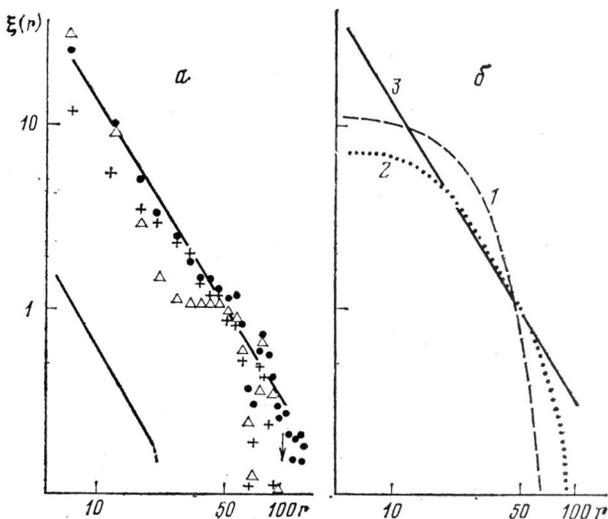


Рис. 3. Сравнение различных корреляционных функций. *а*: крестики — корреляционная функция в области $b^I \geq 40^\circ$, треугольники — $\xi(r)$ в области $|b^I| \geq 40^\circ$, $r \leq 400$ Мпс; точки и верхняя прямая 3 перенесены с рис. 2; нижняя прямая 3 соответствует корреляционной функции галактик ($\xi \approx (8/r)^{1.8}$, $r \leq 20$ Мпс). *б*: кривая 1 — результаты Хаузера и Пиблса (1973); кривая 2 — модель Дорошкевича и Шандарина (1976) при $\Omega = 0.2$; прямая 3 — аппроксимационный закон (см. рис. 2)

крываются, поэтому не удивительно, что треугольники и крестики находятся по одну сторону от прямой.)

На рис. 3, *б* сопоставляются результаты разных работ. Прямая 3 на этом рисунке перенесена с рис. 2, кривая 1 представляет корреляционную функцию ξ , восстановленную Хаузером и Пиблсом (1973) по проекции на небе всего каталога Эйбла ($|b^I| \geq 40^\circ$), за исключением скоплений нулевого класса богатства ($\xi \approx 11.5 \exp(-r/31.9)^2$). Кривая 2 получена в работе Дорошкевича и Шандарина (1976) для спектра возмущений адиабатического типа, заданного в виде

$$\left(\frac{\delta\rho}{\rho}\right)_k = \begin{cases} \sim k^{-1} \exp(-kR_c), & \text{если } 0.6 < kR_c < 9 \\ 0, & \text{если } kR_c < 0.6 \text{ или } kR_c > 9. \end{cases} \quad (3)$$

При этом полагалось, что скопление образуется в той точке, где впервые зародился «блин», т. е. в точке локального максимума наибольшего собственного значения тензора деформации (Зельдович, 1970). Наши расчеты показывают, что для совпадения корреляционной функции скоплений Эйбла и корреляционной функции точек зарождения «блинов» необходимо задать $R_c \approx 30$ Мпс, а при $H = 50$ км/с/Мпс это означает, что $\Omega = 0.2$.

Важной характеристикой скученности объектов служит разность среднего числа соседей у случайно выбранного объекта и среднего числа соседей при равномерном распределении, т. е. величина

$$N_c = 4\pi \int_0^\infty \xi n r^2 dr. \quad (4)$$

Если в интервале $5 < r < 100$ Мпс корреляционная функция равна $(50/r)^{1.6}$, то $N_c = 2,65$, причем основная часть интеграла набирается на больших расстояниях (~ 100 Мпс). Эта величина близка к значению N_c , найденному Хаузером и Пиблсом (1973): $N_c = 1-3$. Такое значение N_c

означает, что либо вообще нет, либо есть небольшое количество скоплений, состоящих из 10 и более членов. Отметим, что $\sim 9\%$ скоплений входит в пары с расстоянием 5—10 Мпс (7 пар). Эти пары и ответственны за $\xi \approx \approx 25$ в этом интервале расстояний.

4. Наши результаты свидетельствуют о том, что в диапазоне $5 < r < < 100$ Мпс корреляционная функция богатых скоплений галактик следует степенному закону $\xi(r) = (r_0/r)^\gamma$, $r_0 = 40-50$ Мпс и $\gamma = 1.3-1.9$. С помощью имеющихся у нас данных трудно достоверно оценить ξ при $r \gtrsim 100$ Мпс, но есть признаки того, что при $r \gtrsim 100$ Мпс величина ξ становится отрицательной (≈ -0.1). Сопоставление наших результатов с результатами Хаузера и Пиблса (1973) показывает, что по порядку величины оценки ξ согласуются. Однако прямой расчет объемной корреляционной функции сопряжен с меньшими ошибками и демонстрирует степенной ход ξ , что трудно было определить по весьма «замытой» поверхностной корреляционной функции.

Корреляционная функция скоплений разительно отличается от корреляционной функции, определяемой галактиками. При $r = 10$ Мпс корреляционная функция галактик равна 0.5—1, тогда как корреляционная функция скоплений в ~ 20 раз больше.

5. К сожалению, пока нет удовлетворительного объяснения наблюдаемой корреляционной функции скоплений. В работе Хаузера и Пиблса (1973) предполагалось, что скученность скоплений может возникнуть в результате того, что отдельные скопления притягиваются друг к другу. Это притяжение, вероятно, должно сказываться на расстояниях 5—20 Мпс, но нетрудно показать, что притяжением ближайших скоплений, пусть даже окруженных огромными гало с массой $10^{16}-10^{17} M_\odot$, невозможно объяснить тот факт, что $\xi = 1$ при $r \approx 50$ Мпс: за космологическое время скопления не успевают сдвинуться на необходимое расстояние.

Вероятно, некоторые затруднения с объяснением скученности могут возникнуть в стандартной энтропийной теории: в ней предполагается, что нет выделенного масштаба скучивания (в этом смысле скопления не отличаются от галактик), тогда как наблюдения показывают, что галактики и скопления распределены в пространстве различным образом.

Положение, возможно, несколько лучше в адиабатической теории образования галактик (Зельдович, 1970). Согласно этой теории, галактики образуются в результате мелкомасштабной фрагментации сильно сплюснутото «блина» — сверхскопления. Поэтому корреляционная функция галактик должна каким-то образом характеризовать структуру сверхскопления. Богатые скопления галактик сформировались под действием другого механизма. Своим появлением они обязаны крупномасштабным течениям внутри сверхскопления. Таким образом, в адиабатической теории скопления и галактики образуются в различных процессах и не удивительно, что их корреляционные функции различны. В ряде работ были исследованы отдельные аспекты этих двух процессов. Так, в работе Клыпина и Шандарина (1982) с помощью численных расчетов было показано, что корреляционная функция галактик может быть согласована с наблюдениями. А в работе Дорошкевича и Шандарина (1976) исследовалось пространственное распределение тех точек, где впервые зародились «блины» (рис. 3, б; скопления, видимо, коррелируют с этими точками). Результаты этих работ внушают оптимизм, но, конечно, предстоит пройти еще длинный путь, прежде чем картина существенно прояснится.

Авторы благодарят А. Г. Дорошкевича и И. Д. Караченцева за стимулирующие обсуждения и помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

- Валентийн (Valentijn E. A.). *Astron. and Astrophys.*, 1981, 102, 53.
Дорошкевич А. Г. и Шандарин С. Ф. Препринт ин-та прикл. матем. им. М. В. Келдыша АН СССР, 1976, № 3.

- Дреслер (Dressler A.). *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 1980, 42, 565.
 Зельдович Я. Б. *Astron. and Astrophys.*, 1970, 5, 84.
 Караченцев И. Д. и Копылов А. И. Письма в АЖ, 1981, 7, 515.
 Киришнер и др. (Kirshner R. P., Oemler A., Schechter P. L.). *Astron. J.*, 1978, 83, 1549.
 Клыпин А. А. и Шандарин С. Ф. Препринт Ин-та прикл. матем. им. М. В. Келдыша АН СССР, 1982, № 136.
 Нунан (Noonan T. W.). *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 1981, 45, 613.
 Пиблс (Peebles P. J. E.). *The Large—Scale Structure of the Universe*, Princeton: Princeton Univ. Press, 1980.
 Рейхерт и др. (Reichert G., Mason K. O., Lea S. M., Charles P. A. Bowyer S., Pravdo S.). *Astrophys. J.*, 1981, 247, 803.
 Сэндидж (Sandage A.). *Astrophys. J.*, 1978, 83, 904.
 Таренги и др. (Tarengi M., Chincarini G., Rood H. J., Thompson L. A.). *Astrophys. J.*, 1980, 235, 724.
 Фанти и др. (Fanti R., Gioia I., Lari C., Ulrich M.-H.). *Astron. and Astrophys. Suppl Ser.*, 1978, 34, 341.
 Фетисова Т. С. *Астрон. ж.*, 1981, 58, 1137.
 Хаузер и Пиблс (Hauser M. G., Peebles P. J. E.). *Astrophys. J.*, 1973, 185, 757.
 Хинцен и др. (Hintzen P., Scott J. S., McKee J. D.). *Astrophys. J.*, 1980, 241, 486.
 Хосселл и др. (Hoessel J. G., Gunn J. E., Thuan T. X.). *Astrophys. J.*, 1980, 241, 486.
 Эбл (Abell G. O.). *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 1958, 3, 211.

Ин-т прикладной математики
 им. М. В. Келдыша АН СССР, Москва

Поступила в редакцию
 2 июля 1982 г.

Специальная астрофизическая
 обсерватория АН СССР, пос. Нижний Архыз