

УДК: 524.45

СТРУКТУРА СКОПЛЕНИЙ. ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА

Б. И. ФЕСЕНКО

Поступила 26 ноября 1987

Принята к печати 15 апреля 1988

По опубликованным данным изучено 14 богатых ложных скоплений галактик с применением новых приемов анализа. Мелкие субструктуры в этих скоплениях не выделяются на фоне случайных флуктуаций. Обнаружено систематическое несовпадение центров галактик со скоростями, большими и меньшими средней скорости скопления. Положительная корреляция между коэффициентами асимметрии распределения координат членов этих групп свидетельствует об асимметричности сглаженных форм центральных областей некоторых скоплений.

1. *Введение.* При изучении скоплений галактик возникают, в частности, две проблемы, заключающиеся в исключении объектов переднего и заднего фона и в различении реальных субструктур на фоне случайных флуктуаций в распределении членов.

Известно, что скопления, отобранные для исследования, «предпочитают» располагаться в окнах межзвездной среды, числа же галактик фона оценивают, изучая произвольные области. К тому же в критерии отбора скоплений всегда отдается предпочтение тем случаям, когда в области случайно повышено число галактик фона. Это объясняется относительной малочисленностью богатых скоплений. Легче получить ложное богатое скопление в области небольшого реального скопления там, где имеется значительная положительная флуктуация чисел галактик фона.

При анализе второй проблемы необходимо учесть возможный эффект мелких субструктур, способный резко усилить роль случайных флуктуаций. При его наличии в скоплении, например, могут случайно возникнуть два больших сгущения. При отсутствии субструктур вероятность такого распределения галактик ничтожно мала. Если игнорировать возможность присутствия мелких субструктур, то можно прийти к ошибочному выводу о свойствах этого скопления.

Рассмотрим новый подход к изучению строения скоплений (он описан также в [1]). Используется некоторая функция от координат x и/или

скоростей членов. Ее среднее значение для совокупности скоплений несет в себе такую информацию, которую другими методами получить было бы трудно, может быть, невозможно. Недостатком же такого подхода является невозможность судить об особенностях какого-то отдельного скопления. Выводы касаются лишь свойств совокупности скоплений.

Заметим, что субъективное впечатление о существовании субструктур, появляющееся иногда при разглядывании снимков скоплений (и даже используемое некоторыми авторами при классификации) — очень ненадежный способ доказательства, поскольку при этом неизбежно игнорируются флуктуации в распределении галактик.

Ниже основная идея, предложенная в [1], применяется к данным о 14 хорошо изученных скоплениях. При этом предлагается ряд новых приемов исследования, которые, по нашему мнению, будут полезны и при изучении других скоплений.

2. *Материал.* Рассмотрим выборку [2] богатых скоплений южного неба, данные о которых получены одними и теми же авторами, инструментами и методами. Эти весьма однородные данные включают лучевые скорости и координаты более 600 галактик в 14 скоплениях, причем изучались лишь центральные области. Лучевые скорости центроидов скоплений заключены в интервале от 14000 до 45000 км/с, а квадратные корни σ_V из дисперсии лучевых скоростей членов изменяются от 453 до 1180 км/с. В качестве членов рассматривались галактики обычно не далее 0.67 Мпк от центра ($H = 75$ км/с/Мпк). Такое ограничение сильно уменьшает примесь галактик фона. Кроме того, лучевые скорости членов, изученных нами, удовлетворяли условию:

$$|V - \langle V \rangle| < 3\sigma_V, \quad (1)$$

где значения $\langle V \rangle$ и σ_V оценены в [2].

3. *Метод шестерок.* В [1] для каждого из 43 скоплений (из числа изученных в [3]) по 6 ярчайшим членам определялась функция:

$$m = \left| \sum_{i=1}^6 \text{sign}(x_i - \langle x \rangle) \right|, \quad (2)$$

где x_i — одна из двух прямоугольных координат и $\langle x \rangle$ — среднее арифметическое из 6 значений. Аналогичная величина определялась для координат y_i . Усреднение по всем скоплениям дало $\langle m \rangle = 1.35 \pm 0.129$, тогда как значение, ожидаемое при отсутствии субструктур, составляет только 0.92.

Этот результат проверим здесь для наших 14 скоплений по галактикам, удовлетворяющим условию

$$|V - \langle V \rangle| < 300 \text{ км/с.} \quad (3)$$

Всего были выделены 48 взаимно независимых случайных шестерок. Получено значение: $\langle m \rangle = 0.79 \pm 0.155$. Поскольку в первом случае данные о скоростях не использовались, то различие с последним результатом может объясняться эффектом неучтенных галактик фона. Но возможны и другие объяснения.

4. *Микроструктура распределений в картинной плоскости.* Введем характерную длину:

$$l = 2\sqrt{\sigma_x \sigma_y / N}, \quad (4)$$

где σ_x и σ_y — стандарты распределений координат x и y , N — число изучаемых членов скопления. Пусть n — число членов, имеющих ближайшего соседа не далее расстояния l , и $\sigma_x = \sigma_y$. В случае усеченно-нормального распределения по каждой координате и при отсутствии субструктур справедливо равенство:

$$\langle n \rangle / N = 1 - c^{-1} \int_0^A \exp\left(-\frac{2(N-1)}{N} \exp(-z) - z\right) dz, \quad (5)$$

где $c = 1 - \exp(-A)$ и A — параметр усечения. В каждом из 14 скоплений случайно выделялось по 20 галактик, подчиняющихся условию (1), и измерялись расстояния до ближайших галактик из той же выборки. Усреднение по всем скоплениям дало значение $\langle n \rangle / 20 = 0.60 \pm 0.015$ в прекрасном согласии с теоретическим значением при $A = 2.5$ (0.595).

Таблица 1

Интервал скоростей	Σ	Σ_1	Σ_2	Σ_3
1	116	30	86	10
2	91	22	69	9
3	78	25	53	1
4	94	19	75	12
5	113	29	84	10

5. *Распределение скоростей.* В табл. 1 в столбце Σ приводятся суммарные данные о распределении галактик по 20% интервалам скоростей, рассчитанным для нормального распределения (первый из них, например, соответствует значениям величины $(V - \langle V \rangle) / \sigma_V$ от $-\infty$ до -0.8416). Столбцы Σ_1 и Σ_2 соответствуют скоплениям с $\sigma_V < 700$ и $\sigma_V > 1000$ км/с. По критерию χ^2 отличие от нормального распределения статистически зна-

чимо в случаях Σ и Σ_2 . Наиболее разителен случай скопления С64 (случай Σ_3 в таблице), отчетливо разделившегося на два субскопления в пространстве скоростей. В картинной плоскости существенного разделения в данном случае не видно.

6. *Асимметрия.* 1) В качестве коэффициента, характеризующего асимметрию эмпирического распределения по координате x , используем величину

$$t_x = \sqrt{\frac{(N+1)(N+3)}{6(N-2)}} \cdot \frac{\langle (x - \langle x \rangle)^3 \rangle}{\langle (x - \langle x \rangle)^2 \rangle^{3/2}}. \quad (6)$$

Аналогично определим величину t_y для координат y . Согласно [4] величины t_x и t_y имеют стандартное нормальное распределение — если величины x и y распределены по нормальным законам. В этом случае величина

$$\xi = \sum_{i=1}^{14} (t_{x_i}^2 + t_{y_i}^2), \quad (7)$$

где суммирование ведется по всем скоплениям, должна подчиняться χ^2 -распределению с 28 степенями свободы. Наблюдаемое значение ξ для галактик, удовлетворяющих условию (1), равно 30.14. При отсутствии субструктур вероятность получить случайно такое или большее значение равна 0.36, то есть достаточно велика. Напомним, что наличие субструктур должно приводить к повышенным значениям ξ .

2) Величину t_V , аналогичную величинам t_x и t_y , можно определить и для распределения скоростей. При тех же предположениях величина

$$\xi_V = \sum_{i=1}^{14} t_{V_i}^2 \quad (8)$$

должна подчиняться χ^2 -распределению с 14 степенями свободы. Обработка данных наблюдений приводит к значению $\xi_V = 21.93$, случайное превышение которого может произойти с вероятностью 0.08. Впрочем, следует принять во внимание, что использованное нами ограничение (1) ведет к занижению флуктуаций величины t_V и к завышению вероятности.

7. *Подсистемы приближающихся и удаляющихся членов.* Галактики, подчиняющиеся условию (1), разобьем на группы А и В соответственно с $V > \langle V \rangle$ и $V < \langle V \rangle$, где усреднение выполнено по галактикам обеих групп. Сравнение этих двух выборок помогает ответить на интересные вопросы.

1) Если группы А и В принадлежат единому стационарному скоплению, то координаты их центроидов должны совпадать в пределах случайных флуктуаций. Для каждого скопления определим величину:

$$\eta = \frac{(\langle x \rangle_A - \langle x \rangle_B)^2}{\sigma_{xA}^2 + \sigma_{xB}^2} + \frac{(\langle y \rangle_A - \langle y \rangle_B)^2}{\sigma_{yA}^2 + \sigma_{yB}^2}, \quad (9)$$

где σ_{xA} , σ_{xB} и т. д. — эмпирические стандарты величин $\langle x \rangle_A$, $\langle x \rangle_B$ и т. д. В нашем случае каждая группа содержит в среднем 17.6 галактик — число достаточно большое, чтобы распределения величин $\langle x \rangle_A$, $\langle x \rangle_B$ и т. д. можно было считать нормальными независимо от вида распределения величин x и y (не очень сильно отличающегося от нормального). Тогда величина η должна приблизительно подчиняться χ^2 -распределению с двумя степенями свободы. Если мы просуммируем значения η для всех 14 скоплений, то сумма будет распределена по тому же закону, но число степеней свободы составит 28.

Значение σ_{xA}^2 определяется по формуле:

$$\sigma_{xA}^2 = (\langle x^2 \rangle_A - \langle x \rangle_A^2) / (N_A - 1). \quad (10)$$

Аналогичные формулы используются при вычислении величин σ_{xB}^2 и т. д. Если в скоплениях присутствуют субструктуры, то число взаимно независимых координат уменьшится примерно в S раз, где S — типичная населенность субструктуры; примерно во столько же раз должна быть увеличена величина σ_{xA}^2 . Если этого не делать, то ожидаемое среднее значение величины η уже не будет равно двум, как раньше, а возрастет примерно в S раз.

Величина $\sum_{i=1}^{14} \eta_i$, определенная для 14 скоплений, оказалась равной

40.65. При отсутствии субструктур вероятность случайного получения такого или большего значения равна 0.058. Если рассмотреть только те четыре скопления, у которых $\sigma_v > 1000$ км/с, то для них сумма значений η должна иметь χ^2 -распределение с 8 степенями свободы. Наблюдаемая сумма равна 23.54. Вероятность случайного получения такого или большего значения составляет всего 0.0027. У остальных скоплений сумма значений η соответствует вероятности 0.65.

2) Существует ли тенденция галактик данной группы образовывать субструктуры? Ответ попытаемся получить сопоставляя средние числа галактик групп А и В в окрестности каждой галактики (в зависимости от принадлежности последней к той или иной группе). Определим величины:

$$\Delta_A = \langle n_{AA} \rangle - ((N_A - 1)/N_B) \langle n_{AB} \rangle$$

и

$$\Delta_B = \langle n_{BB} \rangle - ((N_B - 1)/N_A) \langle n_{BA} \rangle, \quad (11)$$

где N_A и N_B — числа галактик в группах A и B , n_{AA} — число галактик группы A в окрестности галактики той же группы; величины n_{BB} , n_{AB} и n_{BA} определяются аналогично (например, в случае n_{AB} подсчитываются объекты типа B в окрестности объектов типа A). Если галактики групп A и B перемешаны в скоплении случайно, то значения Δ_A и Δ_B должны быть близки к нулю. Для наших 14 скоплений значение величины $\Delta = (\Delta_A + \Delta_B)/2$ оказалось равным $+0.22 \pm 0.13$. Это означает, что данным методом эффект субструктур не выявляется. В качестве „окрестности“ рассматривался квадрат со стороной примерно равной $2l$ (см. (4)) и с центром в данной галактике.

3) Обусловлена ли асимметрия в распределении координат x и y только случайными флуктуациями? Ответ можно получить из сравнения значений t_x и t_y (см. (6)) в группах A и B . При полной симметрии априорного (или сглаженного за случайные флуктуации) распределения корреляции между значениями t_{xA} и t_{xB} , t_{yA} и t_{yB} быть не должно. Однако в 28 парах значений коэффициентов асимметрии коэффициент корреляции по Спирмену оказался равным $+0.478$. Вероятность случайного получения такого или большего значения составляет всего 0.0054.

8. Дисперсия скоростей и структура скопления. В табл. 2 приводятся значения σ_v , заимствованные из [2], а также рассчитанные нами значения η (см. (9)) и Δ (среднее арифметическое из значений Δ_A и Δ_B , определенных формулами (11)). Величина η характеризует сдвиг центроида группы A относительно группы B . Величина Δ является мерой тенденции галактик одной и той же группы располагаться рядом в скоплении. Эти величины взаимно связаны, хотя и не функционально (коэффициент корреляции по Спирмену равен $+0.912$). Как связаны они с дисперсией скоростей?

Коэффициент корреляции по Спирмену между величинами σ_v и η равен $+0.7055$. Вероятность случайно получить такое или большее значение при отсутствии реальной корреляции составляет всего 0.0033. Ранее, используя метод сумм значений η для разных скоплений, мы показали, что непомерно большой сдвиг центроидов групп A и B обнаруживается лишь у скоплений с $\sigma_v > 1000$ км/с.

Корреляция между величинами σ_v и Δ оказалась более слабой ($R = +0.618$), но все еще статистически значимой.

9. *Заключение.* Новый подход к анализу структуры скоплений галактик позволил получить три существенных результата.

1. Асимметрия в распределении координат 6 ярчайших членов скоплений заметно выше, чем ожидается при чисто случайных флуктуациях (см. [1]).

Таблица 2

Скопление	σ_V (км/с)	η	Δ
C02	547	1.52	-0.052
C03	1011	1.66	-0.033
C19	1030	5.98	+1.208
C20	854	1.48	-0.382
C21	631	1.02	-0.168
AC1	1072	5.43	+0.812
C30	615	2.88	+0.526
C31	769	2.22	-0.048
C37	927	3.07	+0.024
C39	453	0.52	-0.171
C52	1180	10.47	+0.864
C64	821	2.41	+0.452
C65	797	1.72	+0.074
C67	726	0.27	-0.088

2. У скоплений с дисперсиями лучевых скоростей, превышающими $(1000 \text{ км/с})^2$, центроиды галактик с $V > \langle V \rangle$ определенно смещены в картинной плоскости относительно центроидов галактик с $V < \langle V \rangle$. Такое смещение может иметь два объяснения: либо в этих скоплениях существуют пространственно обособленные структуры, движущиеся относительно центра с существенно различающимися скоростями, либо мы имеем дело с перекрывающимися на небе, но взаимно независимыми скоплениями. При $H = 75 \text{ км/с/Мпк}$ и $\Delta V \approx 1.5 \sigma_V$ расстояние между ними по лучу зрения должно быть порядка 20 Мпк. Напомним, что здесь не рассматривались галактики, которые в картинной плоскости находятся примерно далее 0.7 Мпк от центра сгущения; из тех же галактик, которые находятся на меньших расстояниях, не рассматривались объекты с $|V - \langle V \rangle| > 3\sigma_V$.

3. Впервые получено объективное свидетельство того, что асимметрия в распределении координат членов скоплений имеет две составляющие.

Одна из них обусловлена случайной флуктуацией, а другая — реальной асимметрией сглаженного распределения галактик. Впрочем, этот результат нуждается в проверке на другом материале.

Поиски мелкомасштабных субструктур в скоплениях (например, двойных галактик) успехом не увенчались. Это может свидетельствовать об обманчивости субъективного впечатления, возникающего при разглядывании снимков скоплений.

На первый взгляд, наш вывод об асимметрии сглаженных форм хотя бы некоторых скоплений в проекции на картинную плоскость находится в противоречии с тем, что среднее значение квадратов коэффициентов асимметрии t_x и t_y (см. (6)) равно 1.08 ± 0.27 , то есть почти равно значению, ожидаемому при точной симметрии априорных распределений (асимметрия возникает только благодаря случайным флуктуациям). Однако большая ошибка наводит на предположение, что метод корреляций значений t в группах А и В просто оказался более чувствительным.

Горьковский педагогический
институт

STRUCTURE OF CLUSTERS — APPLICATION OF NEW METHODS OF INVESTIGATION

B. I. FESENKO

On the basis of published data 14 southern rich clusters of galaxies are studied with the use of new methods of investigation. Small substructures are not distinguished against random fluctuations. It was discovered that the centroids of the galaxies with velocities exceeding and not exceeding the mean velocity of cluster do not coincide. A positive correlation between the coefficients of the asymmetry in the coordinate distributions of the members of these groups is an evidence of the asymmetrical smoothed shape of some clusters.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. И. Фесенко, Л. М. Фесенко, Новые приемы изучения строения скоплений галактик и результаты их применения (рукопись готовится к депонированию в ВИНДИТИ).
2. M. Colless, P. Hewett, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 224, 453, 1987.
3. A. Dressler, Astrophys. J. Suppl. Ser., 42, 565, 1980.
4. Б. А. ван дер Варден, Математическая статистика, М., 1960.