# АСТРОФИЗИКА

ТОМ 24 ИЮНЬ, 1986 ВЫПУСК 3

УДК: 524.7—17


## СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НАБЛЮДАЕМЫХ КРАТНЫХ СИСТЕМ. I. КОМПАКТНЫЕ ГРУППЫ ГАЛАКТИК


С. А. МАЛЫХ, В. В. ОРЛОВ



Поступила 30 мая 1985
Принята к печати 20 января 1986



Предложен метод статистического изучения конфигураций кратных систем, позволяющий судить о их статических и динамических свойствах; сжатие или вытянутость, иерархичность, кольцеобразность структуры, вращения и т. д. Метод применен для исследования выборки из 100 изолированных компактных групп галактик списка П. Хиксона. Показано, что группы имеют тенденцию к вытянутости. Их средняя видимая сферичность равна приблизительно 0.4. Иерархичность структуры не обнаружена.


Кратные системы гравитационно связанных и/или имеющих генетическую общность объектов в разные моменты времени имеют различные видимые конфигурации. Одной из задач исследования этих систем является оценка их конфигурационных характеристик, таких, как сжатие, иерархичность, изогнутость, кольцеобразность. Подобные оценки, если они получены для достаточно большого числа однородных систем и статистически значимы, позволяют делать определенные выводы о динамике и происхождении рассматриваемого класса систем.

Оценка конфигурационных характеристик может производиться при помощи некоторого параметра (или нескольких параметров), вычисляемого по измеренным расстояниям между объектами группы и от группы к группе изменяющегося как случайная величина.

В настоящей работе исследуются тенденции к сжатию и иерархичности групп, состоящих из $n \geqslant 3$ объектов. Вводятся безразмерные конфигурационные параметры $C$ и $B$, характеризующие эти особенности структуры:

1) Величина $C$ — среднее значение суммы квадратов синусов углов всевозможных треугольников, образованных членами системы. Если $n$ точек лежат на одной прямой («цепочка»), то $C = 0$; если точки находятся

в вершинах равносторонних треугольников, то $C = 9/4$ (это значение может достигаться при $n = 3$).

2) Параметр $B$ — вариация квадратов попарных расстояний $r_{ij}$ в группе, определяемая выражением

$$B = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i=2}^{n} \sum_{j=1}^{i-1} (r_{ij}^2 - A)^2/A^2, \tag{1}$$

где

$$A = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i=2}^{n} \sum_{j=1}^{i-1} r_{ij}^2 \tag{2}$$

есть структурный параметр, введенный в работе Т. А. Агекяна [1]. Минимум величины $B$ достигается в случае правильного $n$-угольника, его значение равно $\frac{n-3}{2n}$; величина $B$ возрастает с увеличением иерархичности структуры: если система состоит из двух разделенных подгрупп численностью $m$ и $n-m$ объектов и расстояния между членами каждой из подгрупп равны нулю, то значение

$$B = \frac{n(n-1)}{2m(n-m)} - 1. \tag{3}$$

Максимум величины $B$ достигается при $m = 1$, его значение равно $n/2 - 1$.

Предлагается следующий алгоритм для выяснения реальности и оценок среднего видимого сжатия систем, а также иерархичности структуры:

1) Для выборки из $N$ однородных систем (скажем, кратных звезд или галактик и пр.), содержащих по $n$ объектов, вычисляются средние значения и среднеквадратичные отклонения параметров $C$ и $B$ (при $N \gtrsim 10^3$ целесообразно также вычислять моменты более высокого порядка и строить функции распределения).

2) Полученные средние значения $\overline{C}$ и среднеквадратичные отклонения $\sigma_C$ сопоставляются с математическими ожиданиями $MC$ и стандартами $\sqrt{DC}$, получающимися при случайном равномерном распределении $n$ точек в круге единичного радиуса, когда сжатие и иерархичность структуры отсутствуют. Определяются уровни значимости уклонения $\overline{C}$ от математического ожидания $MC$

$$z = \frac{|MC - \overline{C}|}{\sqrt{DC}} \cdot \sqrt{N}. \tag{4}$$

При $Z > 2$ следует считать, что отклонение наблюдаемого распределения от равномерного не случайно. Вероятность противоположного события оценивается величиной

$$P(Z) = 1 - \Psi(Z), \tag{5}$$

где $\Psi(Z)$ — интеграл вероятностей.

Системы проявляют тенденцию к сжатию в случае $\overline{C} < MC$.

3) Определяется среднее значение видимой сферичности $\varepsilon$. Для этого производится сравнение $\overline{C}$ с математическими ожиданиями $MC(\varepsilon)$ при равнораспределениях точек в эллипсах с отношениями полуосей, равными $\varepsilon$. Искомое значение $\overline{\varepsilon}$ принимается равным сферичности того эллипса, для которого $MC = \overline{C}$. Расхождение между наблюдаемым значением среднеквадратичного отклонения $\sigma_C$ и стандартом $\sqrt{DC(\overline{\varepsilon})}$ при случайном равнораспределении характеризует степень разброса видимых сжатий в группах объектов.

4) Оценивается иерархичность структуры. Наблюдаемое среднее значение параметра $B$ (формула 1) сопоставляется с математическим ожиданием $MB(\varepsilon)$ при равнораспределении $n$ точек внутри эллипса, наиболее подходящего по степени сплюснутости. Сравнение производится в соответствии с пунктом 2). При $\overline{B} > MB(\varepsilon)$, вероятно, имеет место иерархичность структуры. Если $\overline{B} \approx MB(\varepsilon)$, то наблюдаемое распределение конфигураций сходно с равномерным случайным. При $\overline{B} < MB(\varepsilon)$ существует избыток кольцеобразных структур по сравнению со случайным распределением.

Изложенный метод в настоящей работе применяется для изучения выборки $N = 100$ изолированных компактных групп галактик, выделенных П. Хиксоном [2]. Метод отличается от метода, использованного П. Хиксоном и др. [3], и сообщает дополнительные результаты.

Средние значения и среднеквадратичные отклонения параметров $C$ и $B$ для систем различной кратности $n$ из списка [2] помещены в табл. 1 (третий—шестой столбцы). В первом столбце таблицы указана кратность $n$, а во втором приведено число $N$ групп данной кратности. Сопоставление с равномерным случайным распределением проводится отдельно только для выборок с $n = 4$, 5 и 6, так как число семи- и восьмикратных систем мало ($N = 2$ и 1).

Моменты равномерных случайных распределений определялись методом Монте-Карло для $N = 10\,000$ систем с использованием датчика псевдослучайных чисел на ЭВМ. Математические ожидания $MC$ и $MB$, а также стандарты $\sqrt{DC}$ и $\sqrt{DB}$ при равнораспределениях $n$ точек в эллипсах со сферичностями $\varepsilon$ приведены соответственно в табл. 2 и 3 для $n = 4$, 5 и 6; значения $\varepsilon$ указаны в шапках таблиц. Табл. 2 показывает

*Таблица 1*

ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

| $n$ | $N$ | $\overline{C}$ | $\sigma_C$ | $\overline{B}$ | $\sigma_B$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 64 | 1.091 | 0.515 | 0.554 | 0.222 |
| 5 | 25 | 1.279 | 0.425 | 0.554 | 0.200 |
| 6 | 8 | 1.218 | 0.219 | 0.655 | 0.136 |
| 7 | 2 | 0.850 | 0.334 | 0.934 | 0.488 |
| 8 | 1 | 1.409 | — | 0.929 | — |

*Таблица 2*

СЛУЧАЙНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА $C$

| | $n$ \ $\varepsilon$ | 1.0 | 0.8 | 0.6 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | 0.1 | 0.05 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $MC$ | 4 | 1.377 | 1.353 | 1.297 | 1.232 | *1.138* | *0.993* | 0.788 | 0.476 | 0.275 |
| $\sqrt{DC}$ | | 0.396 | 0.407 | 0.420 | 0.436 | 0.452 | 0.471 | 0.468 | 0.419 | 0.347 |
| $MC$ | 5 | 1.378 | 1.358 | *1.296* | *1.229* | 1.135 | 1.002 | 0.797 | 0.483 | 0.271 |
| $\sqrt{DC}$ | | 0.267 | 0.279 | 0.299 | 0.318 | 0.343 | 0.355 | 0.366 | 0.330 | 0.266 |
| $MC$ | 6 | 1.379 | 1.358 | 1.291 | *1.232* | *1.141* | 1.004 | 0.794 | 0.483 | 0.274 |
| $\sqrt{DC}$ | | 0.200 | 0.213 | 0.237 | 0.251 | 0.273 | 0.290 | 0.303 | 0.276 | 0.219 |

*Таблица 3*

СЛУЧАЙНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА $B$

| | $n$ \ $\varepsilon$ | 1.0 | 0.8 | 0.6 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | 0.1 | 0.05 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $MB$ | 4 | 0.460 | 0.470 | 0.505 | 0.535 | 0.576 | 0.635 | 0.697 | 0.756 | 0.778 |
| $\sqrt{DB}$ | | 0.188 | 0.188 | 0.189 | 0.188 | 0.183 | 0.174 | 0.157 | 0.142 | 0.139 |
| $MB$ | 5 | 0.529 | 0.542 | 0.591 | 0.641 | 0.703 | 0.777 | 0.853 | 0.934 | 0.956 |
| $\sqrt{DB}$ | | 0.193 | 0.197 | 0.201 | 0.209 | 0.211 | 0.206 | 0.201 | 0.198 | 0.201 |
| $MB$ | 6 | 0.564 | 0.584 | 0.649 | 0.709 | 0.781 | 0.871 | 0.971 | 1.049 | 1.073 |
| $\sqrt{DB}$ | | 0.181 | 0.189 | 0.201 | 0.216 | 0.220 | 0.221 | 0.227 | 0.233 | 0.236 |

убывание $MC$ приблизительно в 5 раз при изменении сферичности от 1.0 до 0.05. При этом стандарт меняется не столь сильно, достигая максимального значения при $\varepsilon \approx 0.2$—0.3. Математическое ожидание $MC$ не зависит от кратности системы. Зависимость $MB$ от сферичности эллипса более слабая, чем $MC$: при уменьшении $\varepsilon$ от 1.0 до 0.05 эта величина возрастает менее чем вдвое. Значение $MB$ также растет с увеличением кратности системы.

Результаты сопоставления значений $\overline{C}$, полученных из наблюдений и при равнораспределении точек в круге ($\varepsilon = 1$), представлены в табл. 4.

*Таблица 4*

СОПОСТАВЛЕНИЕ СЛУЧАЙНОГО И НАБЛЮДАЕМОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЙ $C$

| $n$ | $\overline{C}$ | $MC\ (\varepsilon=1)$ | $Z$ | $P\ (Z)$ | $\overline{\varepsilon}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 1.091 | 1.377 | 5.8 | $6.10^{-7}$ | 0.37 |
| 5 | 1.279 | 1.378 | 1.9 | 0.06 | 0.57 |
| 6 | 1.218 | 1.379 | 2.3 | 0.02 | 0.48 |
| $N=100$ | 1.146 | 1.377 | — | — | 0.41 |

В первом столбце таблицы указана кратность $n$; во втором — средние значения $\overline{C}$, полученные для компактных групп галактик; в третьем столбце — математические ожидания $MC$ при равнораспределениях в круге; в четвертом столбце приведены уровни значимости $Z$ отклонений наблюдаемых распределений от случайных; в пятом — вероятности $P\ (Z)$ того, что имеющееся отклонение носит случайный характер; в последнем столбце помещены средние видимые сжатия $\overline{\varepsilon}$, определенные линейной интерполяцией по табл. 2 (ближайшие значения $MC$ в табл. 2 выделены курсивом). В последней строке табл. 4 представлены результаты для всех 100 компактных групп галактик.

Как видно из табл. 4, наблюдаемое распределение конфигураций рассмотренных компактных групп галактик с большой вероятностью отличается от равнораспределения: имеет место сжатие видимых структур. На группы галактик могут случайным образом проектироваться галактики фона, что должно приводить в среднем к большей равнораспределенности структур, поэтому полученные средние видимые сферичности являются верхними оценками.

В табл. 5 помещены результаты сравнения распределений параметра иерархичности $B$: а) наблюдаемое распределение; б) равномерное случайное распределение внутри эллипса, имеющего сферичность $\varepsilon$, равную средней видимой сферичности, полученной из наблюдений для величины $C$. Обозначения табл. 5 аналогичны обозначениям табл. 4. Тенденции к иерархичности структуры не обнаружено; наблюдаемые значения $B$ даже несколько меньше математических ожиданий $MB(\varepsilon)$ случайных распределений, что свидетельствует о некоторой антииерархичности структуры — склонности к формированию кольцеобразных конфигураций.

*Таблица 5*

СОПОСТАВЛЕНИЕ СЛУЧАЙНОГО И НАБЛЮДАЕМОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЙ $B$

| $n$ | $\overline{B}$ | $MB(\varepsilon)$ | $Z$ | $P(Z)$ | $\varepsilon_{\varepsilon}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 0.554 | 0.597 | 1.9 | 0.06 | 0.37 |
| 5 | 0.554 | 0.606 | 1.3 | 0.19 | 0.57 |
| 6 | 0.655 | 0.723 | 0.9 | 0.37 | 0.48 |

Так как наблюдаемое сжатие компактных групп галактик с большой вероятностью не случайно, встает вопрос о его физической интерпретации. Можно предложить, по крайней мере, две гипотезы: 1) Компактные группы — вращающиеся системы (сфероиды) либо плоские «блины»; 2) Группы галактик сравнительно недавно сформировались в волокнах или жгутах межгалактической материи и сохранили следы вытянутости их родительской структуры.

Первая точка зрения обсуждается в работе Р. А. Варданяна и Ю. К. Мелик-Алавердяна [4], авторы которой считают, что видимую асимметрию групп галактик можно объяснить, полагая, что они являются эллипсоидами вращения со средней истинной сферичностью $\overline{\varepsilon_*}$, не превосходящей 0.1. Считая группы галактик эллипсоидами вращения, можно перейти от средней видимой сферичности $\overline{\varepsilon}$ к средней истинной сферичности $\overline{\varepsilon_*}$, используя формулу, полученную из уравнения К. В. Каврайской [5] в работе Т. А. Агекяна и Н. И. Сумзиной [6]

$$\overline{\varepsilon_*^2} = \frac{3}{2}\overline{\varepsilon^2} - \frac{1}{2} \tag{6}$$

в предположении о равновероятной ориентации сфероидов в пространстве. Приняв согласно данным табл. 4 $\sqrt{\overline{\varepsilon^2}} \approx 0.41$, получаем $\overline{\varepsilon_*^2} = -0.25$ для 100 групп галактик, что противоречит гипотезе о сплюснутости всех групп галактик. Отметим, однако, что это нижняя оценка, так как не учтена дисперсия видимых сжатий $\sigma_\varepsilon^2$. Разброс видимых сжатий реален, так как наблюдаемое значение $\sigma_C$ в среднем несколько больше, чем $\sqrt{DC}$ при случайном распределении, как видно из сопоставления табл. 1 и 2. Все-таки полученный результат $\overline{\varepsilon_*^2} < 0$ наводит на мысль о том, что среди компактных групп существуют и вытянутые образования.

В случае 2) группы галактик можно аппроксимировать вытянутыми сфероидами, для которых должно выполняться соотношение, установленное Т. А. Агекяном и Н. И. Сумзиной [6]

$$\overline{\varepsilon_*^2} = \overline{\varepsilon^3}. \tag{7}$$

Подставляя в (7) $\sqrt[3]{\overline{\varepsilon^3}} \approx 0.41$, получаем $\overline{\varepsilon_*^2} = 0.07$ и оценку средней истинной сферичности $\overline{\varepsilon}_* \approx \sqrt{\overline{\varepsilon_*^2}} = 0.26$.

Отсутствие видимой иерархичности структуры компактных групп галактик свидетельствует в пользу молодости этих объектов, а определенную тенденцию к кольцеобразности можно объяснить присутствием в группах поглощающей материи (см. [7]). Результаты настоящей работы не противоречат идеям К. Ф. Огородникова [8] об образовании галактик группами в плазменных жгутах.

Ленинградский государственный
университет

## THE STATISTICAL INVESTIGATION OF A STRUCTURE OF OBSERVED MULTIPLE SYSTEMS. I. COMPACT GROUPS OF GALAXIES

S. A. MALYKH, V. V. ORLOV

A method for the statistical study of multiple system configurations is proposed permitting us to judge their static and dynamic properties: oblation or prolation, hierarchy, ring-like structure, rotation etc. The method has been applied for the investigation of a sample of 100 isolated compact galaxy groups from the Hickson list. It has been shown that the groups have a prolate tendency. Their mean apparent sphericity is equal to approximately 0.4. The hierarchy of the structure has not been discovered.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Т. А. Агекян*, Вестн. ЛГУ, № 19, 77, 1982.
2. *P. Hickson*, Astrophys. J., 255, 382, 1982.
3. *P. Hickson, Z. Ninkov, J. P. Huchra, G. A. Mamon*, in: "Clusters and Groups of Galaxies", Trieste, 1983, I. 367.
4. *Р. А. Варданян, Ю. К. Мелик-Алавердян*, Астрофизика, 14, 195, 1978.
5. *К. В. Куврайская*, Вестн. ЛГУ, № 1, 148, 1958.
6. *Т. А. Агекян, Н. И. Сумзина*, Астрофизика, 3, 545, 1967.
7. *P. S. Wesson*, Astrophys. J. Lett., 19, 127, 1978.
8. *К. Ф. Огородников*, Докл. на семинаре по звездной динамике в ЛГУ, 1981.