А С Т Р О Ф И З И К А

ТОМ 27 ДЕКАБРЬ, 1987 ВЫПУСК 3

УДК: 524.388

ОБОБЩЕННЫЙ СТАТИСТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ВЫДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ И ФИЗИЧЕСКИХ КРАТНЫХ СИСТЕМ — СЛУЧАЙНЫХ И НЕСЛУЧАЙНЫХ ГРУППИРОВОК ОБЪЕКТОВ

Ж. П. АНОСОВА

Поступила 8 августа 1986
Принята к печати 20 августа 1987

Предложен статистический критерий выявления случайных и физических группировок звезд и галактик. Критерий применен к близким широким кратным звездам, триплетам галактик списка И. Д.Караченцева, В. Е. Караченцевой и А. Л. Щербановского и двойным галактикам списка О. Дахари, главные компоненты которых являются сейфертовскими галактиками. Выделены уверенно физические, вероятно физические, вероятно, оптические и уверенно оптические системы. Оценено предельное различие лучевых скоростей компонентов физических кратных галактик.

1. *Постановка задачи.* Выявление кратных систем звезд и галактик с физической связью компонентов среди наблюдаемых систем является первой задачей, возникающей при любых исследованиях этих объектов.

В настоящее время существуют (см. [1]) три типа критериев выявления вероятно физических кратных звезд:

1) *статические*, устанавливающие зависимость между видимой величиной m главного (наиболее яркого) компонента A кратной звезды с относительным угловым расстоянием ρ его спутников. Критерии этого типа обычно используются при составлении каталогов кратных звезд — например. каталога ADS [2]. Индекс-каталога IDS [3] и каталога Морской обсерватории WDS [4];

2) *статистические*, определяющие математическое ожидание E числа случайного попадания n одиночных звезд в круг радиуса ρ на небесной сфере при согласованности их собственных движений μ в пределах ошибок определения $\delta\mu$ (А. Н. Дейч, см. [5]): при вычислении величины E предполагается, что на небесной сфере N одиночных звезд распределены равномерно и случайно;

3) динамические критерии (Ж. Доманже [6] для двойных звезд, Ж. П. Аносова [1] для тройных звезд), дающие зависимость между величинами

угловых расстояний ρ и относительными линейными трансверсальными (в картинной плоскости) скоростями ν компонентов кратной системы, вычисленными по их собственным движениям μ и параллаксу π_A главного компонента; при этом предполагается, что параллаксы остальных компонентов системы, которые в большинстве случаев неизвестны, близки к π_A.

Очевидно, что критерии первых двух типов применимы в основном для кратных звезд, находящихся на больших расстояниях r от Солнца. Для близких звездных систем с физически связанными компонентами угловые расстояния ρ между ними могут быть велики и тогда критерии типа 1) и 2) для них не выполняются. Выполнение динамического критерия типа 3) в подавляющем большинстве случаев (за исключением систем с известными орбитами всех компонентов) является необходимым, но не достаточным условием физической связи компонентов кратной звезды, т. к. этот критерий не учитывает сходство или различие пространственных характеристик звезд — их параллаксов и лучевых скоростей.

Для кратных галактик (см., например [8—14]) применяемые критерии выделения систем с физической связью компонентов обычно состоят в совместном выполнении условий: 1) изолированность членов системы от галактик фона; 2) близость лучевых скоростей v ее компонентов — выполнение неравенства

$$|\Delta v| \leqslant \Delta v_{cr}, \tag{1}$$

где Δv_{cr} — принятое максимально возможное значение разности лучевых скоростей этих компонентов. Разные авторы при изучении кратных галактик используют различные, часто значительно отличающиеся друг от друга значения Δv_{cr} — в [8] эта величина принята равной 500 км/с, в [9] — 1000 км/с, [12, 13] — 400 и 600 км/с, [14] — дисперсия скоростей $\leqslant 300$ км/с.

В настоящей работе предложен обобщенный статистический критерий выявления оптических и физических кратных систем звезд или галактик, учитывающий сходство или различие индивидуальных конфигурационных и кинематических данных для всех компонентов системы

$$\{r, \mu, v\}_A; \quad \{\rho, r, \mu, v\}_i; \quad i = 1, 2, \ldots, n-1, \tag{2}$$

где A — главный компонент системы кратности n, i — его спутники, ρ — относительные угловые расстояния i-объектов от компонента A; r, μ, v — соответственно, расстояния по лучу зрения, модули относительных собственных движений и лучевые скорости членов рассматриваемых систем. При выводе обобщенного статистического критерия учитываются эффекты погрешностей определения величин (2)

$$\{\delta_r, \delta_\mu, \delta_\theta\}_A; \quad \{\delta\rho, \delta r, \delta\mu, \delta v\}_i. \tag{3}$$

Показано, что необходимым условием установления существования или отсутствия физической связи компонентов кратной системы, если их орбиты не определены, является наличие полного комплекса наблюдательной информации (2) и (3) для всех компонентов. При выполнении этого условия для каждой n-кратной системы, используя предложенный критерий, можно определить: 1) вероятность P того, что все n компонентов случайно попали в объем σ фазового пространства, занимаемый кратной системой; 2) вероятность P_s того, что некоторое количество $s < n-1$ ее компонентов попали случайно в объем σ, а система в действительности имеет кратность $n-s$; 3) математические ожидания E и E_s количества оптических систем с параметрами, соответствующими наблюдательным характеристикам (2) и (3), и числом компонентов n (или s), которые составили случайно эти системы в рассматриваемом фазовом пространстве Σ при равномерном заполнении его N объектами.

Сопоставляя полученные значения E и E_s с наблюдаемым числом N^* кратных систем с данными наблюдений, близкими к (2) в пределах ошибок их определения (3), можно сделать вывод о наличии или отсутствии физической связи компонентов рассматриваемой кратной системы с помощью следующего критерия:

I — если для математических ожиданий E или E_s числа оптических систем имеет место неравенство

$$E \lesssim 1 \text{ или } E_s \lesssim 1, \tag{4}$$

то кратная система является уверенно физической системой;

II — если выполнено условие

$$E \gtrsim \frac{N}{n} \text{ или } E_s \gtrsim \frac{N}{n-s}, \tag{5}$$

то кратная система является уверенно оптической системой; N/n — максимально возможное число систем кратности n в общем поле.

III — в случаях реализации соотношения

$$1 < E < \frac{N}{n} \text{ или } 1 < E_s < \frac{N}{n-s} \tag{6}$$

для рассматриваемой кратной системы уверенного вывода о наличии или отсутствии физической связи компонентов с помощью статистического критерия сделать нельзя. Возможно, что неуверенность вывода для таких систем обязана большим значениям ошибок (3) определения величин (2), и для этих систем необходимо уточнение наблюдательной информации.

Предложенный в настоящей работе статистический критерий может быть использован при решении ряда задач: 1) выявление кратных систем с физической связью компонентов в звездных и метагалактических полях; 2) выделение вероятных членов движущихся скоплений или потоков звезд; 3) исключение фоновых объектов в скоплениях звезд и галактик; 4) выделение внутри скоплений неслучайных группировок объектов — кратных систем с физически связанными компонентами и т. д.

2. *Определение вероятностей P, P_s и математических ожиданий E, E_s числа оптических систем.* Рассмотрим некоторую фигуру Σ в фазовом пространстве, являющуюся прямым произведением шара Σ_1 радиуса R в пространстве координат и шара Σ_2 радиуса U в пространстве скоростей. Введем предположения: 1) в центрах шаров Σ_1 и Σ_2 находится наблюдатель; 2) величина U для шара Σ_2 равна максимальному значению остаточных скоростей v изучаемых объектов, находящихся в шаре Σ_1; с доверительной вероятностью

$$P_0 = 0.95 \tag{7}$$

(при предположении о нормальном распределении остаточных скоростей объектов) значение U можно принять равным

$$U = |\bar{v}| + 2\sigma_v, \tag{8}$$

где $|\bar{v}|$—модуль среднего значения остаточных скоростей v объектов, σ_v — их средняя дисперсия скоростей. Введенное предположение о нормальности распределения остаточных скоростей объектов в настоящей работе используется для оценки верхнего значения модулей этих скоростей.

Пусть в фигуре Σ равномерно случайно распределены N одиночных объектов. Найдем вероятность того, что n объектов $(n<N)$ случайно попадут в некоторую область σ $(\sigma \in \Sigma)$ и образуют систему кратности n. В настоящей работе при определении величин P и E предполагается, что в области Σ изучаемые N объекты распределены равномерно случайно. Однако возможна модификация предлагаемого статистического критерия для случая любого закона распределения фазовой плотности объектов.

Определим фигуру σ в фазовом пространстве, занимаемую кратной системой. Главный компонент A этой системы фиксирует положение объема σ в области Σ. Для этого компонента А и его n—1 спутников из наблюдений известны величины (2) с погрешностями их определений (3). С доверительной вероятностью (7) при предположении о нормальной функции распределения погрешностей (3) максимальные значения разностей этих наблюдательных характеристик достигаются при следующих значениях этих величин:

если
$$r_A > r_i, \quad \mu_A > \mu_i, \quad v_A > v_i, \tag{9}$$

то
$$\begin{cases} \rho_i' = \rho_i + 2\delta\rho_i, \\ r_A' = r_A + 2\delta r_A, \quad r_i' = r_i - 2\delta r_i \\ \mu_A' = \mu_A + 2\delta\mu_A, \quad \mu_i' = \mu_i - 2\delta\mu_i \\ v_A' = v_A + 2\delta v_A, \quad v_i' = v_i - 2\delta v_i, \quad i = 1, \ldots, \ n-1. \end{cases} \tag{10}$$

Если какие-либо неравенства в (9) имеют обратные знаки, то в соответствующих равенствах (10) индексы i и A меняются местами. В дальнейшем для простоты записи формул штрихи при величинах ρ, r, μ, v будем опускать, подразумевая каждый раз, что эти величины имеют значения (10).

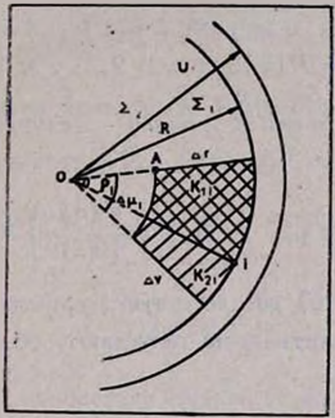

Рис. 1. Области $\Sigma = \Sigma_1 \cdot \Sigma_2$ и $\sigma_i = K_{1i} \cdot K_{2i}$ в фазовом пространстве.

Для каждого i-того компонента кратной системы величины (10) определяют в фазовом пространстве фигуру σ_i (рис. 1), которая является прямым произведением усеченного сферами конуса $K_{1i}(\rho_i, r_A, r_i)$ в пространстве скоростей

$$\sigma_i = K_{1i} \times K_{2i}. \tag{11}$$

Усеченные конусы K_{1i} и K_{2i} имеют следующие параметры:

K_{1i}: радиусы плоских оснований $r_A \cdot \mathrm{tg}\left(\frac{\rho_i}{2}\right)$ и $r_i \cdot \mathrm{tg}\left(\frac{\rho_i}{2}\right)$, высота

$$\Delta r_i = |r_i - r_A|, \tag{12}$$

K_{2i}: радиусы плоских оснований $r_A \cdot tg\left(\frac{\Delta\mu_i}{2}\right)$ и $r_i \cdot tg\left(\frac{\Delta\mu_i}{2}\right)$, высота

$$\Delta v_i = |v_A - v_i|, \tag{13}$$

где $\Delta\mu_i$ — модуль разности векторов $\bar{\mu}_A$ и $\bar{\mu}_i$ собственных движений объектов.

Вероятность $P(\sigma_i)$ попадания объекта i в область σ_i равна (ввиду независимости попадания i-того объекта в конусы K_{1i} и K_{2i})

$$P(\sigma_i) = \frac{V(\sigma_i)}{V(\Sigma)} = \frac{V(K_{1i})}{V(\Sigma_1)} \times \frac{V(K_{2i})}{V(\Sigma_2)}, \tag{14}$$

где $V(K_{1i})$, $V(K_{2i})$, $V(\sigma_i)$, $V(\Sigma_1)$, $V(\Sigma_2)$, $V(\Sigma)$ — объемы соответствующих фигур.

Введем обозначение

$$P_i = P(\sigma_i), \quad i = 1, 2, \dots, n-1. \tag{15}$$

Вероятность того, что объект A имеет $n-1$ случайных несвязанных между собой спутников, равна

$$P_n = P_1 \times P_2 \times \dots \times P_{n-1} = \prod_{i=1,\dots,n-1} \left\{\frac{V(\sigma_i)}{V(\Sigma)}\right\} \times \left[1 - \frac{V(\sigma)}{V(\Sigma)}\right]^{N-n}. \tag{16}$$

Второй множитель в (16) соответствует вероятности того, что остальные $N-n$ объектов в область σ_i не попадают; область σ есть объединение σ_i,

$$\sigma = \bigcup_{i=1,\dots,n-1} \sigma_i. \tag{17}$$

Так как спутником объекта A может быть любой объект из $N-1$ в области Σ, то для определения искомой вероятности P нужно вероятность P_n умножить на число сочетаний C_{N-1}^{n-1}. Тогда имеем

$$P = C_{N-1}^{n-1} \prod_{i=1,\dots,n-1} \left\{\frac{V(\sigma_i)}{V(\Sigma)}\right\} \times \left[1 - \frac{V(\sigma)}{V(\Sigma)}\right]^{N-n}. \tag{18}$$

Объем $V(\sigma)$ определяется величинами

$$\left| \begin{array}{ll} \rho = \max\limits_i (\rho_i), & \Delta r = \max\limits_i (\Delta r_i), \\ \Delta\mu = \max\limits_i (\Delta\mu_i), & \Delta v = \max\limits_i (\Delta v_i). \end{array} \right. \tag{19}$$

Если рассматривать только окрестность σ, занимаемую всеми компонентами системы (компоненты могут быть в любом месте области σ), то выражение (18) имеет более простой вид:

$$P = C_{N-1}^{n-1}\left[\frac{V(\sigma)}{V(\Sigma)}\right]^{n-1}\left[1-\frac{V(\sigma)}{V(\Sigma)}\right]^{N-n}. \tag{20}$$

Определим объемы $V(\sigma_i)$ и $V(\Sigma)$.

Объем фигуры Σ, представляющей в фазовом пространстве прямое произведение шаров Σ_1 и Σ_2, равен

$$V(\Sigma) = \frac{16}{9}\pi^2 R^3 U^3. \tag{21}$$

Объем области σ_i, являющейся прямым произведением усеченных конусов K_{1i} и K_{2i}, определяется выражением

$$V(\sigma_i) = \left(\frac{\pi}{12}\rho_i\right)^2 |r_A^3 - r_i^3| \cdot (\Delta\mu_i)^2 |r_A^2 v_A - r_i^2 v_i|, \tag{22}$$

в котором ввиду малости величин ρ_i и $\Delta\mu_i$ произведена замена

$$\operatorname{tg}(\rho_i/2) \simeq \rho_i/2, \quad \operatorname{tg}(\Delta\mu_i/2) \simeq \Delta\mu_i/2.$$

Подставляя формулы (21) и (22) в (15) и используя известное соотношение

$$U = 4.74\,\mu R \cdot \frac{4}{\pi} \tag{23}$$

между полной линейной скоростью звезды, ее собственным движением μ и расстоянием R по лучу зрения, после простых преобразований получим

$$P_i = \frac{V(\sigma_i)}{V(\Sigma)} = B_i, \tag{24}$$

где

$$B_i = 0.97\cdot 10^{-4}\rho_i^2\left(\frac{\Delta\mu}{\mu}\right)^2\left(\frac{r_A}{R}\right)^5\frac{|v_A|}{U}\left[1-\left(\frac{r_i}{r_A}\right)^3\right]\left|1-\left(\frac{r_i}{r_A}\right)^2\frac{v_i}{v_A}\right| \tag{25}$$

при $r_A > r_i$; при $r_A < r_i$ в выражении (25) индексы i и A при r и v меняются местами; величина ρ_i в (25) — угловое расстояние между компонентами A и i выражена в радианах. Отметим, что первые три множителя в (25) соответствуют критерию А. Н. Дейча [5].

В случае сходства наблюдательных характеристик в пределах погрешностей их определения для рассматриваемых объектов для объема $V(\sigma)$ выполняется условие

$$V(\sigma) \ll V(\Sigma) \tag{26}$$

и вторые множители в правых частях (18), (20) близки к 1.

Подставляя выражение (24) в (18), находим искомую вероятность

$$P = C_{N-1}^{n-1} \prod_{i=1,\dots,n-1} \{B_i\}[1-B]^{N-n}, \tag{27}$$

где величина B определяется формулой (25) при опускании в ней индекса i и соответствует объединению $\sigma = \bigcup_{i=1,\dots,n-1} \sigma_i$.

Выражение (20) тогда имеет вид

$$P = C_{N-1}^{n-1} B^{n-1} [1-B]^{N-n}. \tag{28}$$

Выражение (28) дает вероятность того, что все спутники объекта A одновременно случайно попали в окрестность σ этого объекта. Если в (28) число компонентов $n-1$ заменить на число $s < n-1$, то полученное выражение

$$P_s = C_{N_1}^{s} B^{s} [1-B]^{N_1-s}, \tag{29}$$

где $N_1 = N-1-(n-s)$, определяет вероятность того, что s спутников A случайно попали в область σ и изучаемая система в действительности имеет кратность $n-s$.

Для вычисления математического ожидания E числа оптических систем кратности n, занимающих объемы σ в области Σ, нужно: 1) в выражении (28) индексы $N-1$ и $n-1$ заменить на N и n, т. к. главным компонентом кратной системы в этом случае может быть любой объект из N; 2) полученное выражение умножить на $V(\Sigma)/V(\sigma)$ — число объемов σ, содержащихся в области Σ. Тогда получим

$$E = C_N^n B^{n-1} [1-B]^{N-n}. \tag{30}$$

Выражения (28)—(30) определяют искомые величины — вероятности P, P_s и математические ожидания E, E_s (при замене в (30) индексов n на s и N на N_1) числа оптических кратных систем в области Σ с наблюдательной информацией, близкой к (2) с учетом погрешностей (3).

3. Применение обобщенного статистического критерия к наблюдаемым объектам. 1. *Широкие тройные звезды в окрестности Солнца.* В каталоге двойных и кратных звезд IDS [3] имеется некоторое количество ($\sim 1\%$) широких кратных систем с угловыми расстояниями $\rho > 2'$ между компонентами. Среди этих кратных звезд выделим семь широких тройных систем, находящихся на расстоянии $r \leqslant 20$ пк от Солнца и имеющих для всех компонентов полный комплекс наблюдательной информации (2) и (3). В пяти представленных широких кратных звездах компоненты, максимально отдаленные на небесной сфере, имеют сходные характеристики (2), а для систем ADS 10058 и 11853 у компонентов не согласуются расстояния r от Солнца и лучевые скорости v.

Используя предложенный в настоящей работе статистический критерий, для рассматриваемых кратных звезд определим вероятность P того, что самый отдаленный от главного компонента A компонент C случайно попал в его окрестность σ, и математическое ожидание E числа таких оптических систем в сфере радиуса $R=(r_A,\ r_c)_{max}$.

Приняты следующие характеристики звездного поля в окрестности Солнца (см. [15]): радиус окрестности $R = 20$ пк; средняя плотность звезд $\nu = 0.12$ зв./пк^3; средняя остаточная скорость звезд $|\bar{v}| = 20$ км/с; средняя дисперсия скоростей звезд $\sigma_v = 20$ км/с. Тогда определяются величины $U = 60$ км/с [см. (8)] — максимальная скорость звезд в рассматриваемой окрестности и численность звезд в ней

$$N = (4/3)\,\pi\nu R^3 = 3.5\cdot 10^3, \tag{31}$$

которая согласуется с оценкой Р. Вилен, полученной им по функции светимости звезд каталога Глизе. При вычислении величины E для ADS 11853 с $r_c=40$ пк указанные выше характеристики звездного поля сохранены. Для ADS 10058 ($r_c=700$ пк) определено нижнее значение E при $R=200$ пк, при котором, согласно Дж. Бахкол [16], эти характеристики звездного поля еще могут иметь место. Для сопоставления предложенного в настоящей работе критерия с критерием Дейча [5] и изучения индивидуального влияния наблюдательных характеристик (2) на величины P и E вычисления выполнены с последовательным добавлением информации: 1) учет только угловых расстояний между компонентами; 2) добавление собственных движений звезд; 3) дополнительный учет расстояний звезд по лучу зрения; 4) учет всего комплекса данных наблюдений (2) и (3).

Результаты выполненных вычислений приведены в табл. 1. Оказалось, что для пяти кратных звезд с большими значениями ρ (при сходстве остальных данных из (2)) для отдаленных компонентов оценки P и E малы ($P\sim 0, E\ll 1$) и поэтому можно считать, что эти кратные звезды являются уверенно физическими системами. Для тройной звезды ADS 10058 (с несогласующимися данными наблюдений для компонентов) величины P и E ($P=0.60$ $E\gg 1$) велики, поэтому эта тройная звезда является уверенно оптической системой. Для тройной звезды ADS 11853 определенного вывода о наличии или отсутствии физической связи компонентов сделать не удалось, что, возможно, произошло из-за больших ошибок определения расстояний компонентов по лучу зрения.

Таблица 1

ВЕРОЯТНОСТИ P И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОЖИДАНИЯ E ЧИСЛА ОПТИЧЕСКИХ ТРОЙНЫХ ЗВЕЗД

ADS	7114 ... + (9+10 UMa)	α Cen	20390 S3142	10058	11853	48	6175 (Кастор)
ρ'	$3.8\cdot10^{2}$	$1.3\cdot10^{2}$	$7.7\cdot10$	9.4	6.9	5.5	1.2
			Вероятности P				
1)	$5.0\cdot10^{-3}$	$7.6\cdot10^{-5}$	$2.6\cdot10^{-5}$	0.30	$2.6\cdot10^{-5}$	$1.4\cdot10^{-7}$	$7.2\cdot10^{-8}$
2)	$1.1\cdot10^{-4}$	$5.3\cdot10^{-7}$	$4.2\cdot10^{-7}$	0.60	$2.3\cdot10^{-5}$	$5.2\cdot10^{-9}$	$1.2\cdot10^{-8}$
3)	$7.3\cdot10^{-5}$	$2.0\cdot10^{-7}$	$2.5\cdot10^{-7}$	0.60	$2.2\cdot10^{-5}$	$3.0\cdot10^{-9}$	$5.9\cdot10^{-9}$
4)	$2.8\cdot10^{-5}$	$7.0\cdot10^{-8}$	$7.6\cdot10^{-8}$	0.30	$2.6\cdot10^{-5}$	$4.0\cdot10^{-10}$	$8.0\cdot10^{-10}$
R	20	20	20	200	50	20	20
			Математические ожидания E				
1)	8.5	0.13	$4.5\cdot10^{-2}$	$5.4\cdot10^{5}$	0.68	$2.4\cdot10^{-3}$	$1.2\cdot10^{-4}$
2)	0.18	$8.9\cdot10^{-4}$	$7.2\cdot10^{-4}$	$1.1\cdot10^{6}$	0.59	$3.4\cdot10^{-4}$	$1.9\cdot10^{-5}$
3)	0.12	$3.5\cdot10^{-4}$	$4.5\cdot10^{-4}$	$1.1\cdot10^{6}$	0.58	$2.0\cdot10^{-6}$	$9.1\cdot10^{-6}$
4)	$0.47\cdot10^{-1}$	$1.1\cdot10^{-4}$	$1.3\cdot10^{-4}$	$5.6\cdot10^{5}$	0.68	$2.6\cdot10^{-7}$	$1.3\cdot10^{-6}$

Отметим, что для последних двух тройных звезд применение критерия Дейча с учетом *одних* только астрометрических данных при расстоянии $R = r_A = 20$ пк дало следующий результат:

$$\begin{aligned} &\text{ADS 10058:}\quad P = 2.9\cdot10^{-7},\quad E = 5.1\cdot10^{-3};\\ &\text{ADS 11853:}\quad P = 2.4\cdot10^{-6},\quad E = 4.1\cdot10^{-4}, \end{aligned} \tag{32}$$

который свидетельствовал о наличии физической связи компонентов в них. Однако проведенные недавно астрофизические наблюдения этих тройных звезд [17, 18] показали несогласованность новой информации (фотометрические расстояния и лучевые скорости) для их компонентов, учет которой привел к выводу об оптичности этих систем.

2. *Кратные галактики в метагалактическом поле.* Для кратных галактик в связи с выполнением закона Хабла в предложенном статистическом критерии выражение (25) имеет вид

$$B_i = 6.2\cdot10^{-2}\rho_i^2\left(\frac{r_A}{R}\right)^3\left[1-\left(\frac{r_i}{r_A}\right)^3\right] \quad \text{при } r_i < r_A; \tag{33}$$

при $r_i > r_A$ индексы i и A меняются местами. Формулы (28), (30) и (33) представляют статистический критерий изолированности кратных систем в пространстве кординат.

Вычислим величины P и E для триплетов галактик списка В. Е. Караченцевой, И. Д. Караченцева и А. Л. Щербановского [8]. При определении искомых величин для этих галактик приняты следующие характеристики метагалактического поля: средняя плотность галактик $\nu = 0.05$ галактик / Мпк^3 (см. [5]); постоянная Хабла $H = 75$ км/с/Мпк; радиус шара $R = (r_A, r_i)_{max}$.

Таблица 2

ТРИПЛЕТЫ ГАЛАКТИК

№	E	№	E	№	E	№	E	№	E	№	E
1*	$3.4\cdot10^{-13}$	15*	$2.7\cdot10^{2}$	29	$8.2\cdot10^{2}$	43*	$6.8\cdot10$	57	$7.1.10^{3}$	71*	$2.1\cdot10^{2}$
2*	$2.2\cdot10^{2}$	16*	$2.9\cdot10^{2}$	30	$1.5\cdot10^{5}$	44*	$4.3\cdot10^{-3}$	58	$2.9\cdot10^{4}$	72*	$2.4\cdot10^{2}$
3*	$3.0\cdot10$	17	$8.8\cdot10^{3}$	31*	$6.9\cdot10^{2}$	45*	$2.2\cdot10$	59*	$2.1\cdot10^{2}$	73*	$3.5\cdot10^{3}$
4*	$8.5\cdot10$	18	$5.9\cdot10^{4}$	32	$5.2\cdot10^{3}$	46*	$1.3\cdot10^{3}$	60*	$0.8\cdot10^{4}$	74*	$7.1\cdot10^{3}$
5	$1.1\cdot10^{4}$	19	$9.1\cdot10^{4}$	33	$2.4\cdot10^{-1}$	47*	$1.4\cdot10^{2}$	61*	$5.8\cdot10$	75*	$5.5\cdot10^{2}$
6	$2.9\cdot10^{5}$	20	$4.7\cdot10^{2}$	34*	$4.1\cdot10^{3}$	48*	$3.3\cdot10^{2}$	62*	9.0	76*	$1.6\cdot10^{3}$
7	$7.2\cdot10^{4}$	21*	8.9	35	$1.9\cdot10^{4}$	49*	$2.3\cdot10^{2}$	63	$3.7\cdot10^{3}$	77*	$2.8\cdot10^{3}$
8	$2.3\cdot10^{3}$	22*	$5.5\cdot10^{-1}$	36*	$9.3\cdot10^{-2}$	50	$2.0\cdot10$	64*	$7.9\cdot10$	78*	$6.7\cdot10$
9	$2.2\cdot10^{4}$	23*	$1.7\cdot10^{-5}$	37	$0.5\cdot10^{7}$	51*	$1.2\cdot10^{2}$	65	$2.8\cdot10^{5}$	79*	$1.4\cdot10^{2}$
10	$1.8\cdot10^{3}$	24	$9.0\cdot10^{4}$	38*	$1.0.10^{2}$	52*	$1.4\cdot10$	66	$1.8\cdot10^{3}$	80*	2.2
11*	$6.0\cdot10$	25*	$8.8\cdot10^{-1}$	39*	$2.2\cdot10^{-1}$	53	$1.6\cdot10^{4}$	67*	$1.6\cdot10^{2}$	81*	$9.3\cdot10$
12*	$9.5\cdot10$	26*	$6.3\cdot10$	40	$9.1\cdot10^{4}$	54*	$4.8\cdot10^{-1}$	68	$2.3\cdot10^{2}$	82*	$1.7\cdot10$
13	$5.8\cdot10^{5}$	27	$5.6\cdot10^{4}$	41*	$3.8\cdot10^{-3}$	55*	1.7	69	—	83	$8.6\cdot10^{2}$
14*	$3.0\cdot10$	28*	$2.1\cdot10^{-2}$	42*	3.6	56	$1.6\cdot10^{5}$	70*	$3.5\cdot10$	84	$1.6\cdot10^{5}$

В таблице 2 приведены вычисленные значения математических ожиданий E числа оптических триплетов галактик с соответствующими наблюдательными характеристиками в области Σ радиуса $R = \{r_A, r_i\}_{max}$; звездочками отмечены триплеты, отнесенные И. Д. Караченцевым и В. Е. Караченцевой к возможно физическим системам галактик при критическом значении

$$\Delta v_{rr} = 500 \text{ км/с}. \tag{34}$$

В табл. 3 (вторая строка) приведено распределение $N(E)$ триплетов галактик по величинам E. Эта таблица показывает, что триплеты галактик четко разделяются на две группы по значениям E: 44 триплета имеют $E \leqslant 300$, 33 триплета — $E \geqslant 10^3$, в промежуточный интервал попадают только 6 тройных галактик. Если при применении статистического критерия в качестве критического значения E числа оптических систем принять

$$E_{cr} = 300, \tag{35}$$

то в большинстве случаев (70 триплетов из 83) результаты И. Д. Караченцева и В. Е. Караченцевой (предоставленные автору настоящей статьи до публикации) отбора физических триплетов галактик подтверждаются — 44 тройные галактики могут быть отнесены к вероятно физическим системам, остальные — к вероятно оптическим. Триплеты № 33, 50 и 68 списка [8] (близкие к нам и имеющие тесные компоненты) с разницей лучевых скоростей $\Delta v > 500$ км/с имеют небольшие значения E и могут быть отнесены к вероятно физическим системам. Далекие и широкие триплеты (№ 31, 34, 46, 48, 60, 73—77) с $\Delta v < 500$ км/с имеют $E > 300$ и могут быть отнесены к вероятно оптическим системам. Применение условий (4) и (5) позволяет среди триплетов списка [8] выделить 11 уверенно физических систем (№ 1, 22, 23, 25, 28, 33, 36, 39, 41, 44, 54 с $E \leqslant 1$) и 33 уверенно оптических системы с $E \geqslant 10^3$ — их номера в табл. 2 подчеркнуты.

Таблица 3

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ $N(E)$ СИСТЕМ ГАЛАКТИК

E	<1	1—10	10—100	100—300	300—500	500—1000	>1000
N_3	10	5	16	13	3	3	33
N_2	17	11	7	6	3	3	2

Отметим, что увеличение значения E_{cr} в критерии (35) по сравнению с критерием (4) может быть вызвано внутренней дисперсией и погрешностями определения лучевых скоростей компонентов кратных систем. Метод статистического учета относительных расстояний членов кратных галактик за счет их относительных лучевых скоростей предложил Я. А. Венник [14].

Применим статистический критерий к тесным двойным галактикам Маркаряна списка О. Дахари [9], главные компоненты которых являются сейфертовскими галактиками. Результаты вычислений E для этих двойных галактик приведены в табл. 4; распределение $N(E)$ для них дано в третьей строке табл. 3. Эти данные показывают, что для 17 близких и тесных двойных галактик выполнено условие $E \leqslant 1$ и эти системы являются уверенно физическими системами; для 24 двойных галактик имеет место неравенство $1 < E \leqslant 300$ и они могут быть при условии (35) отнесены к вероятно физическим системам; шесть двойных галактик (Марк 10, 268, 374, 926, 1073, 6251) имеют $3 \cdot 10^2 < E < 10^3$ и поэтому могут быть отнесены к вероятно оптическим системам; две двойные галактики (Марк 474 и 530) с $E \geqslant 10^3$ являются уверенно оптическими системами.

Таблица 4

СЕЙФЕРТОВСКИЕ ДВОЙНЫЕ ГАЛАКТИКИ

№	E	№	E	№	E	№	E	№	E
Марк 10	$6.0\cdot10^{2}$	463	1.3	915	$1.3\cdot10^{2}$	3227	$7.0\cdot10^{-3}$	5506	$1.0\cdot10$
40	$2.5\cdot10^{-4}$	474	$7.4\cdot10^{3}$	926	$8.1\cdot10^{2}$	3516	$2.0\cdot10^{2}$	5929	$1.2\cdot10^{-2}$
141	$1.1\cdot10^{2}$	506	$1.2\cdot10$	975	6.1	3998	$3.5\cdot10^{-2}$	5953	$7.6\cdot10^{-1}$
176	4.0	530	$2.9\cdot10^{3}$	1040	$2.4\cdot10^{-1}$	4117	$3.6\cdot10^{-2}$	6251	$3.9\cdot10^{2}$
266	$7.2\cdot10^{-2}$	533	$1.3\cdot10$	1073	$4.1\cdot10^{2}$	4151	$1.3\cdot10^{2}$	7212	$4.4\cdot10^{-6}$
268	$9.6\cdot10^{2}$	595	$1.3\cdot10^{2}$	1218	5.9	4258	$5.1\cdot10^{-3}$	7319	1.8
279	$5.2\cdot10$	612	9.5	1239	3.1	4593	1.6	7469	1.9
348	$9.7\cdot10^{-1}$	716	$2.7\cdot10$	NGC 1144	7.4	4922	$3.9\cdot10^{-2}$	IC 4329	$1.3\cdot10$
374	$4.4\cdot10^{2}$	739	$1.0\cdot10^{-1}$	2992	$5.3\cdot10^{-1}$	5273	$2.2\cdot10$	W700	2.5
423	1.2	744	$2.0\cdot10^{-1}$	3031	$5.1\cdot10$	5427	$6.2\cdot10^{-1}$		

Таблица 5

ЗНАЧЕНИЯ Δv_{cr} (КМ/С) ДЛЯ КРАТНЫХ ГАЛАКТИК ПРИ $E < 1$

z	D (кпк)			
	10	30	50	70
10^{-2}	1000	150	60	30
$2\cdot10^{-2}$	200	20	10	5
$3\cdot10^{-2}$	50	5	2	1
$4\cdot10^{-2}$	25	2	1	0.5

Полученный в настоящей работе статистический критерий выделения оптических и физических кратных систем дает также возможность оценить критическое значение величины Δv_{cr} — предельного различия лучевых скоростей компонентов для уверенно физических кратных галактик, для которых выполнено условие $E \leqslant 1$, при различной степени тесноты (линейное расстояние D в кпк, z—красные смещения) компонентов и различных расстояниях r систем по лучу зрения. Результаты выполненных вычислений приведены в табл. 5, в которой величина Δv_{cr} выражена в км/с. Полученные оценки показывают, что величина $\Delta v_{cr} = 1000$ км/с, используемая в [9], применима только для близких и тесных кратных галактик. С увеличением расстояний галактик от наблюдателя и ростом относительных расстояний между компонентами критическое значение Δv_{cr} заметно убывает и быстро достигает значений, сравнимых с погрешностями δv современных определений лучевых скоростей галактик.

Автор благодарит И. Д. Караченцева и В. Е. Караченцеву за любезно предоставленные данные о лучевых скоростях компонентов триплетов га-

лактик и результаты отбора триплетов с физически связанными компонентами.

Ленинградский государственный
университет

A GENERALIZED STATISTICAL CRITERION TO REVEAL THE OPTICAL AND PHYSICAL MULTIPLE SYSTEMS — RANDOM AND NON-RANDOM GROUPS OF OBJECTS

J. P. ANOSOVA

A statistical criterion has been proposed to reveal the random and physical clusterings among stars and galaxies. This criterion has been applied to the nearby wide multiple stars, the galaxy triplets of the list by I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, and A. L. Scherbanovsky, and the double galaxies of the list by O. Dahari where the primary components are the Seyfert galaxies. The confident physical, probable physical, probable optical and confident optical systems have been discovered. The limit difference of radial velocities of components for the confident physical multiple galaxies has also been estimated.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ж. П. Аносова*, Тр. ГАО АН СССР, 77, 126, 1969.
2. *R. G. Aitken*, New General Catalogue of Duoble Stars whithin 120 of the North Pole, Washington, 1932, p. 1488.
3. *H. M. Jeffers, W. H. van den Boss, M. F. Greeby*, Index Catalogue of Visual Double Stars, 1961., 0. Univ. California, Publ. Lick Observ., 1963, p. 804.
4. *C. Worley*, Catalogue of Visual Double Stars, Washington, 1985.
5. *Т. А. Агекян, Б. А. Воронцов-Вельяминов, В. Г. Горбацкий* и др., Курс астрофизики и звездной астрономии, том II, М., 1962, стр. 688.
6. *J. Dommanget*, Bull. Astron., 20, 1, 1953.
7. *Ж. П. Аносова*, сб. «Вопросы астрофизики», Саранск, 1984, стр. 75.
8. *В. Е. Караченцева, И. Д. Караченцев, А. Л. Щербановский*, Астрофиз. исслед. Изв. Спец. астрофиз. обсерв., 11, 3, 1979.
9. *O. Dahari*, Astron. J., 90, 1772, 1985.
10. *J. Matherne*, Astron. and Astrophys., 63, 401, 1978.
11. *R. B. Tully*, Astrophys. J., 237, 390, 1980.
12. *J. P. Huchra, M. J. Geller*, Astrophys. J., 257, 423, 1982.
13. *M. J. Geller, J. P. Huchra*, Astrophys. J. Suppl. Ser., 52, 61, 1983.
14. *J. Vennik*, A List of Nearby Groups of Galaxies, Publ. Tartu Observ., 1984, p. 63.
15. *R. Wielen*, Astron. Rechen — Inst. Heidelberg, Mitteil. A, 86, 395, 1974.
16. *J. Bahcall*, Astrophys. J., 276, 169, 1984.
17. *Ж. П. Аносова, С. В. Судаков*, Тр. АО ЛГУ, 41, 80, 1987.
18. *Ж. П. Аносова, В. Н. Семенцов, А. А. Токовинин*, Астрон. ж., 642, 424, 1987.