

ЗАВИСИМОСТЬ МАССА—СВЕТИМОСТЬ В
КРАТНЫХ ЗВЕЗДАХ

А. С. БАРАНОВ

Поступила 21 июля 1969

Предлагается метод оценки относительных масс компонентов в кратных системах, основанный на сравнении вычисленных при помощи численного эксперимента статистических средних расстояний звезд различных масс от геометрического центра с наблюдаемыми величинами. Для пятерных и шестерных систем строится зависимость масса—светимость. Она оказывается слабее, чем аналогичная зависимость для двойных звезд, что должно объясняться наличием значительного числа оптических компонентов у рассмотренных систем.

1. Одной из основных статистических закономерностей физических параметров звезд является зависимость масса—светимость, выражающаяся в том, что чем больше масса звезды, тем, как правило, больше и ее светимость. Трудности определения этой статистической зависимости связаны в основном с трудностями определения масс звезд. Абсолютные определения масс возможны только для двойных звезд, поэтому зависимость масса—светимость строится исключительно для них. Другие методы определения масс звезд недостаточно обоснованы. Так, например, статистическая оценка масс звезд-гигантов в шаровых скоплениях, основанная на статистике Гиббса, предполагает, что рассматриваемые системы находятся в стационарном состоянии и, следовательно, имеют одинаковую во всех точках кинетическую температуру. Но звездные системы полной стационарности достичь не могут, так как иррегулярные силы приводят к диссипации тел. Для квазистационарных же систем условие изотермичности не выполняется. Как теперь стало ясным (см. [1]—[4]), градиент кинетической температуры в квазистационарных системах значителен. Поэтому очень важна возможность найти какой-нибудь независимый метод статистической оценки

масс звезд. В настоящей работе рассматривается возможность использовать для решения этой задачи кратные звезды.

Как показано в [3], метод численного эксперимента позволяет выявлять статистические особенности строения и эволюции звездных систем. В [4] помимо основной задачи — построения модели квазистационарной сферической звездной системы решалась и другая: определялись средние расстояния r звезд различной массы от геометрического центра системы, образованной пятью телами, массы которых $\mathfrak{M}_1 = 1$, $\mathfrak{M}_2 = 2$, $\mathfrak{M}_3 = 3$, $\mathfrak{M}_4 = 4$, $\mathfrak{M}_5 = 5$. Эти сглаженные расстояния приведены в табл. 1.

Таблица 1

\mathfrak{M}	r
1	1.71
2	1.60
3	1.40
4	0.984
5	0.802

Аналогичный закон может быть найден для системы любой другой кратности. Следует предположить, что большинство физических кратных звезд достигло квазистационарного состояния. Это предположение основано на том, что в кратных системах время релаксации мало. Тогда полученные законы будут для них статистически справедливы. Определяя из наблюдений отношение средних расстояний от геометрического центра системы звезд различных типов в кратных системах и сравнивая их с теоретическими результатами, можно оценивать относительные массы звезд различных типов и различных светимостей.

2. При обработке наблюдательного материала был использован каталог [5]. С одной стороны, желательно использовать системы более высокой кратности, а с другой — нужно, чтобы общее число компонентов в системах этой кратности было достаточно большим. Лучшим материалом, по нашему мнению, являются системы, состоящие из пяти и шести звезд. Число систем более высокой кратности мало.

В каталоге для каждой пары компонентов даны, в частности, взаимное расстояние ρ , позиционный угол θ положения одной звезды относительно другой и видимые величины (m) звезд. Системы, для которых отсутствуют какие-либо из этих данных, не рассматривались. Были отброшены также системы, специально выделенные в каталоге, в которых встречаются очень тесные пары. Математическое ожидание числа

кратных звезд, имеющих тесные пары внутри системы как результат случайного проектирования, во много раз меньше действительного. Поэтому тесные пары следует считать физически связанными. Предлагаемый метод к таким системам неприменим.

После исключений осталось 111 пятерных звезд и 31 шестерная звезда. Для них вычислялось видимое расстояние ρ' каждого компонента системы от ее геометрического центра по формуле

$$\rho'_i = \left[\left(\rho_i \sin \theta_i - \frac{1}{h} \sum_i \rho_i \sin \theta_i \right)^2 + \left(\rho_i \cos \theta_i - \frac{1}{h} \sum_i \rho_i \cos \theta_i \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

$i = 1, 2, \dots, h$

где h — кратность системы.

Из наблюдений можно определить лишь видимые расстояния звезд от геометрического центра. Однако естественно считать, что ввиду равновероятной ориентации кратных систем относительно наблюдателя видимые расстояния статистически пропорциональны истинным расстояниям от геометрического центра.

После этого определялась величина

$$r_i = \frac{\rho'_i}{\rho_0} \quad i = 1, 2, \dots, h, \quad (2)$$

где

$$\rho_0 = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^h \rho'_i. \quad (3)$$

Делением на ρ_0 все системы приводятся к одному масштабу. К этому же масштабу были приведены теоретически вычисленные расстояния из табл. 1 (см. табл. 2).

Таблица 2

№	r
1	1.32
2	1.23
3	1.08
4	0.757
5	0.617

Если мы имеем физическую кратную систему, то все компоненты ее находятся на одинаковом расстоянии от наблюдателя, и для каждой звезды, входящей в нее, справедливо соотношение:

$$m_i - \bar{m} = \Delta m = M_i - \bar{M}, \quad i = 1, 2, \dots, h \quad (4)$$

где $\bar{m} = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^h m_i$ — средняя видимая величина звезд системы,

$\bar{M} = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^h M_i$ — средняя абсолютная величина звезд системы.

При построении зависимости масса—светимость желательнее определить возможное влияние оптических компонентов в кратных системах.

Мы применяли следующий критерий для отсева кратных звезд с оптическими компонентами:

$$\lg \rho_{oi} \leq A - 0.1 (m_0 + m_i), \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, h \\ i \neq 0 \end{matrix} \quad (5)$$

Здесь ρ_{oi} — расстояние в секундах дуги между ярчайшим и i -ым компонентом, m_0 — видимая величина ярчайшей в данной системе звезды, A — некоторое число, тем большее, чем строже проводимый отбор. Так как число шестерных систем относительно мало, то критерий (5) был применен только для пятерных систем. Последовательные значения A задавались так, чтобы в результате применения критерия (5) последовательно отбрасывалось примерно одинаковое количество пятерных звезд. Для $A = 3.94$ систем, удовлетворяющих (5), оказалось 74 (отброшено 37). В результате применения критерия (5) с $A = 3.60$ осталось 36 пятерных звезд. Окончательно зависимость масса—светимость искалась для 111, 74 и 36 пятерных систем и для 31 шестерной системы (общее число компонентов соответственно 555, 370, 180 и 186).

Была составлена таблица распределений звезд по Δm и r (см. табл. 3). Графы дают: N — число кратных систем, Δm — интервал видимых величин звезд, n — общее число компонентов в этих интервалах, \bar{r}_n — среднее расстояние от геометрического центра n звезд, \bar{M}_n — средняя масса n звезд. Массы групп звезд, отнесенных к соответствующим интервалам видимых величин, определялись по \bar{r}_n из полученной теоретически зависимости масса—расстояние. При этом для шестерных систем была использована та же зависимость, что и для пятерных.

Как видно из табл. 3, незначительная часть средних групповых расстояний \bar{r}_n оказалась вне промежутка (1.32, 0.617), задаваемого табл. 2. Поэтому необходимо было, основываясь на данных табл. 2, несколько экстраполировать закон зависимости массы от расстояния до геометрического центра. Экстраполяция была проведена

Таблица 3

	Δm	n	\bar{r}_n	$\overline{\Sigma R}_n$
	1	2	3	4
$N=111$	< -7.0	1	0.60	5.25
	-6.5, -7.0	1	0.80	3.85
	-6.0, -6.5	4	0.65	4.75
	-5.5, -6.0	7	0.59	5.30
	-5.0, -5.5	6	0.90	3.53
	-4.5, -5.0	3	0.53	5.82
	-4.0, -4.5	7	0.70	4.35
	-3.5, -4.0	12	0.72	4.23
	-3.0, -3.5	12	0.62	5.00
	-2.5, -3.0	20	0.62	5.00
	-2.0, -2.5	26	0.67	4.58
	-1.5, -2.0	44	0.82	3.75
	-1.0, -1.5	32	1.08	3.00
	-0.5, -1.0	51	1.06	3.05
	0.0, -0.5	46	1.19	2.23
	0.5, 0.0	44	1.08	3.00
	1.0, 0.5	55	1.11	2.85
	1.5, 1.0	47	1.36	0.55
	2.0, 1.5	39	1.10	2.90
	2.5, 2.0	32	1.14	2.62
	3.0, 2.5	36	0.93	3.45
	3.5, 3.0	15	0.90	3.53
	4.0, 3.5	9	0.70	4.35
4.5, 4.0	2	0.55	5.65	
5.0, 4.5	2	0.80	3.85	
5.5, 5.0	1	1.40	0.15	
6.0, 5.5	1	0.90	3.53	

Таблица 3 (продолжение)

	1	2	3	4
N=74	< -7.0	1	0.60	5.25
	-6.5, -7.0	1	0.80	3.85
	-6.0, -6.5	2	0.90	3.53
	-5.5, -6.0	7	0.59	5.30
	-5.0, -5.5	3	1.07	3.05
	-4.5, -5.0	2	0.80	3.85
	-4.0, -4.5	4	0.95	3.37
	-3.5, -4.0	6	0.83	3.73
	-3.0, -3.5	5	0.50	6.10
	-2.5, -3.0	14	0.61	5.20
	-2.0, -2.5	18	0.59	5.30
	-1.5, -2.0	27	0.91	3.50
	-1.0, -1.5	16	0.89	3.55
	-0.5, -1.0	37	0.95	3.37
	0.0, -0.5	29	1.13	2.70
	0.5, 0.0	33	1.21	2.13
	1.0, 0.5	37	1.18	2.30
	1.5, 1.0	36	1.15	2.55
	2.0, 1.5	26	1.18	2.30
	2.5, 2.0	18	1.10	2.90
3.0, 2.5	20	1.14	2.62	
3.5, 3.0	13	0.89	3.55	
4.0, 3.5	7	0.89	3.55	
4.5, 4.0	4	0.50	6.10	
5.0, 4.5	2	0.80	3.85	
5.5, 5.0	1	1.40	0.15	
6.0, 5.5	1	0.90	3.53	

Таблица 3 (продолжение)

	1	2	3	4
N = 36	< -7.0	1	0.60	5.25
	-6.5, -7.0	1	0.80	3.85
	-6.0, -6.5	1	1.20	2.20
	-5.5, -6.0	5	0.38	7.15
	-5.0, -5.5	2	1.15	2.60
	-4.5, -5.0	1	0.80	3.85
	-4.0, -4.5	4	0.95	3.37
	-3.5, -4.0	4	0.90	3.53
	-3.0, -3.5	4	0.38	7.15
	-2.5, -3.0	7	0.57	5.50
	-2.0, -2.5	9	0.63	4.90
	-1.5, -2.0	9	0.82	3.75
	-1.0, -1.5	6	1.20	2.20
	-0.5, -1.0	12	1.05	3.10
	0.0, -0.5	10	1.30	1.20
	0.5, 0.0	14	1.39	0.20
	1.0, 0.5	18	1.15	2.55
	1.5, 1.0	15	1.27	1.55
	2.0, 1.5	12	1.20	2.20
	2.5, 2.0	11	0.85	3.65
3.0, 2.5	19	0.98	3.30	
3.5, 3.0	7	0.81	3.80	
4.0, 3.5	4	0.90	3.53	
4.5, 4.0	1	0.50	6.10	
5.0, 4.5	1	1.10	2.90	
5.5, 5.0	1	1.40	0.15	
6.0, 5.5	1	0.90	3.53	

Таблица 3 (продолжение)

	1	2	3	4
$N=31$	< -5.5	2	0.67	4.58
	-5.0, -5.5	2	0.55	5.65
	-4.5, -5.0	2	0.59	5.30
	-4.0, -4.5	3	0.64	4.80
	-3.5, -4.0	2	0.50	6.10
	-3.0, -3.5	4	0.90	3.53
	-2.5, -3.0	6	0.79	3.88
	-2.0, -2.5	8	0.88	3.58
	-1.5, -2.0	9	0.97	3.32
	-1.0, -1.5	11	1.00	3.25
	-0.5, -1.0	13	0.97	3.32
	0.0, -0.5	24	1.27	1.55
	0.5, 0.0	18	1.05	3.10
	1.0, 0.5	13	1.00	3.25
	1.5, 1.0	23	1.05	3.10
	2.0, 1.5	17	1.06	3.05
	2.5, 2.0	17	0.91	3.50
	3.0, 2.5	6	0.84	3.70
3.5, 3.0	3	1.53	0.10	
4.0, 3.5	2	0.51	6.00	
4.5, 4.0	1	0.56	5.58	

графически. Массы групп звезд определялись по графику (см. рис. 1, на котором сплошной линией нанесена та часть кривой, которая построена по данным табл. 2).

Зависимость масса—светимость искалась в виде

$$\lg \overline{M}_n = a + b\Delta m. \quad (6)$$

Для каждого N может быть написана избыточная система уравнений типа (6). Каждому уравнению типа (6) приписывался вес, равный n —числу компонентов, попавших в соответствующий интервал видимых величин звезд. Решая полученные избыточные системы по способу наименьших квадратов, мы нашли коэффициенты a и b . Результаты приведены в табл. 4.

Полученные устойчивые отрицательные значения b позволяют считать, что динамический эффект различия масс в рассмотренных

кратных системах в самом деле действует. Однако средняя ошибка коэффициента b не мала. Вопреки ожиданиям, b по абсолютной величине не возрастает по мере усиления критерия на присутствие в системах оптических компонентов. Это показывает, что примененный нами

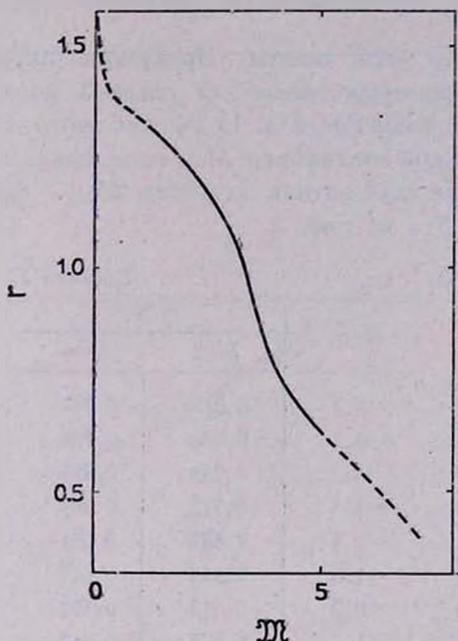


Рис. 1.

критерий (5) не позволяет эффективно выявлять физические кратные системы. Поэтому наиболее вероятными значениями a и b для пятерных систем следует считать значения, полученные для $N = 111$.

Таблица 4.

h	N	a	σ_a	b	σ_b
	111	0.44	± 0.04	-0.041	± 0.021
5	74	0.48	± 0.02	-0.031	± 0.010
	36	0.38	± 0.07	-0.032	± 0.028
6	31	0.47	± 0.05	-0.030	± 0.026

Примем среднюю абсолютную величину \bar{M} звезд равной визуальной абсолютной величине Солнца, т. е. примем $\bar{M} = +4.73$. Примем также M_{\odot} за единицу массы. Тогда определится зависимость масса—визу-

альная абсолютная величина соответственно для пятерных и шестерных систем:

$$\lg \mathfrak{M} = 0.63 - 0.041 M_{vis} \quad (7)$$

$$\lg \mathfrak{M} = 0.61 - 0.030 M_{vis} \quad (8)$$

Можно считать, что звезды, образующие пятерные и шестерные системы, лежат преимущественно на главной последовательности на диаграмме Герцшпрунга-Рессела. С учетом этого по таблицам из [6] для каждой визуальной светимости M_{vis} определялась соответствующая ей болометрическая абсолютная величина M_{bol} . Зависимость $\lg \mathfrak{M} - M_{bol}$ дана в табл. 5 и на рис. 2.

Таблица 5

M_{bol}	$\lg \mathfrak{M}$	
	$h=5$	$h=6$
-8.2	0.818	0.747
-6.2	0.790	0.726
-4.7	0.753	0.699
-3.3	0.712	0.669
-2.4	0.687	0.651
-1.3	0.654	0.627
-0.2	0.613	0.597
1.1	0.572	0.567
2.2	0.536	0.540
3.7	0.482	0.501
4.9	0.429	0.462
5.8	0.392	0.435
7.0	0.290	0.360
8.9	0.142	0.252

Для сравнения на рис. 2 приведена зависимость $\lg \mathfrak{M} = f_{\pi}(M_{bol})$, полученная П. П. Паренаго в [7] для двойных звезд, и линейная зависимость $\lg \mathfrak{M} = f_{S,H}(M_{bol})$, вычисленная способом наименьших квадратов по данным К. Странда и Р. Холла [8] для двойных звезд (без учета белых карликов).

3. Полученная зависимость оказалась значительно слабее, чем зависимость, построенная по материалу двойных звезд. Основной причиной, ослабляющей зависимость между массами звезд и их светимостями в предложенном методе, является наличие значительного числа

оптических компонентов у рассмотренных кратных систем. К сожалению, никто еще не вел специального систематического поиска по всему небу кратных систем. В этом отношении данные о физических кратных системах не могут идти в сравнение, например, с данными о двойных звездах или рассеянных скоплениях. Само понятие „кратная система“

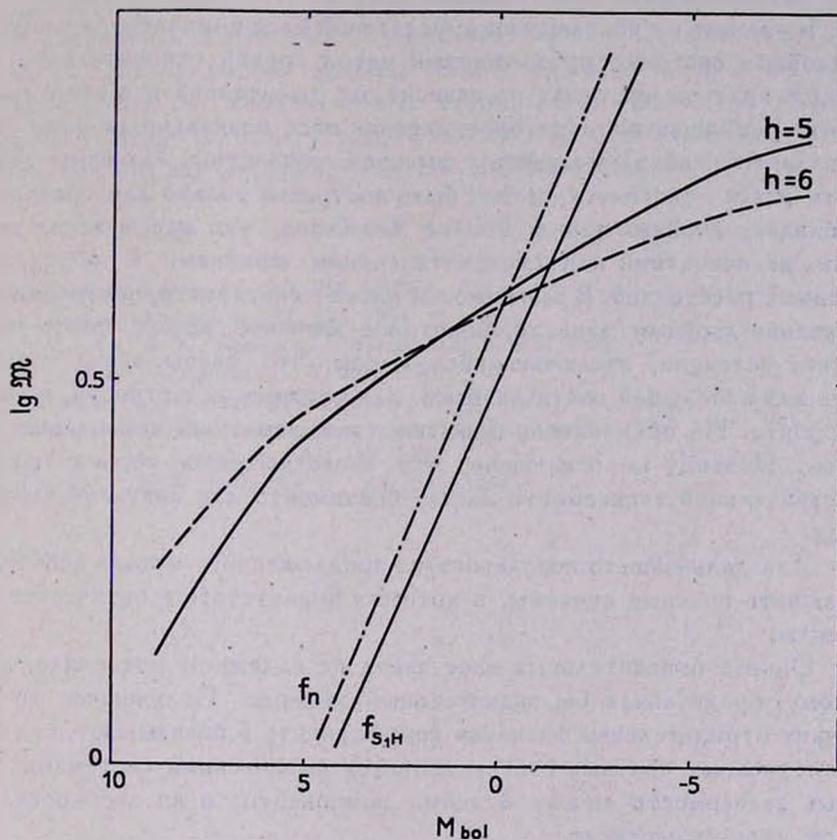


Рис. 2.

не вполне определено. Это просто группа звезд, спроектировавшихся видимым образом в непосредственной близости одна относительно другой. Среди включенных в каталог IDS пятерных и шестерных звезд, безусловно, большая часть содержит оптические компоненты. В то же время, несомненно, основная часть пятерных и шестерных физических систем, доступных выявлению, еще не фигурирует в каталогах.

В сравнении с наличием значительного числа оптических компонентов в рассмотренных системах, другие факторы, которые могли бы исказить зависимость масса—светимость, играют, по нашему мнению,

незначительную роль. Так, предполагалось, что кратные системы находятся в квазистационарном состоянии. Но возможно, что некоторые системы обладают положительной полной энергией и, следовательно, происходит полный распад таких систем. Не исключено также, что некоторые кратные звезды настолько молоды, что в их эволюции не успела сказаться роль иррегулярных сил.

В отличие от абсолютных определений масс компонентов в визуально-двойных системах предложенный метод оценки относительных масс звезд в кратных системах не зависит от расстояний и в этом смысле имеет преимущество. При определении масс визуально-двойных звезд параллаксы необходимо знать с высокой точностью. Поэтому зависимость масса—светимость может быть построена только для сравнительно близких двойных звезд. Вполне возможно, что массы звезд отягощены неточностями или систематическими ошибками в определении звездных расстояний. В зависимости масса—светимость, построенной по визуально-двойным звездам, некоторое значение может иметь также эффект селекции, заключающийся в том, что массы звезд известны лишь для небольшой части двойных, для которых, в частности, построена орбита. Но орбитальное движение тем заметнее, чем больше сами массы. Поэтому не исключено, что известна лишь верхняя граница действительной зависимости масса—светимость для визуально-двойных звезд.

Для дальнейшего использования предложенного метода необходимо исключить кратные системы, в которых присутствуют оптические компоненты.

Оценка относительных масс звезд на надежном материале, по-видимому, представила бы значительный интерес. Полученные во всех случаях отрицательные значения коэффициента b показывают, что часть рассмотренных кратных систем является физическими системами, в которых зависимость между массами компонентов и их светимостями в самом деле существует.

Автор глубоко благодарен Т. А. Агекяну за руководство и помощь в работе.

Ленинградский государственный
университет

THE MASS-LUMINOSITY RELATION FOR MULTIPLE STARS

A. S. BARANOV

A method to estimate the relative masses of components in multiple systems is suggested. The method is based on comparison of the numerical-experimental statistical mean distances from different mass stars to the geometrical center with observational values. The mass-luminosity relation is constructed for systems consisting of five and six stars. It is shown that the relation is less correlated in comparison with the analogous relation for binary stars. This fact is a result of the presence of numerous optical components in the mentioned systems.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Т. А. Алевян, Астрон. ж., 40, 318, 1963.
2. Т. А. Алевян, Астрон. ж., 41, 523, 1964.
3. Т. А. Алевян, А. С. Баранов, Астрофизика, 5, 305, 1969.
4. А. С. Баранов, Астрофизика, 6, 261, 1970.
5. Index Catalogue of Visual Double Stars, 1961; Publ. Lick. Obs., 21, 1963.
6. П. П. Паренаю, Курс звездной астрономии, Гостехиздат, 1946.
7. П. П. Паренаю, Астрон. ж., 14, 133, 1937.
8. К. А. Strand, R. G. Hall, Ap. J., 120, 322, 1954.