

УДК: 524. 38-33

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД
ПО ИСХОДНОМУ ОТНОШЕНИЮ МАСС КОМПОНЕНТОВ

Э.Т.КРАЙЧЕВА, Е.И.ПОПОВА, А.В.ТУТУКОВ, Л.Р.ЮНГЕЛЬСОН

Поступила 16 марта 1988

Принята к печати 30 апреля 1988

Проанализировано наблюдаемое распределение двойных звезд различных типов по отношению масс их компонентов (q). Предложен простой способ оценки доли систем с проэволюционировавшими компонентами среди наблюдаемых двойных звезд. Она обычно не превышает 20%. Распределение по q в интервале $0.3 \leq q < 1$ для наиболее тесных систем (большая полуось орбиты $a \leq 10^3 R_{\odot}$) может быть описано функцией $dN \propto dq$. Более широкие системы обнаруживают концентрацию к малым исходным отношениям масс компонентов.

1. Введение. Одна из основных характеристик двойных звезд — их распределение по отношению масс компонентов $q = M_2/M_1$. Оно определяется условиями звездообразования при наличии значительного углового момента, динамическими процессами в звездных группах и возможными в ходе эволюции обменом веществом между компонентами и потерей массы системой.

Информация о распределении звезд по q имеет ключевое значение для теории эволюции тесных двойных систем. В рамках сценарного подхода к анализу эволюции звезд сведения о распределениях по q , а также о распределениях по массам компонентов и расстояниям между ними позволяют оценить вероятность осуществления различных вариантов эволюции и численность объектов различных типов.

Численное моделирование деления протозвезд и образования тесных двойных систем (с расстояниями между компонентами $a \leq 10^3 R_{\odot}$) пока не приводит к определенным результатам. В зависимости от упрощающих предположений моделирование дает как распределения с концентрацией звезд к $q \approx 1$, так и распределения с концентрацией звезд к малым q [1].

Относительно более широких систем показано, что их образование в результате быстрой релаксации на ранних стадиях динамической эволюции звездных скоплений должно приводить к равномерному распределению по q [2]. Если же образование широких систем является частью процесса фрагментации газопылевых облаков, то распределение по q должно соответствовать

функции масс Солпитера: $dN \propto q^{-2.35} dq$. Ниже мы проанализируем информацию о распределении звезд по q , которую можно получить по каталогам спектрально- и визуально-двойных звезд, и попытаемся определить харак-

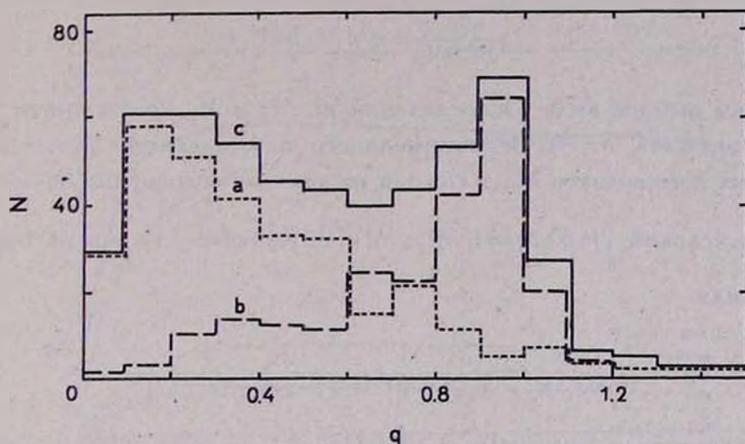


Рис.1. Распределение по отношению масс (q) спектрально - двойных звезд с главными компонентами V класса светимости: а — для систем с одним видимым спектром, б — для систем с двумя видимыми спектрами, с — суммарное распределение.

тер исходных распределений по q , оценив влияние наблюдательной селекции и эволюции звезд.

2. Спектрально-двойные звезды. Исходным материалом для исследования распределений по q тесных двойных звезд, как правило, служит каталог спектрально - двойных звезд (СДЗ) Бэттена и др.[3]. Авторы данной работы использовали собственный каталог орбитальных элементов спектрально - двойных звезд, в основе которого лежит каталог Бэттена и др.[3], дополненный на основе текущей литературы. Каталог содержит сведения о более чем 1300 объектах, для которых были определены физические параметры. Методика вычисления q описана нами в [4].

На рис.1 приведено распределение по q спектрально - двойных звезд с первичными компонентами V класса светимости. Отдельно выделен вклад в общее распределение звезд с одним (СД1) и с двумя (СД2) видимыми спектрами. Можно показать [4,5], что в СД2, для которых характерна концентрация к $q \approx 1$, обмен веществом между компонентами, как правило, не происходил. Следовательно, они сохранили исходное распределение по q . Среди СД1 есть как системы со спутниками — маломассивными звездами главной последовательности, так и с вырожденными карликами — продук-

тами эволюции первоначально более массивных компонентов.

Оценим долю систем со спутниками — вырожденными карликами. Положим, что исходные распределения звезд по массам первичных (M_1) и вторичных (M_2) компонентов описываются степенными функциями:

$$\frac{\partial^2 N}{\partial M_1 \partial M_2} = a M_1^{-\alpha} \cdot b M_2^{\beta}. \quad (1)$$

При таком выборе вида распределений по M_1 и M_2 коэффициент b в (1) должен зависеть от M_1 и минимального наблюдаемого значения массы вторичных компонентов M_{min} . Исходя из условия сохранения полного числа систем и условий $\int_0^1 f(q) dq = 1$, $M_2 \leq M_1$, выражение (1) можно преобразовать к виду

$$\frac{\partial^2 N}{\partial M_1 \partial M_2} = \frac{a}{\beta + 1} \cdot \frac{M_2^{\beta}}{M_1^{\alpha + \beta + 1} (1 - (M_{min}/M_1)^{\beta + 1})}. \quad (2)$$

Если ограничиться системами с $M_{min}/M_1 \ll 1$, то при $\beta > -1$ можно записать

$$\frac{\partial^2 N}{\partial M_1 \partial M_2} = \text{const} \cdot \frac{M_2^{\beta}}{M_1^{\alpha + \beta + 1}}. \quad (3)$$

Положим, что время жизни звезд на главной последовательности $T = g M^{-\gamma}$. Тогда система с исходными массами компонентов M_1 и M_2 до превращения первичного компонента в вырожденный карлик наблюдается в течение времени $\Delta t_1 = g M_1^{-\gamma}$, а после образования карлика $\Delta t_2 = g (M_2^{-\gamma} - M_1^{-\gamma})$. (Мы полагаем здесь, что потеря вещества в тесной двойной системе происходит через общую оболочку и поэтому масса M_2 не изменяется). Из (3) следует, что при непрерывном звездообразовании системы, в которых спутники являются звездами главной последовательности, распределяются как

$$\frac{\partial N}{\partial M_1} = a g \int_0^{M_1} M_1^{-\gamma} \frac{M_2^{\beta}}{M_1^{\alpha + \beta + 1}} dM_2 = \frac{a g}{\beta + 1} M_1^{-\alpha - \gamma}. \quad (4)$$

Системы, в которых спутники являются вырожденными карликами, распределены как

$$\frac{\partial N}{\partial M_2} = a g \int_{M_2}^{\infty} (M_2^{-\gamma} - M_1^{-\gamma}) \frac{M_2^{\beta}}{M_1^{\alpha + \beta + 1}} dM_1 = \frac{a g \gamma M_2^{-\gamma - \alpha}}{(\alpha + \beta)(\alpha + \beta + \gamma)}. \quad (5)$$

Таким образом, при каждой фиксированной массе наблюдаемого в настоящее время первичного компонента M_1 доля систем со спутниками — вырожденными карликами среди всех систем с данной массой первичной

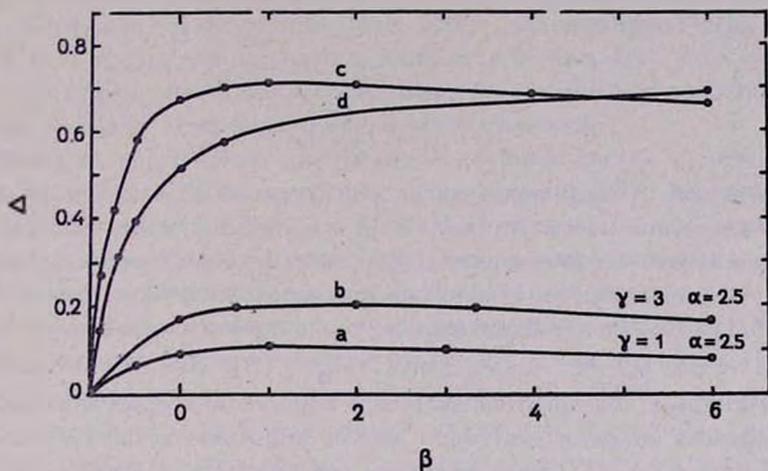


Рис.2. Зависимость доли двойных звезд со спутниками — вырожденными карликами (Δ) от параметра β для фиксированных значений параметров α , γ , ω (см. текст).

звезды M_1 составляет

$$\Delta = \frac{1}{1 + \frac{(\alpha + \beta + \gamma)(\alpha + \beta)}{\gamma(\beta + 1)}} \quad (6)$$

При $M \approx (1-5)M_\odot$ можно положить $\gamma \approx 3$, $\alpha \approx 2.5$. Для наиболее массивных звезд ($M \geq 10M_\odot$) $\gamma \approx 1$. Зависимость величины Δ от искомого параметра β для фиксированных значений α и γ приведена на рис.2 (кривые a и b). На тот же рис.2 нанесена зависимость $\Delta(\beta)$ для случая, когда предполагается, что масса спутника в результате аккреции возрастает до величины ωM_2 , при $\omega = 1.5$. Вообще говоря, не ясно, каково время жизни аккрецировавшего компонента. Можно рассмотреть два предельных случая.

1) Время жизни звезды с массой ωM_2 после аккреции равно времени жизни звезды исходной массы M_2 . В этом случае

$$\Delta = \frac{1}{1 + \frac{(\alpha + \beta)(\alpha + \beta + \gamma)}{\gamma(\beta + 1)\omega^{\gamma + \alpha}}} \quad (7)$$

и зависимость Δ от β изображается на рис.2 кривой *b*.

2) Время жизни равно времени жизни звезды с массой ωM_2 (этому предположению соответствует полное перемешивание звезды в результате аккреции). Тогда

$$\Delta = \frac{1}{1 + \frac{\alpha + \beta}{(\beta + 1)\omega^\alpha}} \quad (8)$$

и зависимость Δ от β показана на рис.2 кривой *d*.

Увеличение массы спутника в результате аккреции (т.е. реализации второго случая) можно ожидать, если звезда—донор имеет лучистую оболочку, т.е. находится на главной последовательности или вблизи нее (при $M \geq 1.5M_\odot$). Однако двойные звезды, по—видимому, образуются с большими полуосями орбит: $a/R_\odot \geq 6(M_1/M_\odot)^{1/3}$ [6]. Это обстоятельство делает маловероятным консервативный обмен веществом в преобладающих среди наблюдаемых объектов системах с массой компонентов порядка нескольких M_\odot , поэтому $\omega = 1$. Таким образом, как показывает рис.2, доля систем с невидимыми вырожденными вторичными компонентами вряд ли превышает $\sim 20\%$. С нашей оценкой согласуется оценка Халбвакса [7], полученная несколько иным методом для частного случая $\alpha = -\beta = 2.5$.

Численное моделирование наблюдаемых распределений спектрально-двойных звезд по q с учетом эффектов селекции и обмена веществом между компонентами также показывает, что доля систем с проэволюционировавшими спутниками среди наблюдаемых звезд с одним видимым спектром составляет 25—35% (в основном при $q \approx 0.3-0.4$), если в качестве исходных принимаются «плоское» распределение $dN/dq = \text{const}$ или распределение с максимумом вблизи $q = 1$ [5].

Приняв, исходя из результатов эволюционных расчетов, что массы вырожденных карликов связаны с массами их предшественников соотношением $M_1 \approx kM_1^*$, можно, фиксируя M_2 , найти на основе (1), что распределение систем с карликами по q имеет вид $\frac{dN}{dq} \propto q^{-\frac{\alpha + \beta + \varphi}{\varphi}}$. Для звезд с массами (1—10) M_\odot можно принять $k \approx 0.5, \varphi \approx 0.33$. Тогда $\frac{dN}{dq} \propto q^{-8.6-3\beta}$. Поскольку характерные массы первичных компонентов СДЗ $M_1 \approx 2M_\odot$, а типичные массы карликов $\sim 0.6M_\odot$, системы с вырожденными карликами дают все возрастающий вклад в распределение по q только при $q \leq 0.3$.

При $q \geq 0.8$ доля СД2 среди наблюдаемых объектов может быть

завышена в силу отмеченного Абтом [8] субъективного интереса наблюдателей к системам со сравнимыми светимостями компонентов. С другой стороны, возможности обнаружения СД2 ограничиваются тем, что минимальные значения полуамплитуд лучевых скоростей (k_1), при которых наблюдаются две системы спектральных линий, должны примерно на порядок превосходить минимальные k_1 для СД1 [5]. Поскольку $K \propto a^{-1/2}$, ширина интервала больших полуосей орбит наблюдаемых СД2 равна $\Delta lga \approx 1$, в то время как СД1 обнаруживается в интервале $\Delta lga \approx 2$. Возможно, что в результате происходит некоторая компенсация отмеченных эффектов селекции «субъективного» и «объективного».

Суммируя обсуждение спектрально—двойных систем с первичными компонентами V класса светимости, можно заключить, что их распределение по q в интервале $0.3 \leq q \leq 1$ близко к $dN = \text{const} \cdot dq$ или даже имеет тенденцию к возрастанию численности звезд по мере уменьшения q .

Еще одну возможность анализа исходного распределения по q дают системы с первичными компонентами-гигантами. В соответствии с начальной функцией масс Солпитера среди гигантов должны преобладать системы с $M_1 \approx M_\odot$. Спутники с массами меньшими $\sim 0.8M_\odot$ не успевают проэволюционировать за время жизни Галактики и остаются звездами главной последовательности. Вклад в распределение по q систем со спутниками — вырожденными карликами и в этом случае не должен превышать $\sim 20\%$. В основном это системы с $q \leq 0.5$. Появление двойных с $q > 1$ — следствие использования среднего значения при оценке отношения масс компонентов. Образование систем с $q > 1$ эволюционным путем маловероятно. С учетом этих обстоятельств распределение двойных звезд с первичными компонентами-гигантами оказывается почти плоским (рис.3). Следует при этом особо отметить, что поскольку спектральные линии гигантов узкие, условия обнаружения по полуамплитудам лучевых скоростей благоприятны для открытия спутников как сравнимых, так и значительно отличающихся масс. К сожалению, зависимость масса—спектр для гигантов ненадежна, что уменьшает достоверность этого распределения.

3. *Визуально—двойные звезды.* Визуально—двойные звезды (ниже — ВДЗ) принадлежат к числу наиболее широких двойных систем: большие полуоси их орбит $a \approx (10^4 - 10^6)R_\odot$. Непосредственное определение масс компонентов ВДЗ возможно лишь, если известны орбитальные элементы и параллаксы звезд. Однако, число таких объектов всего ~ 50 . Возможно косвенное определение q по известным спектрам главных звезд и разностям звездных величин компонентов Δm_V , если оба компонента являются звездами главной последовательности.

Для большинства компонентов ВДЗ отсутствует спектральная класси-

фикация. Использование наиболее обширных каталогов ВДЗ и спектральной классификации «Index Catalogue of Visual Double Stars» [9] и «CSI Catalogue with Selected Data» [10] позволило выделить всего лишь ~ 2800

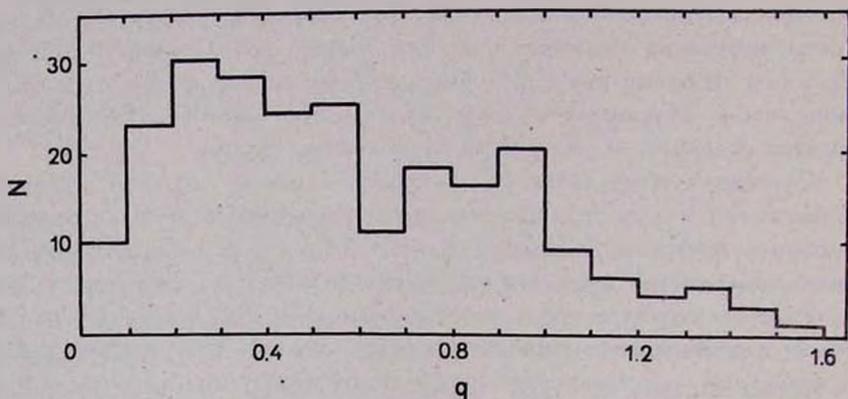


Рис.3. Распределение по отношению масс (q) спектрально - двойных звезд с главными компонентами — гигантами.

ВДЗ с главными компонентами V класса светимости [11,12]. Спутники в этих системах являются в основном звездами главной последовательности. Действительно, время жизни главных компонентов $T \approx 10^{10} (M_{\odot}/M)^3$ лет, их светимость $L_{MS}/L_{\odot} \approx (M/M_{\odot})^4$ (при преобладающих массах $1-3M_{\odot}$). Если спутники были бы остывающими белыми карликами, их светимость зависела бы от времени как $L_{wd}/L_{\odot} \approx 10^9 (T/\text{год})^{-7/5}$ [13]. Следовательно, $L_{wd}/L_{MS} \approx 10^{-5} \cdot M^{1/5}$. При $M \approx 1M_{\odot}$ характерная разность звездных величин компонентов была бы $\sim 12^m$. Однако, в выборке, которую мы анализируем, нет систем с $\Delta m_V > 9^m$ и преобладают ВДЗ с $\Delta m_V \leq 5^m$. Аналогично, оценивая времена жизни, можно показать, что спутники не могут быть и звездами на стадии гравитационного сжатия к главной последовательности [12].

В выборках ВДЗ, включающих слабые звезды («все звезды» и $m_{V_1} \leq 9^m$ на рис.4), содержится повышенное число звезд с q , близким к 1, поскольку у звезд с малым угловым разделением компонентов невозможно обнаружить слабые спутники, и у слабых главных компонентов обнаруживаются преимущественно спутники сравнимой светимости ($q \approx 1$). Поэтому лишь выборку объектов с $m_{V_1} \leq 7^m$ можно считать представительной.

Если приведенное на том же рисунке распределение наиболее ярких

$m_{v_1} \leq 7^m$ ВДЗ отражает распределение этих объектов по q , по крайней мере при $0.8 \geq q \geq 0.3$, то в этом интервале оно может быть представлено функцией $dN/dq \approx q^{-2 \pm 1}$. Солпитеровский характер функции dN/dq может

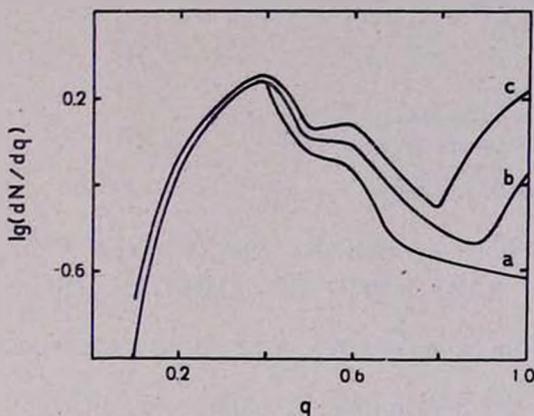


Рис.4. Распределение по отношению масс (q) визуально - двойных звезд с различной яркостью главных компонентов: а — $m_{v_1} \leq 7^m$, б — $m_{v_1} \leq 9^m$, с — все звезды.

рассматриваться как аргумент в пользу образования широких систем в результате фрагментации газопылевых облаков.

4. Заключение. Анализ, проведенный выше, показывает, что предположение об исходном распределении спектрально—двойных звезд с концентрацией систем к $q \approx 1$ [5,14,15] является следствием переоценки доли систем с вырожденными карликами среди наблюдаемых систем с одним видимым спектром. В действительности доля систем с карликами среди этих звезд, вероятно, не превышает $\sim 20\%$ (рис.2). Системы с карликами встречаются только среди двойных с $q \leq 0.3$ и практически не встречаются среди звезд с большими q . Наблюдаемое распределение по q систем с $0.3 \leq q \leq 1$, вероятно, слабо искажено эффектами наблюдательной селекции и близко к распределению непроэволюционировавших систем. Таким образом, распределение непроэволюционировавших систем имеет вид почти плоской функции с некоторым избытком звезд при $0.9 \leq q \leq 1$. Последний может быть следствием того, что системы с двумя видимыми спектрами ярче систем с невидимыми спутниками на $\sim 0.^m75$, поэтому объем пространства, из которого происходит выборка систем с $q \approx 1$, больше.

Для окончательного вывода о характере исходного распределения

тесных двойных звезд по q необходимо численное моделирование, которое позволит учесть кроме обсуждаемого выше эволюционного эффекта также и влияние наблюдательной селекции.

Использование распределения $dN \propto dq$ для оценки числа катаклизмических переменных [16], голубых субкарликов [17], сверхновых I типа в Галактике [18] приводит к результатам, хорошо согласующимся с наблюдательными данными.

Болгарская академия наук
Самостоятельная секция астрономии с
Национальной астрономической обсерваторией
Астрономический совет АН СССР

DISTRIBUTION OF BINARY STARS OVER THE INITIAL MASS RATIO OF COMPONENTS

Z.T.KRAICHEVA, E.I. POPOVA, A.V.TUTUKOV, L.R.YUNGELSON

We analyse the distribution of binaries of different types over the mass ratio of components and suggest a method for the estimation of the proportion of post-mass-exchange binaries among all observed binaries. This proportion does not usually exceed 20 per cent. The distribution of the closest binaries (large semiaxis of orbit $a \leq 10^3 R_{\odot}$) over q may be represented as $dN \propto dq$ for $0.3 \leq q \leq 1$. Wider binaries concentrate into small values of q .

ЛИТЕРАТУРА

1. L.V. Lucy, in «Fundamental Problems in the Theory of Stellar Evolution», eds. D. Sugimoto et al., Reidel, Dordrecht, 1981, p. 75.
2. A.V. Tutukov, *Astron. and Astrophys.*, **70**, 57, 1978.
3. A.H. Batten, J.M. Fletcher, P.J. Mann, *Publ. Domin. Astrophys. Observ.*, XV, № 5, 1978.
4. Э.Т. Крайчева, Е.И. Попова, А.В. Тутуков, Л.Р. Юнгельсон, *Астрон. ж.*, **55**, 1176, 1978.
5. Е.И. Попова, А.В. Тутуков, Л.Р. Юнгельсон, *Astrophys. and Space Sci.*, **88**, 55, 1982.
6. Е.И. Попова, А.В. Тутуков, Л.Р. Юнгельсон, *Письма в Астрон. ж.*, **8**, 297, 1982.
7. J.L. Halbwachs, *Astrophys. and Space Sci.*, **110**, 149, 1985.
8. H. Abt, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.*, **21**, 343, 1983.
9. С.Е. Worley, *Index Catalogue of Visual Double Stars, 1977*. Каталог S 6018 на магнитной ленте Советского центра астрономических данных.
10. F. Ocschenbein, *CSI catalogue with selected data, 1982*. Каталог S 5026 на магнитной ленте Советского центра астрономических данных.
11. С.В. Верещагин, Э.Т. Крайчева, Е.И. Попова, А.В. Тутуков, Л.Р. Юнгельсон, *Науч. инф. Астрон. сов. АН СССР*, **63**, 3, 1987.
12. С.В. Верещагин, Э.Т. Крайчева, Е.И. Попова, А.В. Тутуков, Л.Р. Юнгельсон, *Письма в Астрон. ж.*, **13**, 63, 1987.

13. *I.Iben Jr., A.V.Tutukov*, *Astrophys. J.*, **282**, 615, 1984.
14. *З.Т.Крайчева, Е.И.Попова, А.В.Тутуков, Л.Р.Юнгельсон*. *Астрон. ж.*, **56**, 520, 1979.
15. *L.B.Lucy, E.Ricco*, *Astron. J.*, **84**, *401, 1979.
16. *A.V.Tutukov, L.R.Yungelson*, *Astrophys. and Space Sci.*, **130**, 15, 1987.
17. *A.V.Tutukov, L.R.Yungelson*, *Proc. IAU Coll. «Faint Blue Stars»*, (in press).
18. *I.Iben Jr., A.V.Tutukov*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **54**, 335, 1984.