

УДК 524.3—54—44

## СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ НАЧАЛЬНОЙ И КОНЕЧНОЙ МАССАМИ ДЛЯ ЗВЕЗД МАЛЫХ И СРЕДНИХ МАСС

Ю. Л. ФРАНЦМАН

Поступила 18 марта 1986

Принята к печати 20 июля 1986

Путем приближенного вычисления эволюции звезд разных масс до стадии белого карлика получены зависимости между начальной  $M_i$  и конечной  $M_f$  массами звезд для  $M_i$  в диапазоне  $1-8 M_{\odot}$ , при различных предположениях о потере массы на стадии асимптотической ветви гигантов. Показано, что зависимость  $M_i - M_f$ , полученная на основании оценок масс белых карликов в скоплениях в нашей Галактике [10], по-видимому, неверна. Оценки  $M_i$  и  $M_f$  для звезд скоплений в Магеллановых облаках и сравнение этих значений с полученными теоретически показывают, что скорость потерь массы звездами в БМО превышает скорость потери в ММО. Распределение масс белых карликов в галактиках должно зависеть от начального химического состава звезд.

1. *Введение.* Масса является определяющим параметром, от которого зависит эволюция звезд. В процессе эволюции звезда теряет большую часть массы. От темпа потери массы на разных стадиях и общего количества теряемой массы зависят характеристики и окончательная «судьба» звезд, а также обогащение межзвездной среды продуктами ядерных реакций. Все звезды, начальная масса которых не превышает  $8-9 M_{\odot}$ , оканчивают эволюцию или как белые карлики, или вспышками сверхновых. Если бы потери массы в процессе эволюции не было, в звездах, начальная масса которых превышает  $1.4 M_{\odot}$ , вырожденное углеродно-кислородное ядро достигало бы предел Чандрасекара, что должно приводить к вспышке. Однако потеря массы существует, и у многих звезд, прежде чем будет достигнут предел Чандрасекара, оболочка «испарится», и звезда станет белым карликом. Таким образом, от величины потери массы зависят конечная масса и верхняя граница начальной массы звезд, которые становятся белыми карликами.

Звездами малых и средних масс ( $1-8 M_{\odot}$ ) основная часть массы теряется на стадии асимптотической ветви гигантов (АВГ), когда после образования вырожденного углеродно-кислородного ядра звезда эволюцио-

нирует на диаграмме Герцшпрунга—Рессела при почти постоянной эффективной температуре, но с быстрым ростом светимости. Обычно на стадии красных гигантов потеря массы звездами учитывается по формуле Реймерса [1]:  $M = -4 \cdot 10^{-13} \alpha L R / M (M_{\odot} / \text{год})$ , где  $L$ ,  $R$ ,  $M$  — светимость, радиус и масса звезды в солнечных единицах,  $\alpha$  — коэффициент, обычно принимается  $\alpha \sim 0.5$ . Однако для звезд, находящихся на стадии АВГ, это приводит к следующим несоответствиям теории и наблюдений: 1) Теоретически получаемые распределения звезд по светимости показывают большое количество звезд с  $M_{\text{bol}} < -6^m$ , что не наблюдается в Магеллановых облаках [2—8]. 2) Распределение белых карликов по массам в окрестностях Солнца очень узкое, с максимумом у  $0.6 M_{\odot}$ , а теоретически вычисленные распределения дают значительно большую дисперсию [8—11]. 3) Возраст шаровых скоплений в Магеллановых облаках, определенный по светимости звезд АВГ, значительно отличается от определенного по диаграмме цвет—светимость [12].

Для согласования теории с наблюдениями было предположено, что кроме звездного ветра, описываемого формулой Реймерса [1], есть некоторый механизм очень большой потери массы, который был назван «сверхветром» [13]. Сейчас нет единого мнения о природе «сверхветра» и о его зависимости от основных параметров звезды. В настоящей работе показано, как изменяется соотношение между начальной и конечной массами звезды при различных предположениях о темпе потери массы звездами на АВГ. Результаты сравнены с наблюдениями. Сделано заключение о зависимости соотношения между начальной и конечной массами звезды от начального химического состава.

**2. Методика.** Для получения значений конечных масс звезд приближенно вычислялась эволюция звезд разных масс до образования белого карлика или до достижения вырожденным углеродно-кислородным ядром предела Чандрасекара ( $1.4 M_{\odot}$ ). Потеря массы звездами до стадии АВГ учитывалась согласно работам [14, 15], для звезд с начальной массой, превышающей  $2 M_{\odot}$ , эту потерю массы можно не учитывать. Эволюция звезд на ранней стадии АВГ (когда водородный слоевой источник практически неактивен, большая часть энергии в звезде генерируется в гелиевом источнике) вычислялась по аналитическим формулам из работ [16, 17]. Потеря массы на этой стадии учитывалась согласно закону Реймерса [1]. В конце ранней стадии АВГ активизируется водородный слоевой источник, а горение гелия на границе ядра происходит в виде вспышек. По-видимому, на этой стадии, характеризующейся быстрым ростом светимости, происходит основная потеря массы звездой. В нашей программе по аналитическим формулам из работ [18, 19] для каждой вспышки вычислялись параметры

звезды. Потеря массы за период между вспышками оценивалась по формуле Реймерса, «сверхветер» учитывался таким образом, что коэффициент  $\alpha$  в формуле предполагался значительно превышающим обычно принимаемые значения. В большинстве вариантов учитывался сброс оболочки планетарной туманности на конечной стадии эволюции звезды на АВГ согласно работе [19], в которой приведено аналитическое выражение для массы сбрасываемой оболочки  $M_{PN}$  в зависимости от массы углеродно-кислородного ядра  $M_{co}$ . О массе сбрасываемой оболочки можно судить из следующего. Если в формуле для  $M_{PN}$  коэффициент  $B = 1$ , то при  $M_{co} = 0.7 M_{\odot}$   $M_{PN} = 0.26 M_{\odot}$ ; если  $M_{co} = 1 M_{\odot}$ , то  $M_{PN} = 0.94 M_{\odot}$ ; если  $M_{co} = 1.3 M_{\odot}$ , то  $M_{PN} = 1.38 M_{\odot}$ .

3. *Результаты.* На рис. 1 и 2 показаны различные зависимости между начальной  $M_i$  и конечной  $M_f$  массами звезд для следующих вариантов учета потери массы:

1)  $\alpha = 1/3$ ;  $B = 0$  («нормальная» потеря массы, без сброса оболочки планетарной туманности);

2)  $\alpha = 1/3$ ;  $B = 1$  (учитывается сброс планетарной туманности);

3)  $\alpha = 1$ ;  $B = 0$  (столь большое значение  $\alpha$  уже подразумевает некоторый «сверхветер», т. к., согласно [20], в случае  $\alpha > 0.6$  красные гиганты сферической составляющей потеряли бы оболочку до загорания гелия в ядре, и не существовала бы горизонтальная ветвь шаровых скоплений);

4)  $\alpha = 1$ ;  $B = 1$ ;

5)  $\alpha = 3$ ;  $B = 1$ ;

6)  $\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 e^{M_{co}}$  (коэффициенты  $\alpha_0$  и  $\alpha_1$  выбраны такими, чтобы  $\alpha = 0.33$  при  $M_{co} = 0.5 M_{\odot}$  и  $\alpha = 10$  при  $M_{co} = 1$ );  $B = 1$ ;

7)  $\alpha = 1$ , если светимость звезды  $\lg(L/L_{\odot}) \leq 4.1$ ;  $\alpha = 10$ , если  $\lg(L/L_{\odot}) > 4.1$  (предполагается внезапное увеличение скорости потери массы в 10 раз);  $B = 1$ ;

8)  $\alpha = 1$ , если светимость звезды  $\lg(L/L_{\odot}) \leq 3.9$ ;  $\alpha = 10$ , если  $\lg(L/L_{\odot}) > 3.9$ ;  $B = 1$ .

На рис. 1 показаны результаты для случаев 1—6, на рис. 2 — для случаев 7 и 8, для сравнения также и для 5. С увеличением скорости потери массы минимальное значение  $M_i$ , для которого возможен рост ядра до предела Чандрасекара, смещается к большим массам, в случае  $\alpha = 3$  ядро вообще не достигает этого предела даже при больших  $M_i$ . В случаях 7 и 8 (внезапный рост скорости потери массы при достижении звездой опреде-

ленной светимости) конечная масса  $M_f$  отличается только в диапазоне начальных масс  $1.4\text{--}4.5 M_\odot$ . Для остальных значений  $M_i$  результаты не отличаются, т. к.  $\alpha = 1$  в течение всей стадии вспышек в гелиевом слое для  $M_i < 1.4 M_\odot$ , а для  $M_i > 4.5 M_\odot$  для обоих случаев в течение всей стадии  $\alpha = 10$ .

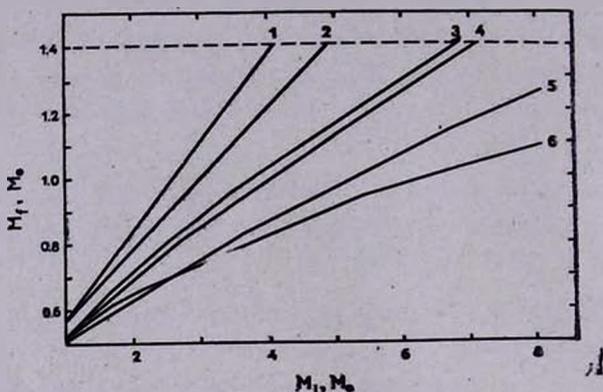


Рис. 1. Зависимость конечной массы звезд  $M_f$  от начальной  $M_i$  при различных предположениях о потере массы на стадии АВГ (см. текст).

На рис. 2, кроме результатов наших вычислений, показаны еще несколько соотношений  $M_i - M_f$ . Кривые  $WK^A$  и  $WK^B$  взяты из работы [10] и получены на основании определения верхней границы масс белых карликов в рассеянных скоплениях. Линия  $M_{co}^i$  показывает значение массы вырожденного углеродно-кислородного ядра в начале эволюции на стадии вспышек в гелиевом источнике. Все значения масс белых карликов ( $M_f$ ), которые образовались из звезд, прошедших стадию вспышек в гелиевом слое, должны находиться выше зависимости  $M_{co}^i$ . Однако для зависимостей  $WK$  [10] в большом диапазоне начальных масс ( $M_i < 5.7 M_\odot$  для линии  $WK^A$  и  $M_i < 7.4 M_\odot$  — для  $WK^B$ ) массы белых карликов оказываются меньше, чем массы углеродно-кислородных ядер звезд в момент начала стадии вспышек в гелиевом слое. Это можно было бы объяснить тем, что звезды теряют свою оболочку уже на ранней стадии АВГ. В таком случае пришлось бы предположить, что скорость потери массы на этой стадии нереально большая. Такое объяснение предлагается в работе [21], однако, согласно нашим оценкам, даже если  $\alpha = 5$ , звезды теряют на ранней стадии не более  $0.5 M_\odot$  (оценки проводились на основании результатов расчетов эволюции звезд на этой стадии, которые приведены

в [22]). Остается предположить, что зависимости  $WK^A$  и  $WK^B$  не соответствуют действительности. Об этом говорит также уменьшающийся наклон кривых  $WK$  в сторону больших начальных масс  $M_i$ , что может быть лишь в случае уменьшения скорости потери массы с увеличением начальной массы (и, следовательно, светимости), что едва ли поддается объяснению. Зависимости  $M_i - M_f$  в работе [10] получены по данным, имеющим очень большой разброс. В большой степени на вид и положение кривых

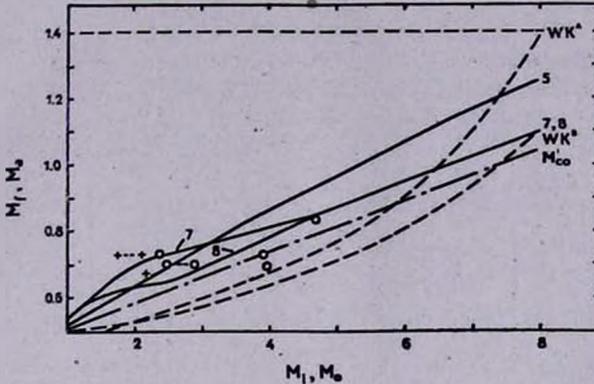


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для предположений о потере массы 5, 7 и 8. Штриховые линии  $WK^A$  и  $WK^B$  — зависимости из работы [10]. Штрих-пунктирная линия  $M_{co}^i$  — зависимость массы углеродно-кислородного ядра звезды в начале эволюции на стадии всплеск в гелиевом слое. Крестики — значения  $M_i$  и  $M_f$  для звезд скопления ГММО, кружки — то же самое для БМО из табл. 1.

$WK$  влияют значения масс белых карликов в окрестностях значения масс  $0.5 M_{\odot}$  в Гиадах и белого карлика 40 Eri B. Однако по крайней мере часть белых карликов с массой около  $0.5 M_{\odot}$  могут быть результатом эволюции двойных систем и слияния двух гелиевых карликов [23], и, таким образом, не могут служить цели определения соотношения  $M_i - M_f$  для одиночных звезд.

Существует еще одна возможность наблюдательной проверки теоретических зависимостей  $M_i - M_f$ , которая предложена в работе [21]. Светимость звезд, находящихся на АВГ, зависит в основном, от массы углеродно-кислородного ядра [24]. Предполагая, что звезды АВГ наибольшей светимости, принадлежащие к данному скоплению, находятся вблизи момента начала эволюции к белым карликам, можно определить массу ядер этих звезд (массу образующихся белых карликов), т. е. величину  $M_f$ . Зная возраст скопления, можно определить массу звезд, отходящих от главной последовательности, и эта масса не должна значительно отличаться от начальной массы звезд, находящихся в верхней части АВГ.

В табл. 1 приведены данные о шаровых скоплениях в Магеллановых Облаках, масса звезд в точке отхода которых превышает  $2 M_{\odot}$  и для которых есть определения возраста на основании диаграмм цвет—светимость в работе [25]. В первом столбце — номер скопления, далее — возраст ( $t$ ), светимость звезд ( $L/L_{\odot}$ ) в верхней части АВГ согласно работам [26, 27], оценка начальной массы звезд, находящихся в верхней части АВГ ( $M_i$ ), значение массы углеродно-кислородного ядра  $M_f$ . Величина  $M_i$  определялась с учетом возраста скопления, по результатам вычисления эволюции

Таблица 1

ЗНАЧЕНИЯ  $M_i$  И  $M_f$ , ПОЛУЧЕННЫЕ НА ОСНОВАНИИ  
ВОЗРАСТОВ И СВИТИМОСТЕЙ ЗВЕЗД АВГ СКОПЛЕНИЙ  
В МАГЕЛЛАНОВЫХ ОБЛАКАХ

№	$t$ ( $10^9$ лет)	$L/L_{\odot}$	$M_i/M_{\odot}$	$M_f/M_{\odot}$
NGC 152	0.61	9700	2.2	0.68
NGC 419*	0.67	12000	2.1	0.73
NGC 1783	>0.2	11000	3.9	0.72
NGC 1831	0.19	10000	3.95	0.69
NGC 2121**	0.7	11000	2.4	0.70
NGC 2134	0.13	16000	4.65	0.84
NGC 2209	0.7	12000	2.4	0.73

\* Согласно [29]  $t=1.2 \cdot 10^9$  лет, что соответствует  $M_i=1.7 M_{\odot}$

\*\* Согласно [30]  $t=0.4 \cdot 10^9$  лет, что соответствует  $M_i=2.9 M_{\odot}$

звезд с различным химическим составом, приведенным в работе [28]. Учитывалось различие содержания тяжелых элементов в Большом и Малом Магеллановых Облаках (БМО и ММО). Масса углеродно-кислородного ядра, зависящая от светимости звезды, вычислялась по формуле, приведенной в работе [18]. Для двух скоплений имеются независимые оценки возраста, сделанные другими авторами, эти результаты приведены в примечаниях к табл. 1 и отражены на рис. 2.

Данные о двух скоплениях БМО лежат немного ниже линии минимальной массы ядер звезд на стадии вспышек в гелиевом слое (рис. 2). Относительно скопления NGC 1783 можно сказать, что в работе [25] приведено лишь минимальное значение возраста, в действительности возраст может быть больше, что приведет к смещению  $M_i$  в сторону меньших значений. Возраст скопления NGC 1831 оценен всего в  $0.19 \cdot 10^9$  лет. Однако согласно нашим оценкам [12], в действительности, как это скопление, так и NGC 1783 значительно старше. Но в настоящей работе оценки из работы [12] не использовались, т. к. они получены на основании тех же вычислений, что и теоретические зависимости  $M_i - M_f$ , показанные на рис. 1 и 2.

Несмотря на малое количество скоплений, для которых можно оценить величины  $M_i$  и  $M_f$ , данные свидетельствуют о большой потере массы звездами на стадии АВГ. Результаты никак не соответствуют предположению о  $\alpha = 1$ , тем более —  $\alpha = 1/3$ , даже с учетом сброса планетарной туманности. По-видимому, в БМО и ММО скорость потери массы звездами различается. Это следует из того факта, что примерно одни и те же конечные массы  $M_f$  соответствуют разным значениям начальной массы  $M_i$ . Значение  $M_f \sim 0.7 M_\odot$  соответствует  $M_i \sim 2 M_\odot$  в ММО и  $M_i \sim 3-4 M_\odot$  в БМО.. Это можно связать с различием начального химического состава звезд в облаках, в ММО содержание тяжелых элементов значительно меньше, что приводит к меньшей потере массы. Так как содержание тяжелых элементов в Галактике превышает таковое в БМО, то в звездах Галактики потеря массы должна быть еще большей.

4. Выводы. 1. Получены теоретические зависимости между начальной и конечной массами ( $M_i - M_f$ ) для звезд малых и средних масс при различных предположениях о потере массы звездами на стадии АВГ.

2. Зависимость  $M_i - M_f$ , приведенные в работе [10] на основании оценок масс белых карликов в скоплениях в Галактике, по-видимому, дают слишком заниженные значения  $M_f$  (примерно на  $0.1 M_\odot$ ).

3. Сравнение данных о  $M_i$  и  $M_f$ , полученных для скоплений в БМО и ММО, свидетельствует о большом различии в скоростях потери массы в этих галактиках, что, по-видимому, связано с различиями их химического состава.

4. Соотношения  $M_i - M_f$ , а, следовательно, и распределения масс белых карликов в разных галактиках должны быть различными. В галактиках с меньшим содержанием тяжелых элементов распределение должно иметь большую дисперсию вокруг среднего значения.

Работа выполнена в Астрономическом совете АН СССР.

Радиоастрофизическая обсерватория  
АН Латв.ССР

## THE INITIAL-FINAL MASS RELATION FOR LOW AND INTERMEDIATE MASS STARS

JU. L. FRANTSMAN

The initial-final theoretical mass relations  $M_i - M_f$  for low and intermediate mass stars are presented and the effect of different assumptions about mass loss is discussed. It appears that Weidemann and

Koester [10]  $M_i - M_f$  relations are erroneous. The data on AGB stars in the Magellanic Clouds clusters indicate that mass loss process is very sensitive to the metal abundance. Mass distributions of white dwarfs must be different in galaxies with different chemical compositions.

## ЛИТЕРАТУРА

1. D. Reimers, *Memoires de la Soc. Royale des Sciences des Liège, Coll. 8°, 8, 369, 1975.*
2. I. Iben Jr., *Astrophys. J.*, 246, 278, 1981.
3. I. Iben Jr., *Physical Processes in Red Giants*, ed. I. Iben, A. Renzini, Reidel Publ. Comp., Dordrecht, 1981, p. 3.
4. J. G. Cohen, J. A. Frogel, S. E. Persson, J. Elias, *Astrophys. J.*, 249, 481, 1981.
5. H. B. Richer, *Physical Processes in Red Giants*, ed. I. Iben, A. Renzini, Reidel Publ. Comp., Dordrecht, 1981, p. 153.
6. J. A. Frogel, J. G. Cohen, S. E. Persson, J. H. Elias, *Physical Processes in Red Giants*, ed. I. Iben, A. Renzini, Reidel Publ. Comp., Dordrecht, 1981, p. 159.
7. G. E. Miller, J. M. Scalo, *Astrophys. J.*, 263, 259, 1982.
8. Ю. Л. Францман, *Астрофизика*, 24, 131, 1986.
9. D. Koester, V. Weidemann, *Astron. and Astrophys.*, 81, 145, 1980.
10. V. Weidemann, D. Koester, *Astron. and Astrophys.*, 121, 77, 1983.
11. Ю. Л. Францман, *Научные информации Астросовета*, № 61, 73, 1986 (в печати).
12. Ю. Л. Францман, *Письма в Астрон. ж.* 12, 281, 1986.
13. A. Renzini, *Physical Processes in Red Giants*, ed. I. Iben, A. Renzini, Reidel Publ. Comp., Dordrecht, 1981, p. 431.
14. F. Fusi-Peccol, A. Renzini, *Astron. and Astrophys.*, 39, 413, 1975.
15. F. Fusi-Peccol, A. Renzini, *Astron. and Astrophys.*, 46, 447, 1976.
16. I. Iben Jr., A. Renzini, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.*, 21, 271, 1983.
17. I. Iben Jr., A. Renzini, *Illinois Astronomy*, No 33, 1983.
18. I. Iben Jr., J. W. Truran, *Astrophys. J.*, 220, 980, 1978.
19. A. Renzini, M. Voli, *Astron. and Astrophys.*, 94, 175, 1981.
20. A. Renzini, *Effects of Mass Loss on Stellar Evolution*, eds. C. Chiosi, R. Stalio, Reidel Publ. Comp., Dordrecht, 1981, p. 319.
21. V. Weidemann, *Astron. and Astrophys.*, 134, L1, 1984.
22. S. A. Becker, I. Iben Jr. *Astrophys. J.*, 233, 831, 1979.
23. I. Iben Jr., A. V. Tutukov, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 54, 335, 1984.
24. B. Paczyn'ski, *Acta Astron.*, 21, 417, 1971.
25. P. W. Hodges, *Astrophys. J.*, 264, 470, 1983.
26. J. Mould, M. Aaronson, *Astrophys. J.*, 263, 629, 1982.
27. M. Aaronson, J. Mould, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 48, 161, 1982.
28. C. Alcock, B. Paczyn'ski, *Astrophys. J.*, 223, 244, 1978.
29. D. Durand, E. Hardy, *Astrophys. J.*, 283, 552, 1984.
30. P. Flower, D. Geisler, P. Hodges, E. Olszewski, R. Schommer, *Astrophys. J.*, 275, 15, 1983.