

В. Г. СУРДИН

ОБ ЭВОЛЮЦИИ ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ И ПРОИСХОЖДЕНИИ ЗВЕЗД ГАЛО ГАЛАКТИКИ

Рассмотрены различные механизмы разрушения шаровых звездных скоплений. Показано, что наиболее эффективны диссипация и динамическое трение. Сделан вывод, что возникновение популяции звезд поля галактического гало нельзя объяснить разрушением уже сформировавшихся чисто звездных шаровых скоплений.

ON THE EVOLUTION OF GLOBULAR CLUSTERS AND THE ORIGIN OF GALACTIC HALO STARS, by V. G. Surdin.— Some mechanisms of destruction of globular clusters are considered. The most effective ones are dissipation and dynamical friction. It is shown that the existence of all galactic halo field stars cannot be explained by disruption of globular clusters.

Введение

Как образовалась сферическая подсистема нашей Галактики? Есть основания считать, что ее происхождение не является результатом непосредственного сжатия в звезды газа, из которого состояла протогалактика [1]. Действительно, характерная (джинсовская) масса фрагментов, образующихся в результате гравитационной неустойчивости газа с температурой T и плотностью ρ :

$$M_J = 3 \cdot 10^7 M_{\odot} \left[\frac{T}{10^4 \text{ К}} \right]^{\frac{3}{2}} \left[\frac{\rho}{10^{-24} \text{ г/см}^3} \right]^{-\frac{1}{2}}. \quad (1)$$

При разумных значениях температуры и плотности в протогалактике ($T = 10^2 \div 10^4 \text{ К}$ и $\rho = 10^{-25} \div 10^{-23} \text{ г/см}^3$), величина M_J скорее соответствует массам шаровых скоплений, чем отдельных звезд. Следовательно, можно предположить, что популяция звезд галактического гало образовалась в результате фрагментации массивных гравитационно связанных облаков [2]. В настоящей статье рассмотрены некоторые причины, которые могли привести к разрушению таких скоплений и образованию населения одиночных звезд гало Галактики.

Для оценки полного количества звезд Галактики можно воспользоваться следующим методом. Как показал Плаут [3], в области с $R \leq 9$ кпс вокруг центра Галактики заключено $\sim 2 \cdot 10^4$ переменных звезд типа RR Lyr с периодом > 0.5 дня и амплитудой $> 1^m$. В шаровых скоплениях таких звезд ~ 200 . Если предположить, что отношение полной массы звезд к массе звезд типа RR Lyr одинаково для гало и скоплений, то масса гало в 100 раз больше массы скоплений. Вольтьер [4] показал, что полная светимость шаровых скоплений гало в области $R \leq 9$ кпс равна $4.2 \cdot 10^6 L_{\odot}$. Тогда, предполагая, что отношение массы к светимости для шаровых скоплений в солнечных единицах $M/L_v = 2$, находим, что масса скоплений равна $8 \cdot 10^6 M_{\odot}$. Соответственно оценка для массы гало равна $10^9 M_{\odot}$.

Массу гало можно определить еще одним независимым способом. По данным Шмидта [5], плотность звезд гало в окрестностях Солнца равна $1.7 \cdot 10^{-4} M_{\odot}/\text{pc}^3$. Отсюда масса гало для $R \leq 10$ кпс равна, в зависимости от за-

кона изменения плотности с расстоянием, $6 \cdot 10^9 M_\odot$ (при $\rho \sim R^{-3}$) или $2 \cdot 10^9 M_\odot$ (при $\rho \sim R^{-2}$). Второе значение более правдоподобно, так как центральные области гало (по крайней мере при $R \leq 4$ кпс) по данным различных исследователей хорошо описываются изотермическим законом изменения плотности $\rho \sim R^{-2}$.

Таким образом, суммарная масса шаровых скоплений едва ли составляет 1% массы гало Галактики. Следовательно, предположив, что все звезды гало родились в скоплениях, нам необходимо объяснить: а) почему большинство скоплений распалось, или б) почему скопления потеряли большую часть своих звезд.

Историю каждого шарового скопления можно разделить на два этапа. Первый этап — этап протоскопления — это время ($\sim 10^8$ лет), в течение которого газовое облако в результате сжатия и фрагментации превращается в звездное скопление. Второй этап — этап собственно шарового чисто звездного скопления. В настоящей работе рассматривается эволюция шаровых скоплений на втором этапе, т. е. практически — в течение всего их времени жизни ($\sim 10^{10}$ лет).

Предполагается, что эволюция шаровых скоплений, подобных наблюдаемым сейчас в Галактике, происходит на фоне стационарного распределения галактической материи.

Разрушение чисто звездных шаровых скоплений

Рассмотрим различные причины, которые вызывают разрушение уже сформировавшихся, чисто звездных (без газа), шаровых скоплений.

1. Динамическое трение возникает как кумулятивный эффект от гравитационного взаимодействия шарового скопления со звездами галактического поля [6]. Скопление массы M , двигаясь через звездный фон плотности ρ , теряет энергию

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{4\pi G^2 M^2 \rho}{v^3} \mathbf{v} \mathbf{v}_c \ln \left(\frac{R_{\max}}{R_{\min}} \right) [\varphi(jv) - jv\varphi'(jv)], \quad (2)$$

где \mathbf{v} — скорость скопления относительно звездного фона, \mathbf{v}_c — скорость скопления относительно центра Галактики, $\varphi(jv)$ — функция ошибок, j — параметр максвелловского распределения для звезд фона ($\langle v^2 \rangle = 3/2j^2$), R_{\max} и R_{\min} — соответственно максимальный и минимальный прицельные параметры звезд фона.

Тормозясь, скопление по спиральной траектории приближается к центру Галактики. Подробно эволюция орбит шаровых скоплений под действием динамического трения рассмотрена в работах Тримэна [7] и Сурдина и Чарикова [8]. В последней работе найдена минимально возможная начальная масса M_{\min} , которую должно иметь скопление, чтобы, начав двигаться по орбите с апогалактическим расстоянием R_a , за 10^{10} лет успеть достигнуть центра Галактики. Графически эта зависимость показана на рис. 1. Она аппроксимируется следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \lg(M_{\min}/M_\odot) &= 5.4 + 0.22 R_a \text{ (кпс)} \quad \text{при } R_a < 5 \text{ кпс}, \\ \lg(M_{\min}/M_\odot) &= 5.8 + 0.15 R_a \text{ (кпс)} \quad \text{при } R_a \geq 5 \text{ кпс}. \end{aligned} \quad (3)$$

Если существовали скопления с начальной массой, большей найденного предела (3), то они должны были бы упасть на центральную область Галактики. Рис. 1 показывает, что верхняя граница наблюдаемого распределения шаровых скоплений в Галактике хорошо описывается формулой (3) в области $R_a < 5-7$ кпс. Следовательно, с большой степенью вероятности можно заключить, что в этой области Галактики массивные шаровые скопления упали на галактический центр под действием динамического трения. Какова же судьба этих скоплений?

Известно [10], что приливные силы, действующие на шаровые скопления со стороны центральных областей Галактики, ограничивают размеры скопления величиной приливного радиуса r_t :

$$r_t = R_p [M/(3+e)M_G]^{1/6}, \quad (4)$$

где M — масса скопления, e и R_p — эксцентриситет и перигалактическое расстояние орбиты скопления, M_G — масса части Галактики внутри радиуса R_p .

Все звезды, попадающие за пределы приливного радиуса r_t , теряют связь со скоплением и становятся звездами галактического поля. Очевидно, что у скоплений, приближающихся под действием динамического трения к центру Галактики, приливный радиус уменьшается. Следовательно, эти скопления будут терять звезды из своих внешних областей. Тримэн [7] показал, что в простой модели Галактики (в виде изотермической сферы)

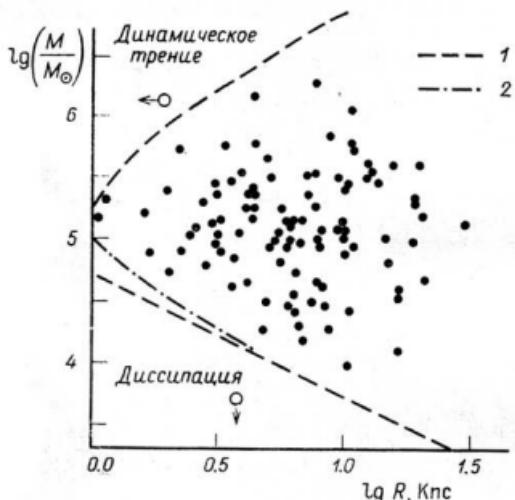


Рис. 1. Распределение шаровых скоплений в плоскости «масса — расстояние от центра Галактики» по данным [9] в предположении отношения массы к светимости скоплений $(M/L_V)=2$ (в солнечных единицах): 1 — значение критической массы, обусловленное эффектами диссипации (12) и динамического трения (3); 2 — значение критической массы с учетом приливных «ударов» при прохождении скопления через плоскость Галактики. Кружок со стрелкой показывает направление эволюции скоплений в областях быстрой эволюции

шаровые скопления, приближаясь к центру Галактики, теряют в среднем 60—75% своих звезд (данные о строении шаровых скоплений были взяты из работ Петерсона и Кинга [11] и Петерсона [12]). Есть основания [8] считать, что центральные области Галактики значительно плотнее, чем принимается в модели изотермической сферы, и что, следовательно, шаровые скопления разрушаются полностью. Однако и сделанной выше оценки достаточно для утверждения о том, что масса звезд, потерянных в гало Галактики массивными шаровыми скоплениями, порядка суммарной массы этих быстро превоизванировавших скоплений.

Для корректной оценки суммарной массы разрушившихся скоплений необходимо знать начальное распределение шаровых скоплений по массам и расстояниям от центра Галактики. Точно восстановить это распределение сейчас, видимо, уже невозможно. Однако можно сделать предположение, что распределение шаровых скоплений по массам в центральных областях Галактики было таким же, как и в областях, не затронутых сильным влиянием динамического трения ($R_a > 7$ кпс). Если еще учесть, что сейчас наблюдается лишь одна четверть находящихся в Галактике шаровых скоплений [13], то для массы звезд гало, возникших в шаровых скоплениях, разрушенных динамическим трением, получим оценку $\lesssim 10^7 M_\odot$.

2. Диссипация или «испарение» звезд из скопления уменьшает со временем массу любого шарового скопления по закону

$$\frac{1}{M} \frac{dM}{dt} = -\frac{K}{\tau}, \quad (5)$$

где $K=0.0074$ – доля звезд в максвелловском распределении со скоростями, большими параболической, τ – среднее время релаксации для скопления. По расчетам Кинга [14]

$$\tau = 3 \cdot 10^8 \left[\frac{N}{10^5} \right]^{1/2} \left[\frac{r_0}{1 \text{ пк}} \right]^{3/2} \text{ лет}, \quad (6)$$

где N – количество звезд в скоплении, а r_0 – радиус, в котором заключена половина спроектированной на плоскость массы скопления. Тогда время полной диссипации для изолированного скопления

$$t_d = \frac{2}{7} \frac{\tau}{K} \quad (7)$$

Для большинства маломассивных шаровых скоплений справедливо соотношение

$$r_0 \approx 0.2 r_t, \quad (8)$$

где r_t – приливный радиус скопления, определяемый по формуле (4). Из-за слабой зависимости r_t от M_g выберем в качестве модели распределения плотности в Галактике модель изотермической сферы. Тогда можно принять

$$M_g = 1.5 \cdot 10^{11} M_\odot (R_p / 10 \text{ кпс}). \quad (9)$$

Используя соотношения (4), (6), (8) и (9) и предполагая, что средняя масса звезды в скоплении равна $0.5 M_\odot$, получим из (7)

$$t_d \approx 8 \cdot 10^9 \left(\frac{M}{10^4 M_\odot} \right) \left(\frac{R_p}{1 \text{ кпс}} \right) \text{ лет}. \quad (10)$$

Расстояния шаровых скоплений от центра Галактики, найденные из наблюдений, в среднем близки к их апогалактическим расстояниям (R_a). Используя данные Петерсона [12] о минимально возможных эксцентриситетах (e_{\min}) орбит 41 шарового скопления, можно найти среднее значение $\langle e_{\min} \rangle = 0.43$. Выберем в качестве среднего значения истинного эксцентриситета величину $\langle e \rangle = 0.5$, тогда

$$R_p = 1/3 R_a. \quad (11)$$

Если принять возраст всех шаровых скоплений равным $1.2 \cdot 10^{10}$ лет, то из (10) и (11) получим значение максимальной массы распавшихся из-за диссипации шаровых скоплений как функцию их апогалактического расстояния

$$M_{\max} \approx 5 \cdot 10^4 M_\odot \left[\frac{R_a}{1 \text{ кпс}} \right]^{-1}. \quad (12)$$

На рис. 1 видно, что нижняя граница распределения по массам шаровых скоплений в Галактике хорошо описывается уравнением (12) в области $R_a \leq 8$ кпс. Можно заключить, что именно процесс диссипации обуславливает эволюцию маломассивных шаровых скоплений в Галактике.

Используя формулы (5), (9) и (12), легко можно показать, что для всех остальных скоплений с $M > M_{\max}$ справедливо соотношение $\Delta M \approx 1/3 M_{\max}$, где ΔM – масса звезд, потерянных скоплением в результате диссипации. Как и в случае с динамическим трением, мы не можем восстановить первоначальное распределение скоплений по массам (теперь уже в области малых масс). Однако, предположив, что это распределение было таким же, как и в областях, не затронутых сильной диссипацией ($R_a > 8$ кпс), получим оценку для полной массы звезд, потерянных в результате диссипации, $\lesssim 10^7 M_\odot$.

Кроме диссипации и динамического трения, существуют еще несколько механизмов, приводящих к потере звезд шаровыми скоплениями. Перечислим их:

1) Гравитационные приливные «удары» воздействуют на скопление при прохождении через плоскость Галактики или вблизи галактического ядра (т. е. в областях, где существует большой градиент силы тяжести). При этом внутренняя энергия скопления увеличивается и некоторые звезды покидают его [15]. Этот механизм эффективно разрушает шаровые скопления на расстояниях $R < 4$ кпс от центра Галактики. Полную массу потерянных скоплений звезд можно оценить в $10^6 M_{\odot}$.

2) Взаимные столкновения шаровых скоплений, являющиеся разновидностью гравитационных приливных «ударов», приводят к частичному разрушению скоплений на расстояниях $R < 8$ кпс от центра Галактики. Полная масса потерянных звезд едва ли составляет $10^5 M_{\odot}$.

3) Истечение газа из атмосфер красных гигантов происходит со скоростью, превышающей параболическую скорость в центре большинства шаровых скоплений [16]. За время своей эволюции скопление может потерять в форме газа до 50% начальной массы [17]. Это, в свою очередь, приводит к потере быстро движущихся звезд. Однако полное их число не привысит 10% массы скоплений, т. е. составит менее $10^6 M_{\odot}$.

4) Если масса части Галактики внутри орбиты шарового скопления медленно изменяется, то радиус орбиты скопления также изменяется по закону $R \sim M_g^{-1}$. Тогда для приливного радиуса скопления получаем зависимость $r_p \sim M_g^{-1/2}$. Расчеты Ханта [18] показали, что при плотности межгалактической среды $3 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-3}$ на Галактику будет происходить аккреция со скоростью $5.6 M_{\odot}/\text{год}$. За 10^{10} лет это может привести к уменьшению приливного радиуса у шаровых скоплений не более чем в два раза, что вызовет потерю менее 10% полного числа звезд.

В заключение необходимо отметить следующее. Во-первых, возможен более точный расчет каждого из перечисленных выше эффектов. Во-вторых, эволюцию шаровых скоплений можно исследовать только при учете совместного действия всех факторов. Однако цель настоящего обзора заключалась лишь в том, чтобы выявить наиболее эффективные механизмы, приводящие к разрушению шаровых скоплений, и оценить полное число звезд, которые могут попасть в гало Галактики в результате эволюции уже сформировавшихся чисто звездных шаровых скоплений.

Сформулируем основные выводы: 1) эволюция массивных шаровых скоплений происходит под действием динамического трения, приводящего к падению скоплений на центр Галактики и к их разрушению приливными силами; 2) эволюция маломассивных скоплений происходит под действием диссипации; 3) все остальные факторы, приводящие к разрушению шаровых скоплений, играют второстепенную роль; 4) полная масса потерянных скоплений звезд не превышает $10^7 M_{\odot}$.

Таким образом, ни один из механизмов, разрушающих чисто звездные шаровые скопления, не мог привести к образованию звездного гало в нашей Галактике. Следовательно, предположив, что все звезды галактического гало образовались в скоплениях, мы должны сделать вывод, что звезды покинули скопления на стадии формирования последних.

В следующей статье будет рассмотрена эволюция протошаровых скоплений и показано, что наличие в протоскоплениях значительного количества газа может стать причиной почти полного их распада. Попытаемся доказать, что наблюдаемые сейчас шаровые скопления являются остатками гораздо более массивных протоскоплений, которые разрушились почти сразу же после своего рождения, образовав таким образом звездное гало Галактики.

Автор считает своим долгом выразить благодарность С. Б. Пикельнеру, по инициативе которого была начата эта работа.

Литература

1. А. Г. Дорошкевич, И. Г. Колесник, Астрон. ж., 53, 10, 1976.
 2. С. Б. Пикельнер, Астрон. ж., 53, 449, 1976.
 3. L. Plaut, In: Galactic Structure, eds A. Blaauw, M. Schmidt, Univ. Chicago Press, Chicago, London, 1965, p. 267.
 4. L. Woltjer, Astron. Astrophys., 42, 109, 1975.
 5. M. Schmidt, Astrophys. J., 202, 22, 1975.
 6. S. D. Tremaine, J. P. Ostriker, L. Spitzer, Astrophys. J., 196, 407, 1975.
 7. S. D. Tremaine, Astrophys. J., 203, 345, 1976.
 8. Б. Г. Сурдин, А. В. Чариков, Астрон. ж., 54, 24, 1977.
 9. Б. В. Кукаркин, Каталог шаровых скоплений, «Наука», М., 1974.
 10. I. King, Astron. J., 67, 471, 1962.
 11. C. J. Peterson, I. King, Astron. J., 80, 427, 1975.
 12. C. J. Peterson, Astrophys. J. Lett., 190, L17, 1974.
 13. А. С. Шаров, Астрон. ж., 53, 702, 1976.
 14. I. King, Astron. J., 63, 109, 1958.
 15. J. P. Ostriker, L. Spitzer, R. A. Chevalier, Astrophys. J. Lett., 176, L51, 1972.
 16. J. G. Cohen, Astrophys. J. Lett., 203, L129, 1976.
 17. J. H. Oort, G. van Herk, Bull. Astron. Inst. Netherl., 14, 491, 1959.
 18. R. Hunt, Monthly Notices Roy. Astron. Soc., 173, 465, 1975.
-