

в рассеянных скоплениях не очень велико: оно составляет  $10^7$ — $10^8$  лет. В рассеянных скоплениях стационарные в регулярном и в иррегулярном поле, достигаются приблизительно одновременно.

В шаровых скоплениях средние скорости звезд приблизительно в 10 раз больше, а следовательно, время релаксации приблизительно в 1000 раз больше. Ясно, что шаровые скопления еще не успели достигнуть состояния стационарного в иррегулярном поле. Впрочем, в центральных областях шаровых скоплений очень высокая звездная плотность  $D$ . Это способствует уменьшению времени релаксации, и надо полагать, что центральные области шаровых скоплений уже стационарны в иррегулярном поле.

В галактиках средние относительные скорости звезд еще в десять раз больше, чем средние скорости в шаровых скоплениях. Поэтому время релаксации в галактиках очень велико, порядка  $10^{13}$ — $10^{14}$  лет, т. е. в тысячи раз больше времени существования галактик. То, что иррегулярные силы в Галактике еще не успели сработать, подтверждается и наблюдаемым распределением скоростей звезд в окрестности Солнца. Вместо максвелловского распределения скоростей, при котором все направления скоростей равноправны, в окрестности Солнца звезды преимущественно движутся в направлении на центр Галактики и от него, а скорости, перпендикулярные к основной плоскости Галактики, встречаются редко. Только в ядрах галактик, где скорости звезд меньше, а звездная плотность больше, по-видимому, достигнута стационарность в иррегулярном поле.

Большой величине времени релаксации в скоплениях галактик сильно способствуют их огромные скорости одна относительно другой, равные нескольким сотням километров в секунду, и очень малое число галактик в единице объема  $D$ . Уменьшают время релаксации гигантские массы галактик — членов скопления. В итоге время релаксации получается равным  $10^{11}$ — $10^{13}$  лет, из чего ясно, что скопления галактик не могли достигнуть стационарности в иррегулярном поле.

### **Диссипация звездных систем**

Две противоположные точки зрения, рассматривающие происхождение звезд: первая — как процесс сжатия массивного диффузного облака и вторая — как процесс рас-

пада сверхплотного вещества, сходятся в одном. Обще-признанно, что звезды формируются не в одиночку, а группами, скоплениями. Конденсация звезд в массивном диффузном облаке должна происходить практически одновременно, и при этом сформировавшиеся звезды образуют скопление. Распад сверхплотной материи, сопровождающийся передачей скоростей образующимся звездам, в результате чего они выбрасываются из некоторой области, также можно считать образованием коллектива, скопления.

Не существует механизма, который вызывал бы объединение в скопления не связанных поначалу между собой отдельных звезд. Поэтому звезды любого наблюдаемого скопления, рассеянного или шарового, должны были сформироваться вместе, образовав скопление уже в первый момент после формирования.

А распад уже существующих звездных скоплений, выбрасывание из них отдельных звезд, происходит должен. Механизмы, управляющие такими процессами, подробно изучены, доказано, что они эффективно действовали в ходе эволюции звездных скоплений.

Мы уже писали, что число рассеянных скоплений, имеющих в настоящее время в Галактике, оценивается приблизительно в 300 000, среднее число звезд в рассеянном скоплении можно считать близким к 300, общее число звезд, содержащихся во всех рассеянных скоплениях, должно быть порядка 10 миллионов. Это только одна десятитысячная доля стомиллиардного населения диска Галактики. Поэтому нужно сделать вывод, что подавляющая часть сформировавшихся в прошлом рассеянных скоплений уже распалась или (обратим внимание читателя и на такую возможность) так изменилась, что перестала наблюдаться как рассеянные скопления.

Если бы процесс формирования и распада рассеянных скоплений в Галактике был процессом равномерным, не ускоряющимся и не замедляющимся, то отношение времени существования Галактики (приблизительно  $10^{10}$  лет) к среднему времени распада рассеянного скопления  $t$  должно было бы равняться отношению общего числа звезд в диске Галактики к числу звезд, содержащихся в настоящий момент во всех рассеянных скоплениях. Справедлива была бы пропорция

$$10^{10} : t = 10^{11} : 10^7.$$

Согласно этой пропорции  $t$  должно было быть равно од-

ному миллиону лет. Изучение механизмов распада рассеянных скоплений показывает, что среднее время распада в 30—50 раз больше. Из этого следует важный вывод, что формирование рассеянных скоплений, а следовательно и формирование звезд, в прошлом происходило значительно интенсивнее, чем в настоящее время. В наше время процесс звездообразования в Галактике уже затухает.

Общее число шаровых скоплений в Галактике заключено между 150 и 200. Если принять его равным 175, а среднее число звезд в одном шаровом скоплении равным 600 000, то общее число звезд, содержащихся в шаровых скоплениях должно оцениваться в 100 миллионов. Число звезд в гало Галактики, т. е. в областях Галактики, значительно удаленных от галактической плоскости, тоже оценивается в несколько сотен миллионов. Так как шаровые скопления входят в состав гало, то нужно сделать вывод, что звезды поля гало — это бывшие члены шаровых скоплений, диссипировавшие, покинувшие в прошлом эти скопления. Возрасты шаровых скоплений оцениваются в несколько, до десятка, миллиардов лет. В Галактике нет молодых шаровых скоплений. Пример шаровых скоплений тоже указывает на то, что процесс звездообразования в Галактике раньше, несколько миллионов лет назад, был более бурным, чем в наши дни.

Изучение процессов диссипации (ухода звезд), которые должны происходить в звездных скоплениях, показывает, что нужно отдельно рассматривать механизм, действующий на ранней стадии эволюции скопления, и отдельно механизм, удаляющий звезды из скопления, когда оно уже достигло квазистационарного состояния. Эти механизмы несколько различны. Рассмотрим их.

Шаровые и рассеянные скопления не обнаруживают заметного вращения и их форма очень близка к сферической. Поэтому если они образовывались путем конденсации в массивной диффузной туманности, то каждая звезда, сформировавшись как сгусток материи в поле туманности, под действием общего притяжения туманности устремлялась к ее центру. До образования сгустка материи, из которой сформировалась звезда, удерживало на месте газовое давление, уравновешивавшее силу притяжения к центру туманности. На образовавшийся сгусток газовое давление уже не действует, и звезда начинает двигаться, повинувшись только силе тяготения.

Все траектории звезд на этой первоначальной стадии эволюции почти прямолинейные, проходящие почти точно через центр инерции скопления. Мы пишем «почти», потому что на самом деле у туманности неизбежны небольшие отклонения от сферической формы и, кроме того, процесс конденсации звезд в ней тоже не должен строго подчиняться закону сферического распределения.

Исследования динамики сферических звездных скоплений с прямолинейными радиальными траекториями показывает, что в непосредственной близости около центра инерции средняя скорость звезд должна быть равна

$$\bar{v} = 0,064 \left( \frac{nM}{\rho} \right)^{1/2} \left( \lg \frac{1}{x} \right)^{1/3} \text{ км/с,} \quad (57)$$

где  $M$  — масса звезды, выраженная в единицах массы Солнца (для простоты предполагается, что массы звезд одинаковы),  $n$  — число звезд в скоплении,  $\rho$  — радиус скопления, выраженный в парсеках,  $x$  — отношение расстояния до центра к радиусу скопления. Формула верна для области скопления около ее центра инерции, следовательно,  $x$  — малая величина. Выражение (57) показывает, что при приближении к центру инерции системы скорости звезд возрастают.

Звездная плотность вблизи центра инерции системы оказывается равной

$$D = 0,057 \frac{nM}{\rho^3} x^{-2} \left( \lg \frac{1}{x} \right)^{-1/3} \quad (58)$$

единиц солнечных масс в кубическом парсеке. Плотность очень быстро растет при приближении к центру инерции.

Если подставить значения  $\bar{v}$  и  $D$  в выражение для времени релаксации (56) и учесть численное значение постоянной тяготения  $G$ , то получим

$$T_2 = 1,2 \cdot 10^6 \left( \frac{n\rho^3}{M} \right)^{1/2} x^2 \left( \lg \frac{1}{x} \right)^{4/3} \text{ лет.} \quad (59)$$

Следовательно, время релаксации вблизи центра очень мало. Это означает, что при прохождении около центра инерции скопления звезды успевают сильно взаимодействовать между собой, обмениваться энергиями.

У некоторой части звезд скорости резко возрастают, становятся больше критической, и звезды покидают скопление. Происходит бурное выбрасывание их в звездное

поле. Этот процесс тем более бурный, чем ближе к центру инерции проходят траектории звезд в самом начале процесса, т. е. чем меньше наименьшее значение  $x$ .

По мере того как звезды выбрасываются из центральной области скопления, траектории звезд, оставшихся в скоплении, но испытавших взаимодействия, становятся все более отличными от прямолинейных, уплотнение близ центра скопления ослабевает, и бурная диссипация звезд на начальной стадии эволюции затухает и прекращается.

Вычисления показывают, какой процент звезд покидает скопление на начальной стадии эволюции в зависимости от наименьшего значения  $x$  в начале процесса:

$x$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1,5}$
Процент диссипировавших из скопления звезд	86	75	59	27	8

Так как шаровые скопления содержат много сотен тысяч звезд и их форма очень близка к строгой сферичности, значение  $x$  у них в начальный момент эволюции должно было быть весьма малым, и согласно приведенной таблице они должны были потерять больше половины своих звезд в процессе бурной диссипации. Эти звезды, ушедшие из шаровых скоплений, образовали гало Галактики.

Когда процесс бурной диссипации шаровых скоплений заканчивается и они приближаются к квазистационарному состоянию, дальнейший уход звезд из них практически прекращается. Время релаксации шаровых скоплений, подсчитываемое по формуле (56), весьма велико, и за  $10^{10}$  лет (время, сравнимое со временем существования Вселенной) они должны терять меньше 1% своего звездного состава. Шаровые скопления неограниченно долго останутся системами гравитирующих, т. е. притягивающих друг друга, тел, и будут наблюдаться до тех пор, пока входящие в них звезды не израсходуют через излучение всю содержащуюся в них внутриатомную энергию.

Иная судьба у рассеянных скоплений. Так как число звезд в них невелико и составляет лишь несколько сотен, случайные отклонения от сферической формы должны быть у них больше, чем у шаровых скоплений, траектории звезд сильнее отличаются от прямых и начальное значение наименьшего  $x$  больше. Поэтому диссипация на первой стадии эволюции у них протекает менее бурно. В итоге рассеянные скопления теряют всего несколько процентов своих звезд. Но, в отличие от шаровых скоплений, диссипация рассеянных скоплений не прекращается после достижения ими квазистационарного состояния. По формуле (56) можно подсчитать, что время релаксации у среднего рассеянного скопления составляет несколько десятков миллионов лет. За время релаксации в среднем 1% звезд приобретает скорость большую критической и полностью покидает скопление. При этом по мере ухода звезд время релаксации уменьшается, и процесс ухода звезд ускоряется.

Кроме того, за время релаксации около 2% звезд приобретает скорость хотя и меньшую критической, но достаточную, чтобы отойти от скопления на значительное расстояние. Если бы не было звезд галактического поля и самой Галактики, то такая удалившаяся на конечное расстояние звезда под действием притяжения скопления вернется назад, войдет в тело скопления и в результате взаимодействий с его членами испытает торможение, останется внутри тела скопления. Отдаление от скопления и возвращение в него происходило бы по почти прямолинейной траектории. Наличие звездного поля Галактики изменяет положение. В области наибольшего удаления отошедшая от скопления звезда движется очень медленно, находится на этом участке пути очень долго. В течение этого длительного времени звезды поля, взаимодействуя с отошедшей от скопления звездой, успевают сообщить ей некоторую скорость. Величина составляющей этой скорости, перпендикулярной к направлению на скопление, достаточна, чтобы при возвращении к скоплению звезда не вошла в его основное тело, а прошла около скопления и, не испытав поэтому торможения, снова отошла примерно на такое же расстояние. Этот процесс ведет к образованию у скопления «короны» — разреженной оболочки из звезд, обращающихся с очень малыми скоростями около центрального тела скопления. Явление корон у звездных скоплений было впервые в результате наблюдений обна-

ружено и исследовано П. Н. Холоповым и Н. М. Артюхиной.

Так постепенно часть звезд уходит из центрального тела скопления вовсе, а другая, несколько большая, переходит в корону. За срок в 1—3 миллиарда лет, в зависимости от первоначального числа звезд в скоплении, его центральное тело полностью диссипирует, на его месте останется лишь двойная звезда. Останется и корона. Но звездная плотность в короне очень мала, она намного меньше даже звездной плотности в поле галактики. Небольшое добавление звездной плотности короны к звездной плотности галактического поля при наблюдениях не может быть обнаружено как уплотнение звезд на небесной сфере и становится как бы невидимым.

Однако у звезд короны сохраняется важная общая черта. Скорость каждой звезды короны относительно центра инерции скопления была очень мала, и поэтому скорости звезд короны должны мало различаться между собой.

Такие образования, состоящие из разбросанных звезд, имеющих одинаковые пространственные скорости, наблюдаются, изучены и получили название движущихся скоплений. Наиболее примечательным из них является движущееся скопление Большой Медведицы. Измерение собственных движений семи ярких звезд, образующих всем хорошо известный ковш созвездия, показало, что пять из них (из которых одна двойная) имеют общее собственное движение. Практически те же собственные движения еще у семи более слабых звезд созвездия. Эти данные приведены в таблице 27, где в третьем столбце дана величина собственного движения  $\mu$  звезды, в четвертом — угол  $\theta$  между направлением от звезды на северный полюс и направлением собственного движения звезды, в пятом — видимая звездная величина звезды, а в шестом — ее спектральный класс.

Равенство пространственных скоростей группы звезд должно проявляться, строго говоря, не в равенстве их собственных движений, а в том, что продолжения их собственных движений должны пересекаться в одной точке. Это хорошо известное свойство перспективы, которым, например, пользуются художники и чертежники, когда рисуют параллельные улицы или стороны улиц вдоль прямых, пересекающихся в одной точке. Точка неба, в которой пересекаются продолжения собственных движений

Таблица 27. Список звезд движущегося скопления  
Большой Медведицы

№ п/п	Название звезды	$\mu$	$\theta$	$m$	Sp
1	$\beta$	0",087	67,9	2,4	A0
2	$\gamma$	0,094	84,6	2,5	A0
3	$\delta$	0,106	85,6	3,4	A3
4	$\epsilon$	0,113	95,0	1,7	A0
5	$\zeta$ A	0,126	101,5	2,4	A2
6	$\zeta$ B	0,122	103,8	4,0	A2
7	37	0,074	58,5	5,2	F1
8	78	0,114	95,8	4,9	F0
9	80	0,120	101,5	4,0	A5
10	HD 109011	0,111	90,8	8,1	K2
11	HD 110463	0,127	90,8	8,4	K3
12	HD 111456	0,107	88,9	5,9	F6
13	HD 115043	0,115	102,3	6,7	A5
14	HD 124752	0,149	126,2	8,2	K0

звезд движущегося скопления, называется радиантом скопления. Конечно, они пересекаются не строго в одной точке: все-таки пространственные скорости звезд движущегося скопления немного различны. Кроме того, говорится то, что собственные движения определяются с некоторыми ошибками. Тем не менее общность пространственных скоростей перечисленных звезд не вызывает сомнений. В этом нас убеждает и то, что соблюдается закон, согласно которому при равенстве пространственных скоростей величины собственных движений должны быть пропорциональны синусам углов между направлениями на звезду и на радиант. Более того, как нетрудно понять, величины лучевых скоростей у таких звезд должны быть пропорциональны косинусам тех же углов. У звезд движущегося скопления Большой Медведицы лучевые скорости измерены, и они замечательным образом подтверждают равенство пространственных скоростей этих звезд.

Объем пространства, который занимают звезды движущегося скопления Большой Медведицы, равен приблизительно 300 кубическим парсекам. Следовательно, звездная плотность этого скопления составляет около 0,047 звезды на кубический парсек, она в три раза меньше звездной плотности поля Галактики. Только механизм



распада рассеянного скопления, сопровождающийся образованием вокруг него исчезающего центрального тела короны, может объяснить явление столь разреженного коллектива звезд, имеющих одинаковые пространственные скорости.

Нужно сказать, что еще около сотни звезд, расположенных вокруг созвездия Большой Медведицы, имеют пространственные скорости, очень близкие к скорости его движущегося скопления. Несомненно, что несколько десятков из них также являются членами движущегося скопления Большой Медведицы. Но эти звезды, расположены внутри очень большого объема, содержащего сотни тысяч звезд, среди которых некоторые случайным образом должны иметь скорости, близкие к скорости членов скопления. Поэтому уверенно отделить члены скопления от звезд, случайно имеющих те же скорости, — задача трудная и пока еще неразрешимая.

Кроме движущегося скопления Большой Медведицы известны еще несколько движущихся скоплений, обладающих примерно теми же характеристиками, но они изучены менее подробно. Это скопления в Персее, Волосах Вероники и Скорпионе — Центавре.

Малое число известных движущихся скоплений объясняется трудностью их выявления. На самом деле число их должно быть очень велико и равняться числу всех сформировавшихся и распавшихся за время существования Галактики рассеянных скоплений. Диск Галактики в значительной степени состоит из проникших друг в друга, движущихся скоплений.

### **Звездные системы на разных стадиях эволюции**

Чтобы подвести итоги исследованию динамики звездных систем, укажем, на какой стадии эволюции находятся различные системы.

Неустойчивыми системами с кинетической энергией, большей потенциальной, являются звездные ассоциации, тесные группы галактик. Эти системы быстро распадаются, их члены одновременно расходятся в разные стороны.

Устойчивыми системами, находящимися в нестационарном состоянии, являются неправильные галактики типа II и периферийные области сферических скоплений галактик.