

по их светимостям. В интервале масс $0,5M_{\odot} \leq M \leq 10M_{\odot}$ светимость звезды пропорциональна четвертой степени ее массы $L \approx M^4$. При $M > 10M_{\odot}$ показатель степени равен 2, т. е. $L \approx M^2$.

3. Масса звезды в момент ее формирования является важнейшим параметром, определяющим ее последующую эволюцию.

4. Радиусы звезд имеют весьма широкие пределы, поэтому средняя плотность звезд колеблется от $5 \cdot 10^{-2}$ до $3 \cdot 10^8$ кг/м³ (сравните с Солнцем — $1,4 \cdot 10^3$ кг/м³).



Главные выводы

1. Две звезды, выделяющиеся на фоне других близостью своих видимых положений, называются двойной звездой. Двойные звезды являются частным случаем кратных звезд.
2. Физические двойные звезды — система двух звезд, связанных силами тяготения и обращающихся около общего центра масс.
3. В зависимости от метода наблюдения двойные звезды подразделяются на визуально-двойные, затменно-двойные, спектрально-двойные, астрометрически-двойные.
4. Компоненты физических двойных звезд совершают видимое относительное движение по эллипсу в соответствии с законами Кеплера и подчиняются закону всемирного тяготения.
5. Изучение двойных звезд позволяет определять массы звезд.



Контрольные вопросы и задания

1. Какие звезды называются двойными? Приведите их классификацию.
2. Что такое амплитуда и период переменности затменно-двойных звезд?
3. Дайте объяснение: почему происходит смещение линий в спектрах спектрально-двойных звезд?

§ 25. Эволюция звезд

1. **Диаграмма «спектр—светимость».** Существует зависимость между основными физическими характеристиками звезд. На основе наблюдений определяются спектральные классы звезд, а по известному расстоянию — абсолютные звездные величины, или светимости звезд.

В начале XX в. независимо друг от друга датский астроном Эйна́р Герцшпру́нг и американский астрофизик Генри Рассел установили связь между этими характеристиками. Эту зависимость можно представить в виде диаграммы (рис. 128): по горизонтальной оси откладывается спектральный класс (или температура) звезд, а по вертикальной — их светимость (в абсолютных величинах). Каждой звезде соответствует точка на диаграмме. Такая диаграмма называется **диаграммой Герцшпрунга—Рассела** или **диаграммой «спектр—светимость»** (см. форзац 4).

Звезды на диаграмме не распределяются случайным образом по всей ее площади, а образуют несколько групп, называемых **последовательностями**.

Большинство звезд на диаграмме лежит в пределах четко выраженной полосы, простирающейся от левого верхнего до правого нижнего угла, которая называется **главной последовательностью**.

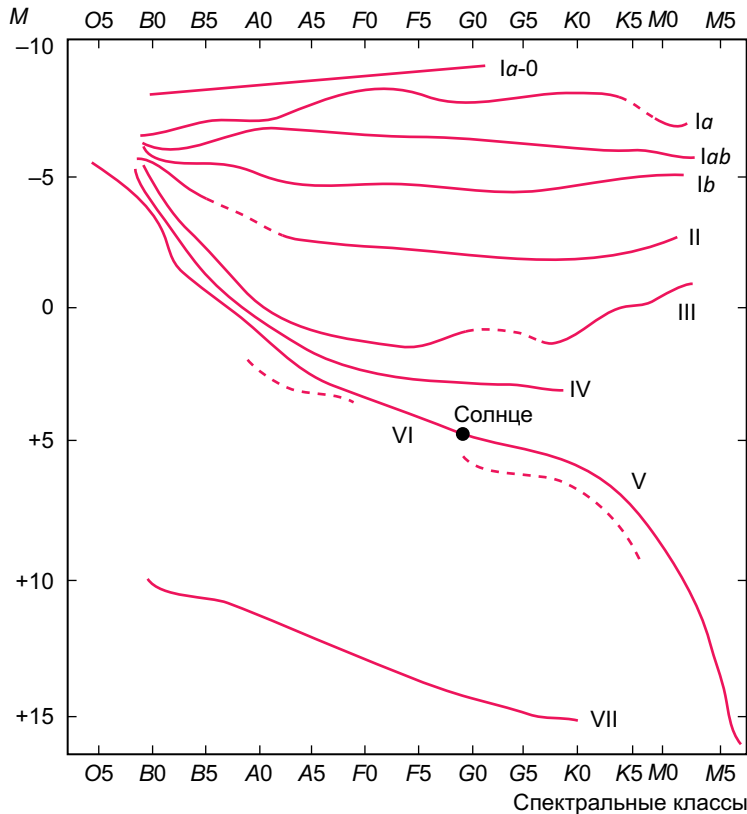


Рис. 128. Диаграмма «спектр—светимость» с указанием классов светимости

В левой верхней части главной последовательности находятся массивные горячие звезды спектрального класса *O*, которые в десятки тысяч раз превосходят по светимости Солнце. Такие звезды называют горячими сверхгигантами. По мере уменьшения температуры светимость звезд падает. Затем полоса главной последовательности проходит через область, где находятся похожие на Солнце звезды класса *G*. И наконец главная последовательность опускается к нижней правой части диаграммы. Здесь находятся звезды класса *M* и *L* с малой массой и относительно низкой температурой. Эти звезды называют красными и коричневыми карликами.

К звездам главной последовательности относятся хорошо известные звезды — Сириус (α Большого Пса), Вега (α Лиры), наше Солнце. Звезды с относительно низкой температурой фотосферы ($3\text{—}5 \cdot 10^3$ К) и светимостью в 100—1000 раз большей светимости Солнца образуют **последовательность красных гигантов**. К данной последовательности относятся, например, Арктур (α Волопаса), Альдебаран (α Тельца).

В верхней части диаграммы «спектр—светимость» располагается **последовательность сверхгигантов** (см. рис. 128). Это звезды с очень высокой светимостью, низкой плотностью, в десятки и сотни раз большими диаметрами, чем у Солнца. К сверхгигантам причисляют звезду Бетельгейзе (α Ориона).

В левой нижней части диаграммы расположены горячие звезды слабой светимости — **последовательность белых карликов**. Их размеры сравнимы с размерами Земли, а массы близки к массе Солнца. Поэтому средняя плотность белых карликов превышает плотность земных пород в сто тысяч раз. С другой стороны, средняя плотность звезд-сверхгигантов очень низкая — в тысячи раз меньше плотности земной атмосферы. Плотность вещества в атмосфере звезды влияет на ширину спектральных линий. Поэтому, например, у красных карликов спектральные линии шире, чем у гигантов и сверхгигантов. Значит, по виду спектральных линий определяется, к какой последовательности принадлежит звезда (главная, карлики, гиганты).

По последовательности оценивается абсолютная звездная величина (см. формулу 6, § 22), а затем и расстояние. Этот метод определения расстояний называется **методом спектральных параллакс**ов.

Наиболее многочисленными звездами являются красные карлики: на 10 млн красных карликов приходится около 1 млн белых карликов, примерно 1000 гигантов и только 1 сверхгигант.

В Йеркской обсерватории разработана двумерная спектральная классификация, в которой каждый спектр звезды учитывает особенности спектральных линий и светимость звезд (см. рис. 128). Эта классификация разделяет все звезды на ряд **классов светимости** (от I до VII):

- Ia-0 — самые яркие сверхгиганты;
- Ia — яркие сверхгиганты;
- Iab — средние сверхгиганты;
- Ib — слабые сверхгиганты;
- II — яркие гиганты;
- III — слабые гиганты;
- IV — субгиганты;
- V — главная последовательность;
- VI — субкарлики;
- VII — белые карлики.

2. Рождение звезд. Процесс звездообразования идет в Галактике непрерывно — с момента ее возникновения. Подтверждением рождения звезд в настоящее время является существование массивных горячих звезд классов *O* и *B*, время жизни которых не превосходит 10 млн лет.

Продолжительность жизни звезд составляет от миллионов до десятков миллиардов лет. Это время слишком велико, чтобы проследить жизненный путь звезд, или их **эволюцию**. Поэтому основным методом исследования эволюции звезд служит построение **моделей внутреннего строения звезд**.

При построении модели задают начальные условия физического состояния газа: химический состав, давление (плотность), температуру, массу. Затем на основании физических законов (газовых законов, законов тяготения) рассчитывают изменения этих параметров с течением времени.

По современным представлениям, звезды образуются в результате сжатия (гравитационной конденсации) вещества межзвездной среды (рис. 129, 1). Звезды

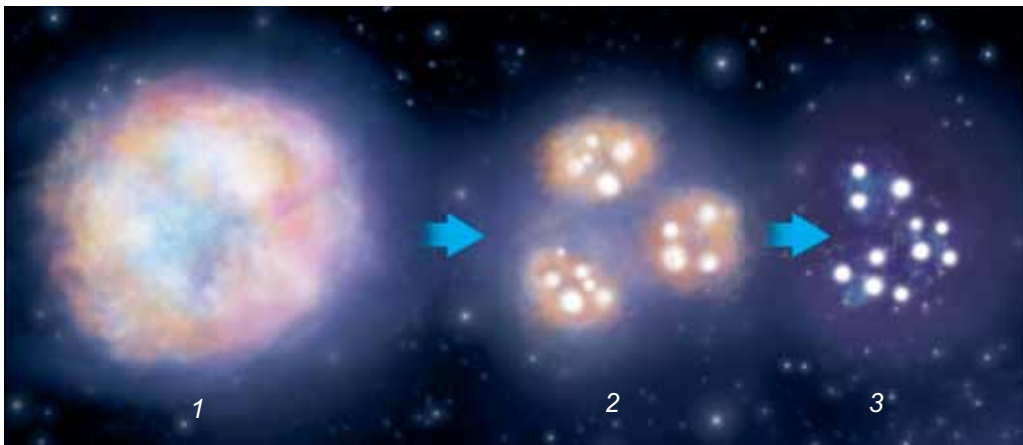


Рис. 129. Образование звезд из газопылевого комплекса

рождаются группами из гигантских газопылевых комплексов размерами до 100 пк и массой в десятки, а иногда и сотни тысяч солнечных масс. Газ в этих комплексах находится в молекулярном состоянии с температурой около 10 К.

Под действием гравитационных сил комплекс сжимается, плотность его растет, и он распадается на отдельные сгустки, или газопылевые облака (рис. 129, 2).

В газопылевом облаке случайно или под действием внешних причин возникают гравитационно-неустойчивые фрагменты, которые продолжают сжиматься. Внешними причинами, стимулирующими звездообразование, могут служить столкновения молекулярных облаков; звездный ветер от молодых горячих звезд; ударные волны, порожденные вспышками сверхновых звезд. Если масса фрагмента достаточно велика, то происходит дальнейший распад на отдельные фрагменты-сгустки (рис. 129, 3).

Фрагменты звездной массы, сжимающиеся под действием собственного тяготения, называют **протозвездами**. При гравитационном сжатии газ в протозвезде разогревается, и она начинает излучать в инфракрасном диапазоне спектра. Вещество, окружающее ядро протозвезды, падает на него, увеличивая его массу и температуру. Когда давление, создаваемое излучением звезды, становится достаточно большим, падение вещества прекращается. Давление излучения ограничивает массу будущих звезд величиной в несколько десятков масс Солнца. Длительность стадии сжатия зависит от массы протозвезды: при массе меньше солнечной — сотни миллионов лет, при большей — сотни тысяч лет.

Вращение протозвезд играет важную роль в их дальнейшей эволюции. Часто у вращающейся протозвезды вокруг центрального сгущения образуется протяженный газопылевой диск, из которого потом образуется планетная система. Формирующаяся звезда в конце стадии сжатия имеет значительные размеры при еще относительно низкой температуре поверхности. Сжатие протозвезды прекращается, когда температура в центре ядра достигает нескольких миллионов градусов, тогда включаются термоядерные источники энергии, реакции протон-протонного цикла. Момент начала термоядерных реакций есть момент рождения звезды. Теперь температура и плотность внутренних слоев становятся такими, что сила их упругости может противодействовать весу наружных слоев. После начала водородных реакций и установления равновесного состояния звезда попадает на главную последовательность диаграммы «спектр—светимость». Новорожденные звезды появляются на главной последовательности по всей ее длине (в зависимости от их массы).

3. Эволюционные перемещения. От массы в первую очередь зависит, какую температуру будет иметь ядро звезды в момент установления устойчивого равновесия. Чем больше масса сжимающегося газопылевого комплекса, затем

протозвезды и наконец звезды, тем больший вес вышележащих слоев приходится выдерживать ее ядру. Поэтому нужна более высокая температура, чтобы газовое давление могло противостоять этому весу.

Самые массивные звезды (размером в 30—50 масс Солнца) являются наиболее горячими звездами класса *O*. Температура центральных областей таких звезд составляет 30—35 млн градусов.

Большую часть времени звезда находится на главной последовательности. Но так как запасы водорода пропорциональны массе, а расход энергии (светимость) пропорционален четвертой степени массы, то водород в массивных звездах выгорает быстрее. Время пребывания звезды на главной последовательности определяется простой зависимостью

$$t = 10^{10} \frac{1}{M^3} \text{ (лет)},$$

где M — масса звезды в массах Солнца.

По приведенной выше формуле можно подсчитать, что Солнце исчерпает свой запас водородного топлива примерно за 10 млрд лет (таким образом, Солнце, возраст которого, по оценкам ученых, составляет около 5 млрд лет, «прожило» на главной последовательности лишь половину своей жизни). Звезды с массами, равными 10 массам Солнца, исчерпают свой запас водородного топлива всего за 10 млн лет, слабо излучающие красные карлики массой около 0,5 массы Солнца — за 80 млрд лет. Горячих молодых звезд-гигантов наблюдается меньше из-за малого времени существования. Поэтому наиболее заполнена правая нижняя часть главной последовательности диаграммы «спектр—светимость».

После выгорания водорода в недрах звезды образуется горячее гелиевое ядро. Дальнейшая эволюция звезды зависит от массы этого ядра. Если она меньше 1,4 массы Солнца, то под действием гравитационного сжатия гелиевое ядро снова разогревается (температура повышается до 100 млн градусов). Внешние слои звезды при этом расширяются и охлаждаются. Звезда словно разбухает. Светимость ее возрастает, а температура падает. Звезда сходит с главной последовательности и в зависимости от массы становится красным гигантом (рис. 130) или сверхгигантом.

Разрастающаяся атмосфера звезды постепенно удаляется от ядра, образуя **планетарную туманность**. Конечной стадией эволюции этих звезд являются белые карлики. **Белый карлик** — компактная



Рис. 130. Эволюция звезд различной массы

звезда с массой до 1,4 массы Солнца, радиусом примерно в 100 раз меньше Солнца. Плотность таких звезд более чем в 100 тыс. раз превосходит плотность воды.

Как и все звезды, Солнце проходит стадии эволюции. Через 5—8 млрд лет оно превратится сначала в красный гигант, затем, сбросив оболочку, станет белым карликом. Звезды, которые намного массивнее Солнца, превращаются в ходе эволюции в нейтронные звезды (при массе от 1,4 до 2,7 массы Солнца) или черные дыры (при массе более 2,7 массы Солнца), проходя стадию сверхновой.



Главные выводы

1. Между различными физическими характеристиками звезд существует связь. Диаграмма зависимости спектральных классов звезд (или температур) от их светимости называется диаграммой «спектр—светимость».
2. Эволюция звезд — постепенное изменение с течением времени физических характеристик, внутреннего строения и химического состава звезд.
3. Звезды образуются в результате гравитационного сжатия вещества из газопылевых комплексов.
4. Звезды в процессе эволюции проходят стадии от протозвезд до конечных стадий (в зависимости от массы) — белых карликов, нейтронных звезд или черных дыр.
5. Переход звезд с различной массой на диаграмме «спектр—светимость» с одной последовательности на другую в ходе изменения их параметров со временем называется эволюционным перемещением.
6. Классы светимости — звездные группы, учитывающие особенности спектральных линий и светимость звезд.



Контрольные вопросы и задания

1. По какому принципу строится диаграмма «спектр—светимость» (диаграмма Герцшпрунга—Рассела)?
2. Как на диаграмме «спектр—светимость» располагаются звезды различного размера?
3. Дайте краткую характеристику звездам: сверхгигантам, красным гигантам, белым карликам, красным карликам.
4. Что понимают под эволюцией звезд?
5. Опишите в общих чертах процесс образования звезд.
6. Что понимают под классами светимости?
7. Какой должна быть скорость вещества, чтобы оно могло покинуть белый карлик, масса которого 10^{30} кг, а радиус $4 \cdot 10^4$ км?