

## 5.1. Общие характеристики

Звезды — массивные плазменные шары, находящиеся в равновесном состоянии; источником их тепловой энергии являются происходящие в их недрах или происходившие в прошлом термоядерные реакции. По своему физическому состоянию звезды можно разделить на *нормальные*, состоящие из невырожденного вещества (идеального газа), в недрах которых идут термоядерные реакции синтеза, и *вырожденные* (белые карлики, нейтронные звезды), равновесие которых поддерживается давлением квантово-механически вырожденных фермионов (электронов в случае белых карликов или нейтронов в случае нейтронных звезд). К особому классу следует отнести черные дыры, которые в обычном смысле звездами не являются. Белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры объединяют общим названием «компактные остатки», т. к. они являются конечными продуктами эволюции обычных звезд. Полное число звезд и их остатков в нашей Галактике  $\sim 10^{11}$ .

Начнем с нормальных звезд. По своим свойствам они могут сильно отличаться друг от друга, однако их основными характеристиками, определяющими строение и эволюцию, являются всего три: начальная масса  $M$ , химический состав (содержание гелия и более тяжелых элементов по отношению к водороду) и возраст.

**Массы звезд** лежат в пределах от  $\sim 0.08$  до  $\sim 100M_{\odot}$ , причем звезды с большей массой встречаются реже. Нижний предел связан с невозможностью протекания термоядерной реакции синтеза гелия при малых значениях массы, верхний — с определяющей ролью дав-

ления излучения в очень массивных звездах и с развитием пульсационных неустойчивостей, которые могут привести к сбросу избытка массы. При особенно больших массах светимость звезды приближается к эддингтоновскому пределу  $L_{Edd} \sim 10^{38}(M/M_{\odot})$  эрг/с, стационарных звезд с более высокой светимостью нет (см. раздел 5.6).

**Химический состав звезд** (главным образом, содержание металлов) определяет коэффициент поглощения вещества звезды, что сказывается на всех ее параметрах (радиусе, центральной температуре и скорости протекания ядерных реакций). По своему химсоставу звезды делятся на два больших класса (населения). К *населению I типа* относятся звезды бедные тяжелыми элементами (содержание элементов тяжелее гелия не превышает нескольких десятых долей процента по массе). Это старые маломассивные звезды (как красные карлики, так и красные гиганты), расположенные в сферической составляющей нашей и других спиральных галактик, например, входящие в состав старых *шаровых скоплений*. К *населению II типа* относят звезды с хим. составом, близким к солнечному (на долю элементов тяжелее гелия приходится около 2% по массе). Это звезды дисковой составляющей нашей и других спиральных галактик, например, звезды, входящие в состав молодых *рассеянных скоплений*. Газ, из которого образуются звезды населения II, частично является продуктом эволюции звезд населения I и поэтому наиболее обогащен тяжелыми химическими элементами, возникшими при ядерной эволюции звезд предыдущих поколений и в предшествующих вспышках сверхновых. Наше Солнце принадлежит к населению II типа. Существование звезд, состоящих целиком из первичного вещества, не прошедшего ядерной переработки (население III), является предметом научного поиска. Пока известно лишь несколько звезд небольшой массы, находящихся в гало нашей Галактики, которые практически лишены тяжелых элементов.

Химический состав звезд определяется по их спектрам. Спектр выходящего излучения из атмосферы звезды зависит от физического состояния плазмы и ее химического состава (через коэффициенты излучения и поглощения). По своим спектральным свойствам звезды подразделяются на спектральные классы, обозначаемые буквами O, B, A, F, G, K, M, L (основные спектральные классы) в порядке убывания эффективной температуры (точнее, температуры, соответствующей данному ионизационному состоянию вещества в области формирования спектральных линий) от  $\sim 30000$  К до  $\sim 2000$  К.



Одному и тому же спектральному классу могут соответствовать звезды разных радиусов. Удобным графическим представлением состояния звезды оказалась введенная в начале XX века диаграмма цвет–светимость (или светимость–эффективная температура), называемая *диаграммой Герцшпрунга–Рессела* (ГР) (*Hertzsprung–Russell*) (см. рис. 5.1). На этой диаграмме наиболее отчетливо прослеживается *главная последовательность* (V), выделяются ветви гигантов (II, III) и сверхгигантов (Ia, Ib), а также ветвь субкарликов (VI) и белых карликов (VII). Звезды главной последовательности наиболее многочисленные, т. к. это звезды, в недрах которых идет термоядерное горение водорода. Это самая продолжительная стадия эволюции звезды. Последующие эволюционные стадии вплоть до образования компактного остатка по длительности составляют около 10% времени жизни звезды на главной последовательности.

**Возраст звезд** оценивается теоретически, чаще всего по положению на диаграмме ГР, поскольку оно меняется в течение жизни звезды. В нашей Галактике, как и в других галактиках, наблюдаются звезды самых различных возрастов — от находящихся еще на стадии образования до старых звезд с возрастом 10–13 млрд. лет. Возраст старых звезд из-за их медленной эволюции оценивается с большой ошибкой (несколько млрд. лет). Возраст Солнца считается равным примерно 5 млрд. лет.

Масса, химический состав и возраст определяют положение звезды на диаграмме ГР, а, следовательно, и такие характеристики звезд как эффективная температура  $T_{eff}$  и размер  $R$ . Последний оценивается либо по закону Стефана–Больцмана ( $L = 4\pi R^2 \sigma_B T_{eff}^4$ , где  $L$  — болометрическая светимость звезды), либо на основании прямых интерферометрических измерений угловых размеров (только для близких звезд). Интервал значений размеров звезд фантастически велик — от величины порядка 10–20 км для нейтронных звезд до размеров, сопоставимых с размерами всей Солнечной планетной системы для красных сверхгигантов.

**Качественная картина эволюции звезд после главной последовательности.** После выгорания водорода звезда отходит от главной последовательности в сторону красных гигантов. При этом радиус фотосферы звезды быстро увеличивается, эффективная температура падает. Источник энергии красных гигантов — горение водорода в слое, окружающем гелиевое ядро. На более поздних стадиях эволюции в ядре звезды происходит горение гелия и его превращение в уг-

лерод, кислород, а в наиболее массивных звездах — и в более тяжелые элементы, вплоть до элементов группы железа. Термоядерные реакции горения каждого следующего элемента происходят во все возрастающем темпе. Для звезд с начальной массой  $M < 8 - 10 M_{\odot}$  эволюция заканчивается значительной потерей массы и образованием белого карлика после медленного истечения оболочки в окружающую среду. Сброшенная оболочка красного гиганта часто наблюдается в виде *планетарной туманности* вокруг горячего вырожденного ядра, впоследствии остывающего и образующего белый карлик. Более массивные звезды взрываются как сверхновые, обычно находясь на стадии красного сверхгиганта. В зависимости от химического состава вспышка сверхновой может произойти и на стадии голубого сверхгиганта, как в случае со сверхновой 1987а в Большом Магеллановом Облаке. В результате вспышек сверхновых образуются сверхплотные нейтронные звезды или черные дыры. Масса нейтронной звезды не превышает  $3 M_{\odot}$ .

Более подробно эволюция звезд разных масс рассматривается в главе 6.

## 5.2. Образование звезд

### 5.2.1. Гравитационная неустойчивость

Звезды образуются в результате гравитационной (джинсовской) неустойчивости в холодных плотных молекулярных облаках. Рассмотрим эту неустойчивость подробнее. Поскольку и силы гравитации, и силы упругости газового давления растут с увеличением плотности вещества, но по разным законам, в случае облаков достаточно большой массы и низкой температуры может проявиться гравитационная неустойчивость, приводящая к сжатию облака. Проанализировав линеаризованную систему уравнений газодинамики для идеального газа, описывающую рост малых возмущений вида  $\rho(t) = A \exp\{i(\omega t + \kappa r)\}$  в газовой среде с учетом сил гравитации, Джинс (1902) впервые показал, что изначально однородная среда с плотностью  $\rho_0$  неустойчива по отношению к малым линейным возмущениям плотности с характерным масштабом, превышающим  $\lambda_J \approx c_s / \sqrt{\pi / G \rho_0}$ . Здесь  $c_s = \sqrt{dP/d\rho} = \sqrt{\gamma RT / \mu G \rho_0}$  — скорость звука в среде с молекулярным весом  $\mu$ , температурой  $T$  и показателем адиабаты  $\gamma$ . В масштабах меньших джинсовской длины волны  $\lambda_J$  возмущения представляют собой обычные акустические коле-