

6.1. Эволюция звезд после выгорания водорода

Горение водорода — самая длительная стадия в жизни нормальной звезды. Это связано с начальным большим обилием водорода (70% по массе) и большой калорийностью ($\sim 0.007Mc^2$) превращения водорода в гелий. На долю этой реакции приходится около 70% энергии, выделяемой в цепочке последовательных термоядерных превращений водорода в элемент с наибольшей энергией связи на нуклон ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ (~ 8.6 МэВ/нуклон). Фотонная светимость звезд на главной последовательности, где горит водород, как правило меньше, чем на последующих стадиях эволюции¹, а их нейтринная светимость незначительна, т. к. температура в центре не превышает $\sim 4 \cdot 10^7$ К. Поэтому ядерное топливо расходуется сравнительно медленно и большая часть звезд в Галактике и во Вселенной являются звездами главной последовательности.

После окончания горения водорода в ядре звезда перемещается вправо от главной последовательности на диаграмме эффективная температура — светимость (диаграмма Герцшпрунга–Рессела), ее эффективная температура уменьшается, и звезда попадает в область красных гигантов. Рост радиуса оболочки связан с конвективным переносом энергии от слоевого водородного источника, располагающегося непосредственно вблизи гелиевого ядра. Уменьшение выделения энергии по мере истощения доли водорода в ядре

¹Это связано, в первую очередь, с увеличением радиуса звезды и изменением прозрачности вещества после ее «схода» с главной последовательности.

приводит к его гравитационному сжатию. Из-за этого температура в ядре постепенно растет, и при значениях $T_c \sim 2-3 \cdot 10^7$ К и плотности $\rho_c \sim 10^3-10^4$ г/см³ начинается термоядерное горение гелия. В природе нет устойчивых элементов с атомными номерами 5 и 8, невозможна реакция ${}^4\text{He} + p \rightarrow {}^5 \dots + \dots$, а ядро бериллия-8 неустойчиво и после образования распадается на 2 альфа-частицы: ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^8\text{Li} \rightarrow {}^8\text{Be} + e^- + \bar{\nu}_e$; ${}^8\text{Be} \rightarrow 2{}^4\text{He}$.

Наиболее важная реакция горения гелия в звездах — так называемый 3α -процесс: $3{}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C}$. Энергия суммы трех альфа-частиц на 7.28 МэВ превышает энергию покоя ядра углерода-12. Поэтому чтобы реакция шла эффективно, нужен «подходящий» энергетический уровень ядра углерода-12. Такой уровень (с энергией 7.656 МэВ) у ядра ${}^{12}\text{C}$ имеется², поэтому 3α -реакция в звездах идет с достаточной скоростью. Сначала две альфа-частицы образуют короткоживущее ядро ${}^8\text{Be}$: ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightleftharpoons {}^8\text{Be}$. Время жизни ${}^8\text{Be}$ около 10^{-16} с, но есть вероятность присоединения еще одной альфа-частицы с образованием возбужденного ядра углерода-12: ${}^8\text{Be} + {}^4\text{He} \rightleftharpoons {}^{12}(\text{C}^*)$. Возбуждение ядра снимается рождением пары, а не фотоном (фотонный переход с этого уровня запрещен правилами отбора), ${}^{12}\text{C}^* \rightarrow {}^{12}\text{C} + e^+ + e^-$. Заметим, что образующееся ядро ${}^{12}\text{C}^*$ с наибольшей вероятностью сразу же «разваливается» на ядра Be и He и, в конечном счете, на 3 альфа-частицы, и только примерно в одном случае из 2500 происходит переход на основной уровень с выделением энергии 7.65 МэВ, уносимой парой e^+e^- .

Удельное выделение энергии при горении гелия примерно на порядок меньше, чем при горении водорода. Время жизни и число звезд на этой стадии эволюции значительно меньше, чем звезд главной последовательности. Однако, поскольку в реакции участвуют три частицы, энерговыделение в расчете на одну частицу пропорционально квадрату концентрации и становится значительным только в плотных ядрах звезд, сошедших с главной последовательности. Благодаря высокой светимости на стадиях красного гиганта или сверхгиганта, когда в ядре звезды идет превращение гелия в углерод, такие звезды хорошо изучены.

Реакция, при которой возможно сближение ядер гелия до радиуса действия ядерных сил, также как и реакция $4{}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He}$, может

²Этот уровень ядра ${}^{12}\text{C}$ был *предсказан* Ф. Хойлом для объяснения синтеза элементов в звездах и позднее был экспериментально обнаружен В. Фаулером.

проходить только за счет квантового туннельного эффекта и требует очень высоких температур.

Ядро ^{12}C немедленно вступает в реакцию с ядрами гелия:



Ее скорость сильно зависит от температуры, которая определяется массой звезды, поэтому окончательный результат горения гелия в звездах — образование углеродно-кислородного или чисто кислородного ядра.

На последующих стадиях эволюции массивных звезд в центральных областях звезды при высоких температурах происходят реакции непосредственного слияния тяжелых ядер. Энерговыделение в реакциях горения ^{12}C , ^{16}O , ^{20}Ne , ^{24}Mg , ^{28}Si сравнимо с энерговыделением в 3α -реакции, однако при высоких температурах $\sim 10^9$ К все более важным становится унос энергии нейтринным излучением. Время жизни звезды на этих стадиях намного меньше, чем время горения гелия. Вероятность обнаружения таких звезд мала, и в настоящее время горение ^{12}C с образованием более тяжелых элементов встречается только в ядрах редких массивных звезд типа Вольфа–Райе класса WO.

6.2. Вырождение вещества

Газ может рассматриваться как идеальный пока энергия взаимодействия между его частицами пренебрежимо мала по сравнению с тепловой энергией. Приближение идеального одноатомного газа со средней энергией на одну частицу $E = 3/2kT$ прекрасно описывает поведение плазмы в центре Солнца и более массивных звезд главной последовательности.

С повышением плотности средние расстояния между частицами уменьшаются, $\delta l \sim \rho^{-1/3}$, и когда они станут сопоставимы с де-Бройлевской длиной волны, $\lambda = h/p$ (p — импульс частиц), начнут сказываться их квантово-механические свойства. Важнейшее из этих свойств связано с т. н. *вырождением* газа из частиц с полуцелым спином, из-за которого радикальным образом меняются термодинамические свойства вещества.

В применении к частицам с полуцелым спином — фермионам (e , p , n) действует принцип Паули (В. Паули, 1925): частицы идентич-