

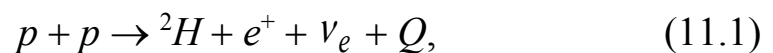
## 11. Горение водорода — источник энергии звезд

Начало звёздной эры относится примерно к 1 млрд. лет с момента Большого взрыва, когда формируются первые галактики. Солнечная система возникла сравнительно поздно – примерно через 10 млрд. лет.

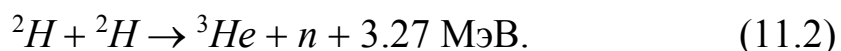
Звезды конденсируются из гигантских газовых молекулярных облаков под действием гравитационных сил. Эти газовые облака первичного вещества состоят преимущественно из водорода. Небольшую примесь ( $\approx 9\%$ ) составляет гелий, образовавшийся в основном в результате первичного нуклеосинтеза в дозвездную эпоху. В существенно меньших количествах в молекулярных облаках присутствует дейтерий ( ${}^2\text{H}$ ), гелий-3 ( ${}^3\text{He}$ ) и даже  ${}^7\text{Li}$ , также образующиеся в процессе первичного нуклеосинтеза.

Звёзды образуются из отдельных неоднородностей в гигантском молекулярном облаке, называемых компактными зонами (их типичный размер порядка нескольких световых месяцев, плотность  $3 \cdot 10^4$  молекул водорода в  $1 \text{ см}^3$  и температура  $\approx 10 \text{ К}$ ). Сжатие компактной зоны начинается с коллапса внутренней части, т.е. свободного падения вещества в центр компактной зоны. «Падая» на центр притяжения, молекулы приобретают энергию и в результате взаимодействия (столкновения) в конечном счёте происходит разрушение молекул на отдельные атомы и переход вещества в ионизованное состояние. Сгусток, образующийся в центре коллапсирующего облака, называют *протозвездой*. Время образования протозвезды от начала коллапса  $10^5$ – $10^6$  лет. Падающий на поверхность протозвезды газ (это явление называется *аккрецией*) образует ударный фронт, что приводит к разогреву газа до  $\approx 10^6 \text{ К}$ . Излучение протозвезды – это излучение свободно движущихся электронов в ионизованной среде. Протозвезда светит за счёт освобождения гравитационной энергии при сжатии.

Когда масса вещества звезды в результате аккреции достигает 0.1 массы Солнца ( $0.1 M_{\odot}$ ), температура в центре звезды возрастает до 1 млн К, в жизни протозвезды начинается новый этап – реакции термоядерного синтеза. Однако эти термоядерные реакции существенно отличаются от реакций, протекающих в звёздах, находящихся в стационарном состоянии, типа Солнца. Дело в том, что протекающая на Солнце реакция синтеза



где  $Q = 0.42$  МэВ – выделяющаяся энергия, требует более высокой температуры ( $\approx 10$  млн К). Температура же в центре протозвезды составляет всего 1 млн К. При такой температуре эффективно протекает реакция слияния дейтерия

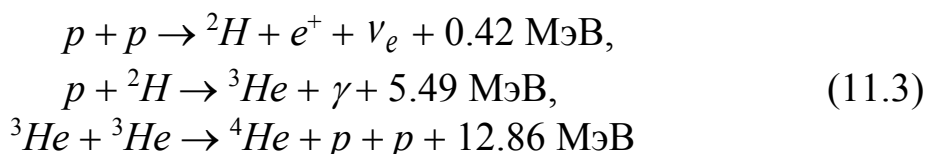


Дейтерий, как и  ${}^4\text{He}$ , образуется на дозвёздной стадии эволюции Вселенной и его содержание в протозвезде  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  от содержания протонов. Однако даже этого небольшого количества дейтерия достаточно для появления в центре протозвезды эффективного источника энергии.

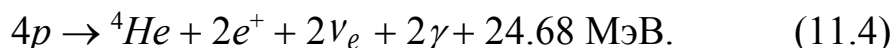
Дальнейшее сжатие звёздного вещества за счёт гравитационных сил приводит к повышению температуры и плотности в центре звезды, что создаёт условия для начала ядерной реакции горения водорода (11.1). Эта реакция начинается при  $T \approx 10^7$  К, когда средняя кинетическая энергия протонов достигает  $\approx 1$  кэВ, что позволяет двум протонам преодолеть кулоновское отталкивание и сблизиться до расстояний 1–2 Фм, при которых вступают в действие ядерные силы притяжения.

Ядерная реакция (11.1) начинается в звезде типа Солнца в ограниченной центральной части при плотностях  $\approx 100$  г/см<sup>3</sup>. Эта реакция останавливает дальнейшее сжатие звезды. Тепло, выделяющееся в процессе термоядерной реакции горения водорода, создаёт давление, которое противодействует гравитационному сжатию и не позволяет звезде коллапсировать. Происходит качественное изменение механизма выделения энергии в звезде. Если до начала ядерной реакции горения водорода нагревание звезды происходило, главным образом, за счёт гравитационного сжатия, то теперь появляется другой доминирующий механизм – энергия выделяется за счёт ядерных реакций синтеза. Звезда приобретает стабильные размеры и светимость, которые для звезды с массой, близкой к солнечной, не изменяются в течение миллиардов лет, пока происходит «сгорание» водорода. Это самая длительная стадия звёздной эволюции. В результате сгорания водорода из каждых четырёх ядер водорода образуется одно ядро гелия.

Наиболее вероятная цепочка ядерных реакций на Солнце, приводящих к этому, носит название *протон-протонного цикла* и выглядит следующим образом:



или в более компактном виде



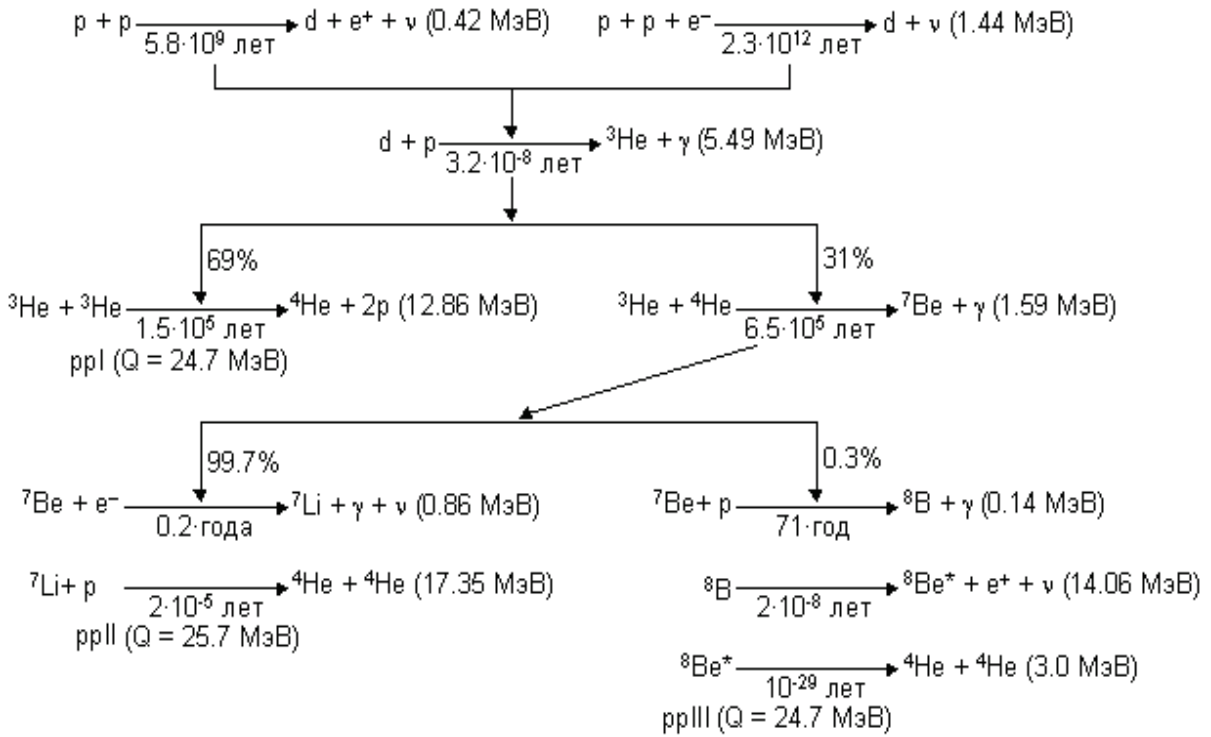


Рис. 11.1. Горение водорода в реакции  $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$ .

Испускаемые Солнцем нейтрино надёжно регистрируются земными детекторами, что подтверждает протекание на Солнце реакций (11.3).

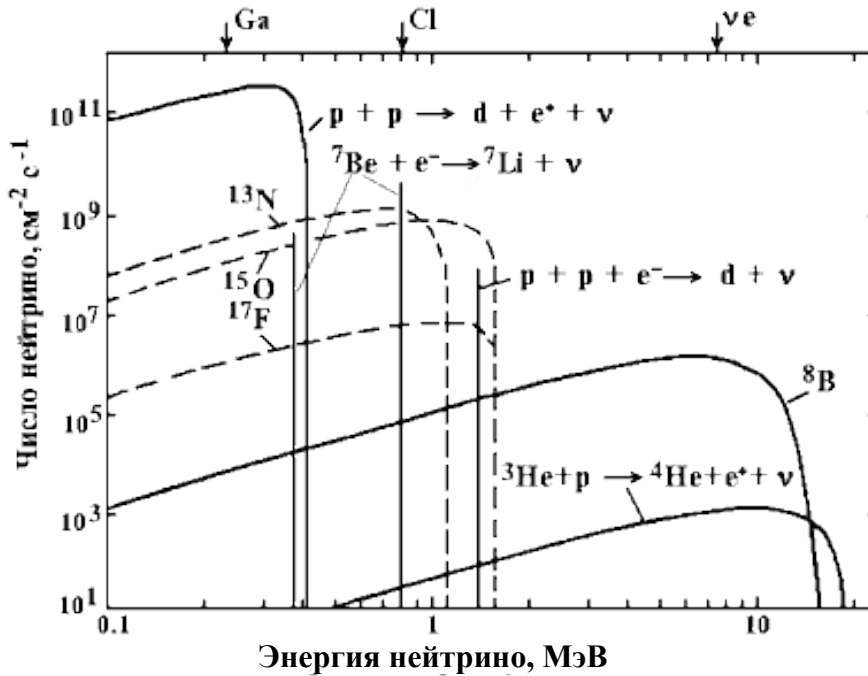


Рис. 11.2. Спектр нейтрино, образующихся на Солнце в результате горения водорода в реакции  $4p \rightarrow \alpha$  и в CNO-цикле.

Полная энергия, выделяющаяся в результате синтеза  ${}^4\text{He}$  из четырех протонов, составляет 24.68 МэВ. Образующиеся при синтезе два позитрона аннигилируют с двумя электронами, увеличивая энерговыделение до

$$24.68 \text{ МэВ} + 4m_e c^2 = (24.68 + 4 \times 0.51) \text{ МэВ} = 26.72 \text{ МэВ}.$$

Основная часть этой энергии выделяется в виде  $\gamma$ -излучения и кинетической энергии протонов. Около 0.6 МэВ уносят нейтрино.

Цепочка реакций (11.3) начинается с реакции (11.1), идущей за счёт слабого взаимодействия. Малая величина сечения этой реакции объясняет, почему стадия горения водорода – самая продолжительная стадия звёздной эволюции. Большинство звёзд находится именно на этой стадии.

В таблице 11.1 приведены пределы изменения основных характеристик звезд.

Таблица 11.1

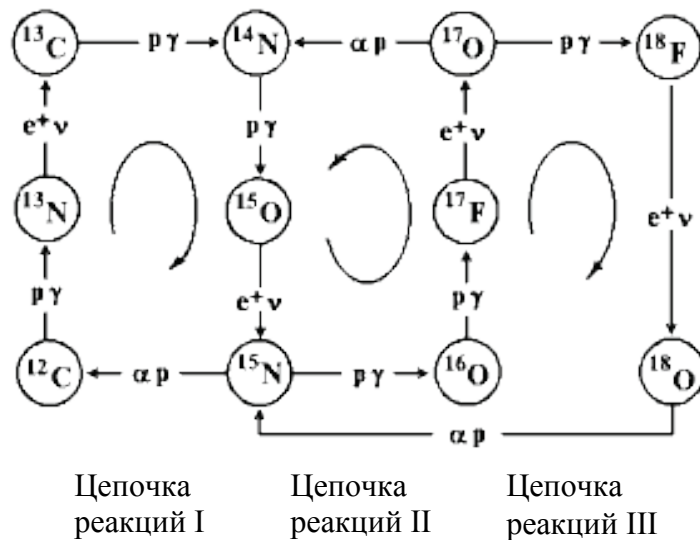
### Пределы изменения характеристик звезд

Масса звезды	$10^{-1} M_{\odot} < M < 100 M_{\odot}$
Светимость звезды	$10^{-4} L_{\odot} < L < 10^6 L_{\odot}$
Радиус звезды	$10^{-2} R_{\odot} < R < 10^3 R_{\odot}$
Температура поверхности	$2 \cdot 10^3 \text{ К} < T < 10^5 \text{ К}$

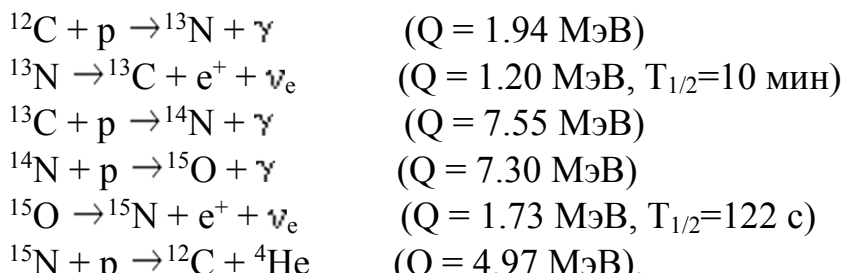
За единицу измерения массы  $M$ , радиуса  $R$ , светимости  $L$ , температуры поверхности приняты соответствующие характеристики Солнца:  $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33} \text{ г}$ ,  $L_{\odot} = 4 \cdot 10^{33} \text{ эрг/с}$ ,  $R_{\odot} = 7 \cdot 10^{10} \text{ см}$ ,  $T_{\odot(\text{поверхности})} = 4,6 \cdot 10^3 \text{ К}$ .

Если звезда относится к звездам второго поколения, и её масса превышает массу Солнца, то «сгорание» водорода в ней происходит при более высокой внутренней температуре ( $> 2 \cdot 10^7 \text{ К}$ ), главным образом, в другой последовательности реакций, называемой *CNO-циклом*. Особенность его в том, что, начинаясь с ядра углерода, он сводится к последовательному добавлению четырёх протонов и образованию из них в конце цикла ядра  ${}^4\text{He}$ . В углеродном цикле ядра углерода играют роль катализаторов. Количество этих ядер в результате цепочки реакций CNO-цикла не изменяется.

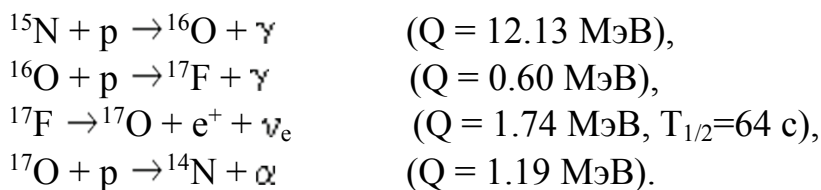
Роль катализаторов в реакциях горения водорода наряду с углеродом выполняют также азот, кислород и неон. Все эти элементы содержатся в веществе звёзд второго поколения вместе с водородом и гелием и попадают туда после распада массивных звёзд первого поколения, где они образуются в цепочке термоядерных реакций.



### Цепочка реакций I



### Цепочка реакций II



### Цепочка реакций III

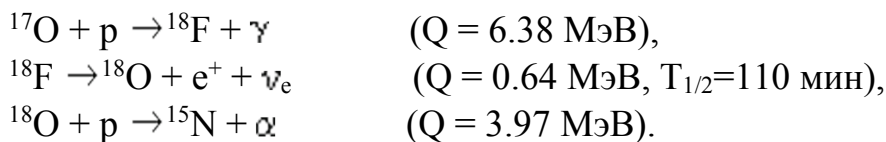


Рис. 11.3. CNO-цикл.

Стабильная звезда на стадии горения водорода находится на главной последовательности диаграммы Герцшпрунга-Рассела (рис. 11.4), представляющей собой зависимость светимости звезды от температуры её поверхности. Время пребывания звезды на главной последовательности на 2–3 порядка больше времени всей её последующей эволюции.

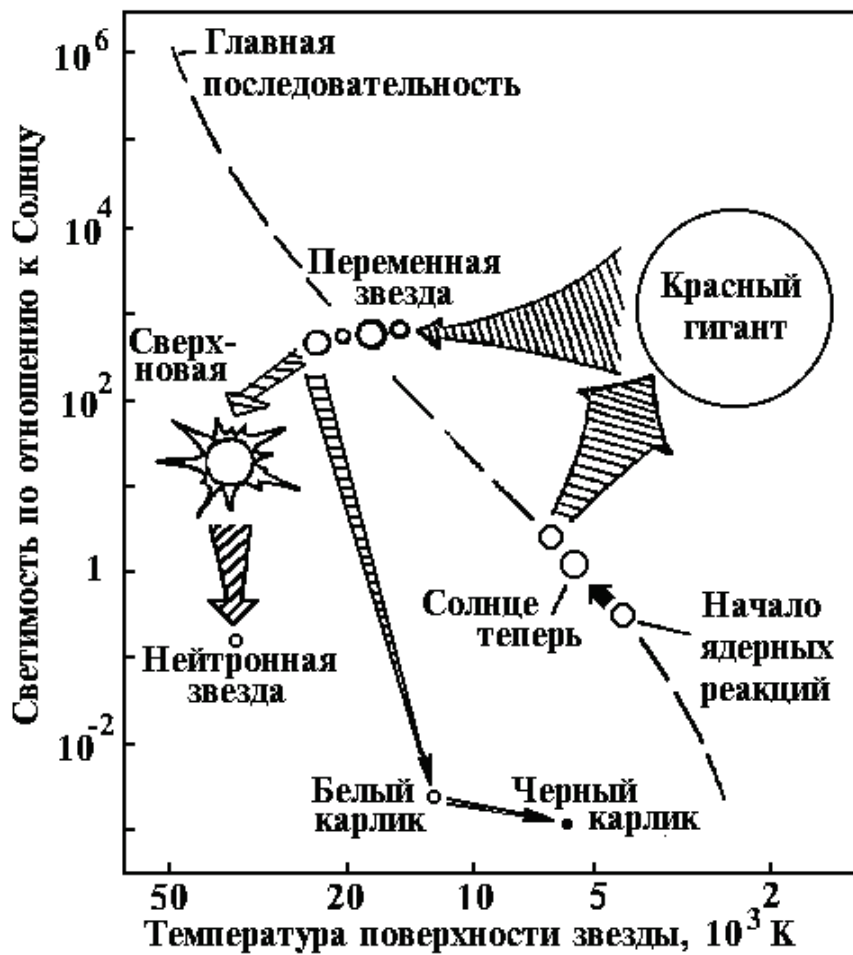


Рис. 11.4. Диаграмма эволюции звезды

Таблица 11.2

**Время достижения главной последовательности и время жизни на главной последовательности звезд различной массы**

$M / M_{\odot}$	Время достижения главной последовательности, лет	Время жизни на главной последовательности, лет
15	$6,2 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^7$
9	$1,5 \cdot 10^5$	$2,2 \cdot 10^7$
5	$5,8 \cdot 10^5$	$6,8 \cdot 10^7$
3	$2,5 \cdot 10^6$	$2,3 \cdot 10^8$
1,5	$1,8 \cdot 10^7$	$1,7 \cdot 10^9$
1,0	$5,0 \cdot 10^7$	$8,2 \cdot 10^9$
0,5	$1,5 \cdot 10^8$	$5,0 \cdot 10^{10}$