

взрыву сверхновой [363], а также при взрывном горении гелия важны другие реакции (α , γ) захвата. Если величины $N_A \langle 01 \rangle$ записать в виде (14.32), то коэффициенты для некоторых реакций из [638] приведены в табл. 16. В [399, 638] приведены параметры различных (α , γ), (α , n) и (α , p), а также обратных к ним реакций, участвующих во взрывном горении гелия.

§ 15. Реакции с тяжелыми ядрами при высоких температурах

На поздних стадиях эволюции массивных звезд, а также при взрывах ведущих к вспышке сверхновой, в центральных областях звезды происходят реакции непосредственного слияния тяжелых ядер. Энерговыведение в реакциях горения ^{12}C , ^{16}O , ^{20}Ne , ^{24}Mg и ^{28}Si сравнимо с энерговыведением в 3α реакции, однако мощное нейтринное излучение из-за высокой температуры делает время жизни звезды на стадии горения ^{12}C или ^{16}O много меньшим, чем на стадии горения ^4He . В связи с малым временем жизни вероятность обнаружения таких звезд также мала. В настоящее время нельзя с уверенностью указать на звезду в спокойном состоянии, излучающую энергию за счет горения ^{12}C или других тяжелых элементов.

В тех случаях, когда пренебрежимо экранирование кулоновского поля ядер, скорости реакций рассчитываются на основе учета резонансных и нерезонансных вкладов, согласно изложению § 13. В [361] приведены соотношения для следующих реакций:

$$^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, \gamma)^{24}\text{Mg}, \quad Q_6 = 13,931,$$

$$N_A \langle ^{12}\text{C}^{12}\text{C} \rangle = \left\{ 1,26 \cdot 10^{27} T_{9A}^{5/6} T_9^{-3/2} \exp\left(-\frac{84,165}{T_{9A}^{1/3}}\right) \times \right. \\ \left. \times [\exp(-0,010 T_{9A}^4) + 5,56 \cdot 10^{-3} \exp(1,685 T_{9A}^{2/3})]^{-1} \right\} (\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}). \quad (15.1)$$

$$T_{9A} = T_9 (1 + 0,067 T_9)^{-1}.$$

Скорость энерговыведения есть

$$\epsilon_{1,2\text{C}^{12}\text{C}} = 4,67 \cdot 10^{16} x_{12\text{C}}^2 \rho N_A \langle ^{12}\text{C}^{12}\text{C} \rangle (\text{эрг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}). \quad (15.2)$$

Реакция

$$^{12}\text{C}(^{16}\text{O}, \gamma)^{28}\text{Si}, \quad Q_6 = 16,754,$$

$$N_A \langle ^{12}\text{C}^{16}\text{O} \rangle = 1,72 \cdot 10^{31} T_{9A}^{5/6} T_9^{-3/2} \exp\left(-\frac{106,594}{T_{9A}^{1/3}}\right) \times \\ \times [\exp(-0,180 T_{9A}^2) + 1,06 \cdot 10^{-3} \exp(2,562 T_{9A}^{2/3})]^{-1} (\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}), \\ T_{9A} = T_9 (1 + 0,055 T_9)^{-1} \quad (15.3)$$

дает энерговыведение

$$\epsilon_{1,2\text{C}^{16}\text{O}} = 8,42 \cdot 10^6 x_{12\text{C}} x_{16\text{O}} \rho N_A \langle ^{12}\text{C}^{16}\text{O} \rangle (\text{эрг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}). \quad (15.4)$$

Реакция

$${}^{16}\text{O}({}^{16}\text{O}, \gamma){}^{32}\text{S}, Q_6 = 16,541,$$

$$N_A \langle {}^{16}\text{O}^{16}\text{O} \rangle = 3,61 \cdot 10^{37} T_{9A}^{5/6} T_9^{-3/2} \exp\left(-\frac{135,930}{T_{9A}^{1/3}}\right) \times$$

$$\times [\exp(-0,032 T_{9A}^4) + 3,89 \cdot 10^{-4} \exp(2,659 T_{9A}^{2/3})]^{-1} (\text{см}^3 \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}),$$

$$T_{9A} = T_9(1 + 0,067 T_9)^{-1} \quad (15.5)$$

имеет скорость энерговыделения

$$\epsilon_{{}^{16}\text{O}^{16}\text{O}} = 3,12 \cdot 10^{16} x_{{}^{16}\text{O}}^2 \rho N_A \langle {}^{16}\text{O}^{16}\text{O} \rangle (\text{эрг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}). \quad (15.6)$$

В реакциях непосредственного слияния ядер ${}^{24}\text{Mg}$ и более тяжелых для преодоления кулоновского барьера требуется столь большая температура $T_9 \geq 3 \cdot 10^9$ К, что прежде этого начинается фотоотщепление легких частиц p , n и α от ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{20}\text{Ne}$ и захват их другими ядрами. Таким образом, производство элементов тяжелее ${}^{32}\text{S}$ происходит путем (p, γ) , (n, γ) , (α, γ) захватов. Эта быстрая (~ 3000 с) стадия эволюции называется стадией альфа-процессов или кремниевого горения [363, 302], так как ${}^{28}\text{Si}$ наиболее обильно образуется при горении ${}^{12}\text{C}$ и ${}^{16}\text{O}$ в ядрах звезд. Скорости некоторых (p, γ) и (α, γ) реакций приведены в § 14 и табл. 14, 16.

Скорости фотоотщепления, обратные к реакциям слияния, находятся по формуле (13.10), соответствующее энергопоглощение дано в (13.17). Характеристики обратных реакций с участием четырех ядер даны в (13.9). Скорость реакции фоторасщепления ${}^{12}\text{C}$ с учетом [389] и (14.38) есть

$$\frac{1}{\tau_\gamma({}^{12}\text{C})} = \lambda_\gamma({}^{12}\text{C}) = 2,00 \cdot 10^{20} T_9^3 \exp(-84,424/T_9) N_A^2 \langle \alpha\alpha\alpha \rangle. \quad (15.7)$$

Если результатом взаимодействия двух частиц 0 и 1 являются три частицы 2, 3 и 4 с выделением тепла Q , то соотношения между прямыми и обратными реакциями имеют вид

$$\frac{\langle 234 \rangle}{\langle 01 \rangle} = \frac{g_0 g_1}{g_2 g_3 g_4} \left(\frac{A_0 A_1}{A_2 A_3 A_4} \right)^{3/2} \left(\frac{2\pi \hbar^2}{m_u kT} \right)^{3/2} \left(\frac{1 + \Delta_{234}}{1 + \delta_{01}} \right) \exp(-Q/kT), \quad (15.8)$$

а в равновесии

$$\frac{n_2 n_3 n_4}{n_0 n_1} = \rho N_A \frac{x_2 x_3 x_4}{A_2 A_3 A_4} \frac{A_0 A_1}{x_0 x_1} = \frac{g_2 g_3 g_4}{g_0 g_1} \left(\frac{A_2 A_3 A_4}{A_0 A_1} \right)^{3/2} \times$$

$$\times \left(\frac{m_u kT}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \exp(Q/kT) \quad (15.9)$$

или

$$\frac{x_2 x_3 x_4}{x_0 x_1} = 0,98677 \cdot 10^{10} \frac{T_9^{3/2}}{\rho} \left(\frac{g_2 g_3 g_4}{g_0 g_1} \right) \left(\frac{A_2 A_3 A_4}{A_0 A_1} \right)^{5/2} \times$$

$$\times \exp\left(\frac{11,605 Q_6}{T_9}\right). \quad (15.10)$$

При рассмотрении свойств прямых и обратных реакций следует иметь в виду, что как результирующее, так и начальное ядро могут быть возбужденными и это увеличивает число его возможных состояний. При температуре T населенность i -го возбужденного состояния есть

$$P_i = \frac{g_i}{G} \exp(-E_i/kT),$$

$$G = \sum_i g_i \exp(-E_i/kT)$$
(15.11)

и $g_i = 2J_i + 1$ — статистический вес возбужденного состояния со спином J_i , E_i — энергия возбуждения относительно основного состояния. $G(T)$ есть эффективный статистический вес ядра с учетом возбужденных состояний или сумма по состояниям. Роль возбужденных состояний определяется нормализованной суммой по состояниям

$$\mathcal{G} = G/g_0 = 1/P_0,$$
(15.12)

являющейся величиной, обратной к относительной концентрации ядер в основном состоянии P_0 . Учет возбужденных состояний сводится к замене статистических весов g_i на соответствующие суммы по состояниям G_i . Отличия G_i от g_i или \mathcal{G} от единицы появляются при высокой температуре ($T_9 \geq 2$ для ${}^{56}\text{Fe}$ [362]).

С ростом температуры значение G из (15.11) формально расходится, однако корректный учет состояний непрерывного спектра, дающих отрицательный вклад, и ограничения, связанные с развалом ядер, приводит к тому, что G проходит через максимум и стремится к нулю при $T \rightarrow \infty$. Для ${}^{56}\text{Fe}$ максимальное значение $G_{\max} \approx 33340$ и достигается при $T_9 \approx 700$ [362]. Таблица сумм по состояниям для ядер с $8 \leq Z < 86$ и $0 < T_9 \leq 10$ имеется в [638].

§ 16. Процессы образования тяжелых элементов

К моменту начала образования звезд вещество расширяющейся вселенной состояло из водорода и гелия с небольшими примесями дейтерия $x_{2D} \leq 10^{-4}$, гелия-3 $x_{3\text{He}} \leq 3 \cdot 10^{-5}$, лития $x_{7\text{Li}} \approx 10^{-9}$ и ничтожными примесями более тяжелых элементов [567]. Элементы, начиная с лития, практически не образуются из-за того, что отсутствуют стабильные элементы с $A = 5$ и 8 . Образование элементов с $A > 5$ и $A > 8$ возможно только в реакциях с заряженными частицами с $Z \geq 2$, которые не успевают пройти из-за кулоновского барьера.

Элементы, начиная с углерода и тяжелее, образуются в термоядерных реакциях в недрах звезд, при взрывах сверхновых и реакциях (p, γ) и, главным образом, (n, γ) захвата [215]. Возможно также образование очень тяжелых элементов при выбросах из нейтронных звезд [61]. Элементы ${}^6\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{10}\text{B}$ и ${}^{11}\text{B}$ не образуются при термоядерном горении в звездах. Их наблюдаемые весовые концентрации в атмосферах звезд $\leq 10^{-8}$ объясняются реакциями откола при взаимодействии быстрых частиц космических лучей с тяжелыми элементами на поверхности звезд и в оболочках сверхновых [170].