

указанных на схеме изотопов принимают практически не зависящие от времени значения. При этом полное число всех изотопов С, N, O и F остаётся равным их нач. числу. Каково бы ни было нач. распределение изотопов этих элементов, У.-а. ц. вырабатывает вполне определённые (зависящие от темп-ры в недрах звезды) концентрации изотопов. Т. о., изотопы С, N, O и F не являются в строгом смысле катализаторами — их отношения, вообще говоря, изменяются в процессе установления У.-а. ц., не изменяется лишь их полное число [утечкой этих изотопов через реакцию  $^{19}\text{F}(\text{p}, \gamma)^{20}\text{Ne}$  обычно можно пренебречь].

Параметры основных реакций углеродного цикла

Реакция	Q, МэВ	$\tau$ , лет	$\mathcal{E}_v$ , МэВ. Равновесные относительные содержания изотопов С, N, O, F
$^{12}\text{C}(\text{p}, \gamma)^{13}\text{N}$	1,94	$3,6 \cdot 10^2$	$[^{12}\text{C}] = 1,3 \cdot 10^{-2}$ , $[^{13}\text{N}] = 1 \cdot 10^{-9}$ $\mathcal{E}_v = 0,71$ , $\mathcal{E}_{v\text{макс}} = 1,20$ $[^{12}\text{C}]/[^{13}\text{C}] = 3,5$ , $[^{13}\text{C}] = 3,7 \cdot 10^{-3}$ $[^{14}\text{N}] = 0,935$ , $[^{15}\text{O}] = 2 \cdot 10^{-10}$ $\mathcal{E}_v = 1,0$ , $\mathcal{E}_{v\text{макс}} = 1,74$ $[^{15}\text{N}] = 3,5 \cdot 10^{-5}$ $\mathcal{E}_v = 1,7$ , $[^{16}\text{O}] = 2,9 \cdot 10^{-2}$ $[^{17}\text{O}] = 1,9 \cdot 10^{-2}$ , $[^{17}\text{F}] = 9 \cdot 10^{-14}$ $[^{18}\text{F}] = 7 \cdot 10^{-12}$ , $[^{18}\text{O}] = 10^{-3}$ — $10^{-8}$ , $[^{19}\text{F}] = 10^{-6} - 10^{-9}$
$^{13}\text{N}(\text{e}^+ \nu)^{13}\text{C}$	2,22	$2,7 \cdot 10^{-5}$	
$^{13}\text{C}(\text{p}, \gamma)^{14}\text{N}$	7,55	$1,0 \cdot 10^2$	
$^{14}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{15}\text{O}$	7,29	$2,5 \cdot 10^4$	$\mathcal{E}_v = 1,0$ , $\mathcal{E}_{v\text{макс}} = 1,74$ $[^{15}\text{N}] = 3,5 \cdot 10^{-5}$ $\mathcal{E}_v = 1,7$ , $[^{16}\text{O}] = 2,9 \cdot 10^{-2}$ $[^{17}\text{O}] = 1,9 \cdot 10^{-2}$ , $[^{17}\text{F}] = 9 \cdot 10^{-14}$ $[^{18}\text{F}] = 7 \cdot 10^{-12}$ , $[^{18}\text{O}] = 10^{-3}$ — $10^{-8}$ , $[^{19}\text{F}] = 10^{-6} - 10^{-9}$
$^{15}\text{O}(\text{e}^+ \nu)^{15}\text{N}$	2,76	$5,6 \cdot 10^{-6}$	
$^{15}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{12}\text{C}$	4,97	0,93	
$4^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + 2\nu$	26,73	$2,2 \cdot 10^6$	

\* Разброс относительных содержаний  $^{18}\text{O}$  и  $^{19}\text{F}$  связан с неопределённостью скорости реакции  $^{18}\text{O}(\text{p}, \alpha)^{15}\text{N}$ .

В табл. приведены параметры реакций осн. цикла I: Q — полное энергосодержание в реакции;  $\tau$  — характерное время протекания реакции (время, за к-рое концентрация вступающего в реакцию изотопа С, N или O уменьшилась бы в e раз, если этот изотоп не восполнялся бы за счёт др. реакций);  $\mathcal{E}_v$  — средняя и  $\mathcal{E}_{v\text{макс}}$  — максимальная энергии испускаемых нейтрино. В последней строке приведены также равновесные относит. содержания изотопов У.-а. ц., рассчитанные с учётом всех 4 циклов I—IV. Значения  $\tau$  и содержания вычислены для темп-ры  $3 \cdot 10^7$  К, плотн.  $10 \text{ г/см}^3$  и концентрации водорода по массе  $X=0,5$ , что соответствует физ. условиям в центре типичной звезды *спектрального класса V* (массой  $\sim 10 M_\odot$ ) на гл. последовательности (см. *Герциштриунга — Ресселла диаграмма*). Относит. содержания обозначены символами самих изотопов, заключёнными в квадратные скобки, и определены как отношения числа частиц данного изотопа к полному числу частиц элементов С, N, O, F в единице объёма.

Наиб. медленной в цикле I оказывается реакция  $^{14}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{15}\text{O}$ , поэтому именно она определяет скорость переработки водорода в гелий и интенсивность энергосодержания в У.-а. ц. В последней строке табл. даётся итог У.-а. ц.: каждый из циклов I—IV приводит к объединению 4 протонов в ядро  $^4\text{He}$ , при этом выделяется энергия 26,73 МэВ (такая же, как и в водородном цикле), из к-рой ок. 1,7 МэВ (несколько больше, чем в водородном цикле) уносят нейтрино. Характерное время термоядерного сгорания водорода в центре звезды массой  $10 M_\odot$  составляет ок. 2 млн. лет, однако время пребывания этой звезды на гл. последовательности примерно в 10 раз больше. Это связано с существованием у звезды конвективного ядра, значительно превышающего по массе ту область вблизи центра звезды, где протекают термоядерные реакции. Конвекция поставляет в центр. область звезды «свежее» горячее, существенно замедляя скорость уменьшения концентрации водорода. В результате звезда не уходит с гл. последовательности до тех пор, пока не исчерпается весь водород в конвективном ядре.

Для ядерной астрофизики наиб. важны такие последствия У.-а. ц., как превращение почти всех (ок. 94%) исходных изотопов С, N, O и F в  $^{14}\text{N}$ , а также образование изотопов  $^{13}\text{C}$  и  $^{17}\text{O}$  — потенц. источников нейтронов.

Посредством У.-а. ц. водород превращается в гелий не только в недрах массивных звёзд, но и на поверхности

звёзд, где могут происходить вспышки термоядерного горения (см. *Новые звёзды, Барстеры*). В этих случаях У.-а. ц. существенно изменяет свой вид. Связанные со вспышками высокие темп-ры ( $T \geq 10^8$  К) приводят к тому, что участвующие в У.-а. ц. радиоакт. ядра, не успев распасться, вступают во взаимодействие с протонами. В результате сеть реакций У.-а. ц. значительно усложняется и меняется характер превращения изотопов С, N, O и F (напр., концентрация ядер  $^{14}\text{N}$  может быть уже не очень большой). Такой У.-а. ц. наз. горячим. Вследствие быстрого изменения физ. условий в процессе звёздных вспышек равновесные концентрации изотопов, вообще говоря, не успевают устанавливаться. Поэтому при исследованиях звёздных вспышек приходится проводить трудоёмкие расчёты, учитывающие кинетику ядерных превращений в сложной сети реакций горячего У.-а. ц.

Лит.: Родни У. С., Рольфс С., Горение водорода в массивных звездах, в кн.: Ядерная астрофизика, под ред. Ч. Барнса, Д. Клейтона, Д. Шрамма, пер. с англ., М., 1986. Д. К. Наёжсин.

**УГЛОВАЯ СКОРОСТЬ** — величина, характеризующая быстроту вращения твёрдого тела. Численно У. с.  $\omega = d\varphi/dt$ , где  $d\varphi$  — приращение угла поворота  $\varphi$  за промежуток времени  $dt$ . Вектор У. с. направлен вдоль оси вращения в ту сторону, откуда поворот тела виден происходящим против хода часовой стрелки (в правой системе координат).

**УГЛОВОЕ УСКОРЕНИЕ** — величина, характеризующая быстроту изменения угл. скорости твёрдого тела. При вращении тела вокруг неподвижной оси, когда его угл. скорость  $\omega$  растёт (или убывает) равномерно, численно У. у.  $\varepsilon = d\omega/dt$ , где  $d\omega$  — приращение, к-рое получает  $\omega$  за промежуток времени  $dt$ . Вектор У. у.  $\varepsilon$  направлен при этом вдоль оси вращения (в ту же сторону, что и  $\omega$ , при ускоренном вращении и противоположно  $\omega$  — при замедленном). При вращении вокруг неподвижной точки вектор У. у.  $\varepsilon = d\omega/dt$  и направлен по касательной к годографу вектора  $\omega$  в соответствующей его точке.

**УГЛОВОЙ МОМЕНТ** — то же, что *момент количества движения*.

**УГЛОВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И УГЛОВЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ** — осн. характеристики процессов столкновений и распадов частиц. Являются эксперим. источником информации о свойствах атомных ядер и элементарных частиц.

В эксперименте по столкновению частиц непосредственно измеряют дифференц. сечение:

$$d\sigma \propto |R|^2 \delta(\mathcal{E}_c + \mathcal{E}_d + \dots - \mathcal{E}_a - \mathcal{E}_b) \times \\ \times \delta(\mathbf{p}_c + \mathbf{p}_d + \dots - \mathbf{p}_a - \mathbf{p}_b) d^3p_c d^3p_d \dots$$

оно представляет собой ср. число столкновений частиц а и b в 1 с, при к-рых продукты реакции — частицы с, d, ... имеют импульсы в пределах  $d^3p_c, d^3p_d, \dots$  около  $p_c, p_d, \dots$ . Здесь  $R$  — матрица рассеяния,  $\mathcal{E}_a, \mathcal{E}_b, \dots$  — энергии сталкивающихся частиц. Интегрирование  $d\sigma$  по всем переменным (кроме направлений  $\mathbf{n}_c, \mathbf{n}_d, \dots$  движения частиц с, d, ...) даёт угл. распределение  $W(\mathbf{n}_c, \mathbf{n}_d, \dots)$ , т. е. относит. число соударений  $dN$ , в к-рых вторичные частицы попадают в телесные углы  $d\Omega(\mathbf{n}_c), d\Omega(\mathbf{n}_d), \dots$ . Ф-ция угл. корреляции по сути дела является частным случаем ф-ции угл. распределения применительно к каскадным распадам типа:  $a \rightarrow b + e, e \rightarrow c + d$ .

Сохранения законы налагают на вид матрицы рассеяния существ. ограничения [1]. Параметры матрицы рассеяния, к-рые не определяются из кинематич. соотношений, наз. динамическими, они характеризуют взаимодействие, приводящее к данному процессу. Их определение — осн. задача исследования. Так, сопоставление дифференц. сечения, полученное в 1911 Э. Резерфордом (Е. Rutherford) в эксперименте по прохождению  $\alpha$ -частиц через тонкую фольгу, с теоретически рассчитанным сечением рассеяния  $\alpha$ -частиц на точечном электрич. заряде позволило Резерфорду построить планетарную модель атома с центральным положительно заряженным ядром, в к-ром сосредоточена осн. масса атома. Наблюдённое отклонение от теоретич. ф-лы