

смотря на уменьшение содержания водорода, выделяемые энергии внутри С. возрастает. Следовательно, с возрастом светимость С. несколько увеличивается. В ходе эволюции центр. ядро сжимается, а оболочка расширяется; радиус С. при этом растёт.

Теория внутр. строения эволюции звёзд предсказывает, что, когда С. достигнет возраста  $9 \cdot 10^8$  лет, водород в центр. ядре будет исчерпан и термоядерные реакции будут идти в окружающем ядро слое, к-рый расширяется со временем. На этой стадии эволюции длительностью  $\approx 5 \cdot 10^8$  лет существенно увеличится радиус С. и уменьшится эфф. темп-ра поверхности — С. станет красным гигантом (см. *Красные гиганты и сверхгиганты*). Затем последует быстрая стадия ( $\approx 5 \cdot 10^7$  лет) горения гелия и более тяжёлых элементов, сопровождающаяся сбросом оболочки, после чего С. превратится в медленно остывающий *белый карлик*.

Для детального изучения внутр. строения С. строят модели С. и сравнивают их предсказания с данными наблюдений. Стандартная модель С. рассчитывается при следующих предположениях: С. является сферически-симметричным и находится в гидростатич. равновесии; С. находится в состоянии теплового равновесия, за исключением небольших изменений энтропии во время эволюции; изменения хим. состава обусловлены ядерными реакциями в водородном и углеродно-азотном циклах; вещество перемешивается только в конвективной зоне; С. было первоначально однородным по хим. составу и эволюционировало без изменения массы в течение  $4,7 \cdot 10^9$  лет к совр. значениям радиуса и светимости.

Ур-ния, описывающие стандартную модель в переменной  $M_r = 4\pi \int_0^r \rho r^2 dr$  (масса внутри радиуса  $r$ ), имеют вид:

$$\frac{\delta r}{\delta M_r} = \frac{1}{4\pi r^2 \rho};$$

$$\frac{\delta P}{\delta M_r} = -\frac{GM_r}{4\pi r^4} \quad (\text{условие гидростатич. равновесия});$$

$$\frac{\delta L}{\delta M_r} = \varepsilon - T \frac{\delta S}{\delta t} \quad (\text{ур-ние теплового баланса});$$

$$L = L_{\text{луч}} + L_{\text{конв}} = 4\pi r^2 \left( -4\pi r^2 \rho K \frac{\delta T}{\delta M_r} - Nu \cdot K \frac{\Delta T}{l} \right)$$

(ур-ние теплопереноса в диффузионном приближении для лучистого переноса и в приближении нули перемешивания для конвективного переноса). Здесь  $P$  — давление,  $\varepsilon$  — кол-во энергии, вырабатываемое 1г вещества в 1 с,  $S$  — энтропия единицы массы,  $K = 16\sigma T^3/3\kappa\rho$  — коэф. лучистой теплопроводности,  $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана,  $Nu$  — число Нуссельта, характеризующее эффективность конвективного теплопереноса,  $\Delta T$  — характерный перепад темп-р в конвективных элементах;  $l$  — длина перемешивания, к-рая полагается пропорциональной шкале (характерной высоте) изменения давления  $H_p$ . К этим ур-ниям добавляются ур-ния состояния  $\rho = \rho(P, T, X_i)$ ,  $S = S(P, T, X_i)$ , выражения для коэф. поглощения  $\kappa = \kappa(P, T, X_i)$  и скорости генерации энергии  $\varepsilon = \varepsilon(P, T, X_i)$ , где  $X_i$  — относит. содержание по массе элементов с атомным номером  $i$ . Ур-ния состояния в первом приближении такие же, как для идеального газа, но с учётом ионизации и возбуждения атомов, частичного вырождения электронного газа и электростатич. взаимодействия заряж. частиц. Для коэф. поглощения берётся среднее по частотам излучения значение. Скорость генерации энергии определяется вкладами отд. реакций водородного цикла и небольшой добавкой от реакций углеродно-азотного цикла. Ур-ния для изменения содержания элементов имеют вид:

$$\frac{1}{A_i} \frac{\delta X_i}{\delta t} = \sum_j \frac{X_j}{A_j} p_{ij} - \frac{X_i}{A_i} \sum_k p_{ik},$$

где  $p_{ij} = \sum_a N_a \langle \sigma'v \rangle_{iaj}$  — вероятность на единицу времени образования ядра  $j$  из ядра  $i$ ,  $\langle \sigma'v \rangle_{iaj}$  — вероятность реакции синтеза  $i + \beta \rightarrow j$ ,  $\sigma'$  — сечение этой реакции,  $v$  — относит. скорость частиц  $i$  и  $\beta$ , угл. скобки означают усреднение,  $N_i = N_0 \rho X_i / A_i$  — концентрация частиц  $i$ ,  $N_0$  — число Авогадро,  $A_i$  — атомная масса. В расчётах вероятностей ядерных реакций учитываются поправки на электронное экранирование кулоновского потенциала ядер.

Ур-ния дополняются четырьмя граничными условиями. Поверхности модели соответствует эфф. темп-ре С.,  $T = T_s$ , поэтому первое граничное условие:  $4\pi r^2 \sigma T^4 = L$  при  $M_r = M_\odot$ . Второе условие на поверхности получается из равенства давления  $P$  при  $M_r = M_\odot$  давлению, полученному путём интегрирования ур-ния гидростатич. равновесия в атмосфере. Два других граничных условия задаются в центре С. при  $M_r = 0$ :  $r = 0$  и  $L = 0$ .

Эволюц. последовательности моделей С. рассчитывают начиная от стационарной, однородной по хим. составу модели, соответствующей нулевому возрасту на гл. последовательности, до модели совр. возраста  $t_\odot = 4,7 \cdot 10^9$  лет, принимая во внимание изменения хим. состава, вызванные ядерными реакциями (см. *Моделирование звёзд*). Варьированием двух параметров: нач. содержания гелия  $X_4$  и  $\alpha = l/H_p$  получают для  $t = t_\odot$  модель, радиус и светимость к-рой согласуются с наблюдаемыми величинами. Нек-рые характеристики стандартной модели приведены в табл. 1, 2 и на рис. 2.

Табл. 1.—Параметры Солнца согласно стандартной модели (Bachall et al., 1982)

Светимость ( $L_\odot$ )	$3,86 \cdot 10^{33}$ эрг/с
Масса ( $M_\odot$ )	$1,99 \cdot 10^{33}$ г
Радиус ( $R_\odot$ )	$6,96 \cdot 10^{10}$ см
Возраст ( $t_\odot$ )	$4,7 \cdot 10^9$ лет
Плотность в центре ( $\rho_c$ )	$158$ г/см <sup>3</sup>
Температура в центре ( $T_c$ )	$15,5 \cdot 10^6$ К
Содержание водорода по массе на поверхности ( $X_1$ )	0,732
Содержание водорода по массе в центре ( $X_{1,c}$ )	0,355
Эффективная температура поверхности ( $T_s$ )	$5,78 \cdot 10^3$ К
Начальное содержание гелия по массе ( $X_4$ )	$0,25 \pm 0,01$
Начальное содержание тяжёлых элементов по массе ( $Z$ )	0,018
Глубина конвективной зоны	$0,27 R_\odot (M_r = 0,02 M_\odot)$
Доля энергии водородного цикла	0,985
Доля энергии углеродно-азотного цикла	0,015
Поток нейтрино от PP-реакций	$6,1 \cdot 10^{10}$ см <sup>-2</sup> ·с <sup>-2</sup>
Поток нейтрино от реакции распада ядер <sup>8</sup> B	$5,6 \cdot 10^8$ см <sup>-2</sup> ·с <sup>-2</sup>

Табл. 2.—Параметры стандартной модели Солнца в зависимости от времени (Bachall et al., 1982)

$t \cdot 10^{-9}$ , лет	$R \cdot 10^{-10}$ , см	$L \cdot 10^{-33}$ , эрг/с	$T_s \cdot 10^{-3}$ , К
0,000	6,07	2,68	5,65
0,525	6,17	2,81	5,67
1,575	6,32	3,03	5,71
3,155	6,60	3,40	5,75
4,735	6,96	3,86	5,78

Тестом для моделей С. являются данные о внутр. строении С., полученные путём измерения потока солнечных нейтрино и в результате наблюдений глобальных осцилляций С.

Электронные нейтрино с энергиями  $\epsilon > 0,81$  МэВ, образующиеся в реакции  ${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + e^+ + \nu_e$  водородного цикла, зарегистрированы в эксперименте Дэви-