

а в случае критерия Леду гелий выгорает в области красных сверхгигантов с $\lg T_c = 3,5-3,7$.

С ростом массы растёт величина L/L_c , где критич. светимость

$$L_c = \frac{4\pi c GM}{x} \approx 1,3 \cdot 10^{38} \frac{M}{M_\odot} \left(\frac{0,4}{x}\right) \text{ эрг} \cdot \text{с}^{-1},$$

и в $\text{см}^2/\text{г}$. При $L=L_c$ сила светового давления на электроны уравновешивает силу гравитац. притяжения атомных ядер. В процессе движения звезды на ГРД направо в область красных сверхгигантов после образования гелиевого ядра в оболочке, где возникают зоны неполной ионизации гелия и водорода, резко возрастает непрозрачность и L/L_c становится больше единицы. На этой стадии возможно резкое увеличение скорости потери массы звездой, так что может потеряться вся водородная оболочка. Наблюдения показывают существование очень ярких гелиевых звезд типа Вольфа—Райе (WR, см. *Вольфа—Райе звезды*), у к-рых происходит мощное истечение вещества с потоком массы $\dot{M} \approx 10^{-5} M_\odot/\text{год}$. На стадии образования WR-звезд поток массы мог быть значительно больше.

Расчёт эволюции массивных звезд требует самосогласованного учёта потери массы, так чтобы величина \dot{M} получалась в расчётах однозначно, как L , R , T_c . Т. к. время потери массы M/\dot{M} много больше гидродинамич. времени звезды $R^{3/2}/\sqrt{GM}$, звезда на стадии истечения может быть представлена в виде статич. ядра и стационарно истекающей оболочки, масса к-рой внутри критич. радиуса потока много меньше массы звезды; на критич. радиусе r_c скорость v_c равна скорости звука $v_{\text{зв}}$ и $v_c^2 = GM/2r_c$ (см. *Звёздный ветер*). Скорость потока быстро падает по мере перехода к плотным внутр. слоям звезды, и оболочка плавно переходит в статич. ядро. Сделаны лишь предварит. расчёты эволюции с самосогласованным учётом потери массы, хотя имеется много зволюц. расчётов с феноменологич. учётом потери массы, типа зависимостей

$$\dot{M} \approx -\frac{LR}{M} \cdot 10^{-11}, M_\odot/\text{год} \quad \text{или} \quad \dot{M} \approx -10^2 \frac{L}{c^2} \cdot M_\odot/\text{год}$$

(L, R, M в единицах $L_\odot, R_\odot, M_\odot$).

Расчёт эволюции двух звезд с пост. массами ($M=15$ и $25 M_\odot$) вплоть до образования железного ядра в состоянии предсверхновой представлен на рис. 5. После возгора-

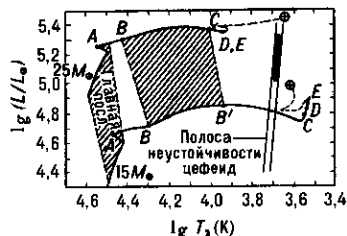


Рис. 5. Эволюционные треки звезд с массами 15 и $25 M_\odot$; BB' и BC —области горения гелия в ядре; CD —горение в двойном (H—He) слоевом источнике; DE —горение углерода. Расчёты доведены до точки потери устойчивости (указана крестом в кружке), штриховые треки соответствуют не вполне уверенным расчётам.

ния углерода эволюция ядра идёт очень быстро, ввиду роста скорости нейтринных потерь, так что состояние оболочки почти не меняется и звезда мало движется по ГРД вплоть до начала коллапса. Наблюдения сверхновой 1987A в Большом Магеллановом Облаке показали, что предсверхновая здесь представляла собой голубой, а не красный сверхгигант, как показано на рис. 5. Это может быть связано с тем, что либо произошёл сброс значит. части водородной оболочки, либо звезда эволюционировала на треке вдоль петели, заходящей в голубую область. Если углерод загорелся в тот момент, когда звезда находилась в голубой области, её видимое положение на ГРД оставалось почти неизменным вплоть до потери устойчи-

вости и вспышки сверхновой. Сравнение разл. расчётов показывает, что появление петели носит стохастич. характер, поэтому можно говорить лишь о вероятности расположения звезды в области голубых, жёлтых или красных сверхгигантов в состоянии предсверхновой.

Звёзды, превратившиеся в красные и жёлтые гиганты и сверхгиганты, после образования гелиевого ядра становятся в определ. области неустойчивыми относительно раскочки механич. колебаний и наблюдаются как переменные звёзды с регулярными колебаниями блеска (*цефеиды* и звёзды типа RR Лирь). Осн. причиной возбуждения колебаний в этих звёздах является аномальное поведение непрозрачности в зоне неполной ионизации гелия, толщина к-рой растёт с ростом темп-ры (см. *Пульсации звёзд*). Вне ГП расположены и др. типы переменных звезд с регулярной, полурегулярной и нерегулярной переменностью. Причиной переменности регулярных переменных, находящихся на стадиях Э. з. до и после ГП, является наличие мощных конвективных оболочек, приводящих к генерации ударных волн при звёздных вспышках, аналогичных *вспышкам на Солнце*, но на много порядков более мощных.

Предсверхновые и сверхновые

Сверхновые второго типа (с линиями водорода в спектрах и остатками в виде *пульсаров*) являются продуктом эволюции массивных звезд с $M \geq (13-15) M_\odot$. Ядра этих звезд теряют устойчивость и коллапсируют после увеличения центр. темп-ры настолько, что начинается диссоциация ядер ^{56}Fe и адиабатич. показатель γ становится меньше $4/3$. Значение γ , усреднённое по звезде ($\langle \gamma \rangle$), определяет её гидродинамич. устойчивость. Неустойчивость имеет место при

$$\int_0^1 \left(\gamma - \frac{4}{3}\right) P \frac{dy}{\varphi(y)} < 0,21 \frac{G^2 M^{4/3} \rho_c^{5/3}}{c^2},$$

$$\text{где } y = \frac{m(r)}{M}, \varphi(y) = \frac{\rho(r)}{\rho_c}.$$

В выражении член справа связан с эффектами общей теории относительности и равен нулю в ньютоновской теории, в к-рой $\langle \gamma \rangle = 4/3$ отделяет устойчивые состояния от неустойчивых. Согласно результатам расчётов, представленным на рис. 5, ядра звезд в точке вскоре после потери устойчивости характеризуются параметрами:

$\frac{M}{M_\odot}$	$\frac{M_\text{я}}{M_\odot}$	$\rho_c, \text{г} \cdot \text{см}^{-3}$	T_c, K	$T_\text{я}, \text{K}$	$\frac{R_f}{R_\odot}$	$\frac{L_\text{ph}}{L_\odot}$	$\frac{L_\text{v}}{L_\odot}$
15	1,56	6,0 (9)	8,3 (9)	4,28 (3)	560	9,7 (4)	1,8 (15)
25	1,61	3,5 (9)	8,3 (9)	4,36 (3)	963	3,1 (5)	2,1 (15)

Здесь $M_\text{я}$ —масса ядра; T_c и ρ_c —центральные темп-ра и плотность, L_v —нейтринная светимость, L_ph —фотонная светимость, R_f —радиус фотосферы; цифры в скобках указывают порядок величины. У звезд массой ок. $8 M_\odot$ образуется вырожденное углеродно-кислородное ядро массой $1,39 M_\odot$, к-рое перед тепловой вспышкой характеризуется след. параметрами: $\rho_c = 2,7$ (9) $\text{г}/\text{см}^3$, $T_c = 2,8$ (8) K, $r_\text{я} = 3,4$ (-3) R_\odot ($r_\text{я}$ —радиус ядра). Тепловые вспышки звёздных ядер, ведущие к полному разлёту звезды и выделению энергии $\sim 10^{51}$ эрг, связывают с наблюдаемыми вспышками сверхновых типа I, в спектрах к-рых водород не наблюдается, а в остатках взрыва не найдены пульсары. Вспышки сверхновых типа Ib, промежуточных между типами I и II (линии водорода почти не видны, но нейтронные звёзды могут образоваться), связаны, видимо, с потерей устойчивости в ядрах звезд промежуточной массы $M = (8-13) M_\odot$ или с вхождением этих звезд в двойные системы.

Расчёты гидродинамич. коллапса ядер массивных звезд показали, что подавляющая часть ($> 99\%$) выделяющейся гравитац. энергии ($\sim 10^{54}$ эрг) уносится нейтрино. Внутр. части звезды оказываются непрозрачными для рождаю-