

Звёзды

Table 10.1: Some integral properties of the cosmic mixture

<u>Mass fraction of</u>			
Hydrogen	X	=	0.707
Helium	Y	=	0.274
Metals	Z	=	0.019
CNOF-isotopes	X_{CNOF}	=	0.0137 = 0.726 Z
α -nuclides ($^{20}\text{Ne} \rightarrow ^{40}\text{Ca}$)	X_{α}	=	$3.30 \cdot 10^{-3}$ = 0.175 Z
Iron-56	X_{56}	=	$1.16 \cdot 10^{-3}$ = 0.062 Z
Iron-group (Ti \rightarrow Fe \rightarrow Cu)	X_{Fe}	=	$1.38 \cdot 10^{-3}$ = 0.073 Z
Heavies (beyond Iron-group)	X_{h}	=	$2.9 \cdot 10^{-6}$
Pure r-nuclides	X_{r}	=	$5.5 \cdot 10^{-8}$
Pure s-nuclides	X_{s}	=	$4.0 \cdot 10^{-8}$
p-nuclides	X_{p}	=	$3.9 \cdot 10^{-9}$
<u>Metals:</u>			
Mean atomic number	$\langle Z \rangle$	=	8.409
Mean atomic mass number	$\langle \mathcal{A} \rangle$	=	16.94
Mean molecular weight of the whole mixture	μ	=	0.6176
Mean molecular weight per electron	μ_e	=	1.179
Normalizing constant	C	=	$2.515 \cdot 10^{-11}$

$$0.08 M_{\odot} \leq M \leq 200 M_{\odot}$$

$$10^{-4} L_{\odot} \leq L \leq 10^6 L_{\odot}$$

$$10^{-2} R_{\odot} \leq R \leq 10^3 L_{\odot}$$

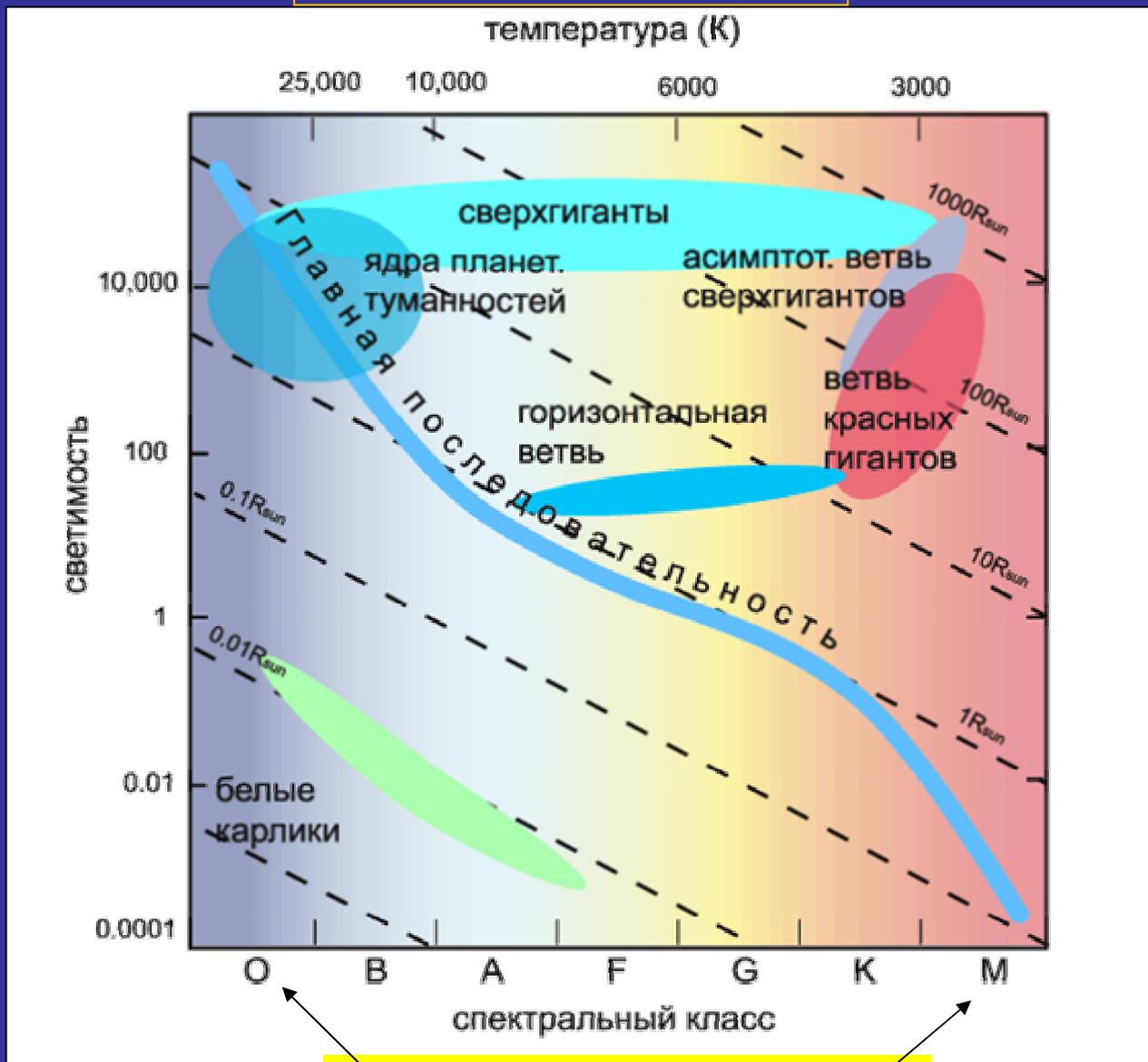
$$M_{\odot} \approx 2 \times 10^{33} \text{ g}$$

$$R_{\odot} \approx 7 \times 10^{10} \text{ cm} \approx 100 R_{\oplus}$$

$$L_{\odot} \approx 3.8 \times 10^{33} \text{ erg}$$

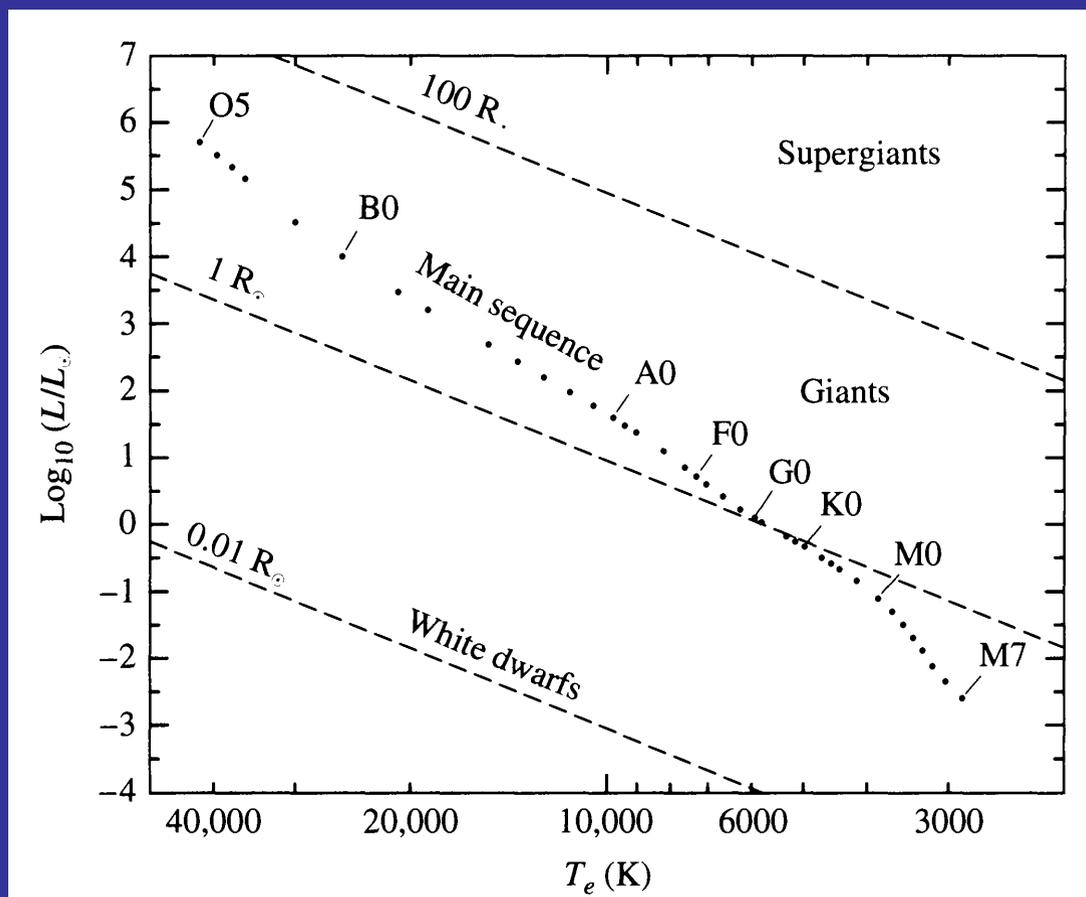
$$L = 4\pi R_s^2 \times \sigma_{SB} T_{eff}^4$$

Диаграмма Герцшпрунга-Рассела



Oh be a fine girl kiss me

	O	B	A	F	G	K	M
T, 10^3 K	30-60	10-30	7.5-10	6-7.5	5-6	3.5-5	2-3.5
Цвет	голубой	бел.- голубой	белый	жёл.- белый	жёлтый	оранжевы й	красный
M/M _{Sun}	60	18	3	1.7	1.1	0.8	0.3
R/R _{Sun}	15	7	2.1	1.3	1.1	0.9	0.4
L/L _{Sun}	1.4×10^6	2×10^4	80	6	1.2	0.4	0.04



Условия внутри звёзд

$$[P(r) - P(r + \delta r)]\Delta S = \frac{Gm(r)}{r^2} \rho \Delta S \delta r$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dr} = - \frac{Gm(r)}{r^2}$$

$$\frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \rho$$

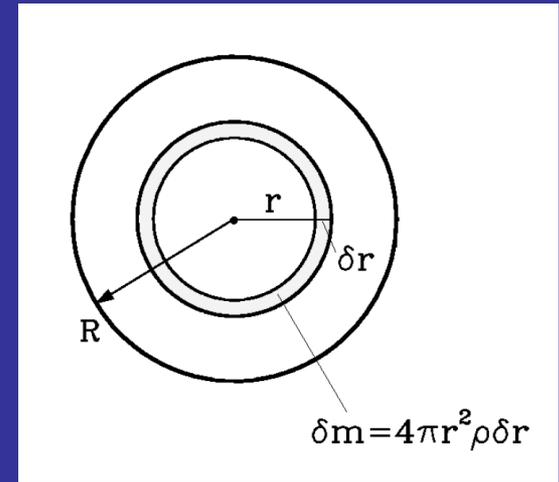
$$U_{gr} = - \int_0^{M_s} \frac{Gm dm}{r}$$

Теорема вириала:

$$3 \int_0^{M_s} \frac{P}{\rho} dm + U_{gr} = 0$$

$$3(\gamma - 1)E_{int} + U_{gr} = 0$$

$$E_{tot} = (4 - 3\gamma)E_{int} = \frac{4 - 3\gamma}{\gamma - 1} \int_0^{M_s} \frac{P}{\rho} dm$$



$$P = (\gamma - 1)\rho E$$

$$\gamma \equiv \left(\frac{\partial \ln P}{\partial \ln \rho} \right)_S$$

$$E_{int} \equiv \int_0^{M_s} E dm$$

Отрицательная
теплоемкость звезды

$$\gamma = \frac{5}{3}$$



$$E_{tot} = E_{int} + U_{gr} = -E_{int}$$

Невырожденная звезда,
теряя энергию, **НАГРЕВАЕТСЯ!**

Устойчивость

$$\gamma = \frac{4}{3}$$



Критическое
значение

Плотность

$$\langle \rho_{\odot} \rangle = \frac{M_{\odot}}{\frac{4\pi}{3} R_{\odot}^3} \approx 1.4 \text{ г/см}^3$$

$$\rho_c = 150 \text{ г/см}^3$$

Температура

$$P = \frac{\rho k T}{m_u \langle \mu \rangle}$$

из теоремы
вириала

$$3 \int \frac{P}{\rho} dm = 3 \int \frac{kT}{m_u \langle \mu \rangle} = \int \frac{Gmdm}{r} \geq \frac{GM^2}{R}$$

$$\langle T \rangle \geq \frac{GM_s m_u \langle \mu \rangle}{6kR_s} \approx 2 \times 10^6 \text{ K}$$

$$T_c = 15 \times 10^6 \text{ K} \sim 1 \text{ keV}$$

Характерные времена:

1. Гидродинамическое:

$$t_H \sim \frac{R_s}{c_s} \sim \frac{R_s}{\sqrt{\frac{\partial P}{\partial \rho}}} \sim \sqrt{\frac{R_s^3}{GM_s}} \approx 1000 \left(\frac{R_s}{R_{\odot}} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{M_s}{M_{\odot}} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ сек}$$

2. Тепловое:

$$t_{th} \sim \frac{E_{\text{int}}}{L_s} \sim \frac{|U_{gr}|}{L_s} \sim \frac{GM_s^2}{R_s L_s} \approx 2 \times 10^7 \left(\frac{M_s}{M_{\odot}} \right)^2 \frac{R_{\odot}}{R_s} \frac{L_{\odot}}{L_s} \text{ лет}$$

3. Ядерное:

$$t_n \sim \frac{E_{nuc}}{L_s} \sim \frac{M_{core} c^2 \times 0.007}{L_s} \approx 10^{10} \frac{M_s}{M_{\odot}} \frac{L_{\odot}}{L_s} \text{ лет}$$

$$t_H \ll t_{Th} \ll t_n$$

Table 2.1: Stellar time scales

Object	t_H	t_T	t_n
The Sun	1000 s	$2 \cdot 10^7$ y	10^{10} y
Blue Supergiant on the Main Sequence $M = 30M_\odot$	3,500 s	$3 \cdot 10^4$ y	$5 \cdot 10^6$ y
Red Supergiant (Betelgeuse) $M = 20M_\odot$	2 months	$1 \cdot 10^3$ y	$1 \cdot 10^7$ y
White Dwarf (Sirius B)	0.8 s	$3 \cdot 10^7$ y	no nuclear burning

Термоядерные реакции в звёздах

$$E_{kin} \sim kT \sim 1keV, \quad E_{int} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r_{12}} \quad R_{A,Z} \approx A^{\frac{1}{3}} fm \rightarrow E_{int}^{pp} \approx 1MeV!$$

$$\Delta \sim e^{-\frac{E_{int}}{kT}} \sim e^{-\frac{1MeV}{1keV}} \approx 10^{-430}$$

Число барионов
в звезде:

$$N_b \sim \frac{M_s}{m_u} \sim \frac{M_s}{M_\odot} \frac{2 \times 10^{33} e}{1.6 \times 10^{-24} e} \sim 10^{57} \frac{M_s}{M_\odot}$$

доля протонов с энергией,
достаточной для реакции

В рамках классической физики
термоядерные реакции в звёздах **НЕВОЗМОЖНЫ!**

Решение – квантово-механическое
туннелирование через барьер,
Г.А. Гамов (1928 г.)

$$E = \frac{p^2}{2\mu} = \frac{e^2 Z_1 Z_2}{r_2}, \quad \mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

$$r_2 = \frac{e^2 Z_1 Z_2}{E}, \quad \lambda = \frac{\hbar}{p} = \frac{\hbar}{\sqrt{2\mu E}}$$

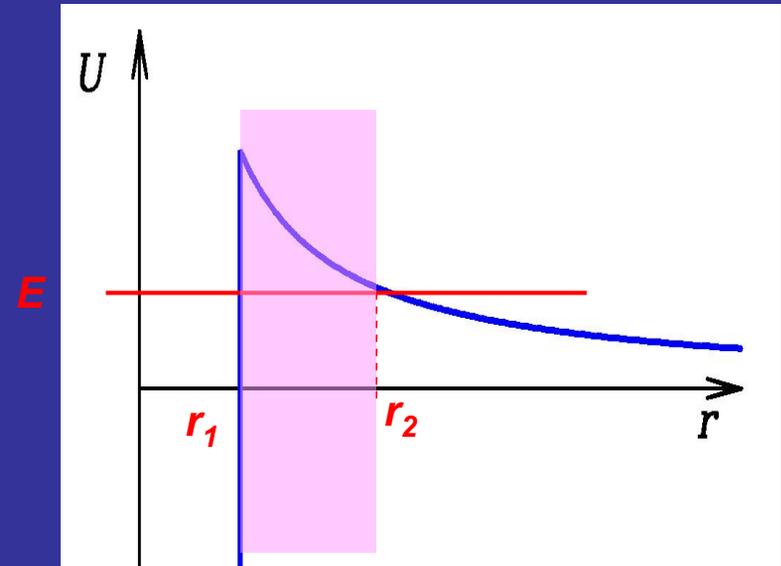
$$P = \exp\left(-\pi \frac{r_2}{\lambda}\right) = \exp\left(-\sqrt{\frac{E_G}{E}}\right)$$

вероятность проникновения через барьер



энергия
Гамова

$$E_G = \frac{2\pi^2 e^4 Z_1^2 Z_2^2 \mu}{\hbar^2} \approx \frac{Z_1^2 Z_2^2 A_1 A_2}{A_1 + A_2} MeV$$



астрофизический S-фактор

$$\sigma = \pi \lambda^2 \times P(E) = \frac{S(E)}{E} e^{-\sqrt{\frac{E_G}{E}}}$$

сечение реакции

Скорость реакции a+b → ...

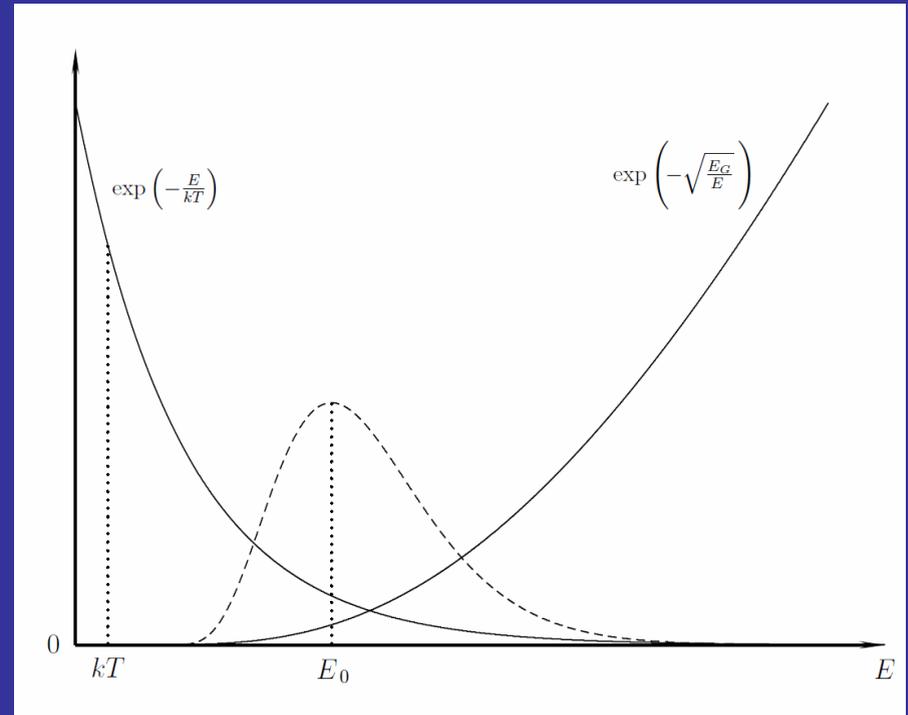
$$R_{ab} = \frac{n_a n_b}{1 + \delta_{ab}} \langle \sigma v \rangle$$

Усреднение по Максвелловскому распределению:

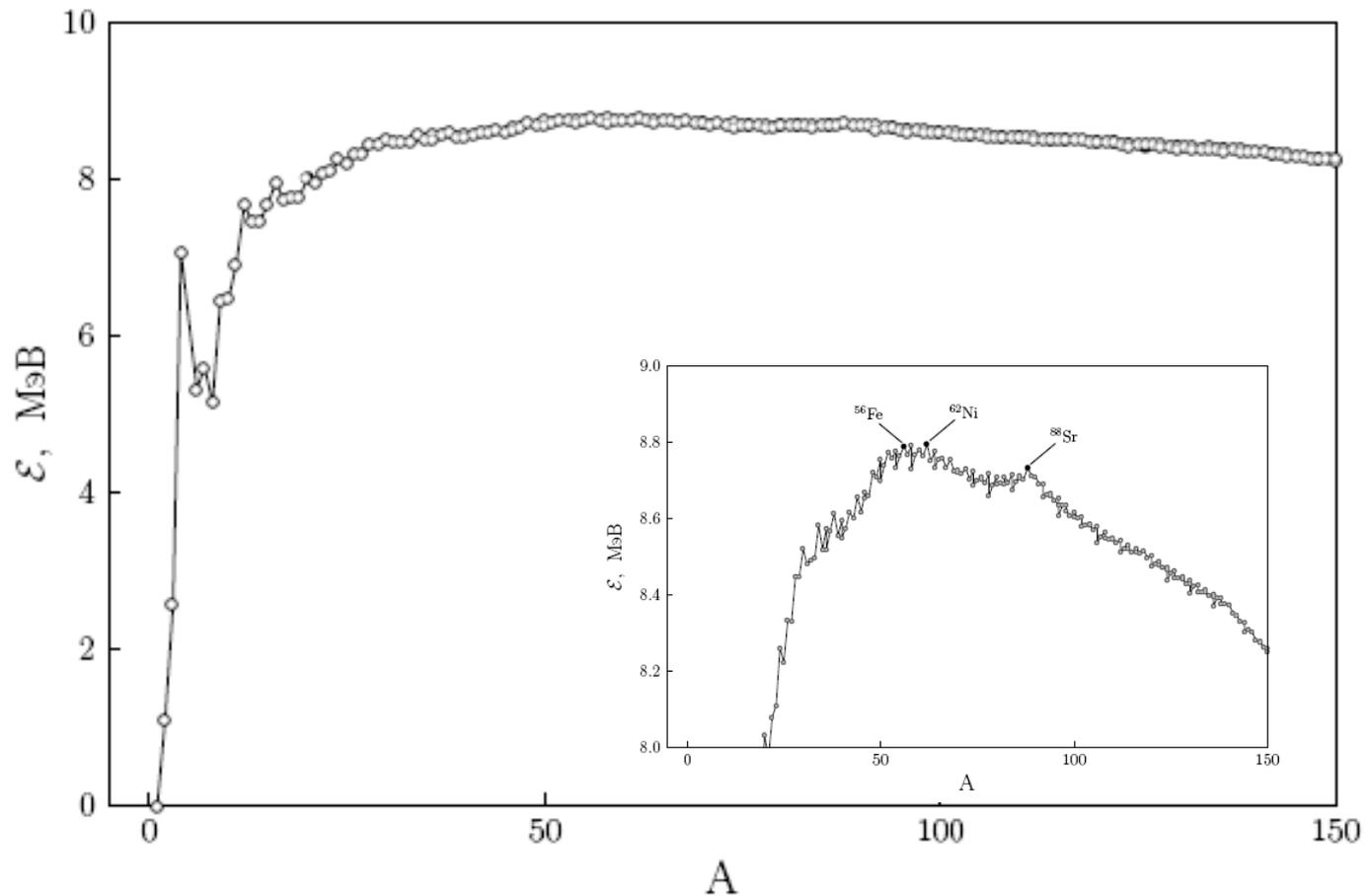
$$\langle \sigma v \rangle \sim \int \exp\left(-\sqrt{\frac{E_G}{E}} - \frac{E}{kT}\right) dE$$

пик при $E_0 = E_G^{1/3} \left(\frac{kT}{2}\right)^{2/3}$

$$\langle \sigma v \rangle \sim \frac{S(E_0)}{T^{2/3}} \times \exp\left(-\frac{3}{2} \left[\frac{2E_G}{kT}\right]^{1/3}\right)$$



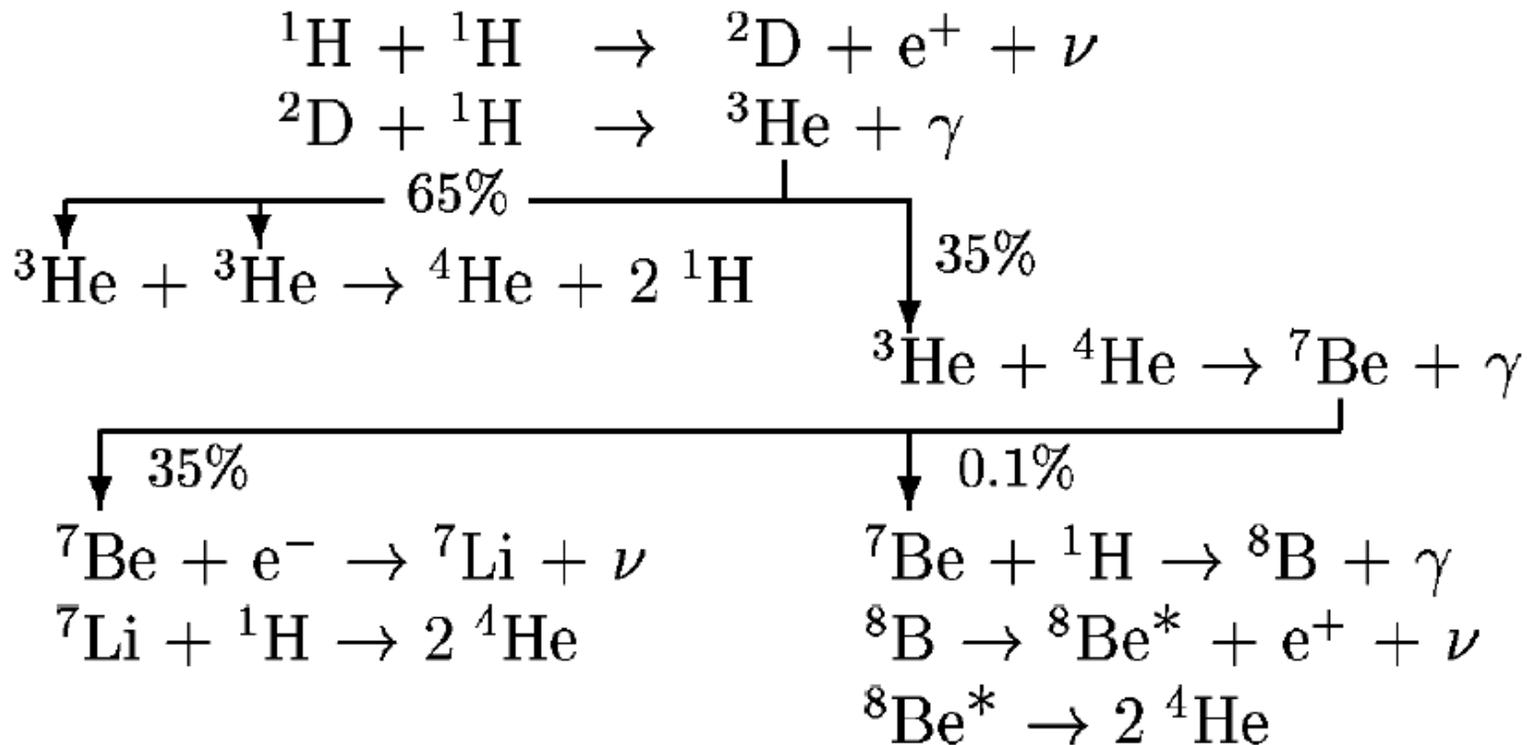
Энергия связи ядер



Ядро	^1H	^2D	^3He	^4He	^6Li	^7Li	^{12}C	^{16}O	^{28}Si	^{56}Fe	^{238}U
ϵ (МэВ)	0.0	1.11	2.6	7.03	5.3	5.6	7.7	7.9	8.5	8.79	7.57

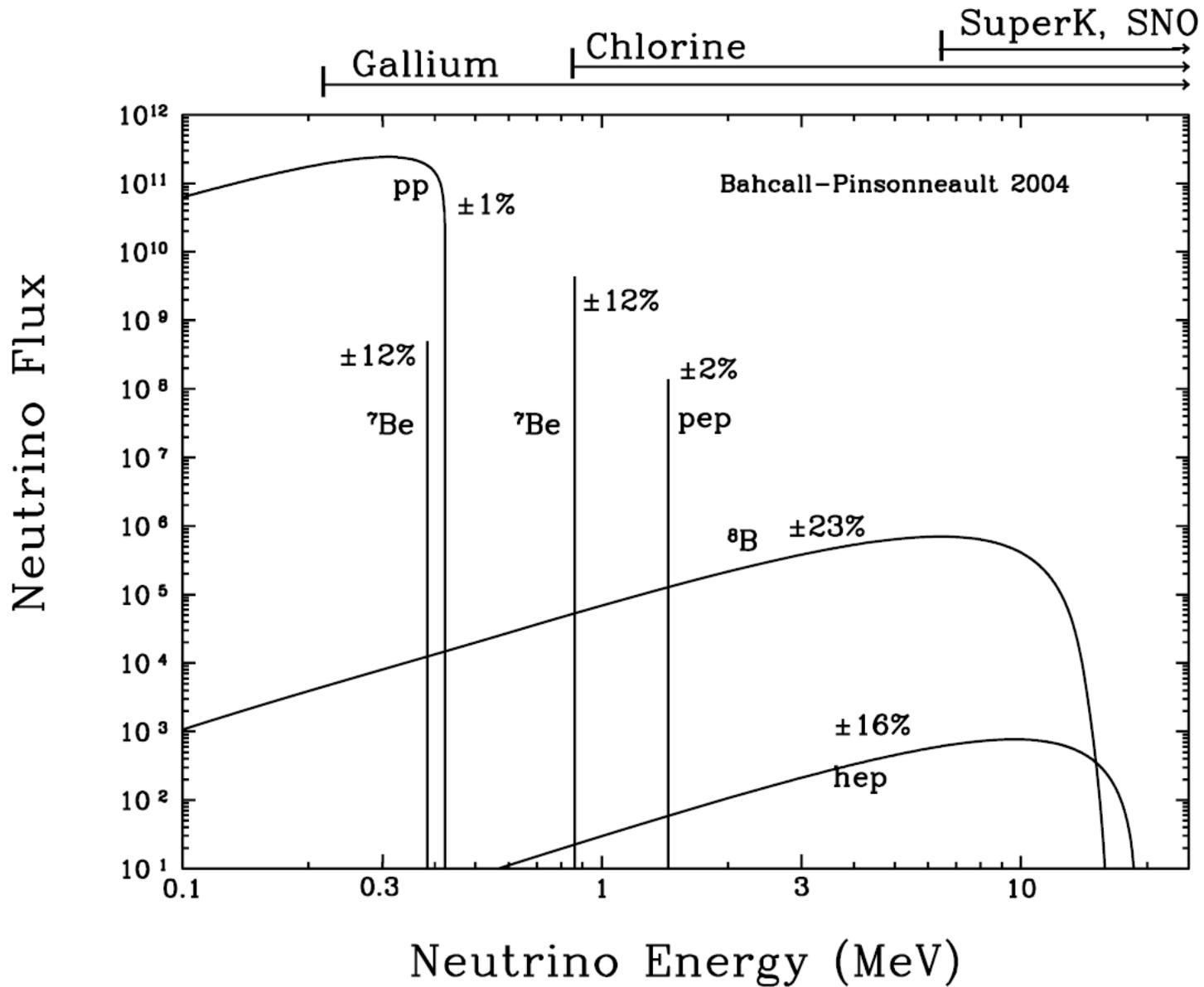
Горение водорода в звёздах:

P-P цепочка

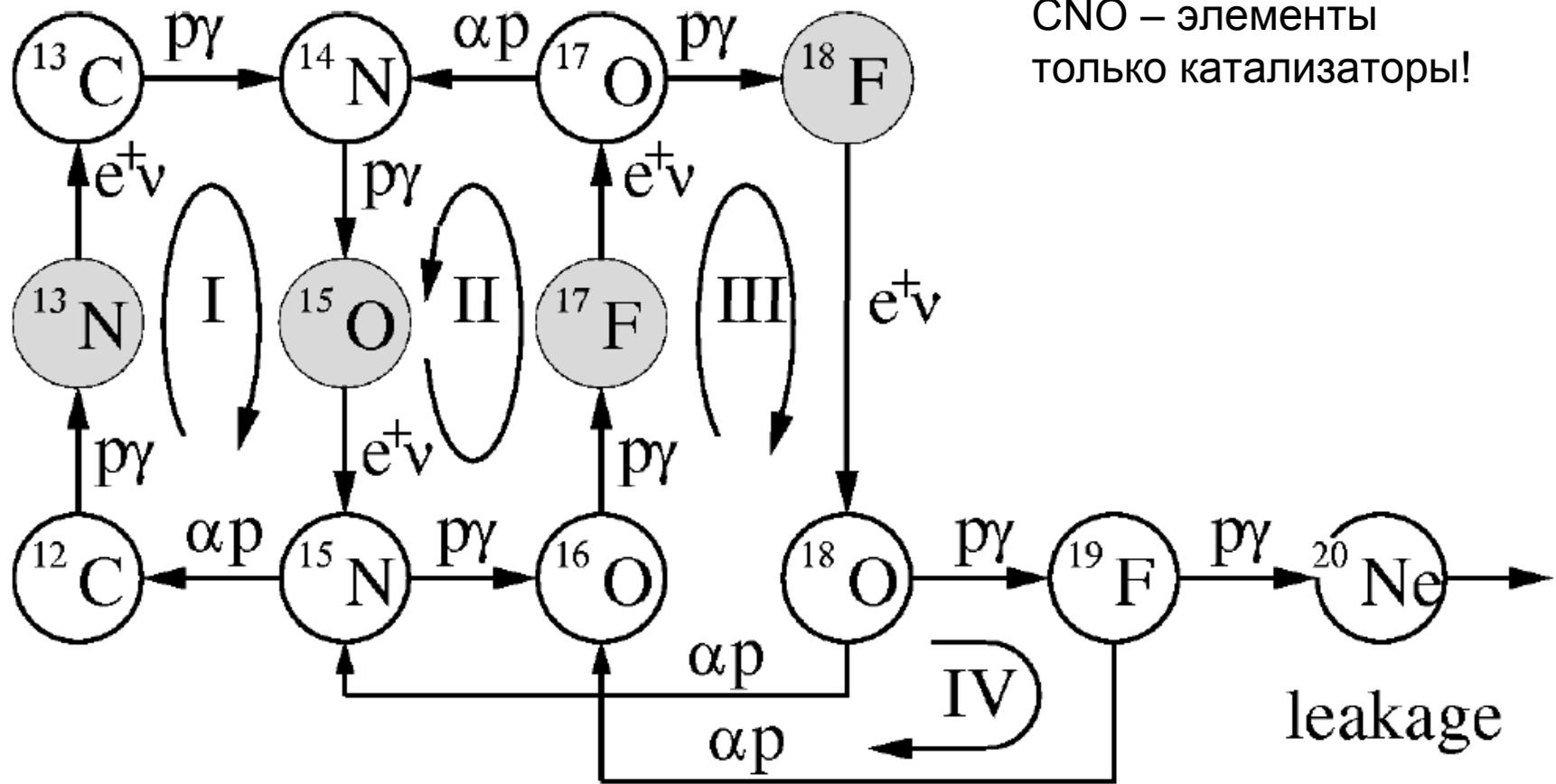


Reaction	Q MeV	τ years	ϵ_ν , MeV; X
${}^1\text{H}(p, e^+ \nu) {}^2\text{D}$	1.44	$8.2 \cdot 10^9$	$\bar{\epsilon}_\nu = 0.26$; $\epsilon_{\nu, \text{max}} = 0.42$
${}^2\text{D}(p, \gamma) {}^3\text{He}$	5.49	$4.4 \cdot 10^{-8}$	$X({}^2\text{D}) = 2.7 \cdot 10^{-18}$
${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p) {}^4\text{He}$	12.86	$2.4 \cdot 10^5$	$X({}^3\text{He}) = 1.6 \cdot 10^{-5}$
${}^3\text{He}({}^4\text{He}, \gamma) {}^7\text{Be}$	1.59	$9.5 \cdot 10^5$	$X({}^7\text{Be}) = 1.2 \cdot 10^{-11}$
${}^7\text{Be}(e^-, \nu) {}^7\text{Li}$	0.862	0.30	$\bar{\epsilon}_\nu = 0.81$ $\epsilon_\nu = 0.862(90\%), 0.383(10\%)$
${}^7\text{Li}(p, {}^4\text{He}) {}^4\text{He}$	17.348	$3.8 \cdot 10^{-5}$	$X({}^7\text{Li}) = 1.5 \cdot 10^{-15}$
${}^7\text{Be}(p, \gamma) {}^8\text{B}$	0.137	$1.0 \cdot 10^2$	$X({}^8\text{B}) = 4 \cdot 10^{-21}$
${}^8\text{B}(e^+ \nu) {}^8\text{Be}^*$	15.08	$3.0 \cdot 10^{-8}$	$\bar{\epsilon}_\nu = 7.3$; $\epsilon_{\nu, \text{max}} = 14.06$
${}^8\text{Be}^* \rightarrow 2 {}^4\text{He}$	2.99		
$4 {}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + 2\nu$	26.73	$8.2 \cdot 10^9$	$\bar{\epsilon}_\nu = 0.6$

Спектр солнечных нейтрино



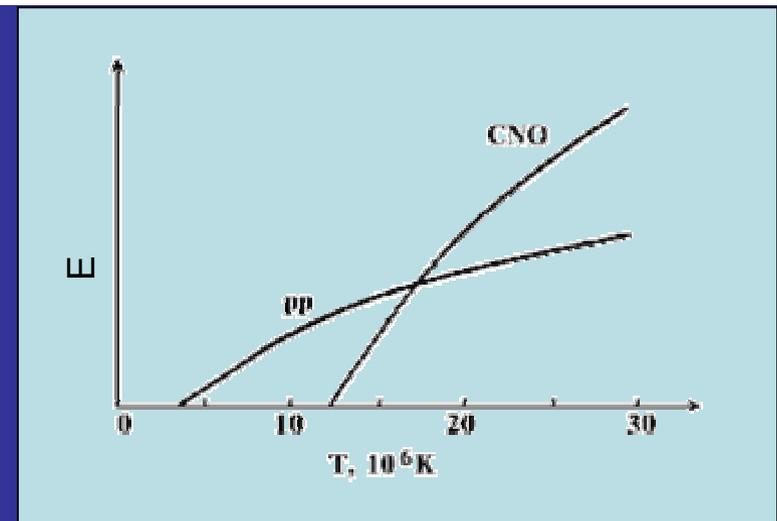
CNO - ЦИКЛ



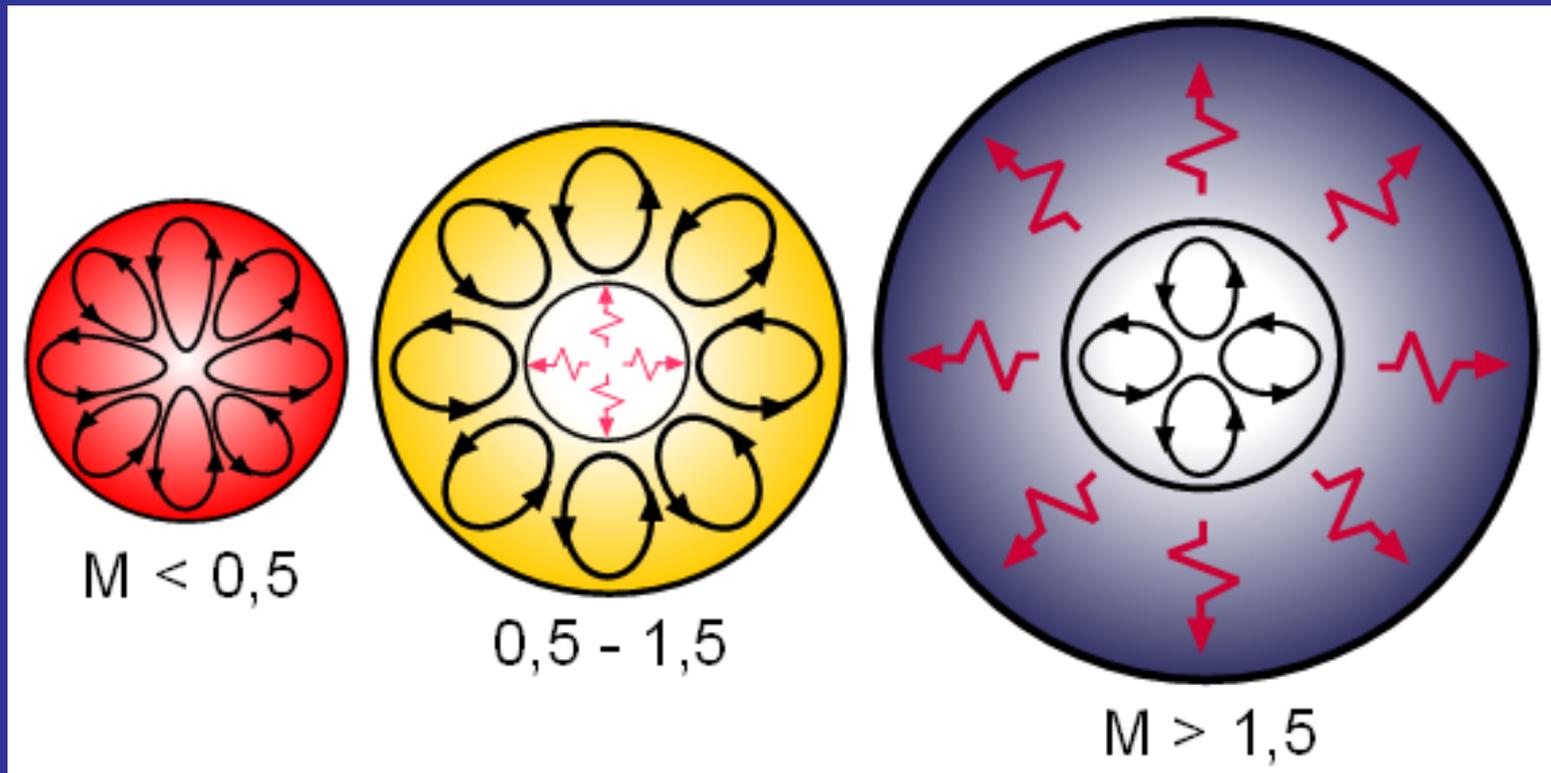
CNO – элементы
только катализаторы!

Reaction	Q MeV	τ years	ϵ_ν , MeV; $[Y] \equiv [C, N, O, F]$
$^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}$	1.94	$3.6 \cdot 10^2$	$[^{12}\text{C}] = 1.3 \cdot 10^{-2}$, $[^{13}\text{N}] = 1 \cdot 10^{-9}$
$^{13}\text{N}(e^+ \nu)^{13}\text{C}$	2.22	$2.7 \cdot 10^{-5}$	$\bar{\epsilon}_\nu = 0.71$, $\epsilon_{\nu, \max} = 1.20$
$^{13}\text{C}(p, \gamma)^{14}\text{N}$	7.55	$1.0 \cdot 10^2$	$[^{12}\text{C}]/[^{13}\text{C}] = 3.5$, $[^{13}\text{C}] = 3.7 \cdot 10^{-3}$
$^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$	7.29	$2.5 \cdot 10^4$	$[^{14}\text{N}] = 0.935$, $[^{15}\text{O}] = 2 \cdot 10^{-10}$
$^{15}\text{O}(e^+ \nu)^{15}\text{N}$	2.76	$5.6 \cdot 10^{-6}$	$\bar{\epsilon}_\nu = 1.0$, $\epsilon_{\nu, \max} = 1.74$
$^{15}\text{N}(p, \alpha)^{12}\text{C}$	4.97	0.93	$[^{15}\text{N}] = 3.5 \cdot 10^{-5}$
$4^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + 2\nu$	26.73	$2.2 \cdot 10^6$	$\bar{\epsilon}_\nu = 1.7$
			$[^{16}\text{O}] = 2.9 \cdot 10^{-2}$, $[^{17}\text{O}] = 0.019$, $[^{17}\text{F}] = 9 \cdot 10^{-14}$, $[^{18}\text{F}] = 7 \cdot 10^{-12}$ $[^{18}\text{O}] = 10^{-5} - 10^{-8}$, $[^{19}\text{F}] = 10^{-6} - 10^{-9}$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{pp} \sim \rho X_p^2 T^n \frac{\partial p \tau}{\partial \text{сек}}, \quad n \approx (4.6 \div 3) \\ E_{CNO} \sim \rho X_p X_{CNO} T^n \frac{\partial p \tau}{\partial \text{сек}}, \quad n \approx (22 \div 18) \end{array} \right.$$



Конвективная зона в звёздах разных масс

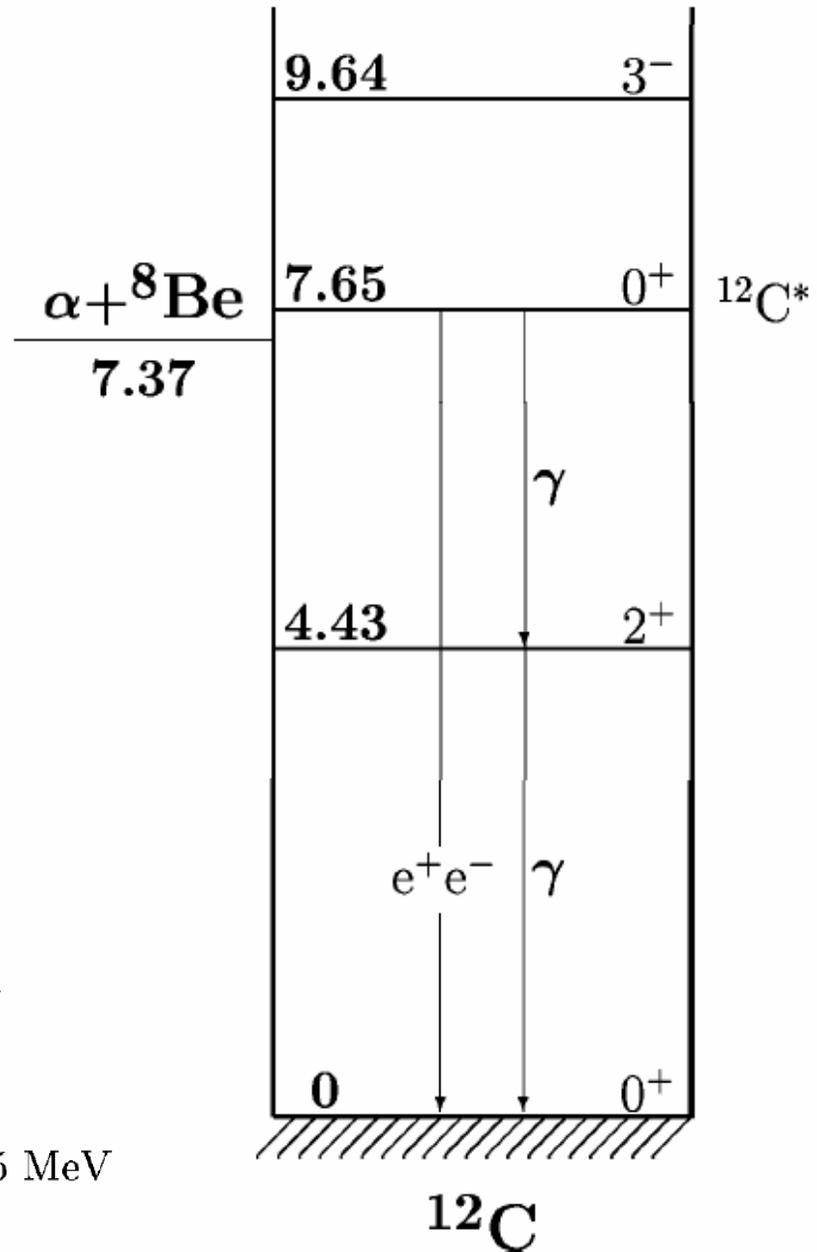
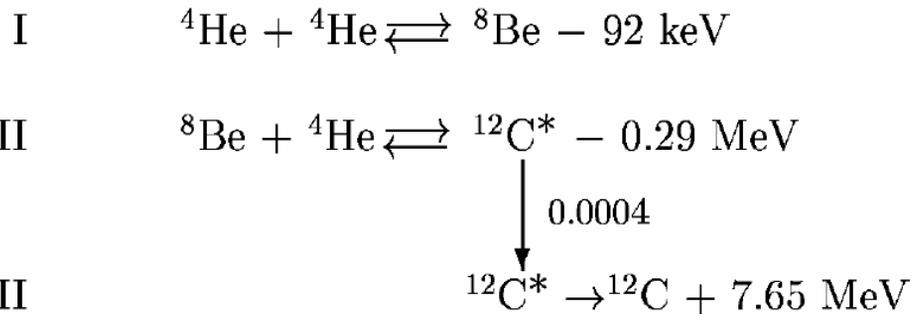


Сход звезды с Главной Последовательности Горение гелия

Фред
Хойл



3- α реакция (резонанс!)

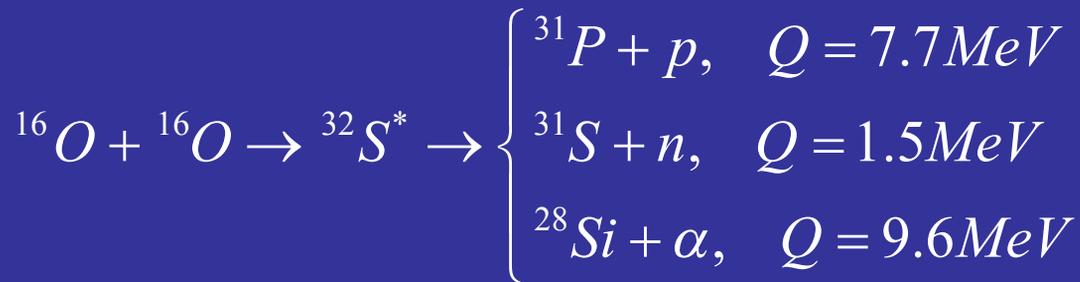
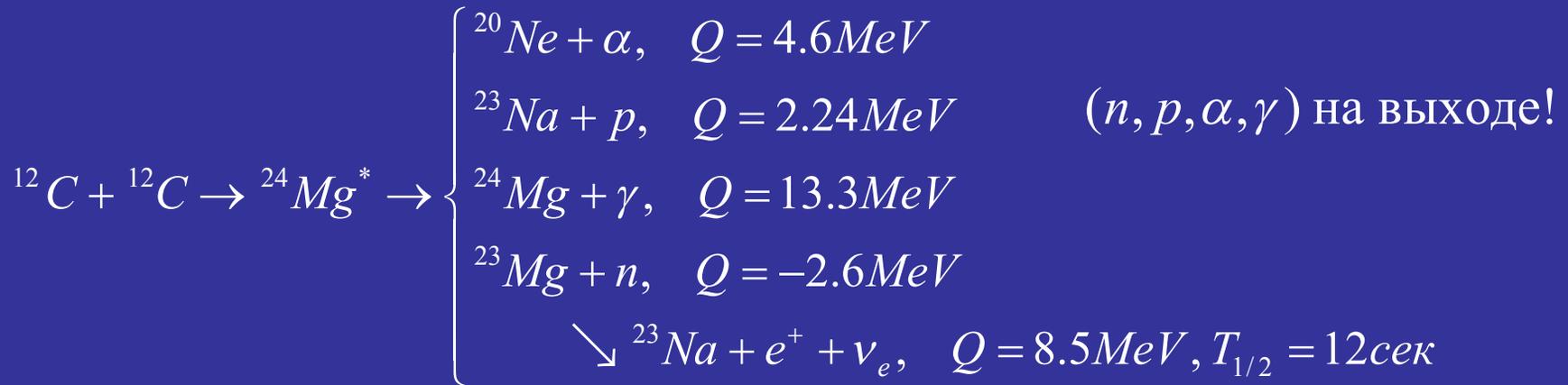


Горение других элементов

Горение углерода и кислорода



$$T \sim 8 \times 10^8 \text{ K} \quad \rho \sim 10^4 \div 10^5 \text{ г/см}^3$$



$$T = 2 \times 10^9 \text{ K}$$

Эволюция звёзд разных масс на Г-Р диаграмме (I.Iben)

$$0.5 \leq M / M_{\odot} \leq 2.5$$

Горение водорода. Красный гигант, сжатие ядра, горение H в слое, растущее He ядро, вспышка гелия в вырожденных условиях, CO-WD, $M \sim 0.5 M_{\text{sun}}$

$$2.5 \leq M / M_{\odot} \leq 8$$

На стадии КГ невырожденное He ядро, горение гелия, вырожденное CO ядро, тепловая неустойчивость, сброс оболочки, планетарная туманность. CO-WD с $M \sim 0.6-0.7 M_{\text{sun}}$

$$8 \leq M / M_{\odot} \leq 10 \div 12$$

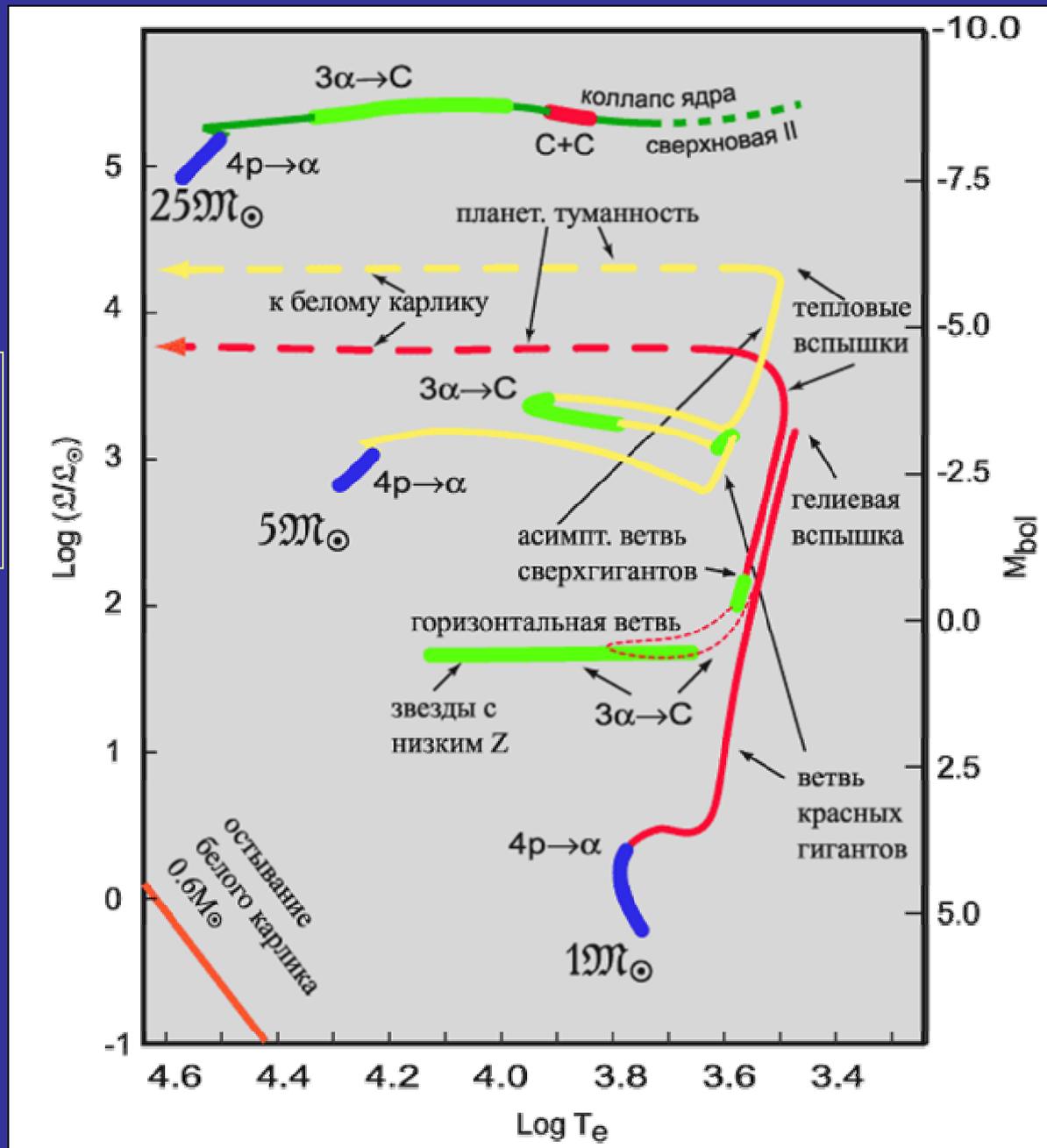
Горение O, Ne, Mg, планетарная туманность. O-Ne-Mg WD с массой $M \sim M_{\text{Ch}} \sim 1.2 M_{\text{sun}}$

$$10 \div 12 \leq M / M_{\odot} \leq 30 \div 40$$

Горение до “железного пика”: Fe, Co, Ni. $M_{\text{core}} \sim 1.5-2 M_{\text{sun}}$. Коллапс, SN!

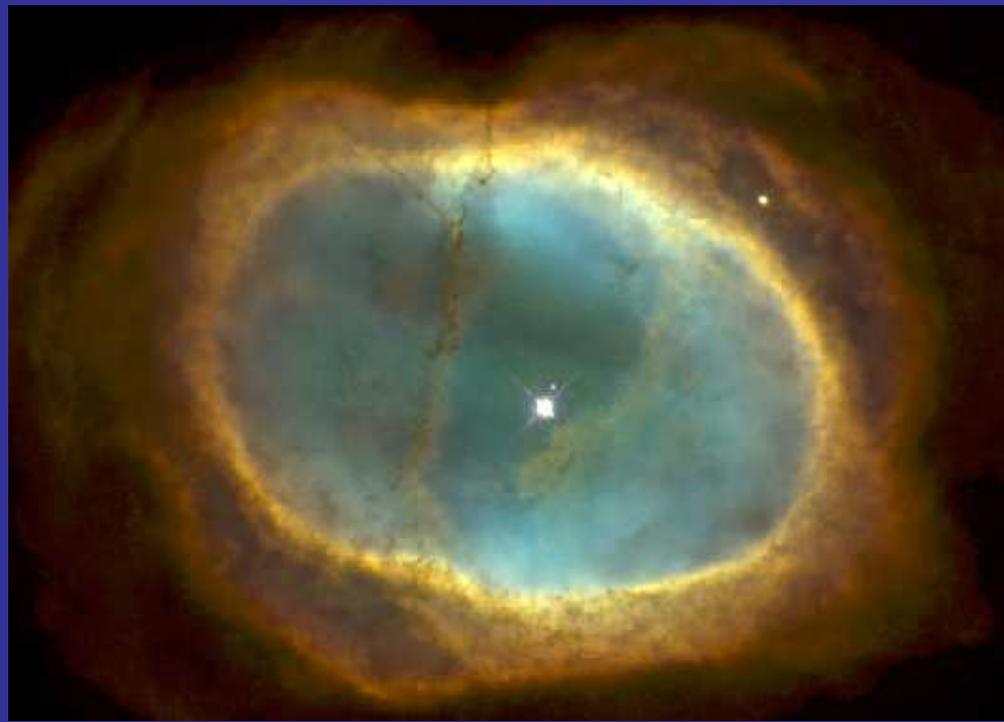
$$40 \leq M / M_{\odot}$$

“Тихий” коллапс? Гиперновая?



Планетарные туманности вокруг
белых карликов

NGC 6543, Кошачий глаз



NGC 3132

Планетарная туманность
в созвездии Паруса

Белые карлики (справка)

Гравитация – барионы, давление – вырожденные электроны



С. Чандрасекар

1. Нерелятивистские электроны

$$E_e = \frac{p_F^2}{2m_e} = \frac{(3\pi^2 n_e \hbar^3)^{2/3}}{2m_e}$$

Условие применимости:

$$E_e \leq m_e c^2 \rightarrow \rho Y_e \leq m_u \left(\frac{m_e c}{\hbar} \right)^3 \frac{2^{2/3}}{3\pi^2} \approx 2 \times 10^6 \frac{g}{cm^3}$$

$$n_e = \frac{8\pi}{h^3} \frac{p_F^3}{3}$$

Из теоремы вириала:

$$E_{\text{int}} \sim |U_{gr}|$$

$$\begin{cases} E_{\text{int}} \sim N_e E_e = \frac{M}{m_u} Y_e E_e \\ U_{gr} \sim -\frac{GM^2}{R} \end{cases}$$

$$\begin{cases} n_e = \frac{\rho}{m_u} Y_e \\ Y_e = \frac{N_p}{N_n + N_p} \end{cases}$$

$$\rho \sim \frac{M}{\frac{4\pi}{3} R^3}$$

$$\frac{GM^2}{R} \sim \frac{MY_e}{m_u m_e} \left(3\pi^2 \hbar^3 \frac{Y_e}{m_u} \frac{M}{\frac{4\pi}{3} R^3} \right)^{2/3} \rightarrow MR^3 = const$$

2. Релятивистские электроны

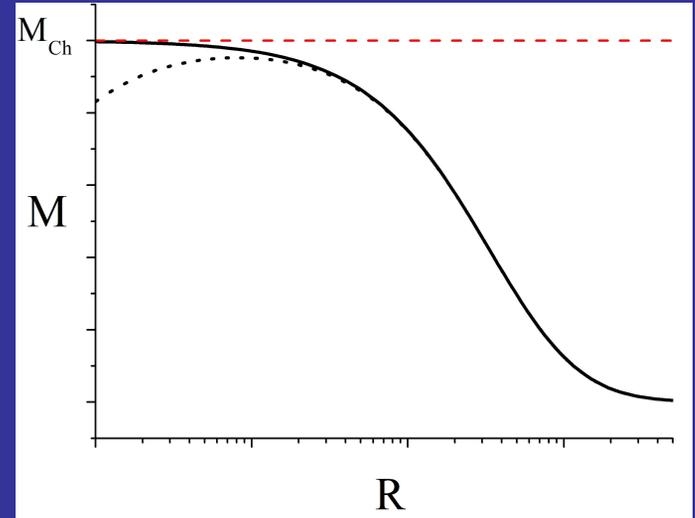
$$E_e = p_F c = (3\pi^2 n_e \hbar^3)^{1/3} c$$

$$\frac{GM^2}{R} \sim \frac{MY_e c}{m_u} \left(3\pi^2 \hbar^3 \frac{Y_e}{m_u} \frac{M}{\frac{4\pi}{3} R^3} \right)^{1/3}$$

$$M_{Ch} \approx 5.83 Y_e^2 M_{\odot}$$

$$M = M_{Ch} = \sqrt{\frac{9\pi}{4}} Y_e^2 m_u \left(\sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \frac{1}{m_u} \right)^3 \sim Y_e^2 m_u \left(\frac{m_{pl}}{m_u} \right)^3$$

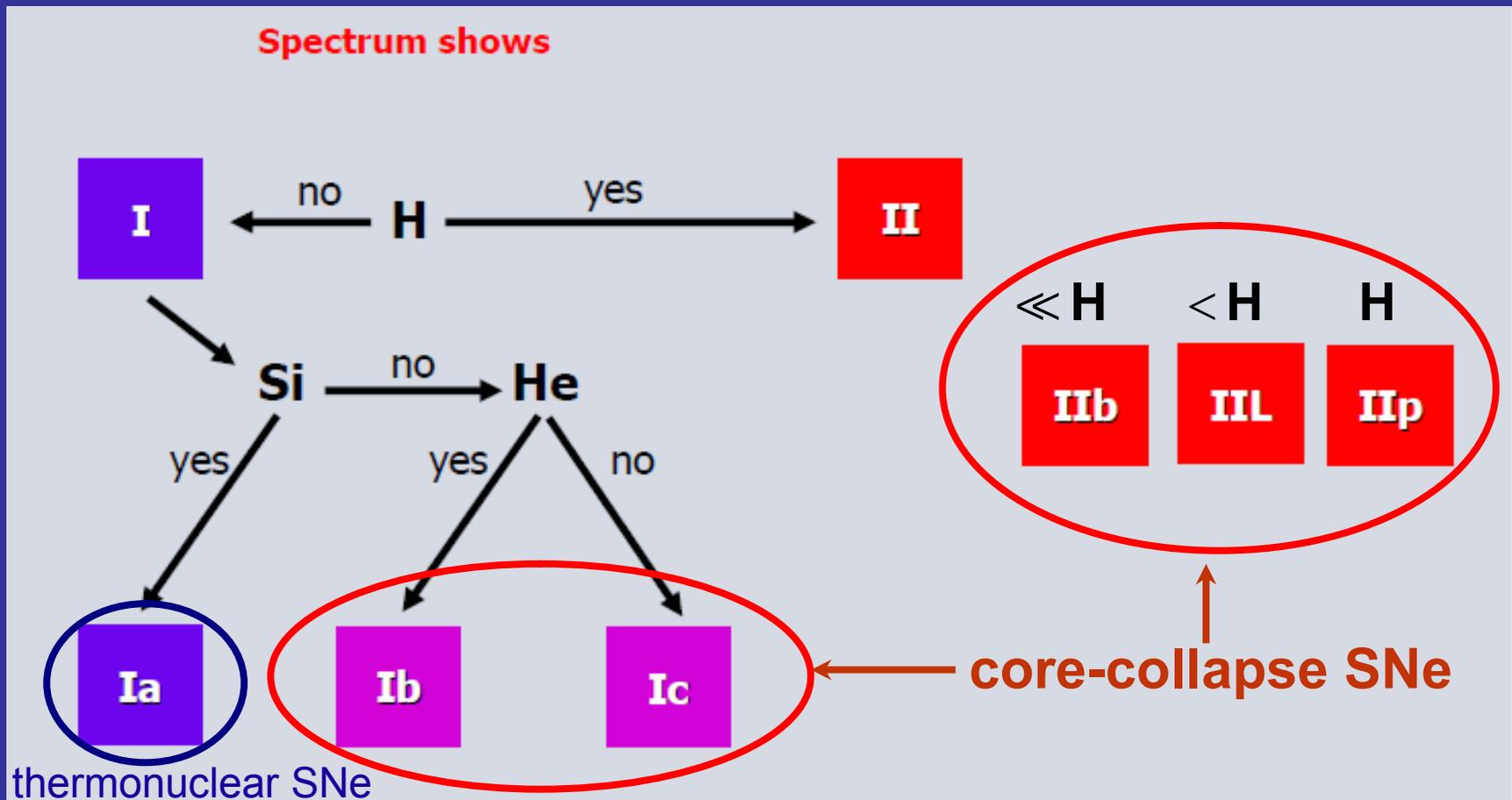
$$\begin{cases} m_{pl} \approx 2 \times 10^{-5} e \\ m_u \approx 1.6 \times 10^{-24} e \end{cases}$$



Радиус выпадает из формулы!

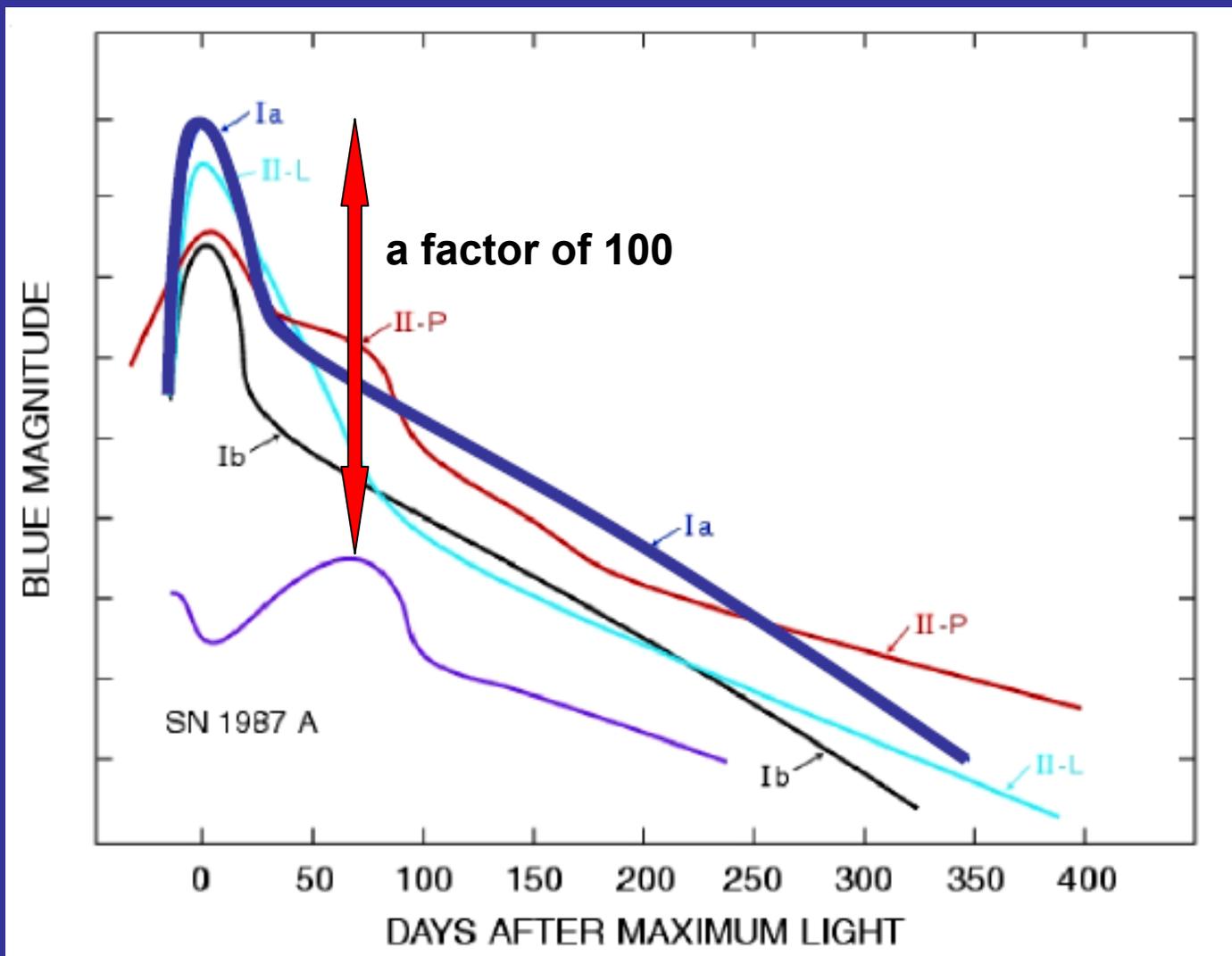
Классификация сверхновых

Overwhelming majority of information on SNe comes from observations of their spectra:
fluxes, colors, doppler shift and width of spectral lines



Adapted from: F. Röpke (<http://theor.jinr.ru/~ntaa/07/files/program.html>)

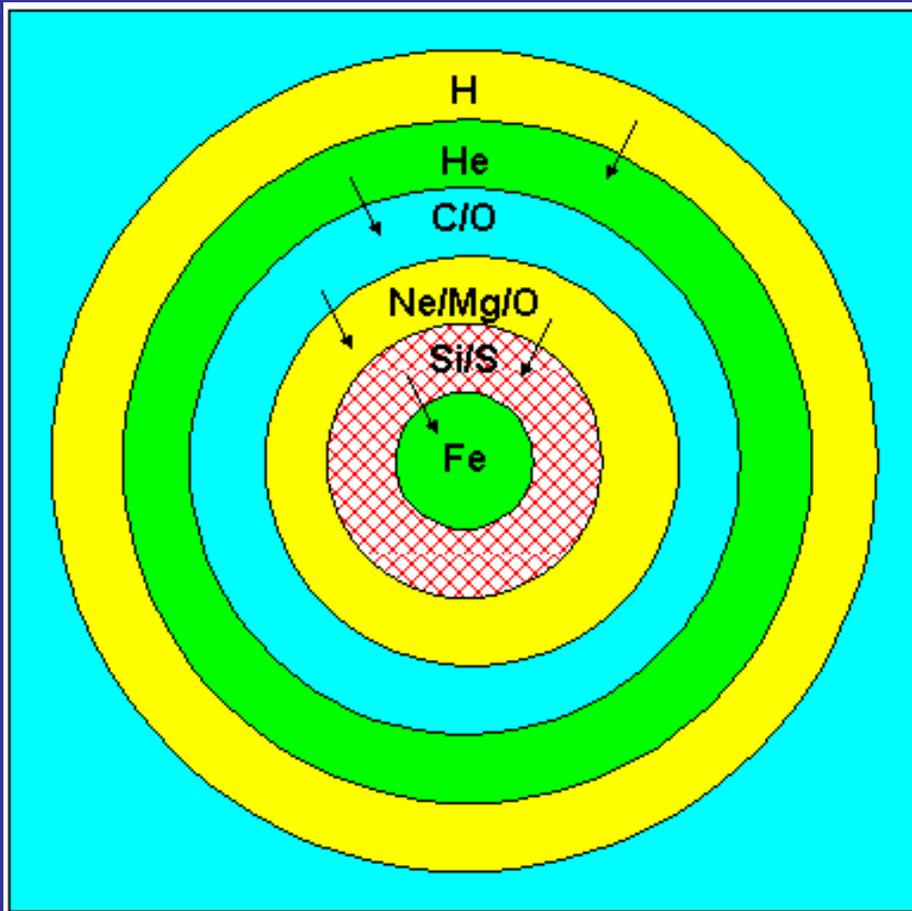
Кривые блеска сверхновых



Adapted from: F. Röpke (<http://theor.jinr.ru/~ntaa/07/files/program.html>)
A. Filippenko (Annu. Rev. Astron. Astrophys. 1997, 35, 309)

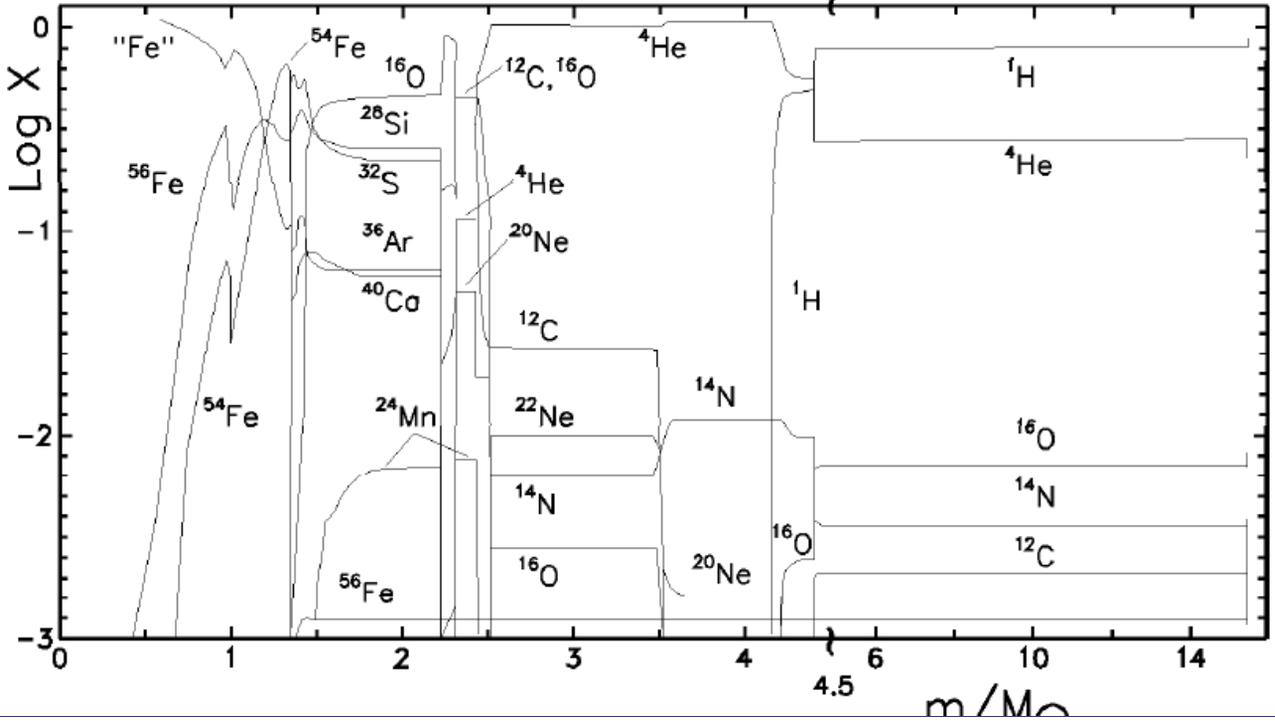
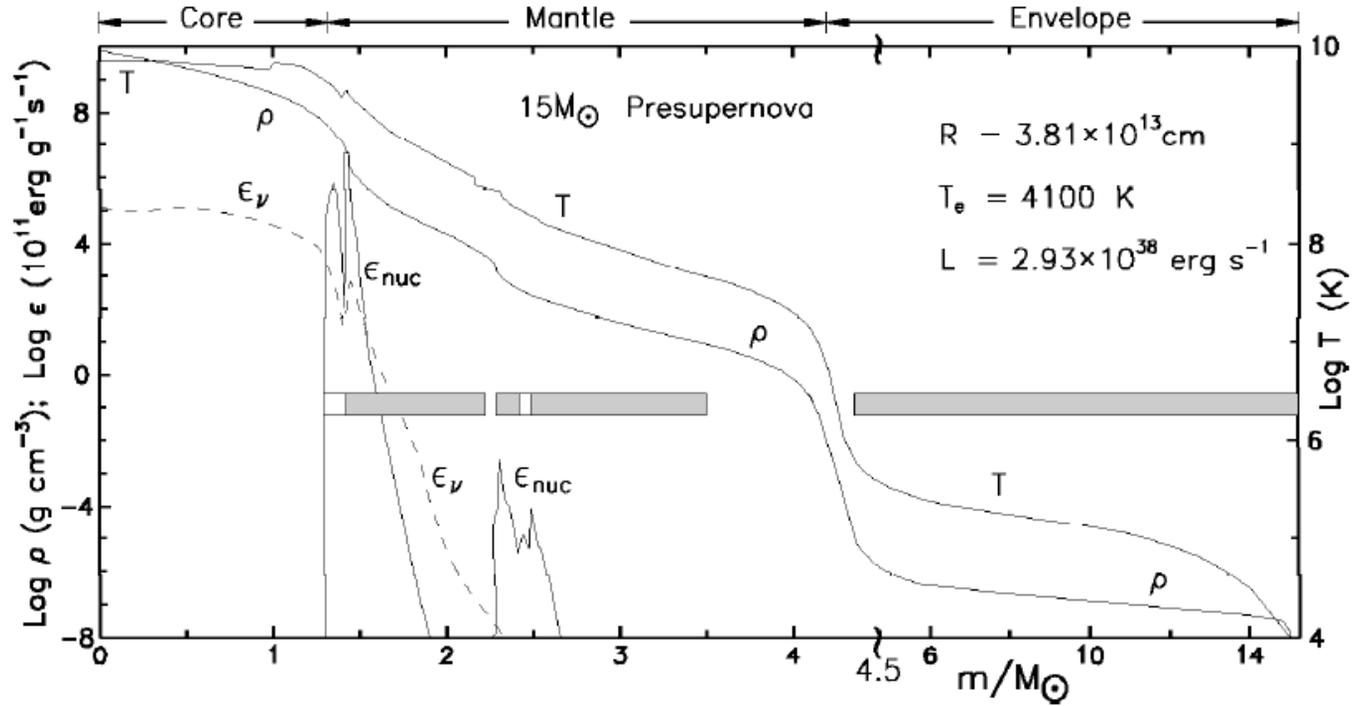
Массивная звезда на последней стадии
своей эволюции перед коллапсом

“Луковичная” структура звезды



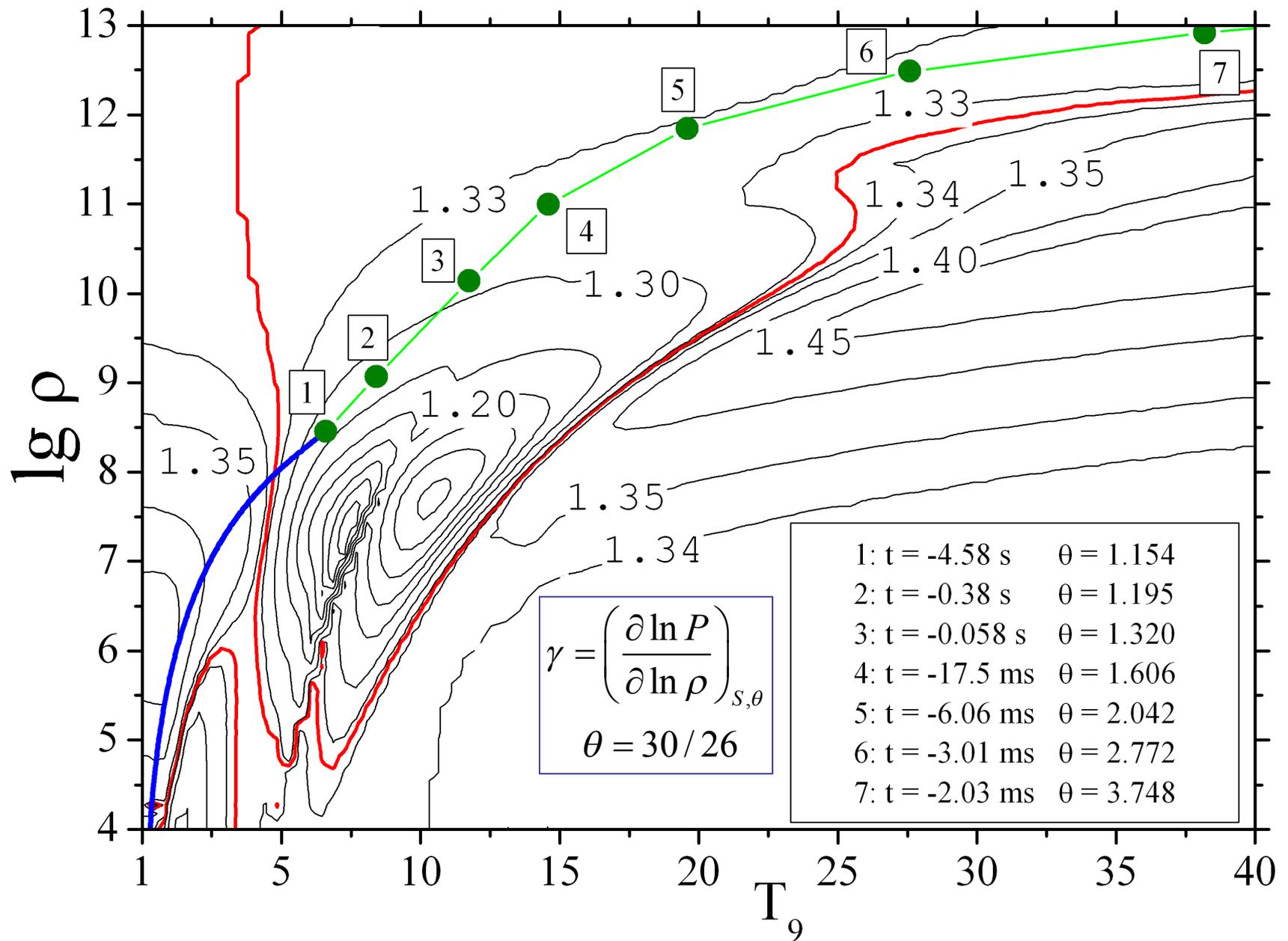
Скорость сжигания
элементов звездой в
 $15 M_{\text{sun}}$

горение водорода	10 млн. лет
горение гелия	1 млн. лет
горение углерода	300 лет
горение кислорода	200 дней
горение кремния	2 дня



Структура массивной предсверхновой

Овраг неустойчивости и трек коллапса



Уравнение состояния в условиях NSE



$$(T - \rho - \theta)$$

$$Y_i = \frac{n_i m_u}{\rho}, \quad Y_e = \frac{1}{1 + \theta}$$

$$\mu_{A,Z} = (A - Z)\mu_n + Z\mu_p$$

$$\begin{cases} Y_n + \sum_{A,Z} (A - Z) Y_{A,Z} = \frac{\theta}{1 + \theta} \\ Y_p + \sum_{A,Z} Z Y_{A,Z} = \frac{1}{1 + \theta} \end{cases}$$

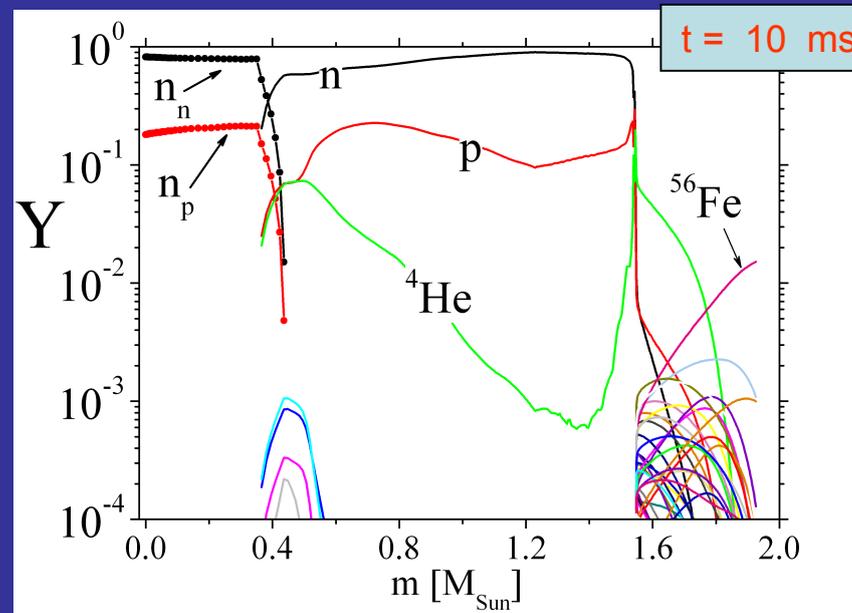
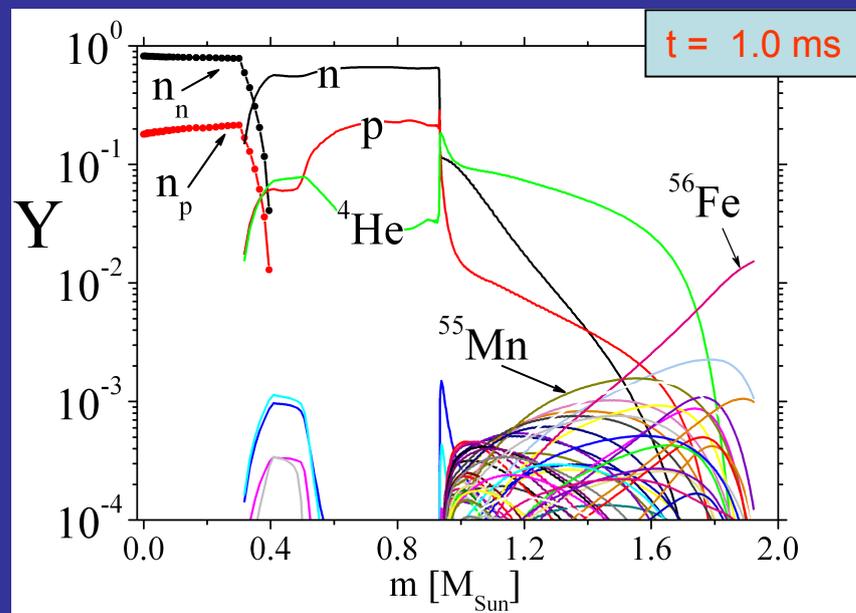
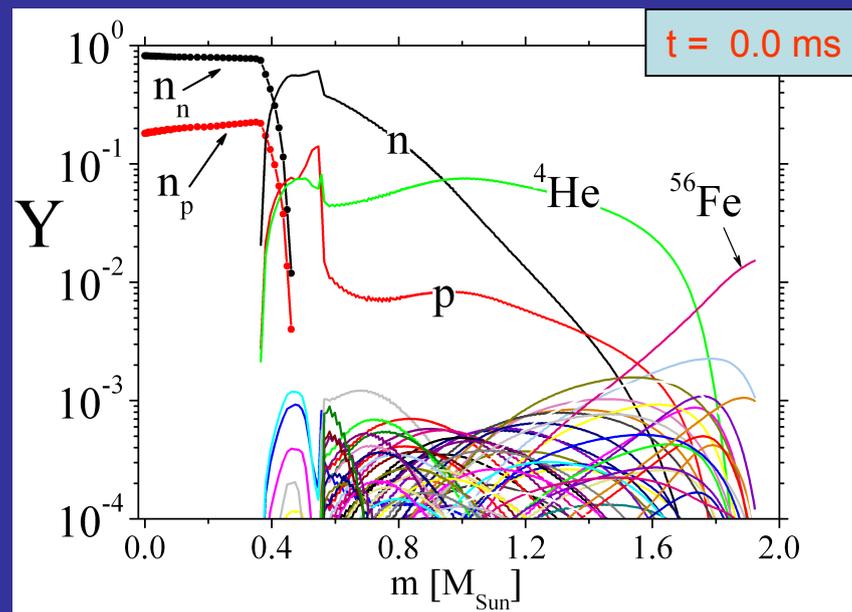
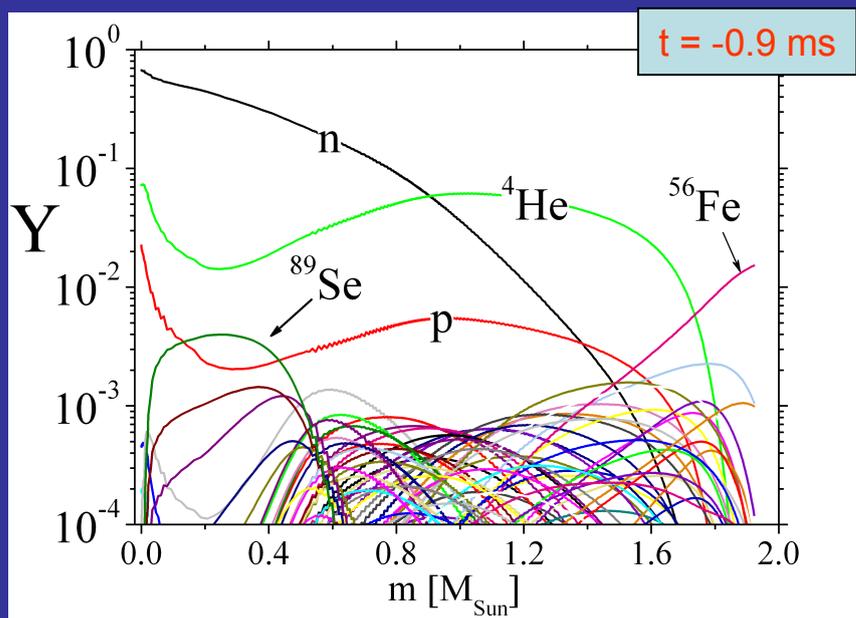
$$Y_{A,Z} = \omega_{A,Z} \mu_{A,Z}^{3/2} \frac{m_u}{\rho \lambda_T^3} \exp \left[(A - Z)\psi_n + Z\psi_p + \frac{Q_{A,Z}}{kT} \right]$$

Nuclides taken into account

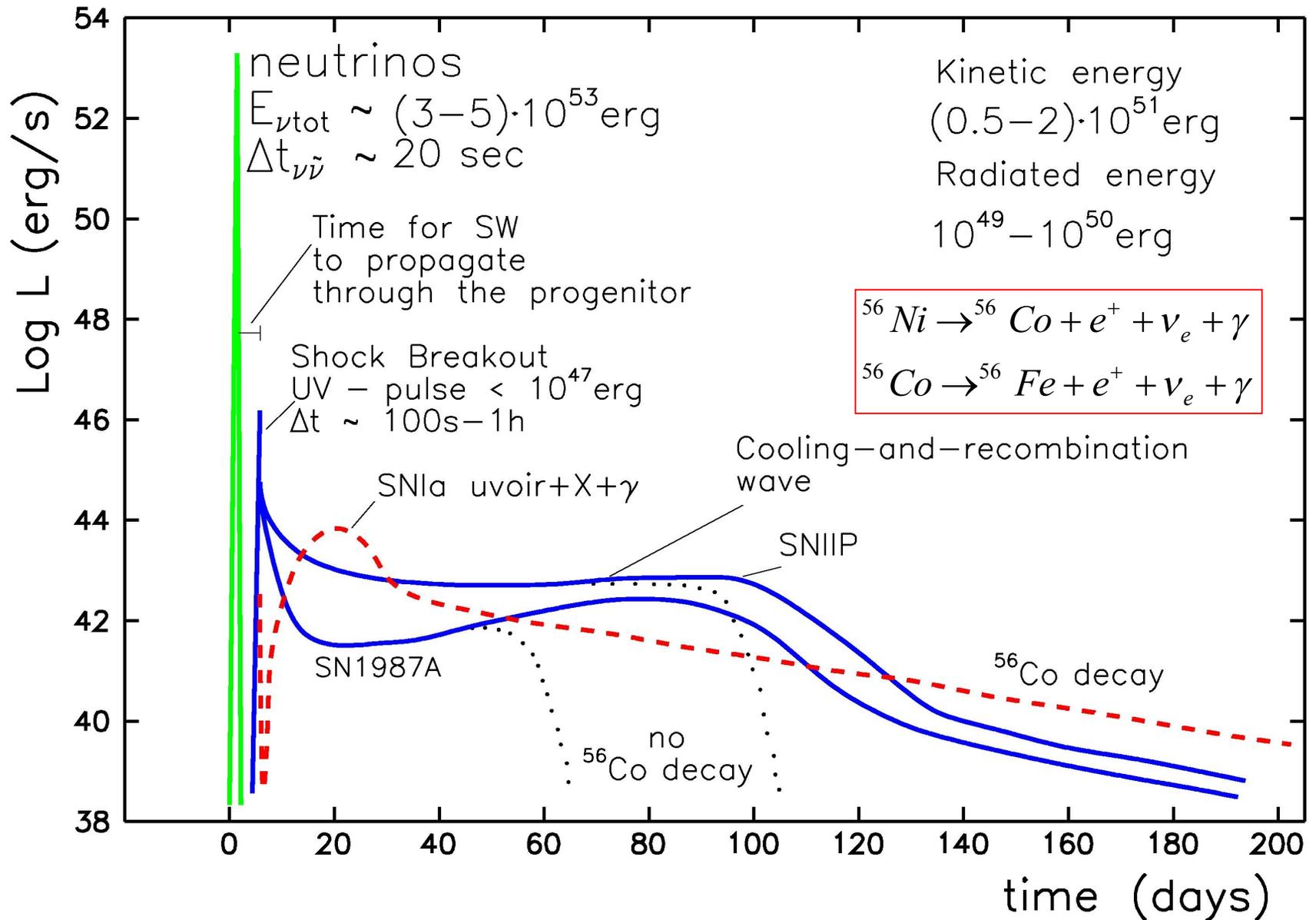
Z	A	I_{gs}	N_{ex}	Z	A	I_{gs}	N_{ex}		
He	2	4	0	15					
C	6	12	0	55					
O	8	16	0	75					
Ne	10	20	0	131					
Mg	12	24	0	94					
Si	14	28	0	188					
S	16	32	0	25					
Ar	18	36	0	33					
Ca	20	40,41,42	0, 3.5, 0	98, 28, 107	Fe	26	52,53,54	0, 3.5, 0	20, 21, 50
		43,44,45	3.5, 0, 3.5	73, 71, 41			55,56,57	1.5, 0, 0.5	42, 111, 65
		46,47,48*	0, 3.5, 0	46, 15, 10			58,59,60	0, 1.5, 0	66, 40, 24
Sc	21	43,44,45	3.5, 2, 3.5	66, 56, 85			61,62	1.5, 0	4, 10
		46,47,48	4, 3.5, 6	96, 41, 46	Co	27	55,56,57	3.5, 4, 3.5	72, 26, 94
		49	3.5	1			58,59,60	2, 3.5, 5	92, 73, 105
Ti	22	44,45,46	0, 3.5, 0	26, 24, 104			61,62,63	3.5, 2, 3.5	29, 15, 6
		47,48,49	2.5, 0, 3.5	66, 218, 35			64,65	1, 3.5	8, 1
		50,51	0, 1.5	39, 13	Ni	28	56,57,58	0, 1.5, 0	22, 2, 30
V	23	47,48,49	1.5, 4, 3.5	21, 52, 79			59,60,61	1.5, 0, 1.5	68, 82, 76
		50*,51,52	6, 3.5, 3	65, 109, 30			62,63,64	0, 0.5, 0	67, 12, 64
		53	3.5	22			65,66	2.5, 0	10, 20
Cr	24	48,49,50	0, 2.5, 0	17, 11, 79	Cu	29	61,62,63	1.5, 0, 1.5	58, 65, 80
		51,52,53	3.5, 0, 1.5	100, 86, 65			64,65,66	1, 1.5, 1	90, 19, 18
		54,55,56	0, 1.5, 0	61, 31, 21			67,68,69	1.5, 1, 1.5	2, 3, 6
		57	1.5	1	Zn	30	64,65,66	0, 2.5, 0	101, 15, 98
Mn	25	51,52,53	2.5, 6, 3.5	44, 41, 65			67,68,69	2.5, 0, 0.5	29, 50, 27
		54,55,56	3, 2.5, 3	52, 90, 78			70	0	22
		57,58,59	2.5, 1, 1.5	33, 17, 2	Ga	31	69,71	1.5, 1.5	17, 15
					Ge	32	70,71,72	0, 0.5, 0	115, 58, 112
							73,74,75	4.5, 0, 0.5	8, 137, 49
							76*	0	68
					As	33	71,75	2.5, 1.5	24, 58
					Se	34	74,76,78	0, 0, 0	56, 91, 95
							80,82*,83	0, 0, 4.5	53, 18, 10
							84,85,86	0, 2.5, 0	20, 1, 1
							87,88,89	2.5, 0, 2.5	1, 1, 1
					Br	35	79,81	1.5, 1.5	53, 42
					Kr	36	78,80,82	0, 0, 0	53, 23, 28
							83,84,86	4.5, 0, 0	24, 31, 7

* Stable nuclides are in bold. Formally, the isotopes ${}^{48}\text{Ca}$, ${}^{50}\text{V}$, ${}^{76}\text{Ge}$, and ${}^{82}\text{Se}$ are unstable. Their half-decay lives are 5.1×10^{19} y, 1.5×10^{17} y, 1.09×10^{21} y, and 1.21×10^{20} y, respectively.

Образование ударной волны в коллапсирующем ядре звезды



Schematic Supernova «light curves»



Происхождение элементов за “железным” пиком:

1. s-процесс (slow)

$$\tau_{\beta} \ll \tau_{(n,\gamma)}$$

Медленный процесс захвата нейтронов (n,γ) до радиоактивного ядра, затем β -распад
Место: оболочки красных гигантов, $t \sim 1000$ лет

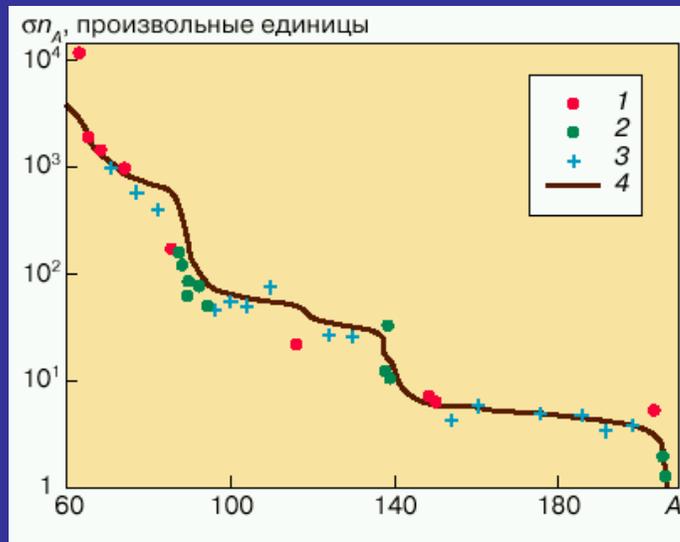
поток нейтронов

$$\frac{dn_{A,Z}}{dt} = f_n (n_{A-1,Z} \sigma_{A-1,Z} - n_{A,Z} \sigma_{A,Z}),$$

$$\frac{dn_{A,Z}}{dt} \approx 0 \rightarrow n_{A-1,Z} \sigma_{A-1,Z} = n_{A,Z} \sigma_{A,Z}$$

S-процесс идёт вдоль долины стабильности $N \sim Z$

Образование элементов вплоть до $Z=82$ (Pb), $Z=83$ (Bi) **ПРЕДЕЛ!**

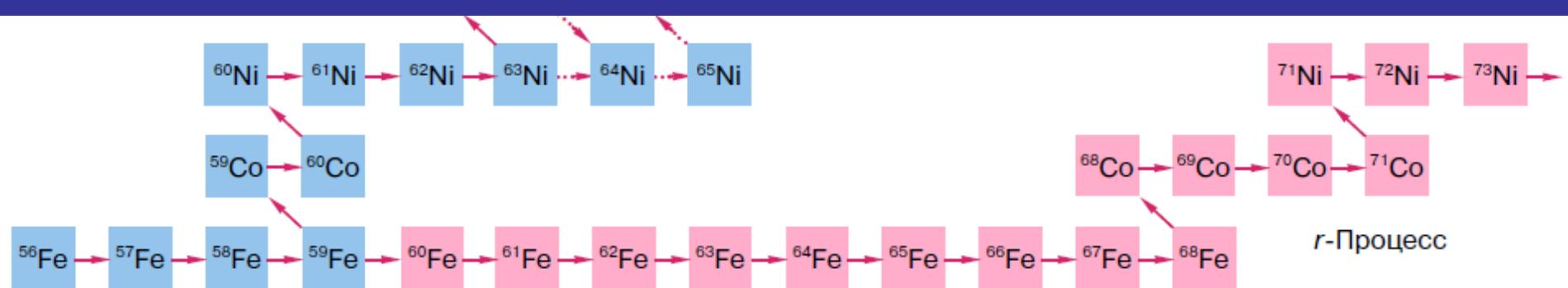
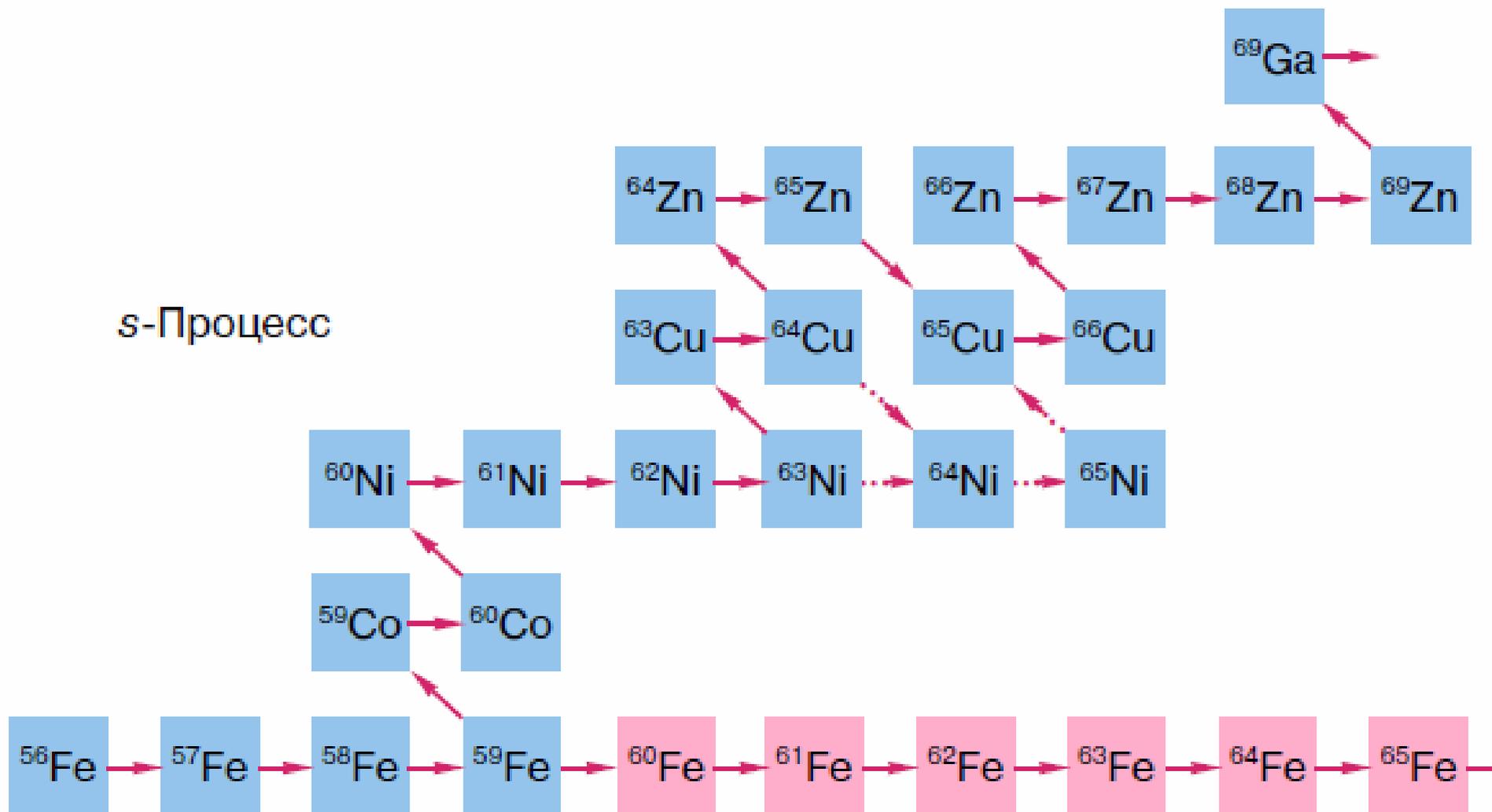


2. r-процесс (rapid)

$$\tau_{\beta} \gg \tau_{(n,\gamma)}$$

Быстрый процесс захвата нейтронов при катастрофических явлениях: взрывы сверхновых, слияние нейтронных звезд, ...?

s-Процесс

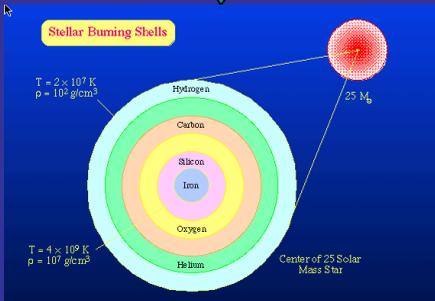


r-Процесс

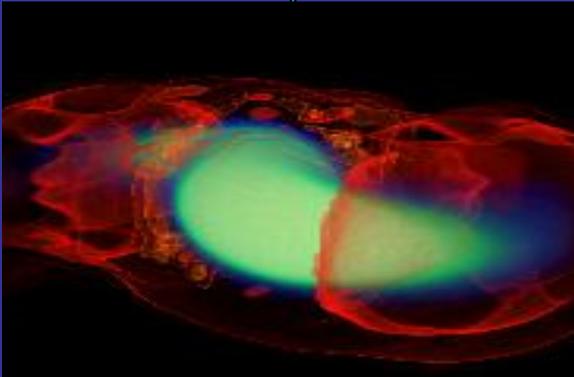
"Sites" for *r*-Process Nucleosynthesis

Identification of the *r*-process sites remains a major challenge.

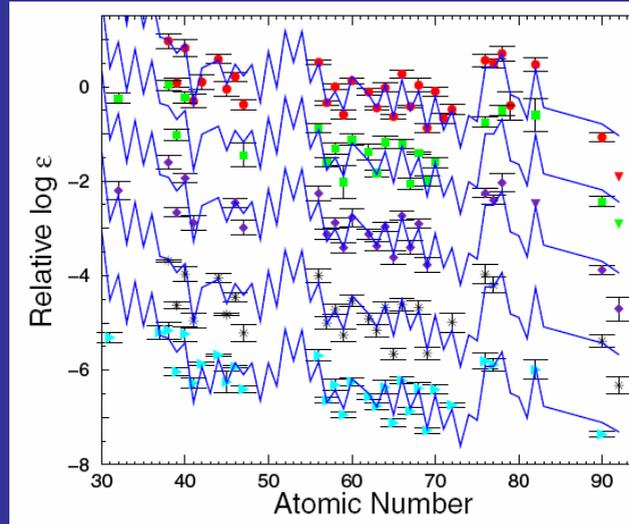
Helium Shells of SNe II



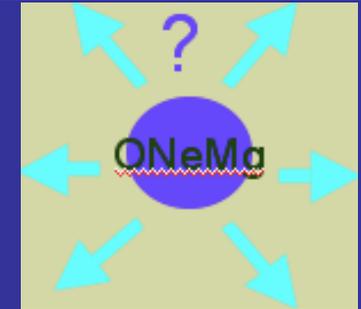
Neutron Star-Neutron Star Collisions



Nuclear structure
Masses and rates
fission barriers



Low Mass (Prompt Expl.) SNe II



ν -Driven Winds SNe II

