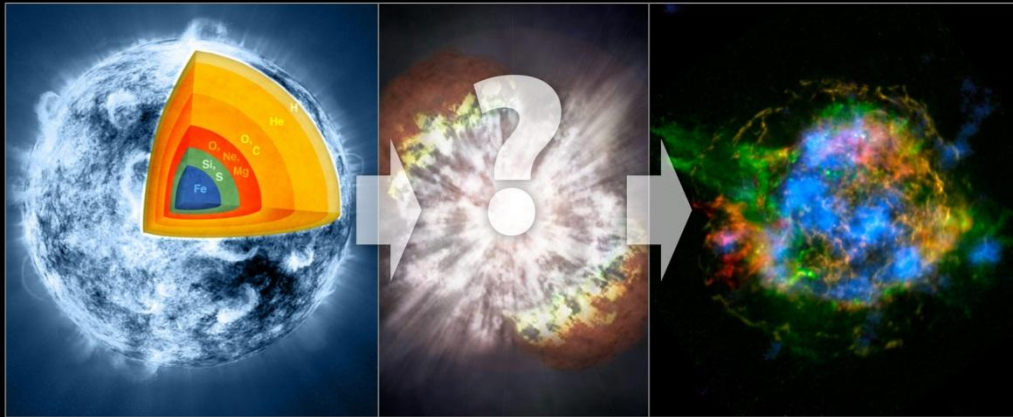
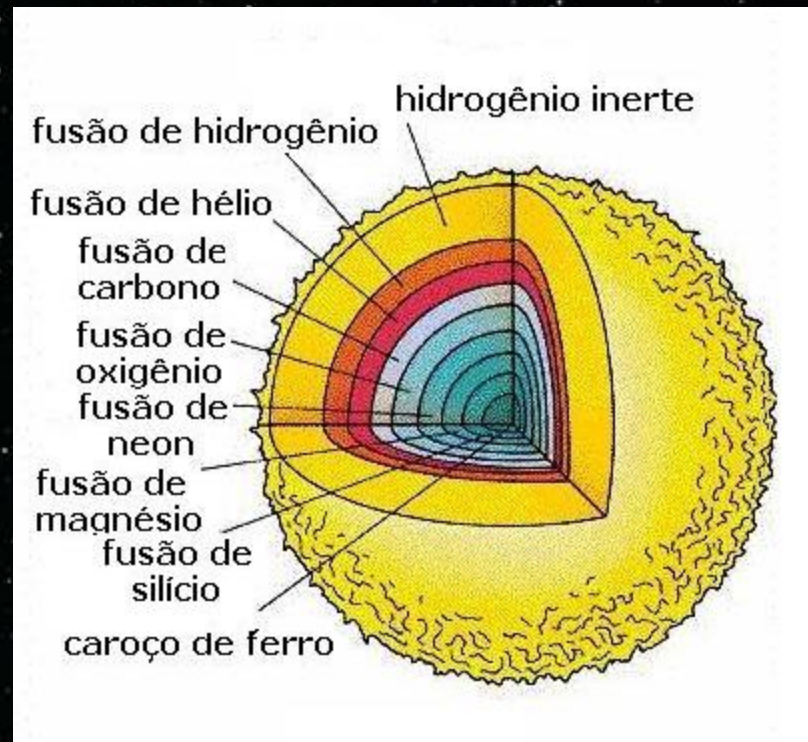
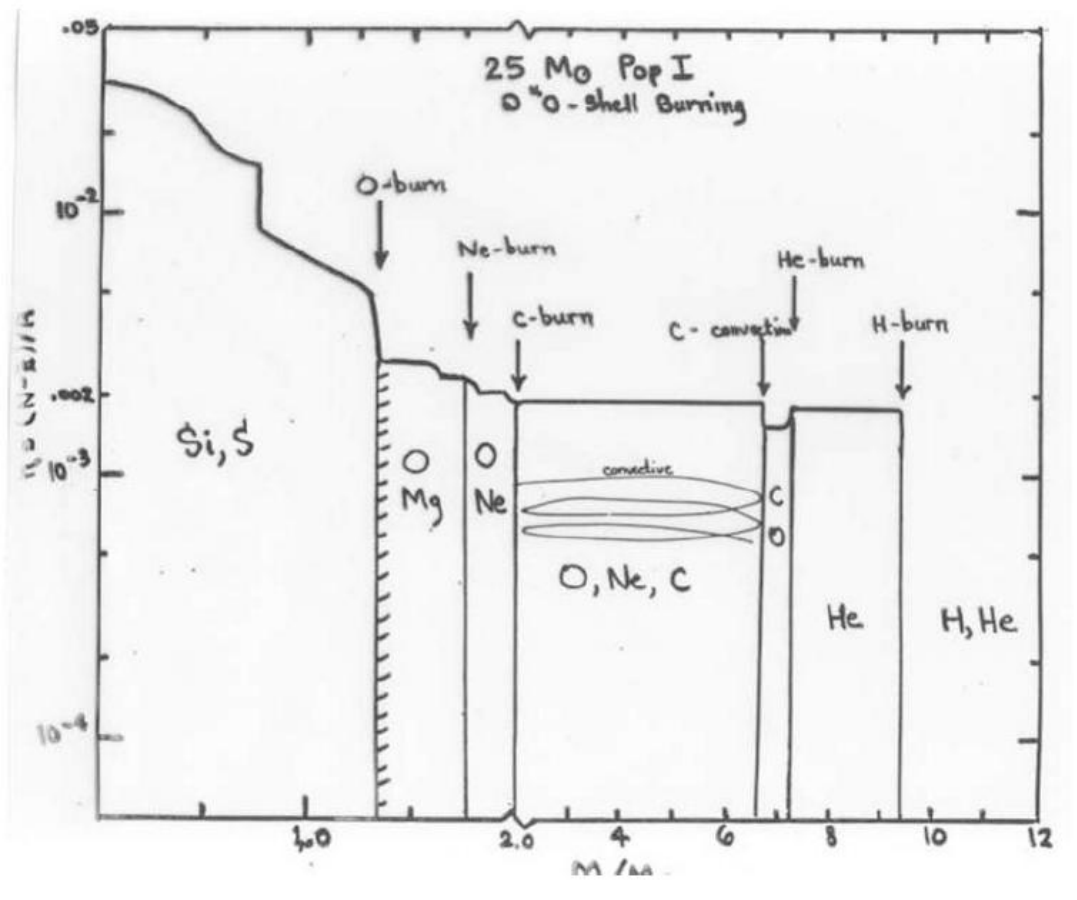


Colapsos e supernovas

J.E. Horvath
IAG-USP





Combustível	Produtos	Temperatura da ignição	Massa mínima para a ignição (M_{\odot})	Duração numa estrela de 25 M_{\odot}
H	He	4 10^6 K	0.1 M_{\odot}	7 10^6 anos
He	C, O	120 10^6 K	0.4 M_{\odot}	0.5 10^6 anos
C	Ne, Na, Mg, O	600 10^6 K	4 M_{\odot}	600 anos
Ne	O, Mg	1.2 10^9 K	8 M_{\odot}	1 anos
O	Si, S, P	1.5 10^9 K	8 M_{\odot}	0.5 anos
Si	Ni to Fe	2.7 10^9 K	8 M_{\odot}	1 dias

O caroço de “Fe”

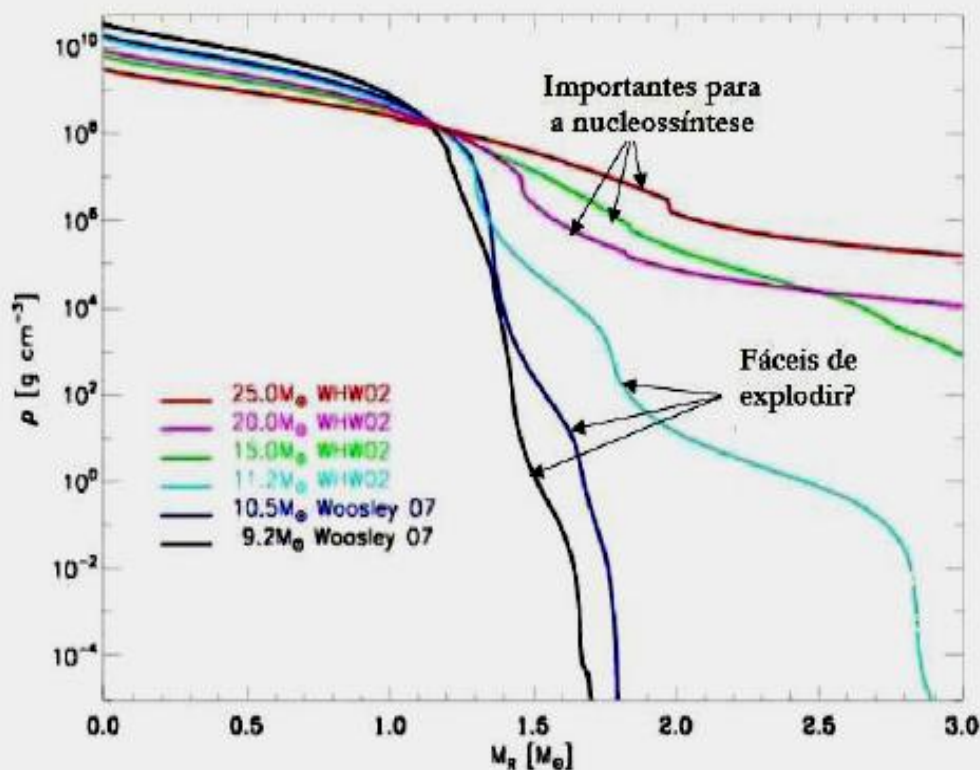
Inicialmente

$$\rho_c \cong 5 \times 10^9 \text{ g cm}^{-3} ; T_c \cong 0.7 \text{ MeV} ; Y_e \cong 0.4$$

Suportado pelos **elétrons degenerados**

$$P = \frac{1}{4} n_e \mu_e \left(1 + \frac{2}{3} \left(\frac{\pi T}{\mu_e} \right)^2 \right)$$

$$P = K \rho^\Gamma$$



A massa de Chandrasekhar pode ser calculada exatamente e resulta:

$$M_{Ch} = 1.46 \left(\frac{Y_e}{0.5} \right)^2 M_\odot \propto K^{3/2} \rho^{\frac{3\Gamma}{2}-2}$$

Há correções coulombianas, relativísticas, temperatura finita, etc. etc.

Mas é importante determinar a massa do caroço quando começa a colapsar

Há dois efeitos que desestabilizam o caroço : a captura eletrônica
 $e^- + A \rightarrow A - 1.$ que retira elétrons da distribuição, e com isso
diminui a pressão que suporta o caroço

e a fotodesintegração do “Fe”

Para $T > 6 - 7 \times 10^9 K$ \longrightarrow ${}^{56}\text{Fe} \rightarrow 13\alpha + 4n$

que consome energia ($q_{des} = -1.710^{18} \text{ erg } g^{-1}$) e acelera o colapso

Trapping (retenção?) dos neutrinos no caroço em colapso

$$e^+ + e^- \rightarrow \nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$$

$$\nu + {}^Z A \rightarrow \nu + {}^Z A$$

Ainda que os neutrinos tem uma seção de choque 20 ordens de grandeza menor que a eletromagnética, da ordem de

$$\sigma_0 = 1.5 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$$

O caroço em colapso quando chega a ter um raio de uns $R \approx 10^6 \text{ cm}$ retém os neutrinos, já que se escrevermos a “opacidade” aos neutrinos,

$$\kappa_{coe} = \frac{n\sigma}{\rho} = 2.6 \times 10^{-20} \left(\frac{A}{56}\right) \left(\frac{\varepsilon_\nu}{\text{MeV}}\right)^2 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

A condição de *trapping*: $\kappa_{coe} \rho R \approx 1$ para $R \approx 10^6 \text{ cm}$ \longrightarrow $\rho \approx 4 \times 10^{11} \text{ g cm}^{-3}$

Acima desta densidade (isto é, depois desse instante) o número de léptons total $Y_L = Y_e + Y_\nu$ permanece *constante* e igual ao valor no ponto de trapping

$$Y_L = Y_e \approx 0.37$$

Homologia, o caroço interno e caroço externo

$$\frac{u}{r} = \frac{\dot{\alpha}}{\alpha} = \text{constante}$$

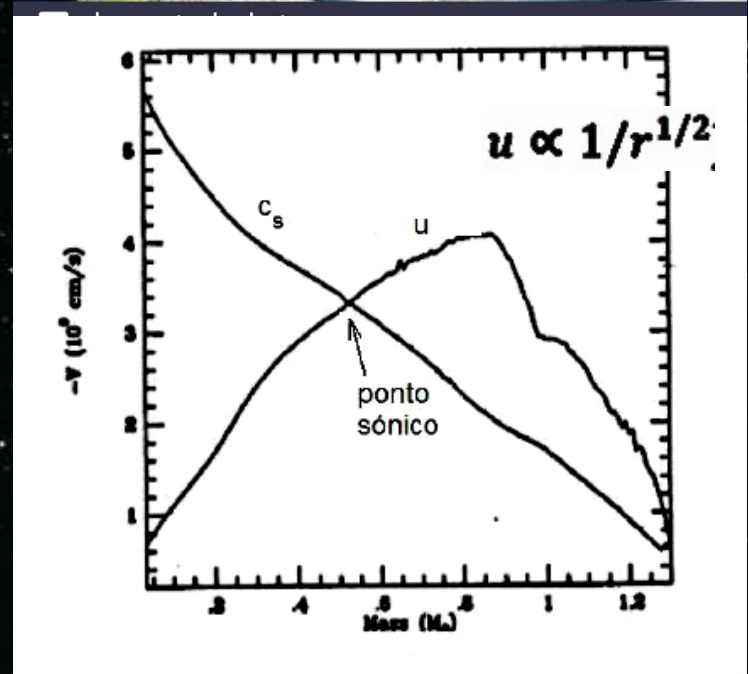
Ponto sônico $u + c_s = 0$

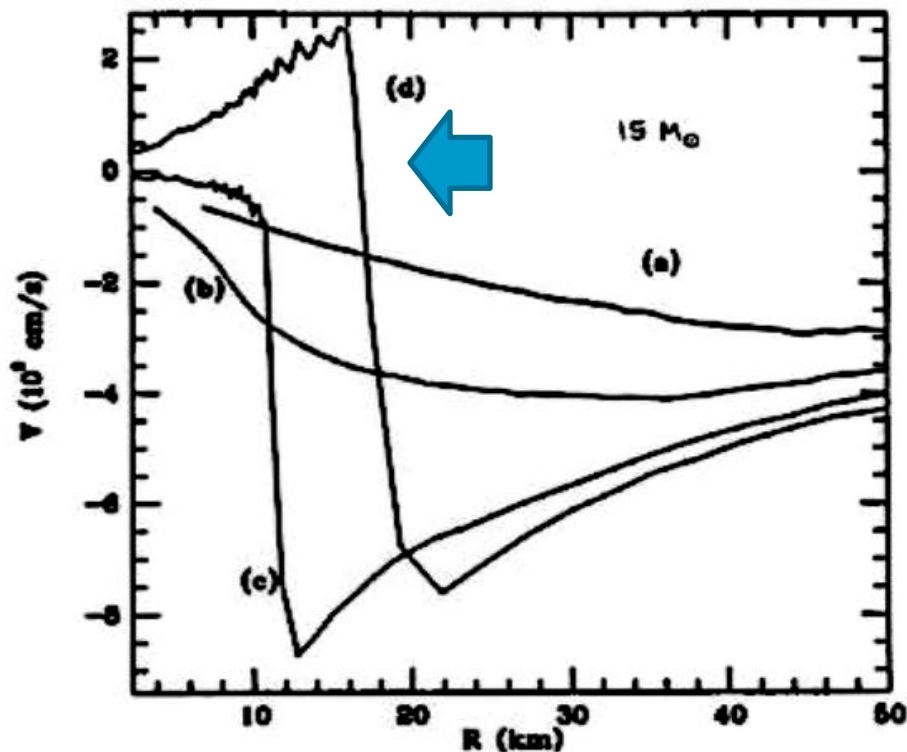
Assim que atingida a densidade de saturação nuclear

nuclear $\rho_0 = 2.7 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$

Adeus homologia (muro rijo!)

As ondas de pressão se acumulam no ponto sônico e formam um *choque*





	ρ_c
a)	4.8×10^{13}
b)	2.6×10^{14}
c)	9.7×10^{14}
d)	6.9×10^{14}

Figure 16: Velocity profiles at various times

The velocity profiles are taken from the collapse of the $15 M_{\odot}$ model of Woosley and Weaver (1988). Time (a) is at last good homology, time (b) when the center has gone above nuclear matter density and the homology is broken, time (c) is at maximum scrunch, and time (d) is when the shock wave has been launched.

O choque se forma no ponto sônico com energia

$$E_{\text{choque}} \cong E_{\text{ligCI}} \cong Y_L^{10/3} = 4 - 7 \times 10^{51} \text{ erg}$$

onde $Y_L \approx 0.33$

(daí que é importante o valor no momento do *trapping*!)

E seria suficiente para explosão não fosse porque...

...precisa fotodesintegrar os núcleos a caminho da borda do caroço

por cada $0.1 M_{\odot}$



$1.8 \times 10^{51} \text{ erg}$

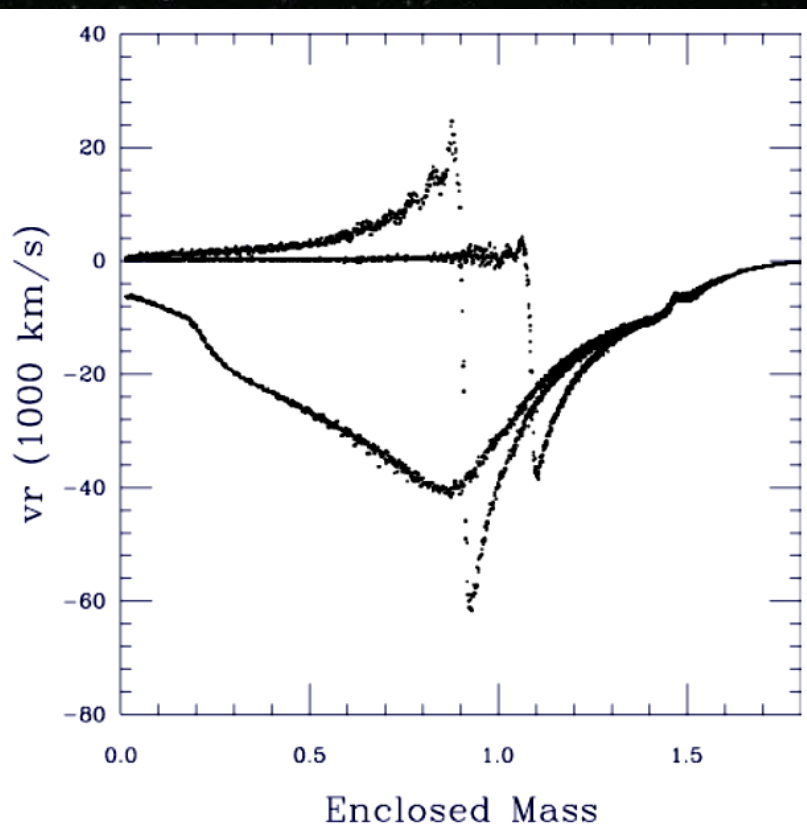
são perdidos!

...quando chega nas regiões onde $\rho \sim 10^{12} \text{ g cm}^{-3}$ os neutrinos levam embora mais energia do choque



O choque para em $r \sim 200\text{-}300 \text{ km}$!

($t \sim 10 \text{ ms}$)



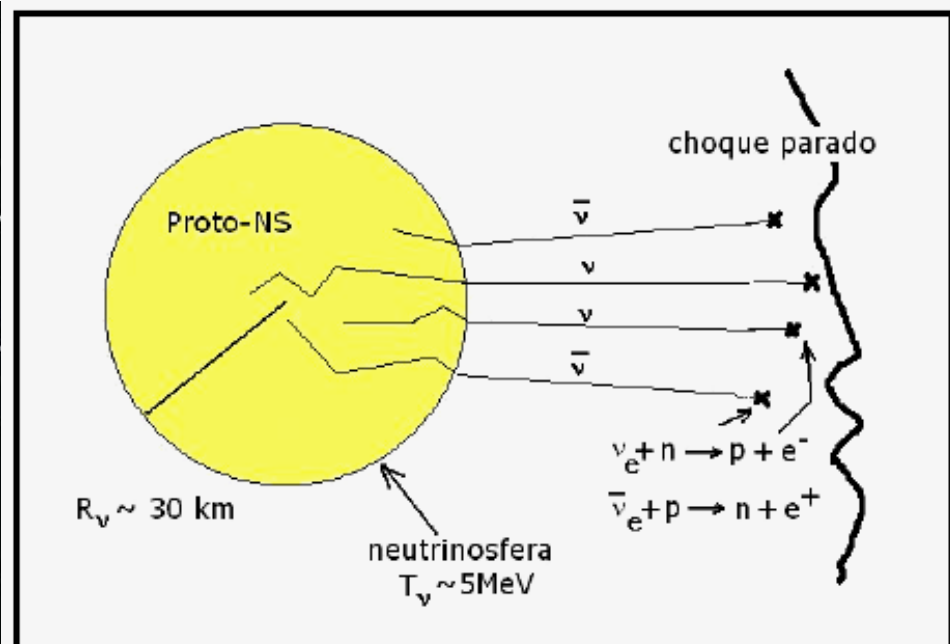
Felizmente o caroço está cheio de neutrinos (térmicos)

como os neutrinos são os que levam a energia de ligação embora, sabemos que há $\approx 10^{53} \text{ erg}$ guardados, 1% disto é suficiente para as explosões...

A $\langle E_\nu \rangle \approx 10 \text{ MeV}$ e elevada opacidade aos neutrinos (!) indicam que estão no regime de difusão, forma-se uma **neutrinosfera** com

$$L_\nu = \frac{7}{4} (4\pi R_\nu^2) (\sigma T_\nu^4) \approx 10^{53} \left(\frac{R_\nu}{30 \text{ km}} \right)^2 \left(\frac{T_\nu}{4 \text{ MeV}} \right)^4 \text{ erg}$$

Férmions !



Evolução dos neutrinos na aproximação de difusão

$$\rho \frac{\partial Y_L}{\partial t} = \frac{1}{3r^2} \frac{\partial [r^2 c \lambda_\nu (\partial(\rho Y_L)/\partial r)]}{\partial r}$$



$$\frac{\partial Y_\nu}{\partial t} = \frac{c \tilde{\lambda}_\nu}{3r^2} \frac{\partial [r^2 Y_\nu^{-2/3} (\partial Y_\nu / \partial r)]}{\partial r}$$

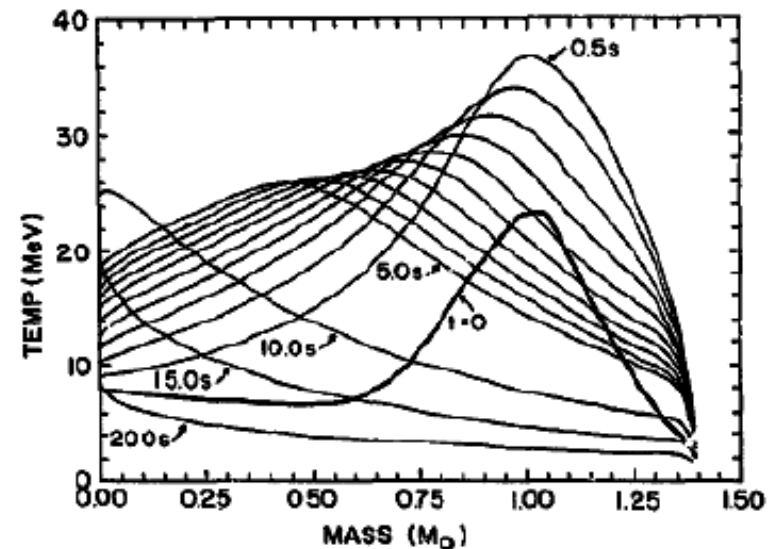
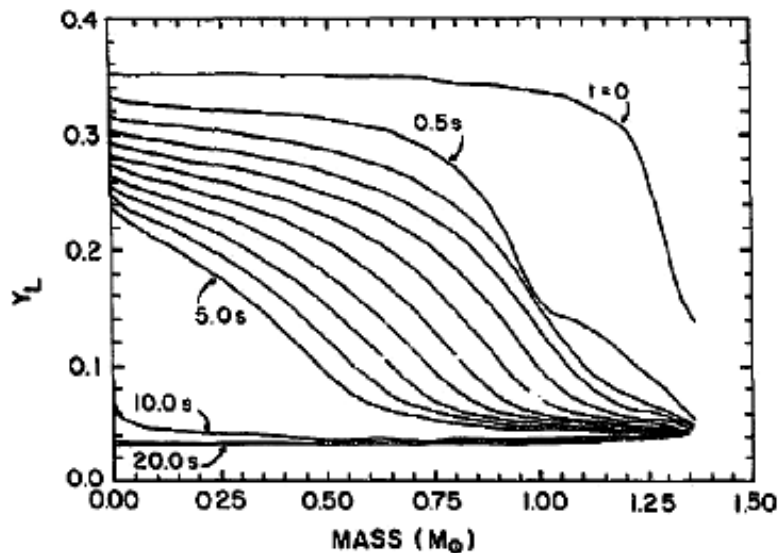
$$(Y_L = Y_\nu)$$

$$\tilde{\lambda}_\nu = \lambda_\nu Y_\nu^{2/3}$$

Com solução (analítica)

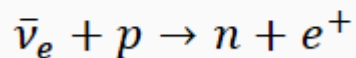
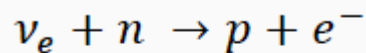
$$\frac{Y_\nu}{Y_{\nu 0}} = \left[e^{t/\tau} + \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right]^{-3/2}$$

$$\tau = \frac{r_0^2}{2c\tilde{\lambda}_\nu} \approx 2 \text{ s}$$



Captura de neutrinos (entre a neutrinosfera e o choque parado)

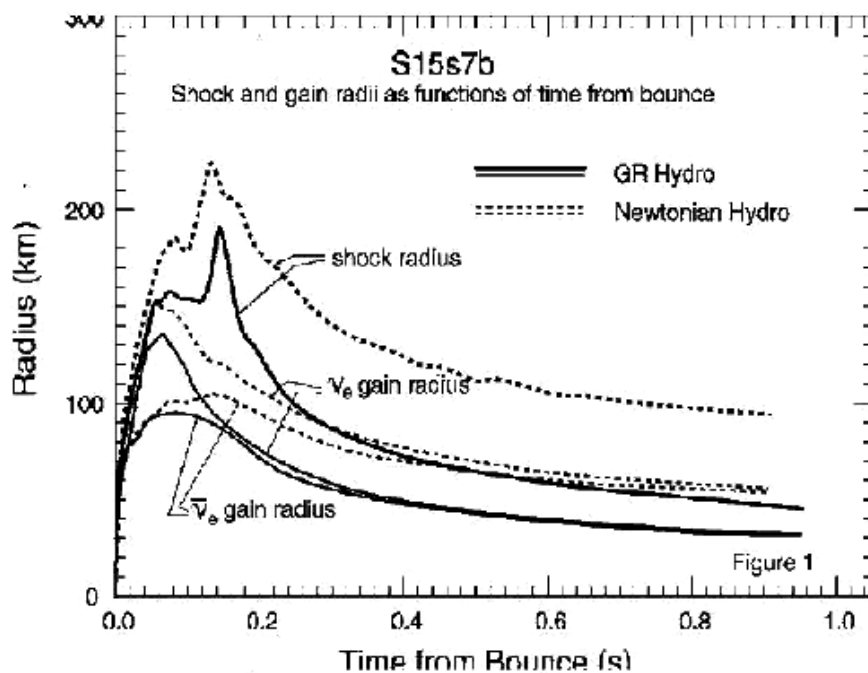
Revivendo o choque?



A taxa efetiva de captura

$$\dot{Q} \approx F_\nu \sigma_{\nu n} \langle E_\nu \rangle \approx \frac{L_\nu}{\langle E_\nu \rangle} \langle E_\nu^3 \rangle$$

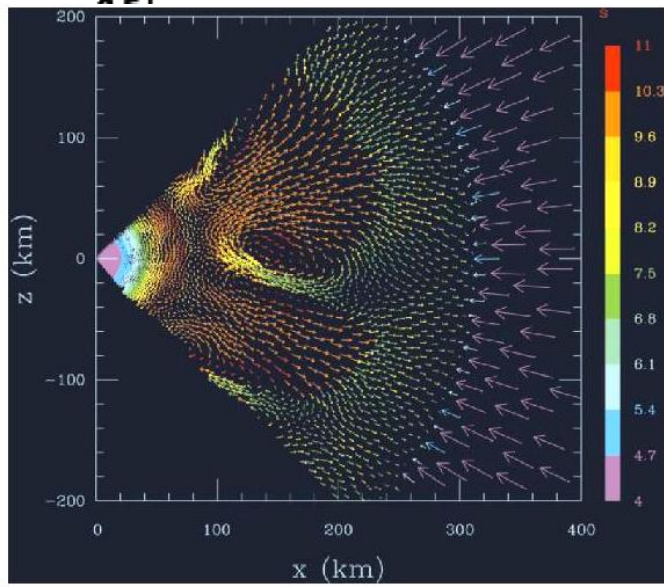
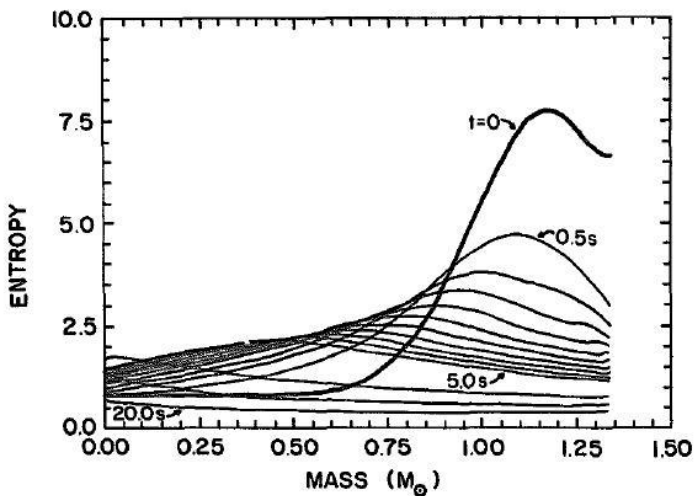
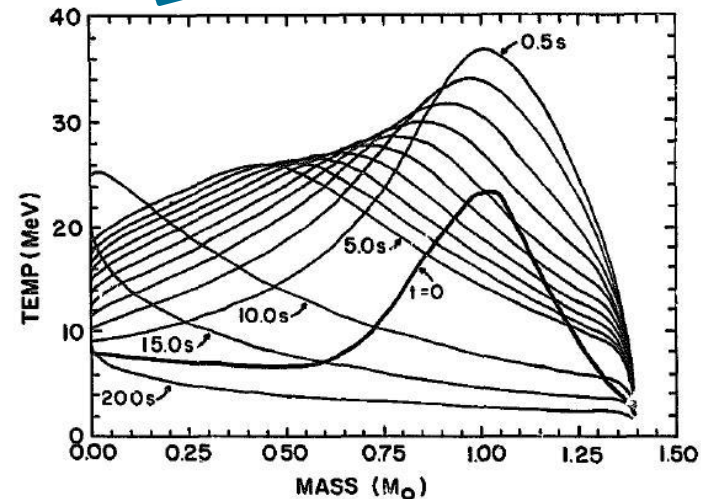
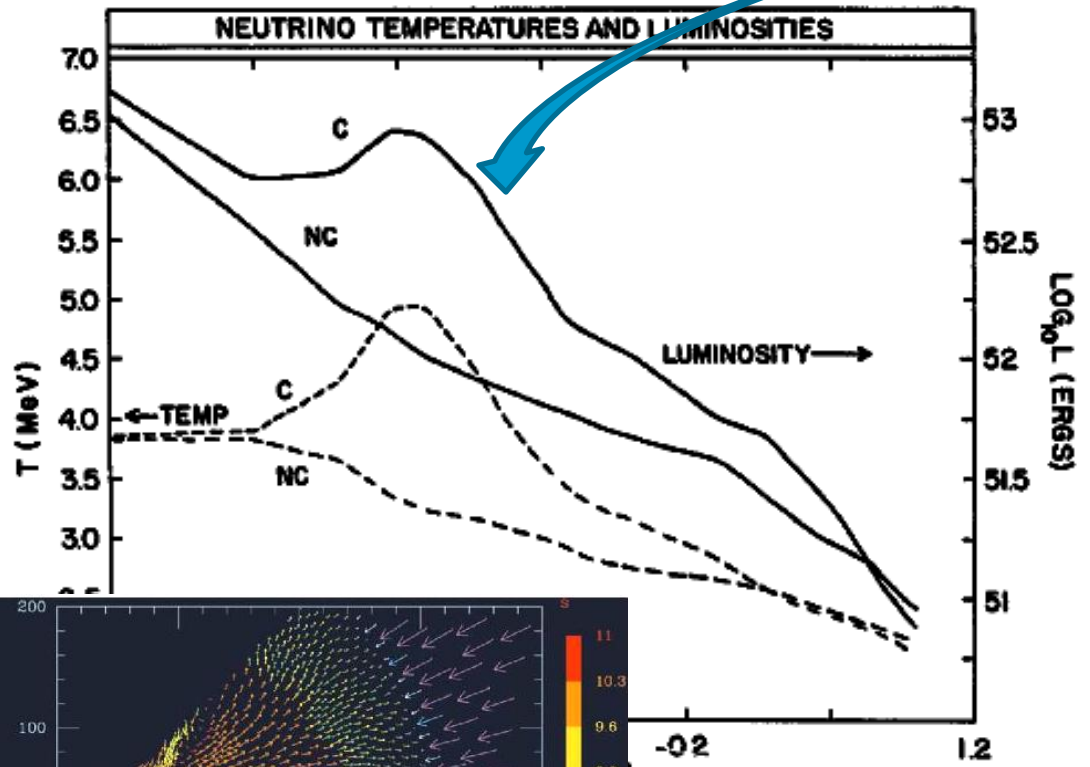
Sensível à forma do espectro e a energia média



NÃO estamos falando de transferir energia para o choque como causa da explosão, mas de criar condições para que aquele “reviva”

SN → Vento de neutrinos que arrastra o envelope

Convecção no caroço? For a da neutrinosfera? Instabilidades de R-T?

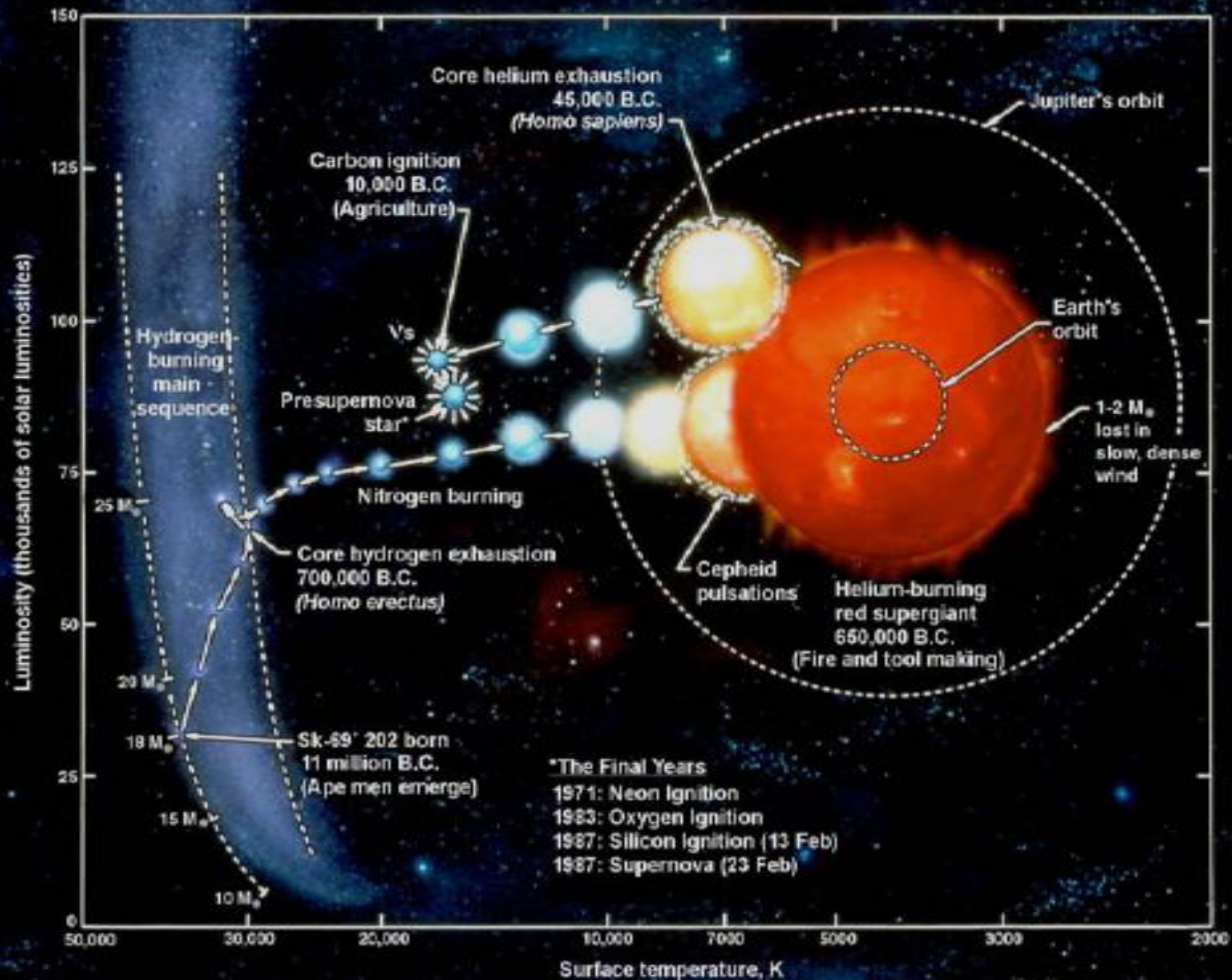


Neutrino-driven?
Rotação? Campos magnéticos?

SN 1987A na Nuvem Maior de Magalhães (LMC)

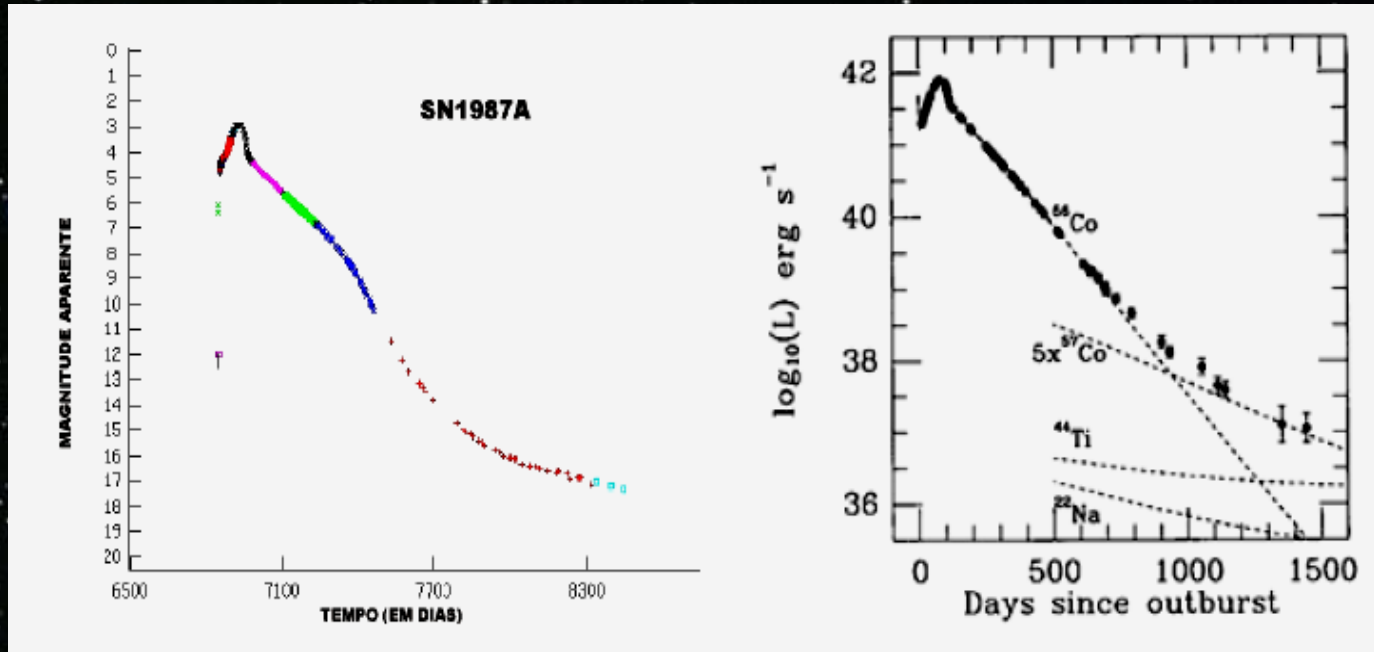
23 de Fev de 1987 : Sanduleak -69 202 decide se suicidar





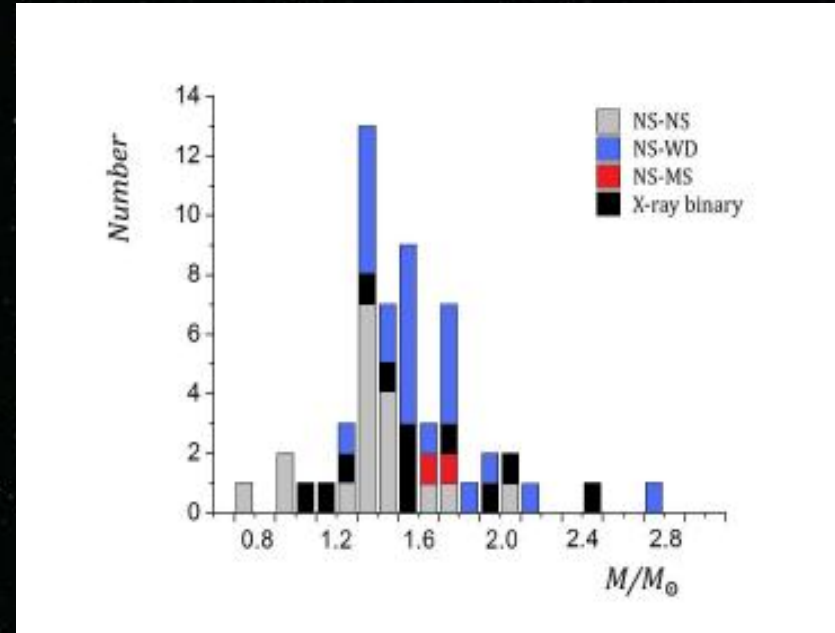
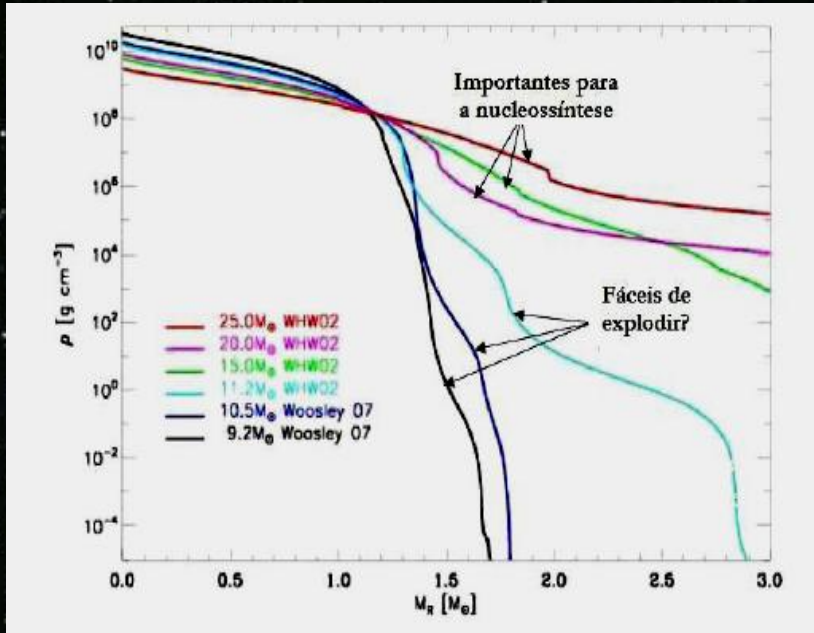
Curvas de luz (bolométricas) :

E o pulsar?



O que provocou a explosão? Qual é o mecanismo?

As estrelas de nêutrons formadas: algumas delas serão detectadas como pulsares. Qual será sua massa? Depende da massa do caroço de Fe e da energia da explosão



Dois “picos”, em 1.37 e 1.73 M_{sun}

Acresção pode elevar a massa depois da formação, mas algumas devem ter nascido assim, bem além da faixa de 1.4 M_{sun}



**Na próxima aula, mais supernovas
(termonucleares), mais adiante, os
neutrinos detectados da SN1987A**