

# Tópicos em Astrofísica Estelar

## II. Colapsos e supernovas

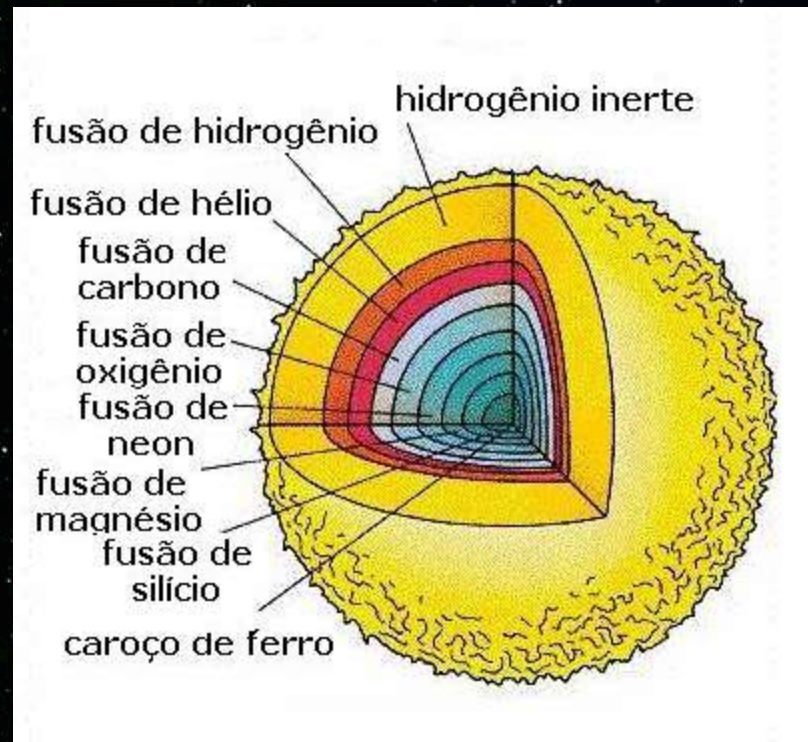
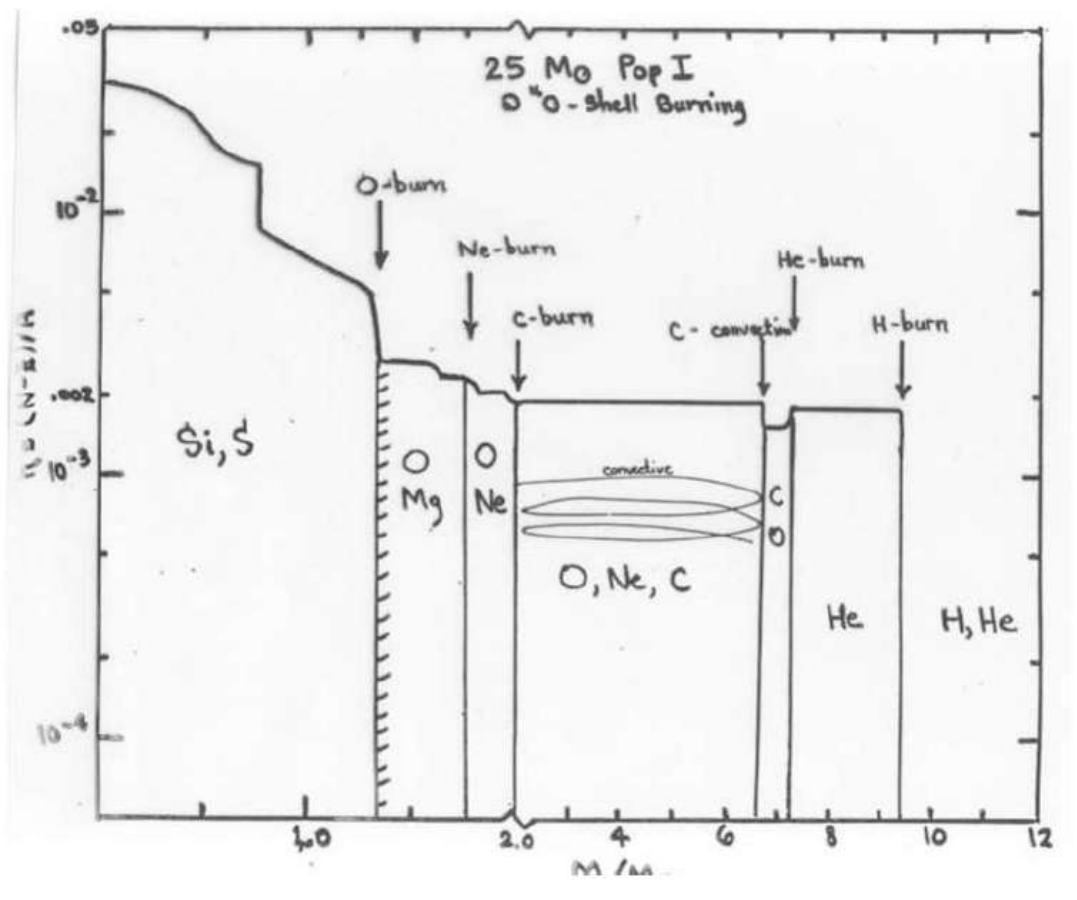
**J.E. Horvath**

*Astronomia IAG-USP, São Paulo, Brazil*



*Perdón, Urania !*





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

Nos estágios pré-supernova, o caroço diminuiu sua entropia (*digs an entropy hole*)

Uma mistura de gás e radiação tem

$$S = C + \frac{N_0 k_B}{\bar{\mu}} \ln \frac{T^{3/2}}{\rho} + \frac{4a}{3} \frac{T^3}{\rho}$$

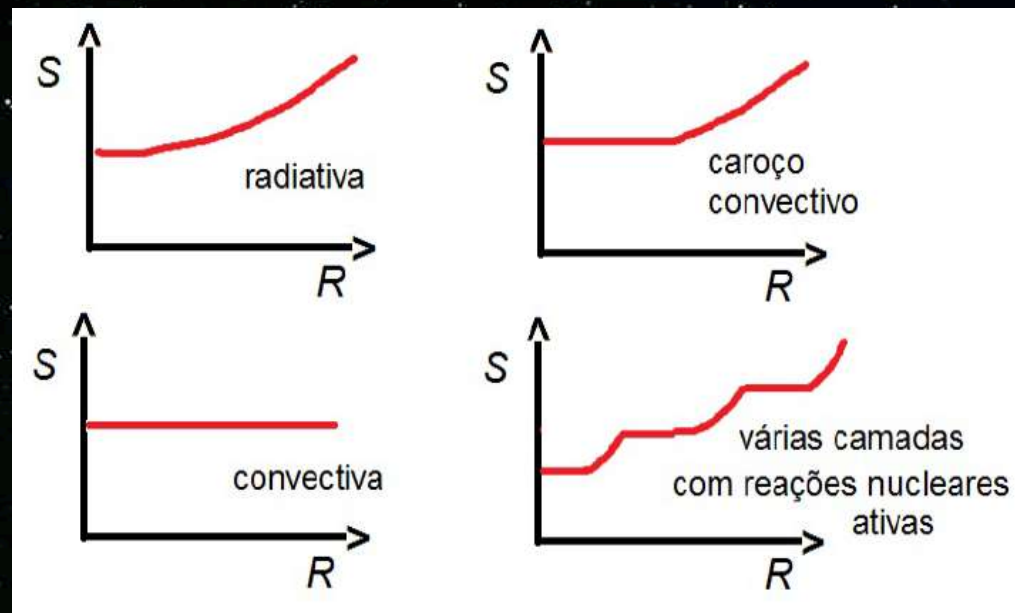
Como o caroço deve satisfazer o Teorema do Virial

$$\frac{GM^2}{R} \approx \frac{N_0}{\bar{\mu}} M k_B T$$

$$T \sim \frac{G\bar{\mu}}{N_0 k_B} M^{2/3} \rho^{1/3}$$

Densidade constante

Assim,  $\frac{T^3}{\rho}$  é constante.  
A entropia deve diminuir quando T aumenta, devido ao termo do logaritmo



O caroço de “Fe”

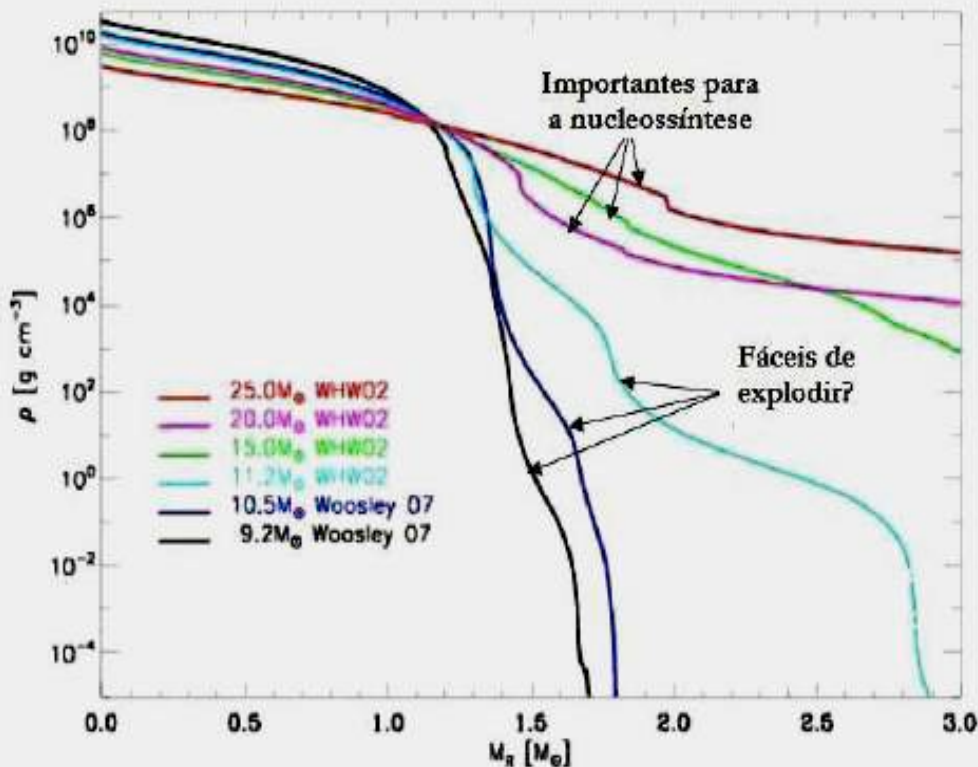
Inicialmente

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

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

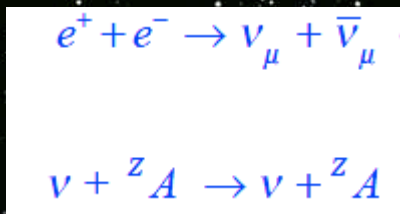
Há dois efeitos que desestabilizam o caroço : a captura eletrônica  
 $e^- + A \rightarrow A - 1$  que retira elétrons da distribuição, e com isso  
diminui a pressão que suporta o caroço

e a fotodesintegração do “Fe”

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

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

## Trapping (retenção?) dos neutrinos no caroço em colapso



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

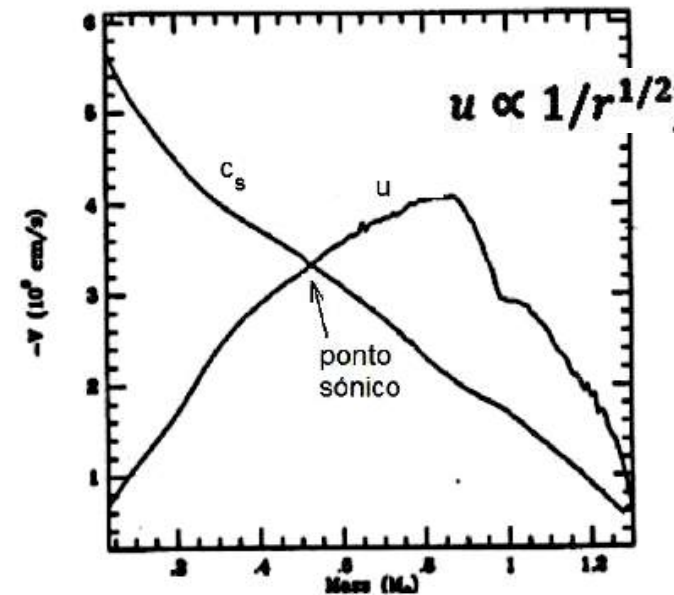
$$\frac{u}{r} = \frac{\dot{\alpha}}{\alpha} = \text{constante}$$

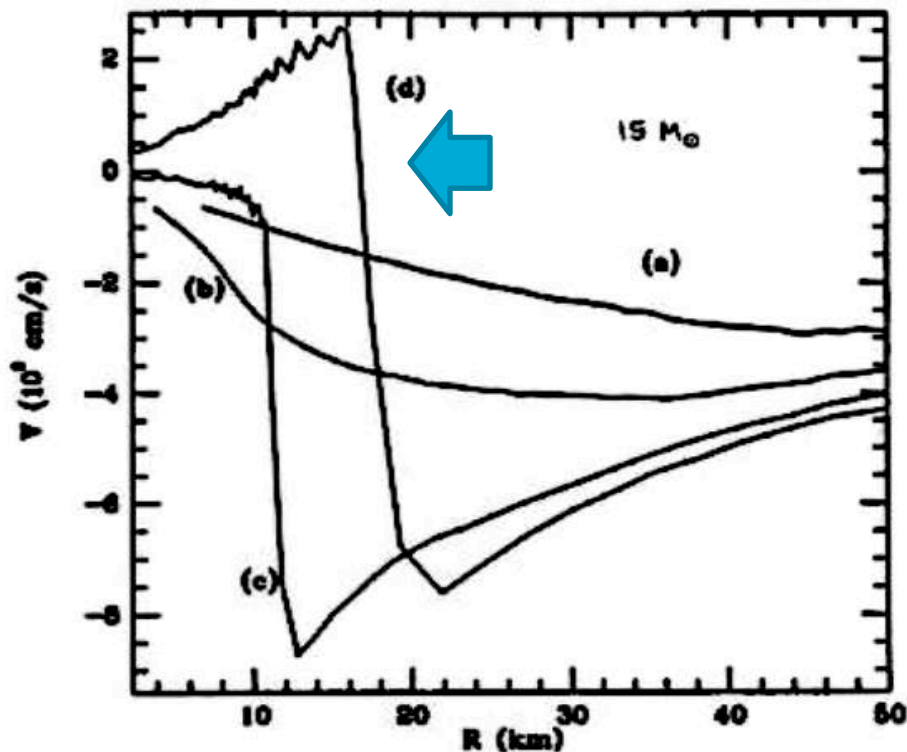
Ponto sônico  $u + c_s = 0$

Assim que atingida a densidade de saturação nuclear  $\rho_0 = 2.7 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$

Adeus homologia (muro rijo!)

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





	$\rho_c$
a)	$4.8 \times 10^{13}$
b)	$2.6 \times 10^{14}$
c)	$9.7 \times 10^{14}$
d)	$6.9 \times 10^{14}$

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 (1985). 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

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

onde  $Y_L \approx 0.33$

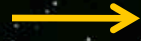
(daí que é importante o valor no momento do *trapping*!)

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  
levam embora mais energia do choque

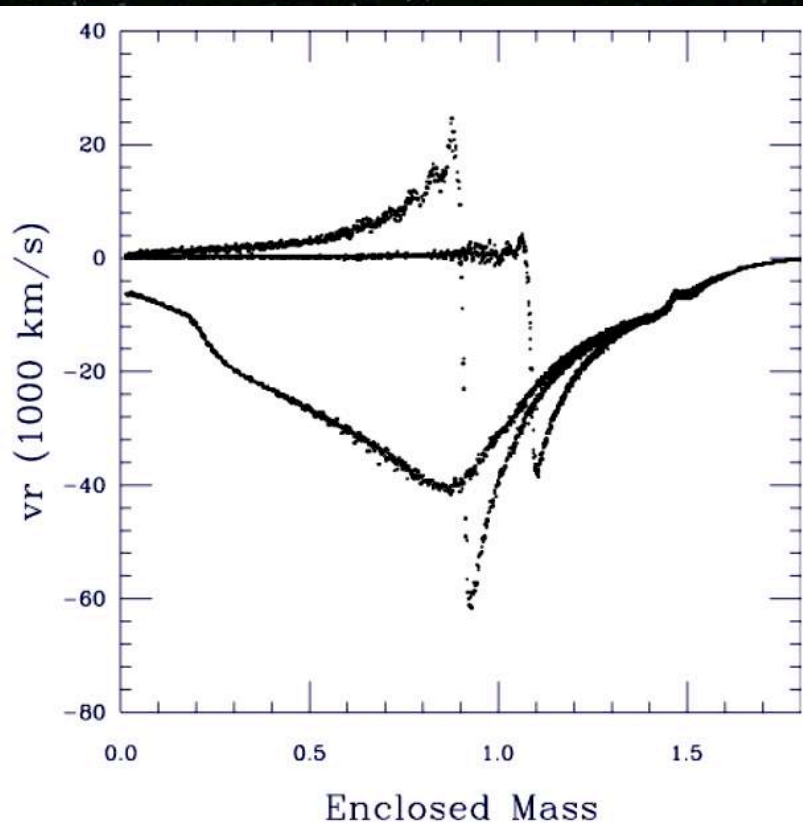
$\rho \sim 10^{12} \text{ g cm}^{-3}$

os neutrinos



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

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



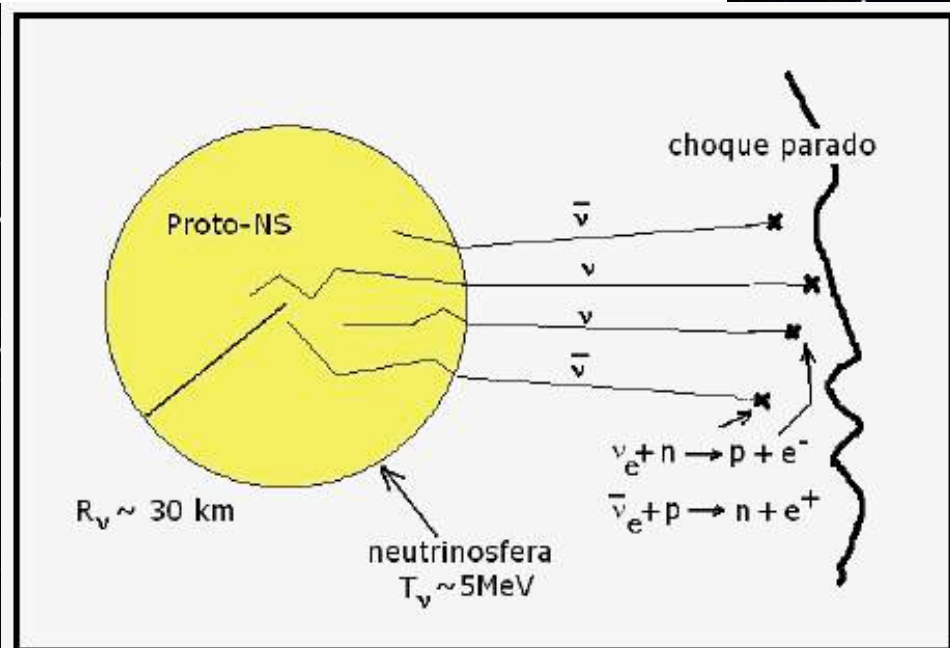
Felizmente o caroço está cheio de neutrinos (térmicos)

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

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



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

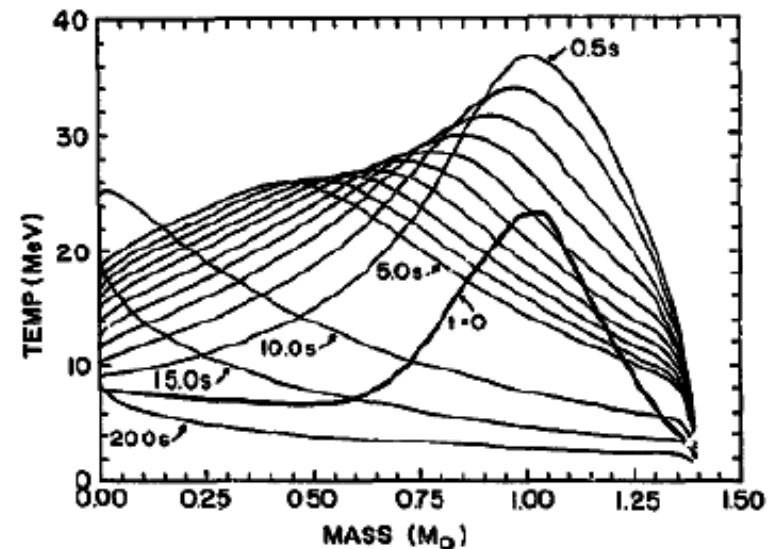
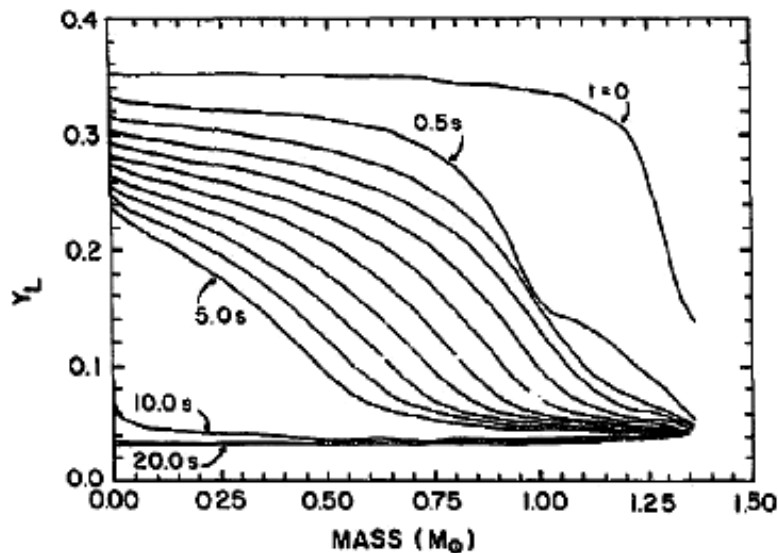
$$(Y_L = Y_\nu)$$

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

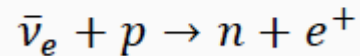
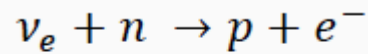
Com solução (analítica)

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

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



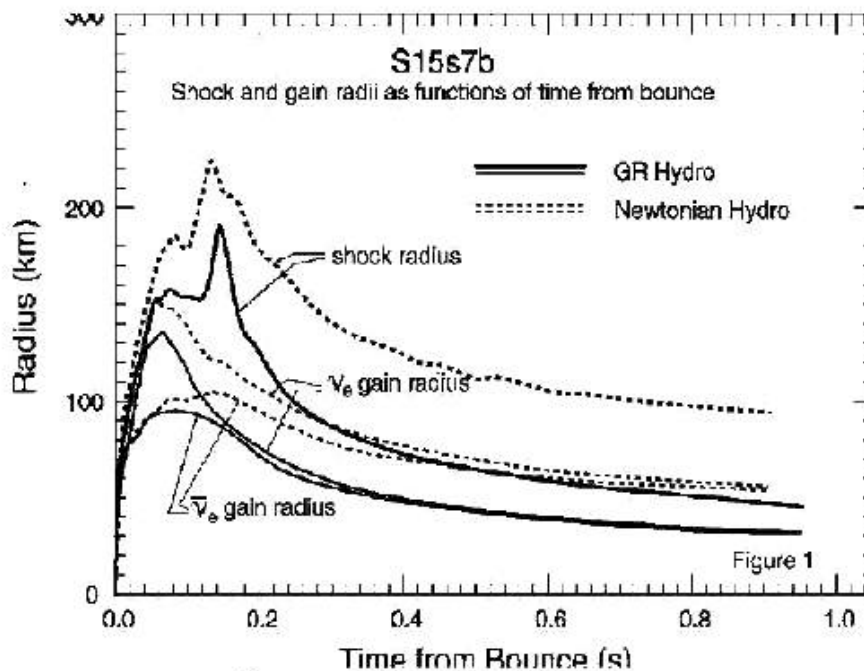
# Captura de neutrinos (entre a neutrinosfera e o choque parado) Revivendo o choque?



A taxa efetiva de captura

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

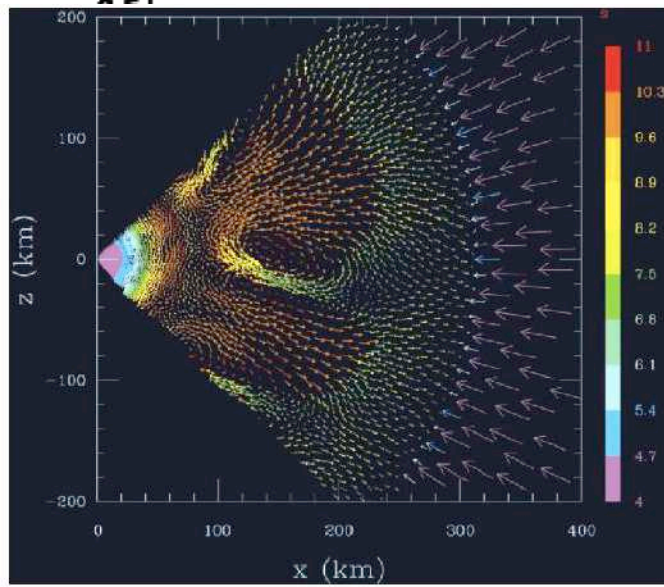
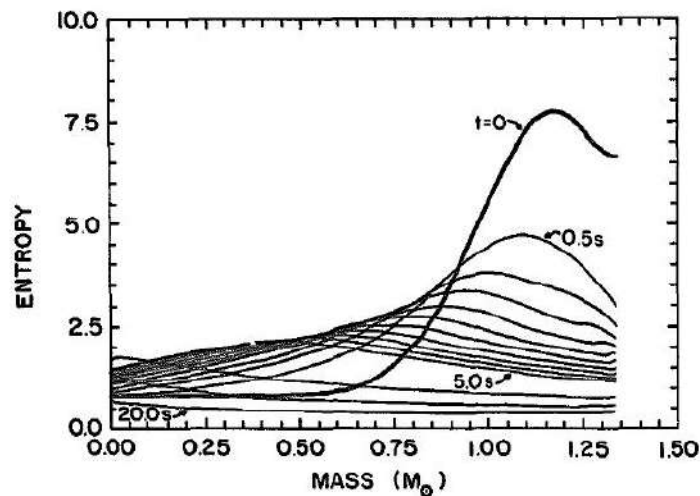
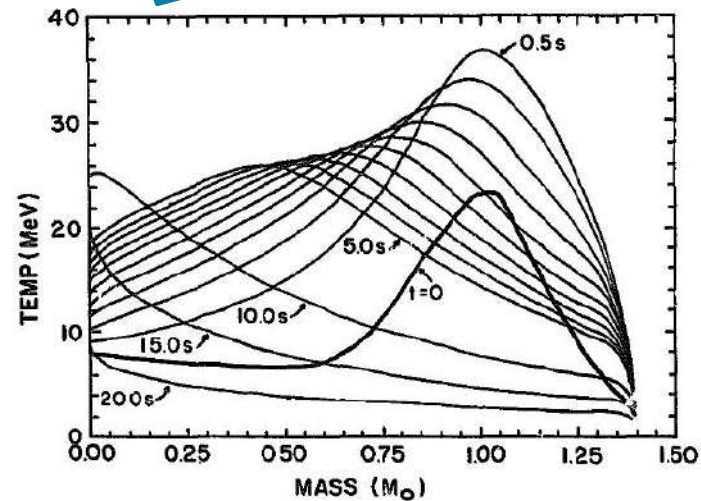
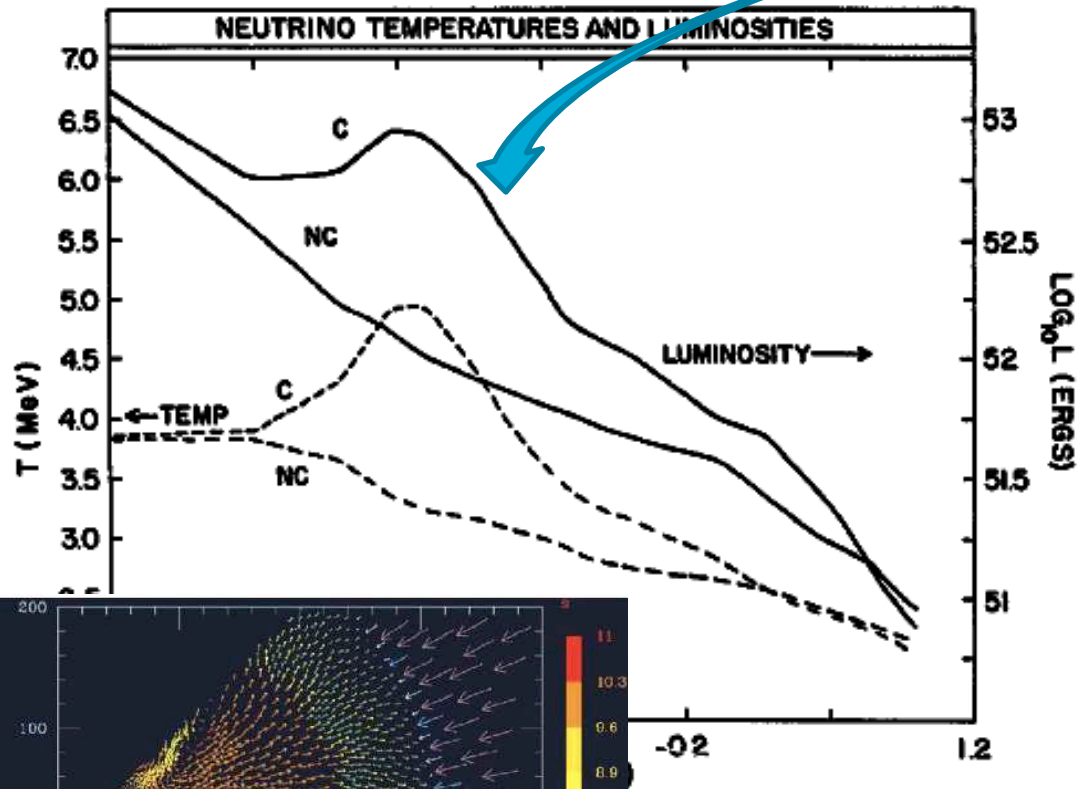
Sensível à forma do espectro e a energia média



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?

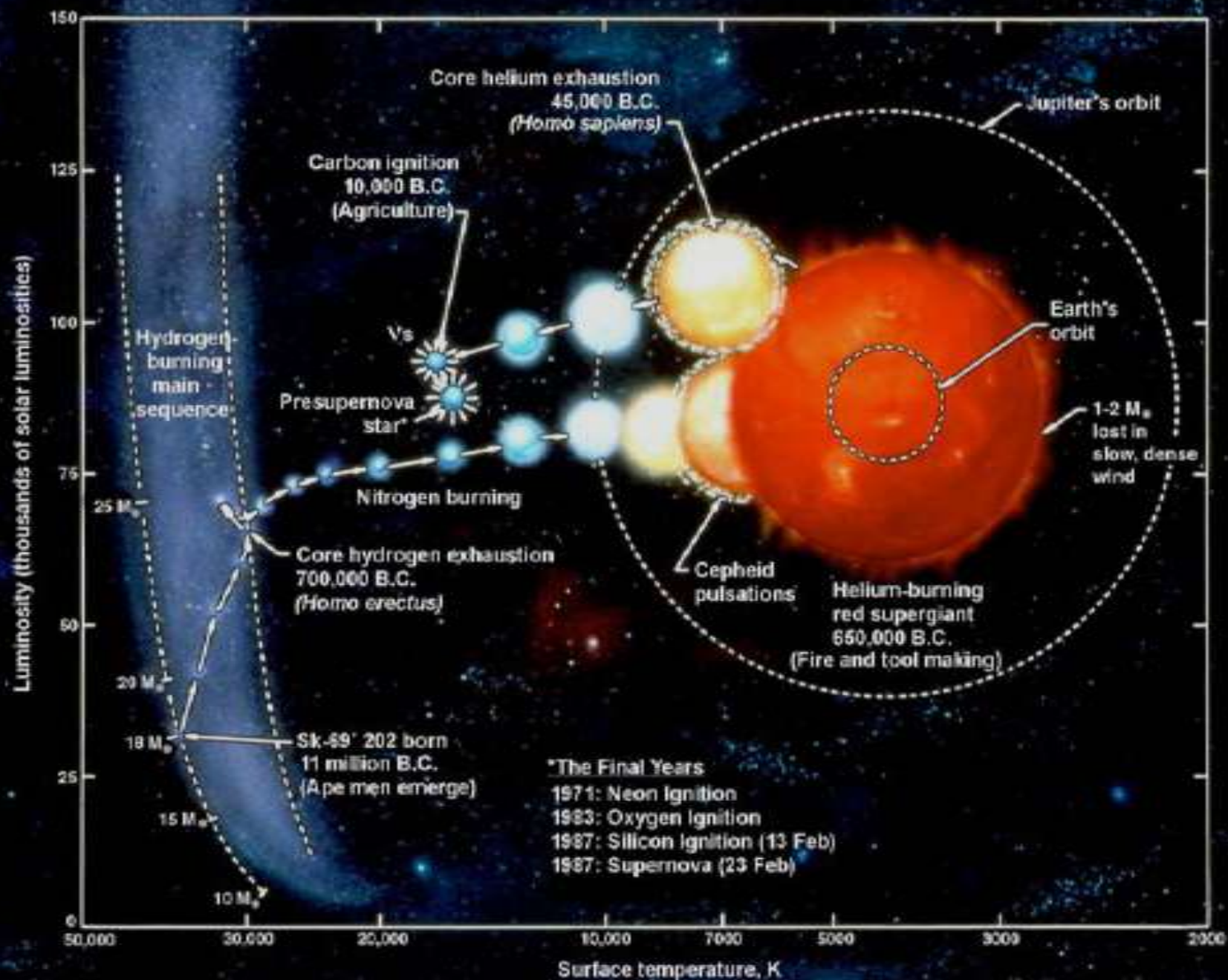


Neutrino-driven?  
Rotação? Campos magnéticos?

SN 1987A na Nuvem Maior de Magalhães (LMC)

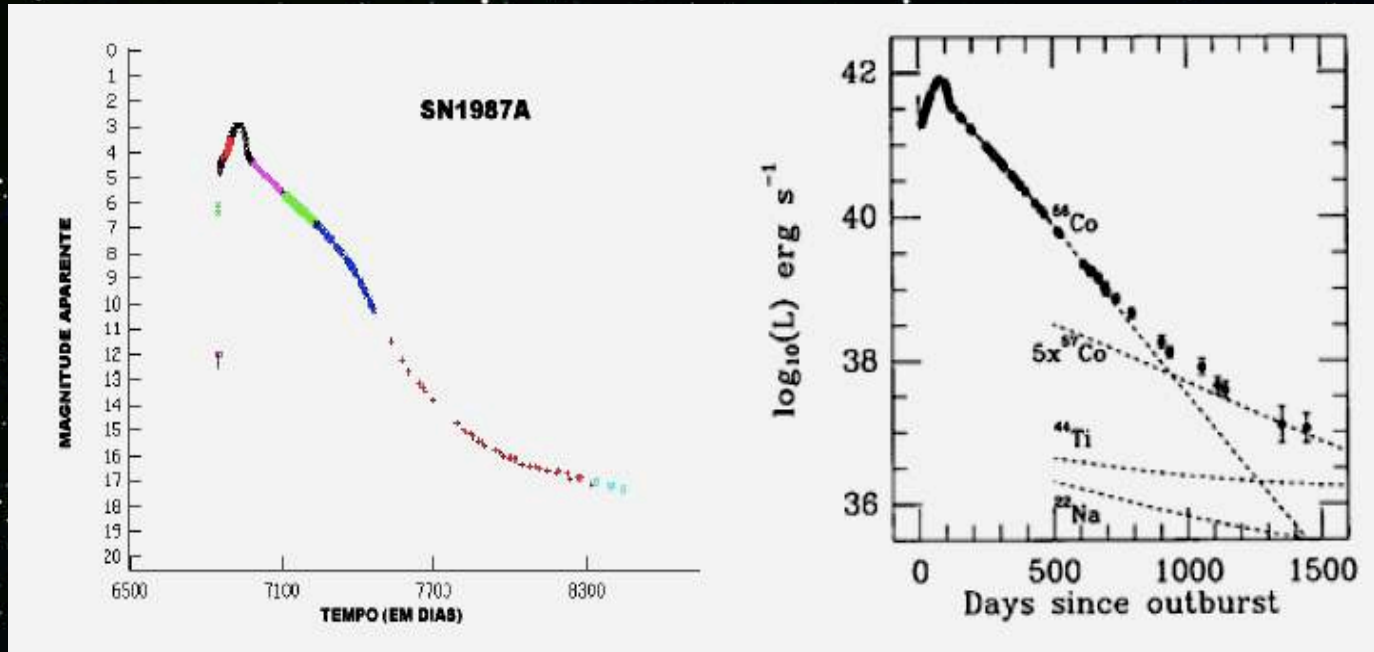
23 de Fev de 1987 : Sanduleak -69 202 decidê se suicidar





## Curvas de luz (bolométricas) :

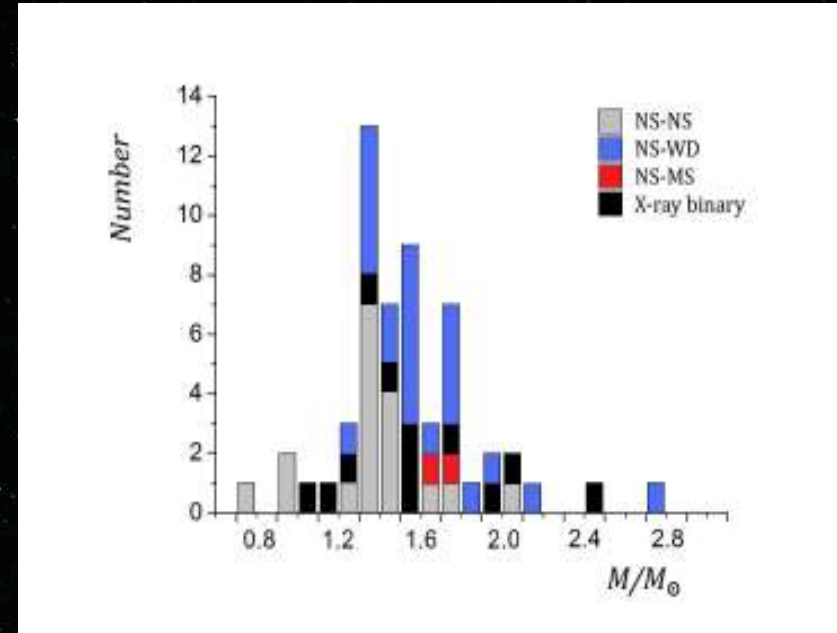
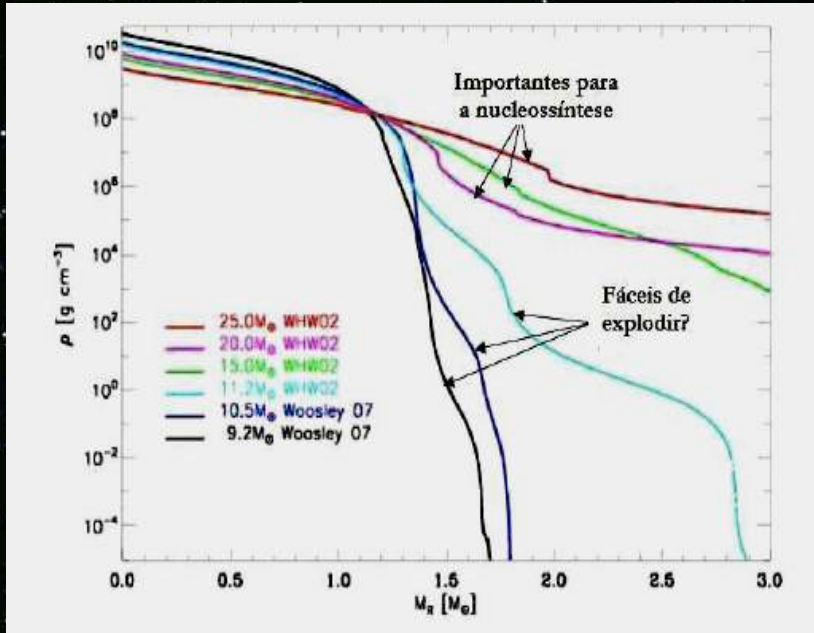
E o pulsar?



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



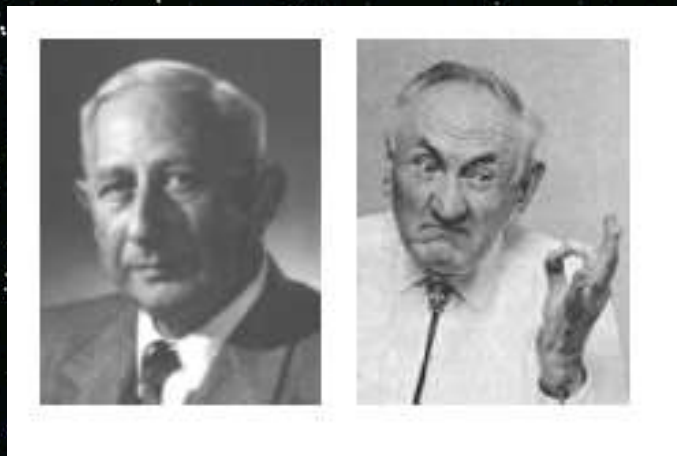
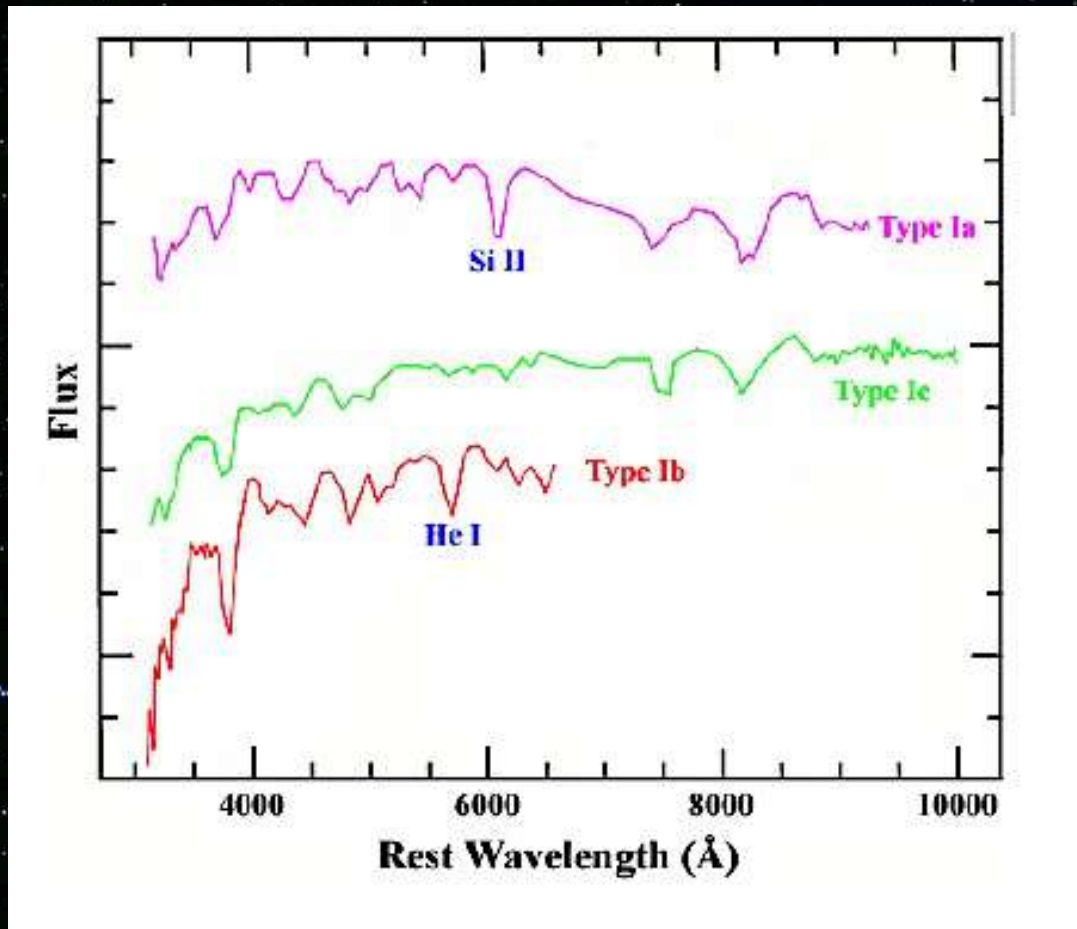
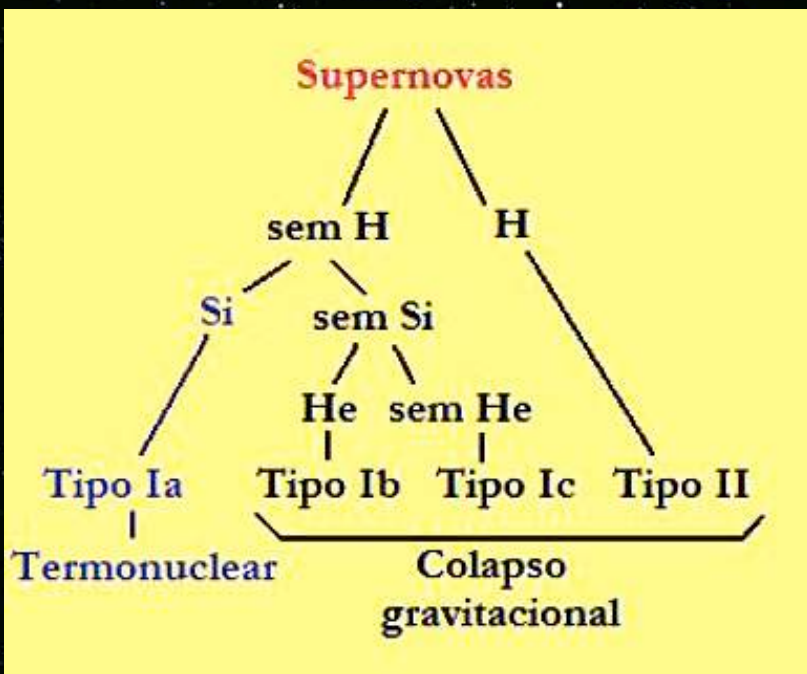
Dois “picos”, em 1.37 e 1.73 Msun

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

# Supernovas termonucleares



# Classificação das supernovas (espectroscópica)



Baade & Zwicky

# Supernovas históricas identificadas como eventos tipo Ia

SN	Distância (kpc)	$m_V$
185	$1.2 \pm 0.2$	$-8 \pm 2$
1006	$1.4 \pm 0.3$	$-9 \pm 1$
1572 (Tycho)	$2.5 \pm 0.5$	$-4 \pm 0.3$
1604 ? (Kepler)	$4.2 \pm 0.8$	$-4.3 \pm 0.3$

(Sirio -1.46)

# Supernovas históricas



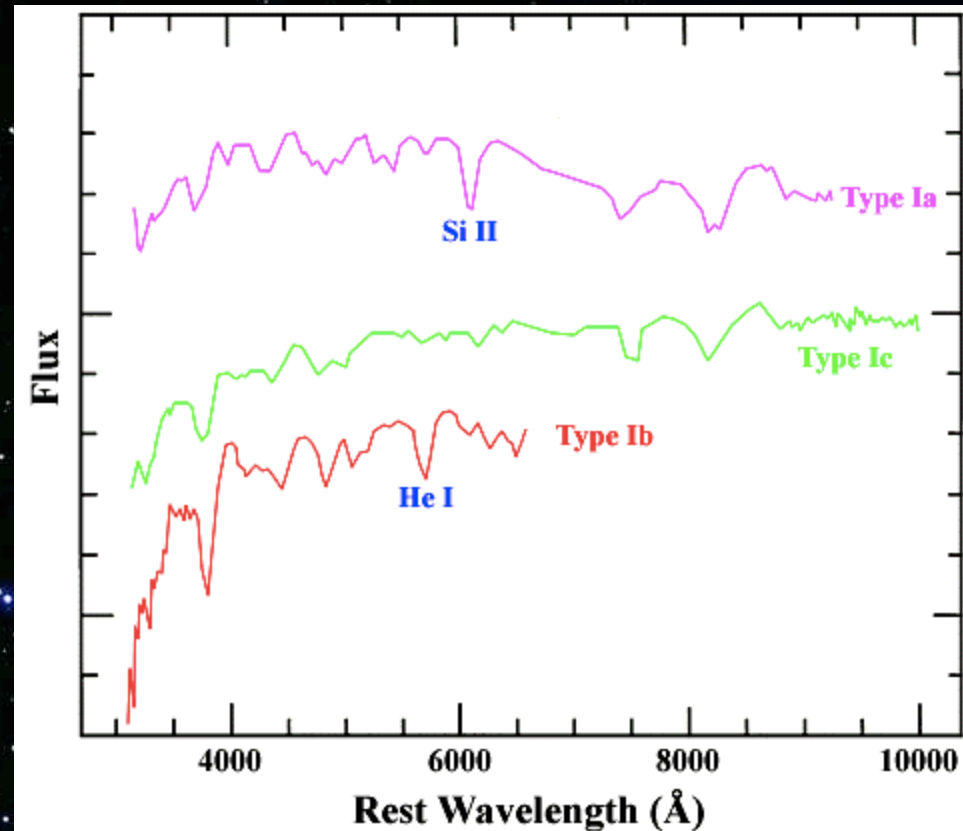
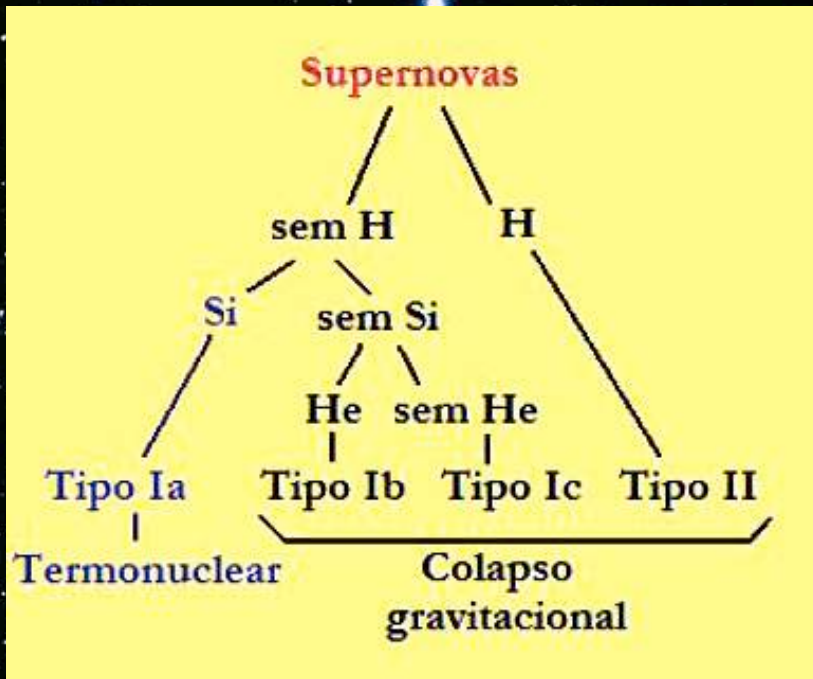
Tycho (1572)

Não estão associadas com a população jovem do disco,  
devem ser Pop II ou seja, evoluídas



Não aparece H, mas outros elementos intermediários  
(como o Si) estão presentes

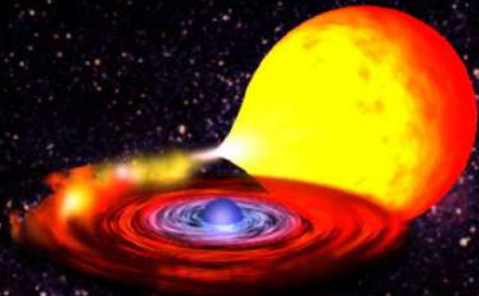
# Classificação das supernovas (espectroscópica)



Cenários considerados: uma (single degenerate) ou duas (double degenerate), mas o essencial é que exista uma **anã branca**

Por que essa insistência na anã branca? : Pop II, regularidade das curvas, sem H...

Podem queimar subitamente (“helium flash” versão maxi) já que estão compostas **de C**



Uma u  
outra?





# Supernovas Ia e Cosmologia

As supernovas atingem magnitudes absolutas negativas, portanto é possível ver elas desde muito longe...

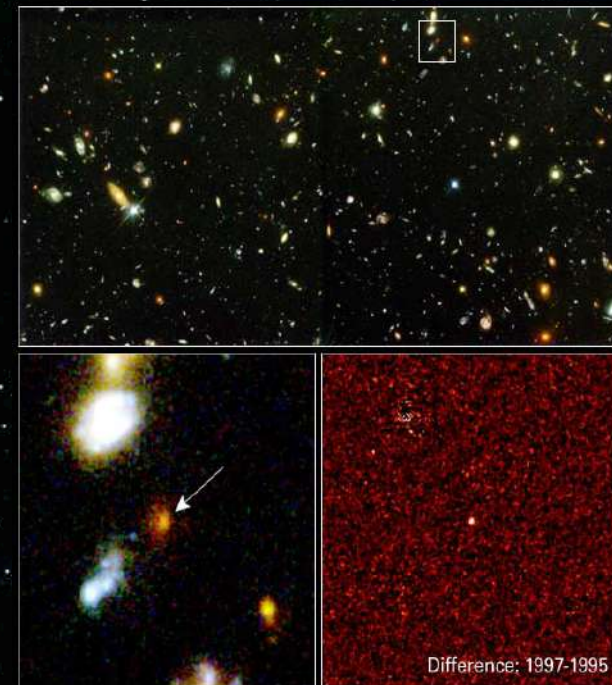
Qual é a distância máxima à qual uma supernova Ia pode ser vista com um grande telescópio que tem como limite a  $m_B \sim 25$  ?

$$\log\left(\frac{d}{pc}\right) = \frac{(m - M)}{5} + 1 = \frac{(25 + 19.6)}{5} + 1 = 9.92$$

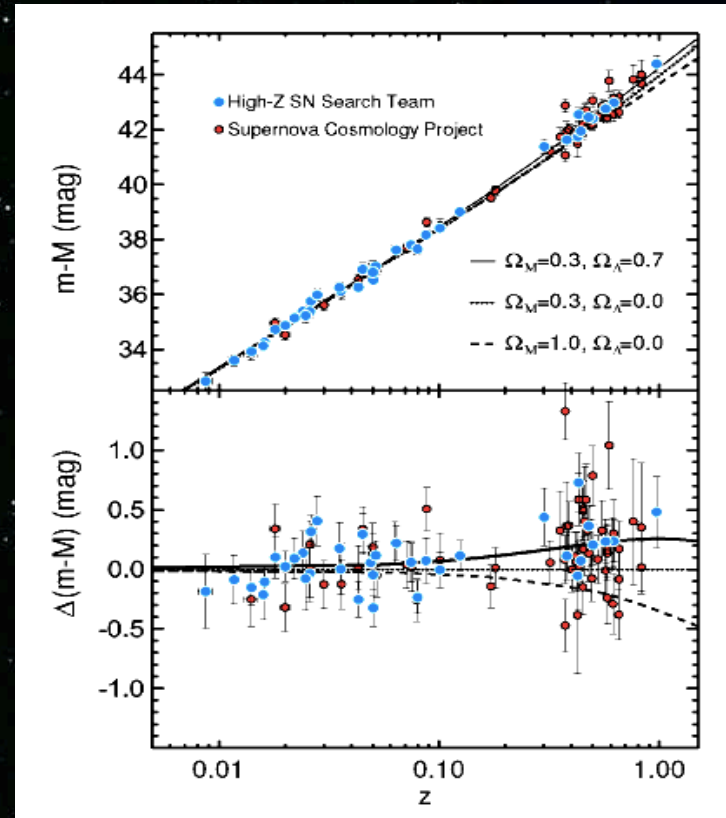
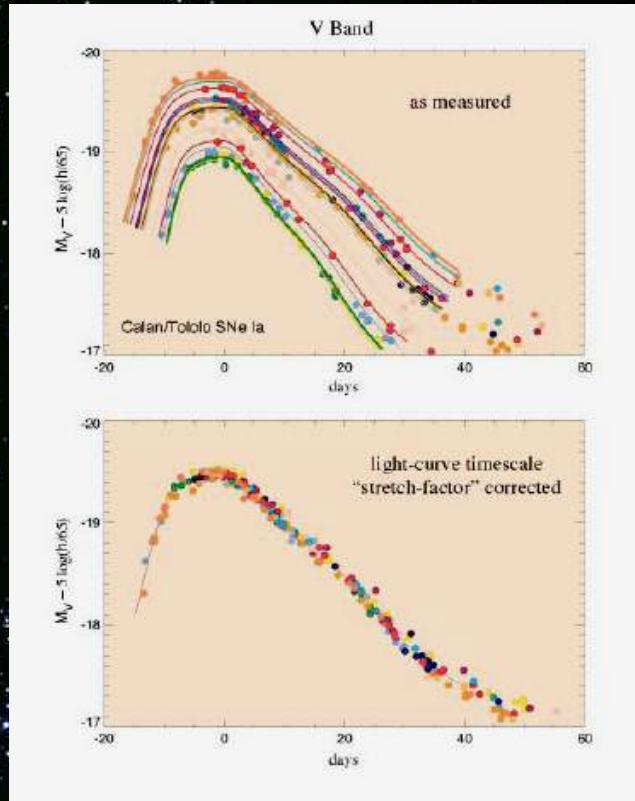
$$d = 8.3 \times 10^9 pc$$

A esta distância, a luz foi emitida quando o Universo tinha mais ou menos 1/3 da idade atual.

A supernova mais distante já observada até hoje aconteceu a uma distância de 12.7 Gpc, o Universo tinha então somente 3.8 Gyr

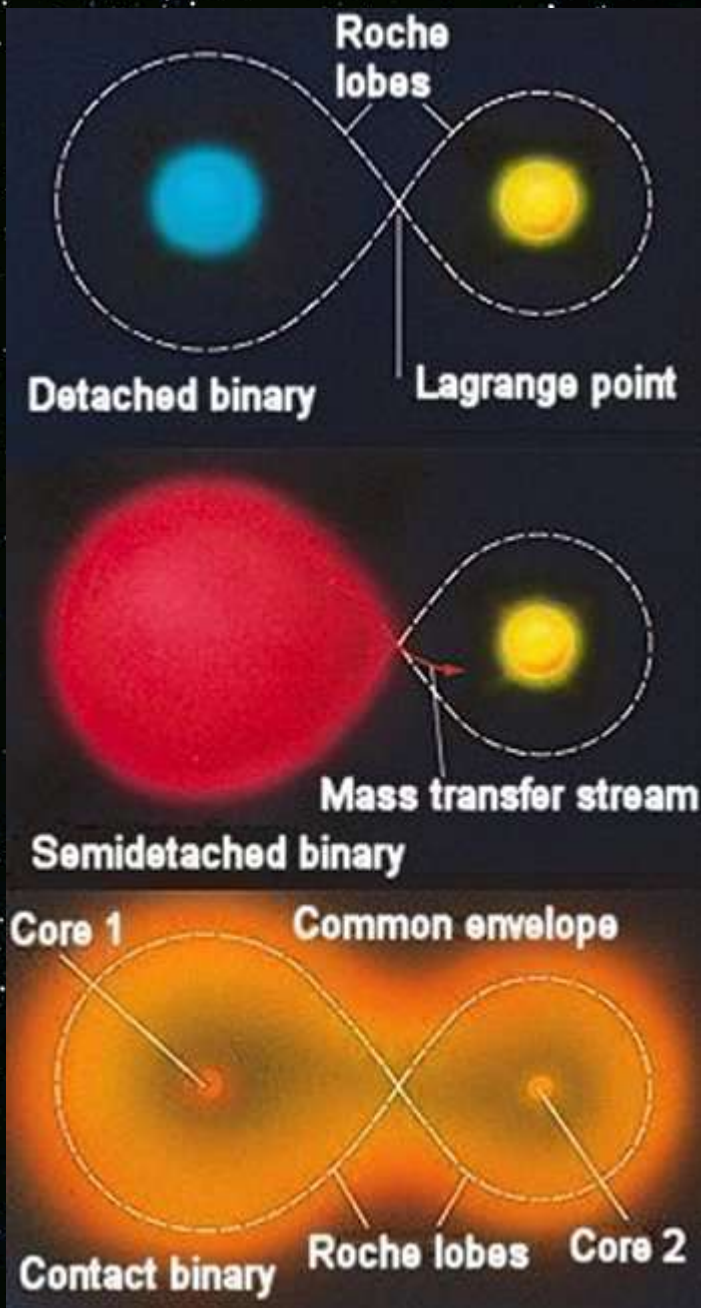


# Cosmologia : Calibração de Hamuy-Phillips



Lmax função só da largura da curva (tempo) !  
(mais larga – mais brilhante)

As supernovas estão mais distantes do que deveriam estar segundo a expansão decelerada: o Universo **acelerou** recentemente



Single ou double degenerate?

Variáveis cataclísmicas

(envelope comum)

$P \sim$  horas

Candidatas a “double-degenerate”

# Condições de ignição do C pela acreção

$$M \approx 1.38 M_{\text{sun}}$$

$$\rho \rightarrow 3 \times 10^9 \text{ gm cm}^{-3}; T \approx 3 \times 10^8 \text{ K}$$

maior  $\dot{M}$   $\rightarrow$  maior gradiente térmico  
menor o tempo de difusão

$$t \sim 2 \times 10^5 \text{ anos para } \dot{M} \sim 10^{-6} M_{\odot}$$

Instabilidade térmica (ignição): as reações devem acontecer mais rapidamente do que a capacidade dos neutrinos esfriarem

$$\tau_{\text{nuc}} \ll [\tau_{\text{cool}}; \tau_{\text{expansão}}] \quad \text{como já vimos ontem}$$



$$\dot{E}_{\text{nuc}}(\rho, T) < \dot{E}_v(\rho, T) + \nabla \cdot (\kappa \nabla T) \rightarrow (\text{ignição}) \text{ no plano } (\rho, T). \rightarrow T_{\text{ign}} = 7.6 \times 10^8 \text{ K para } \rho = 10^9 \text{ g cm}^{-3}$$

Todas as combustões devem satisfazer as condições:

Fluxo de massa

$$\rho_1 v_{1x} = \rho_2 v_{2x} \equiv j$$

Fluxo de energia

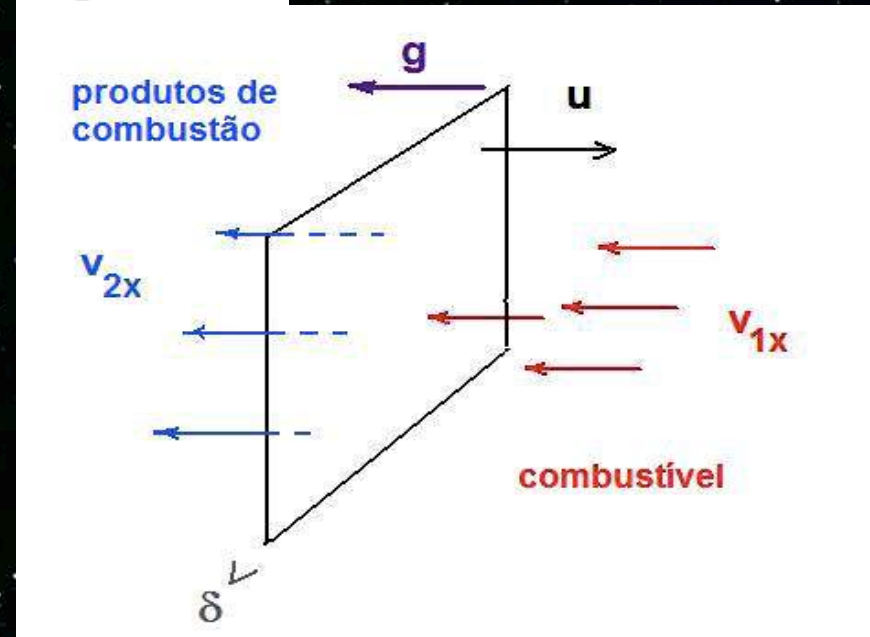
$$\frac{1}{2} v_{1x}^2 + \omega_1 = \frac{1}{2} v_{2x}^2 + \omega_2$$

Fluxo de momentum

$$P_1 + \rho_1 v_{1x}^2 = P_2 + \rho_2 v_{2x}^2$$

sistema de coordenadas fixo

superfície  $\delta$



Entalpia: diferente para cada lado

$$\omega = \varepsilon + P/\rho$$

$$v_{1x} = v_n - u$$

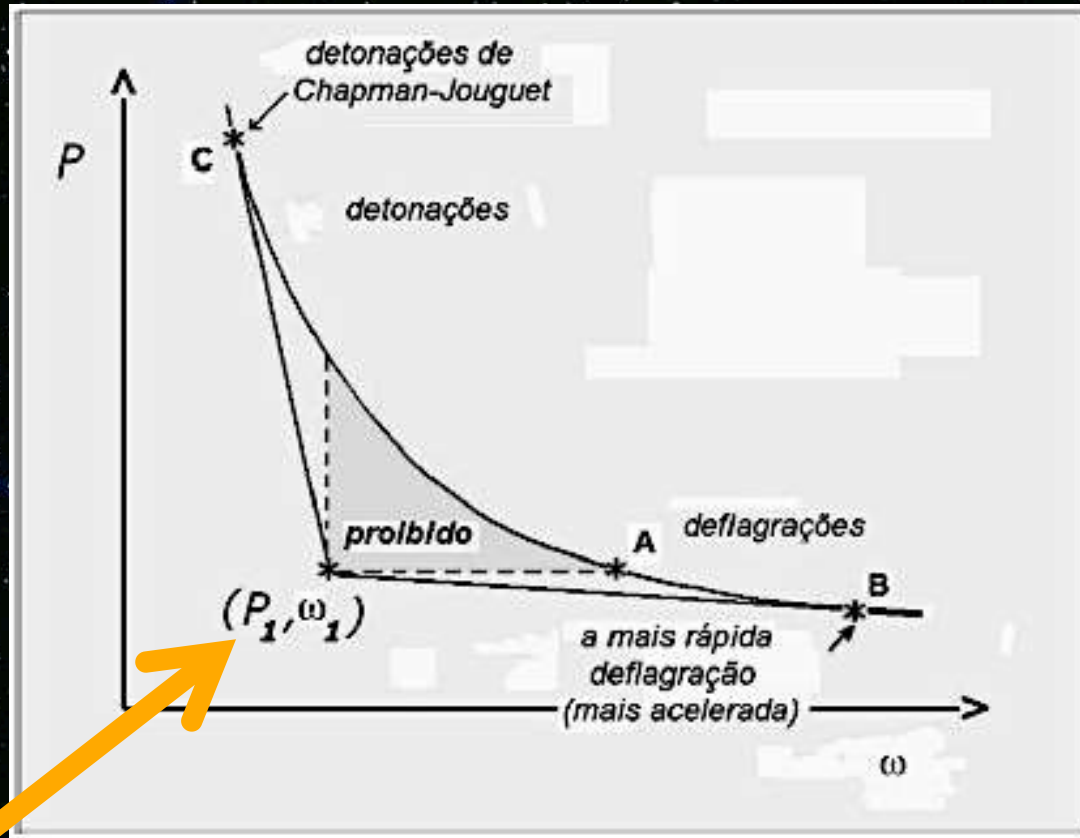
Manipulando chegamos a  
(fluxo de massa acima da superfície)

$$j^2 = \frac{(P_2 - P_1)}{(V_1 - V_2)}$$

e também

$$\omega_1 - \omega_2 + \frac{1}{2}(V_2 + V_1)(P_2 - P_1) = 0$$

*adiabática de Chapman-Jouguet.*



O C está inicialmente aqui

Então, ou

$$P_2 < P_1 \text{ e } V_1 < V_2$$

(deflagrações)

Ou

$$P_2 > P_1 \text{ e } V_1 > V_2$$

(detonações)

Deflagrações: processos difusivos

$$\chi = \frac{\kappa_{\text{term}}}{c_p \rho}$$

zona de reação

$$\delta = (\chi \tau)^{1/2}$$

*subsônicas*

$$u_{\text{def}} \sim \delta / \tau =$$

Detonações: difusão irrelevante: choque seguido da  
zona de reação *supersônicas* (no meio “1”)

Já que as detonações são supersônicas, a matéria na frente é “atropelada” e queima até o fim. Assim, produzem somente Ni (detonações)

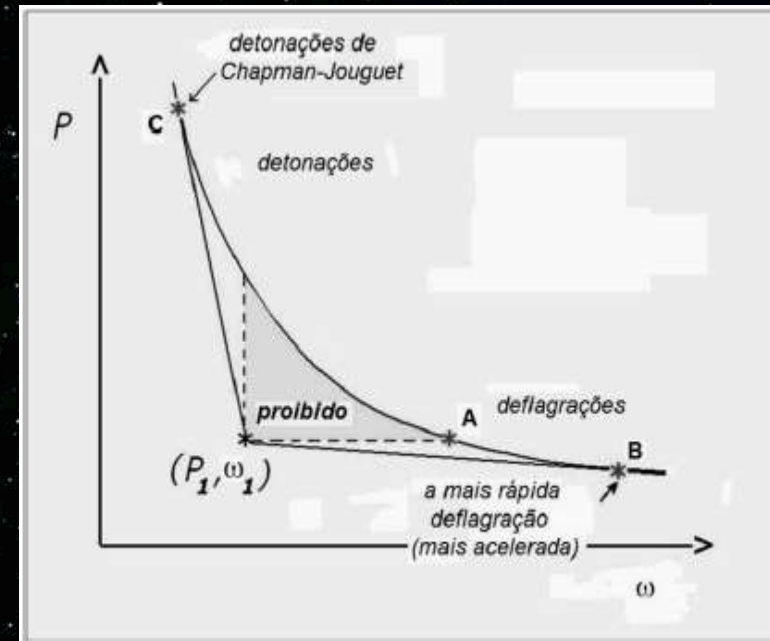
No outro caso, a pre-expansão pelas perturbações consegue que se formem Si, Ne, etc. Que são “brasas” a meio queimar (deflagrações)

## Requisitos de um modelo bem sucedido

- $0.6 M_{\text{sun}}$   $^{56}\text{Ni}$  (necessário para a curva de luz)
- $0.2 M_{\text{sun}}$  SiSArCa (observado no espectro)
- Pouco  $^{54}\text{Fe}$  e  $^{58}\text{Ni}$  (estraga a nucleossíntese)

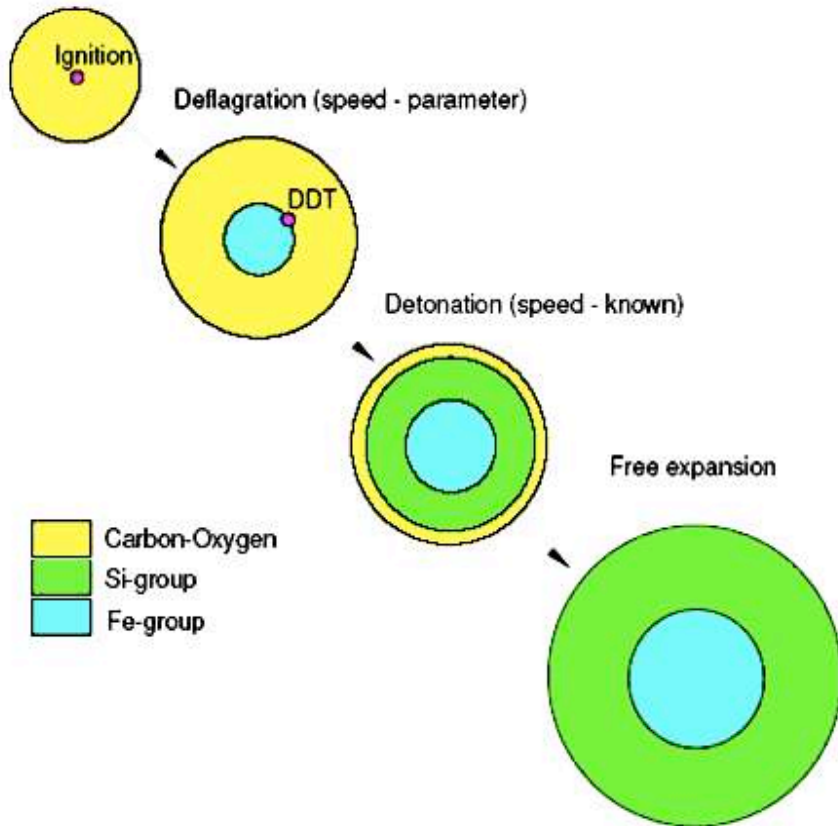
A chama subsônica é muito lenta e não atende, *deve* ser mais rápida

OU as detonações se disparam  
OU, pelo menos, a chama se acelera





# Deflagrações, detonações ou DDT ?



Instabilidade das deflagrações

*Rayleigh-Taylor*

(grandes escalas)

*Landau-Dahrreius,*

(pequenas escalas)

# Instabilidade de Rayleigh-Taylor

Propagação num  
meio de densidade  
muito diferente

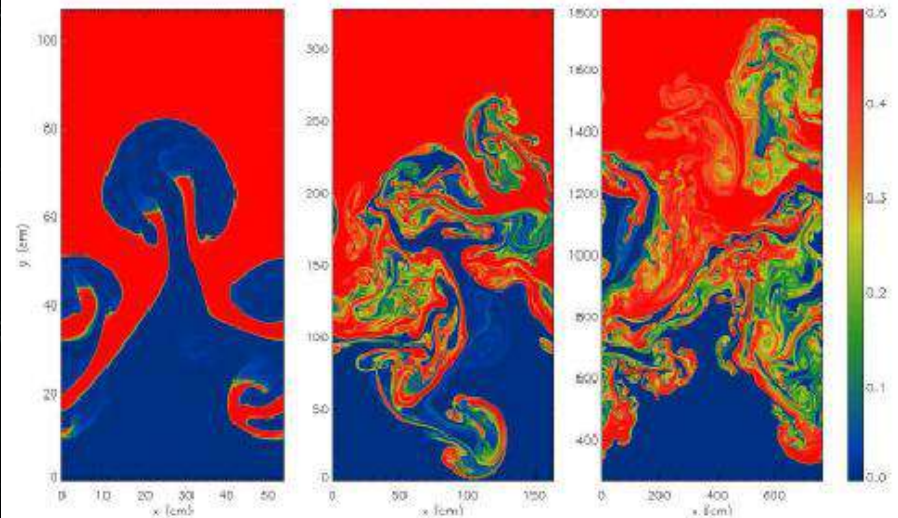


A vida como ela é...  
O número maldito que estraga  
que resulta mais fácil de tratar  
Reynolds

$$Re = \frac{\rho v L}{\eta} \sim 10^{14}$$

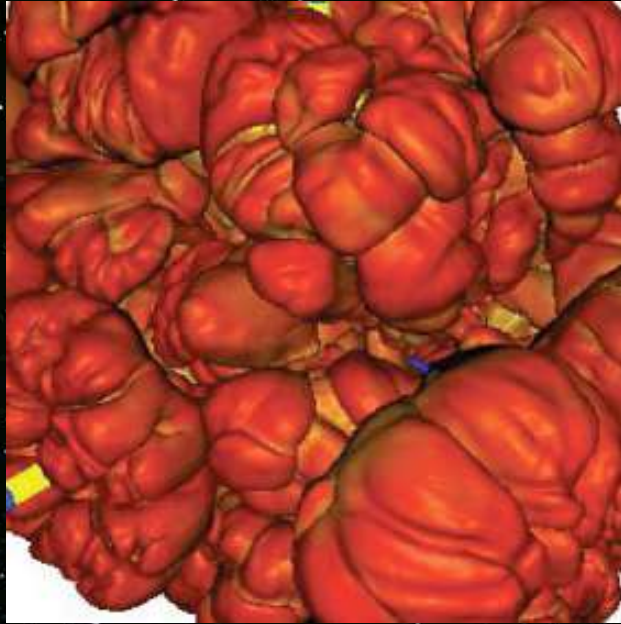
Se o  $Re \gg 1$  não é possível  
usar as eq. de Euler normais etc.

De fato a combustão das anãs  
brancas é MUITO turbulenta  
não laminar...

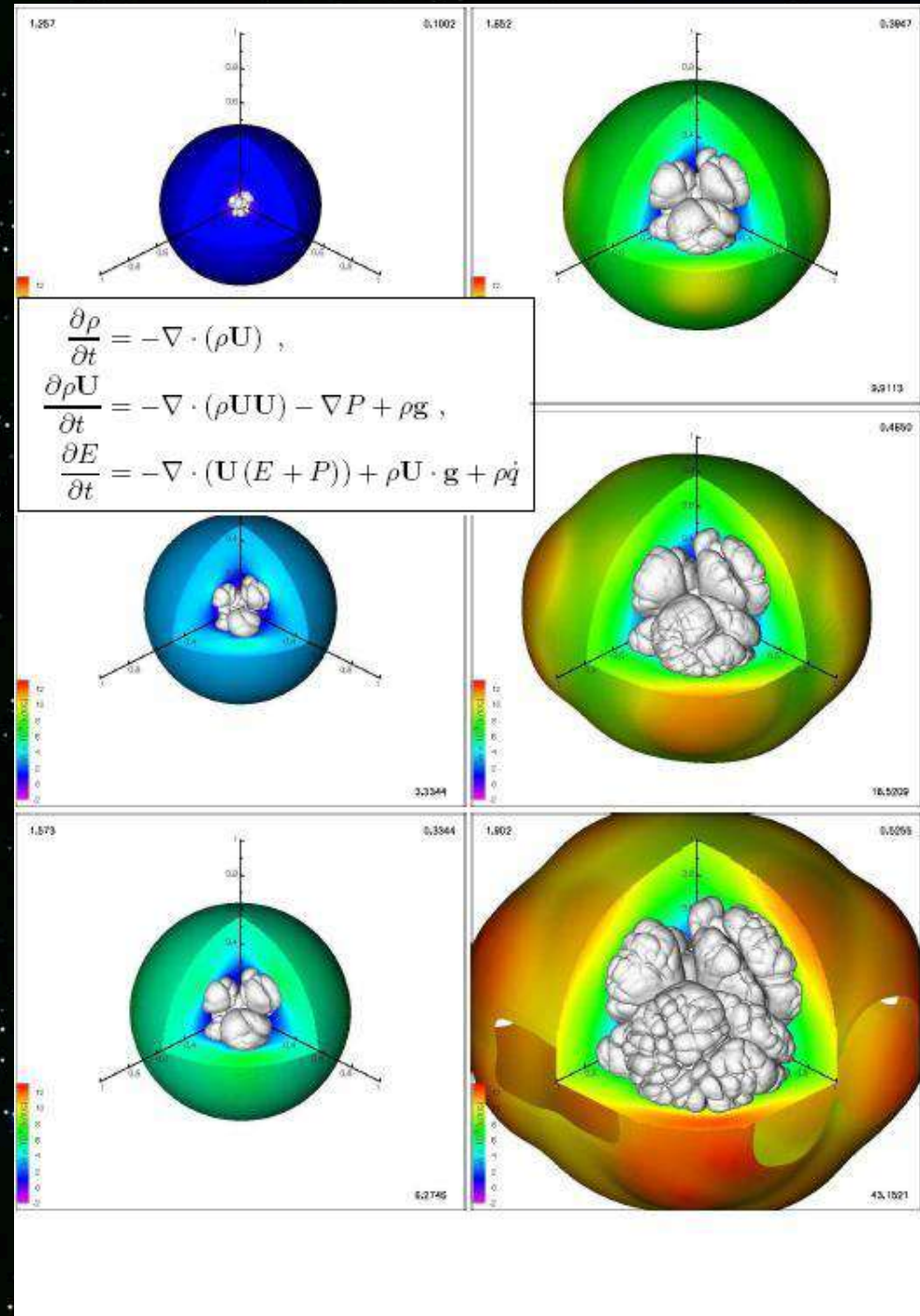


→  
 $\rho$  decrescente: a turbulência domina a  
queima e entramos no regime distribuído

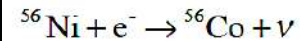
As condições para a transição à rama das detonações  
podem ou não ser atingidas, uma detonação "pura"  
produz muito mais  $^{56}\text{Ni}$  do que observado



Mas...  
 As deflagrações turbulentas  
 também estão contidas na  
 adiabática de Chapman-Jouget

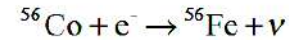


# Curvas de luz: a física elementar



$$\tau_{1/2} = 6.1 \text{ days}$$

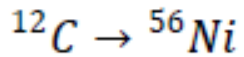
$$q = 3.0 \times 10^{16} \text{ erg/gm}$$



$$\tau_{1/2} = 77.1 \text{ days}$$

$$q = 6.4 \times 10^{16} \text{ erg/gm}$$

Na queima



$$q = 9.6 \times 10^{17} (8.64 - Q)$$

Evidentemente

$$\frac{1}{2} M_{WD} \langle v \rangle^2 = q M_q - E_\nu - E_G$$

perdas pequenas

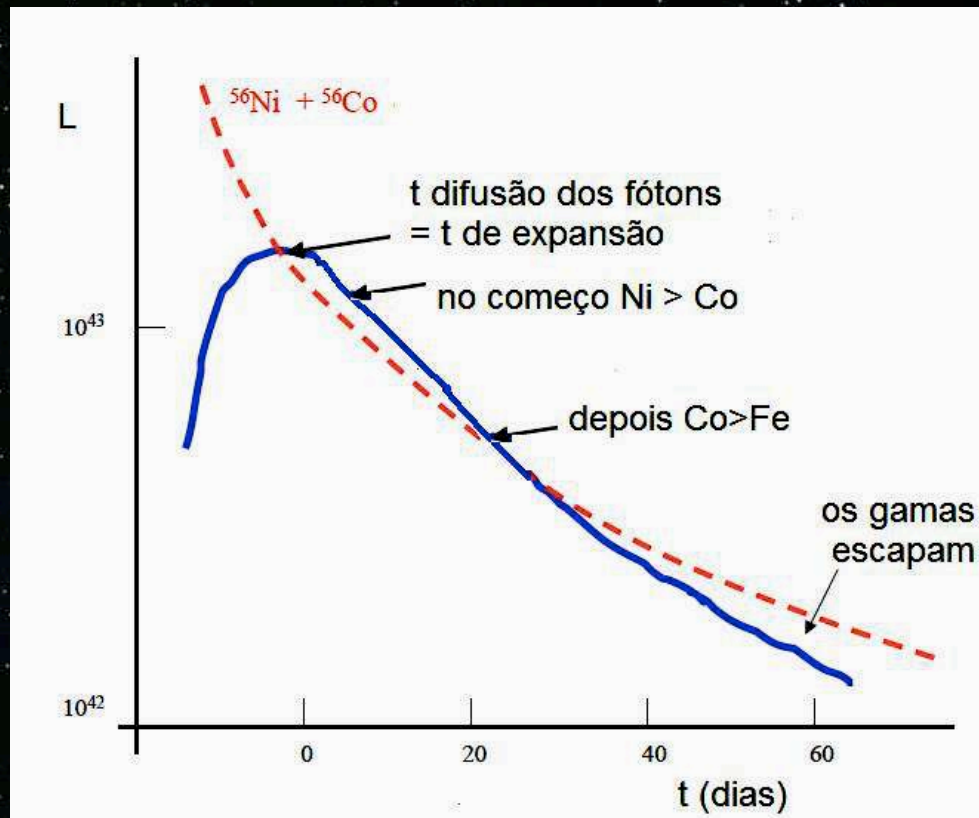
inserindo a  $\langle v \rangle$  observada temos que  $M_q / M_{WD} \leq 1$  (ainda bem!)

Se fosse somente pela expansão e esfriamento dos fótons, a curva decairia rapidamente

As observações apontam para a presença de fontes de energia no ejecta

Quando  $R$  aumenta, pela expansão, chega um tempo no qual livre caminho médio dos fótons no envelope  $\bar{\kappa}\bar{\rho}R \approx 1$  então  $t_d \rightarrow 0$  (*free streaming*). Antes do estabelecimento deste regime de transparência  $L = \dot{\epsilon}(t)$ .

A curva de luz “segue” o decaimento das fontes



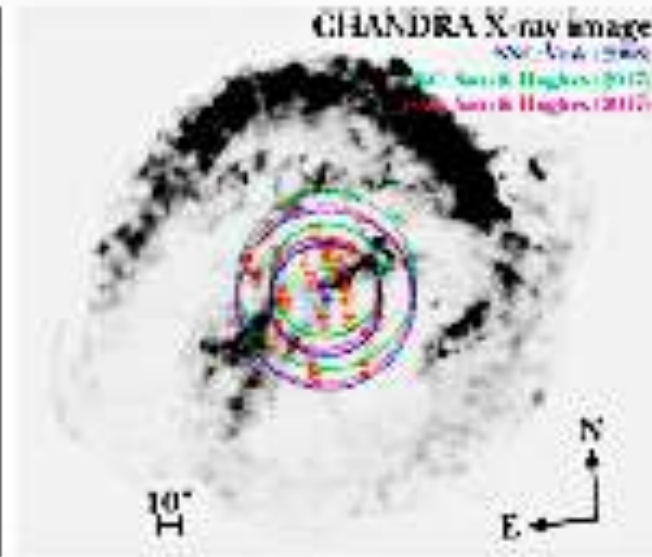


Fig. 5.13 Left: Search for the surviving companion star [11]. Right: The Kepler remnant (still disputed as an SNIa explosion). No candidates have been identified within the circles marking the central region of the explosion [12]. © AAS. Reproduced with permission. Credit: P. Ruiz-Lapuente

Single ou double degenerate?

E se as double forem a maioria,  
como é que podem ser “velas padrão”

# Supernovas superluminosas $> 10^{52}$ erg

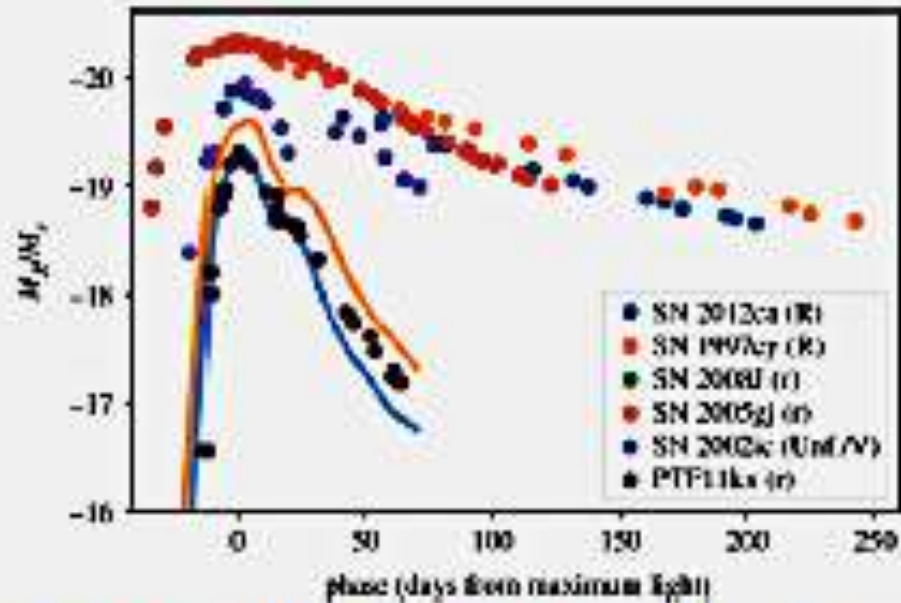


Fig. 5.17 Light curves of several SLSN. The curves decay over a few months or even longer, in some cases even of order 1 yr [18]. Credit: M. Fraser

É um grupo que inclui a) colisão do choque com o ISMç b) injeção de energia por um magnetar c) instabilidade de pares (próximas do limite superior de massa)



**Perguntaaaaas**

