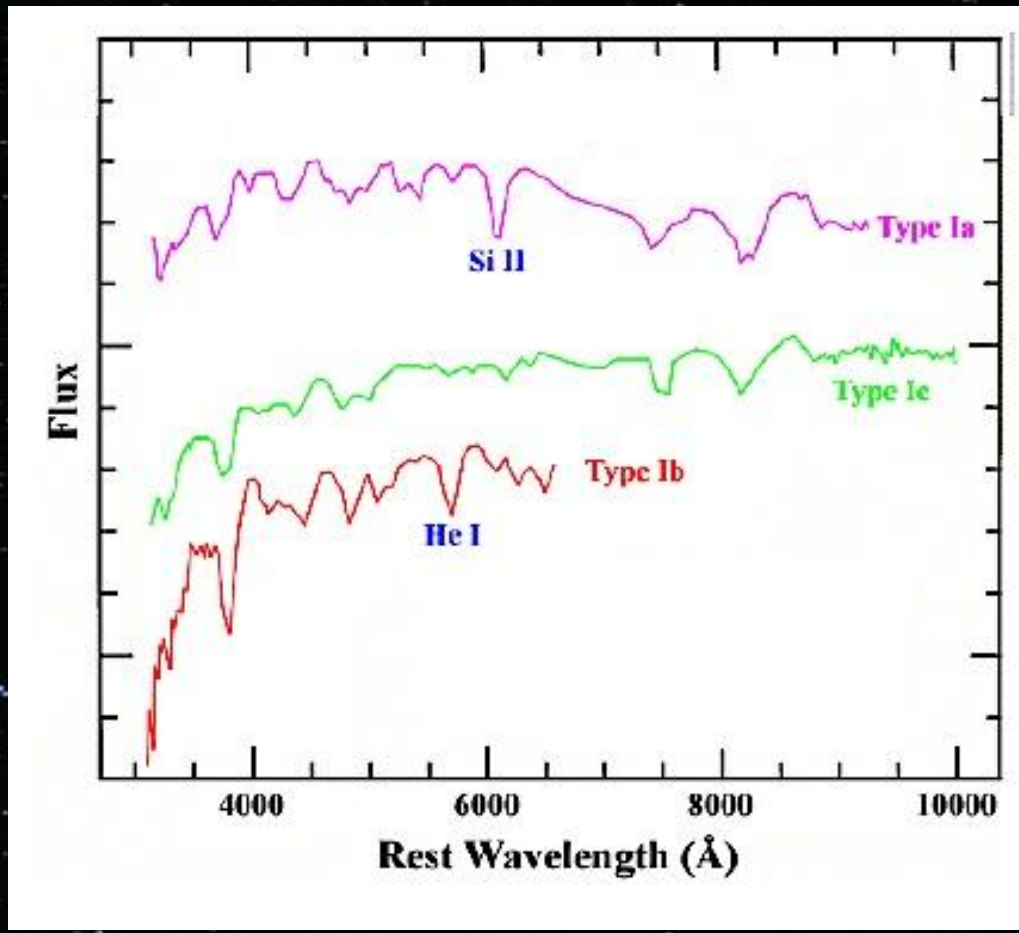
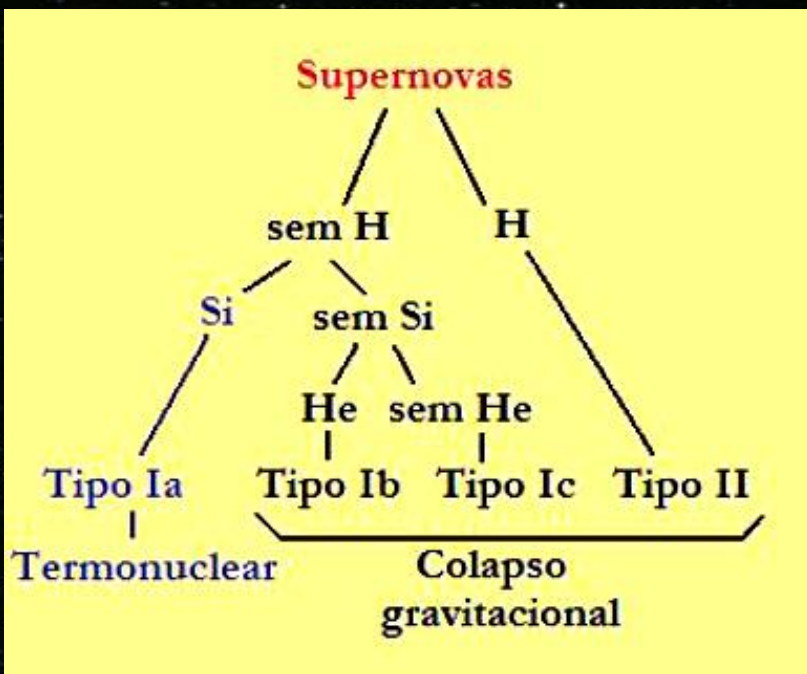


# Supernovas termonucleares

*J.E. Horvath*  
IAG-USP



# 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



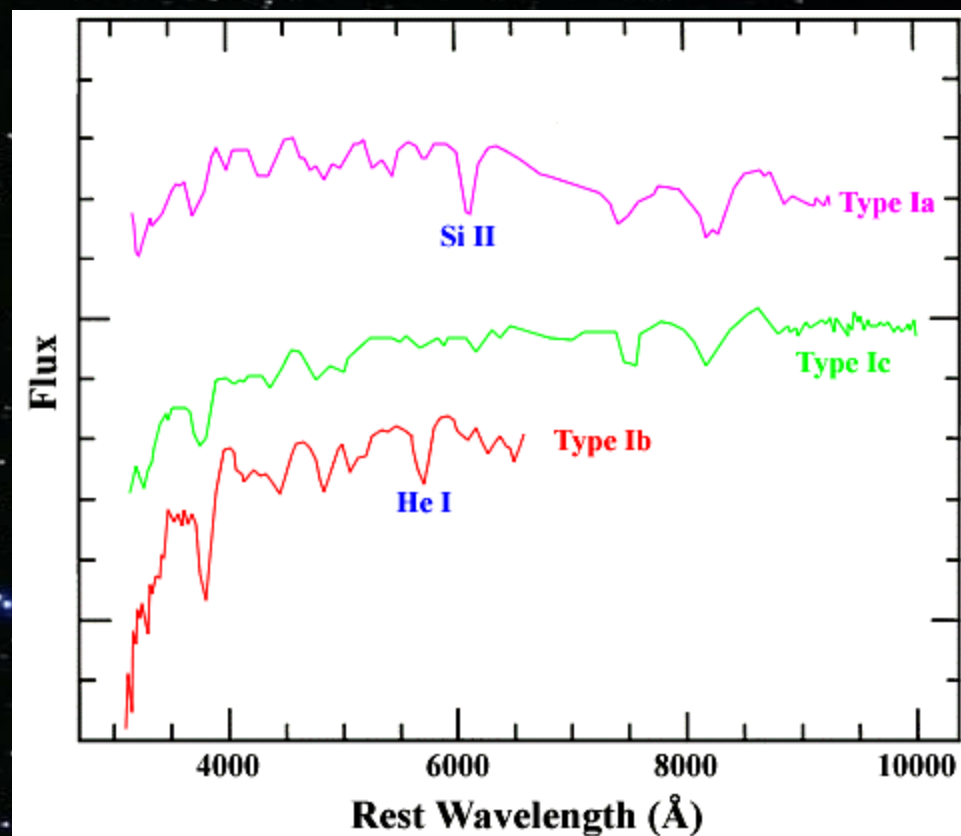
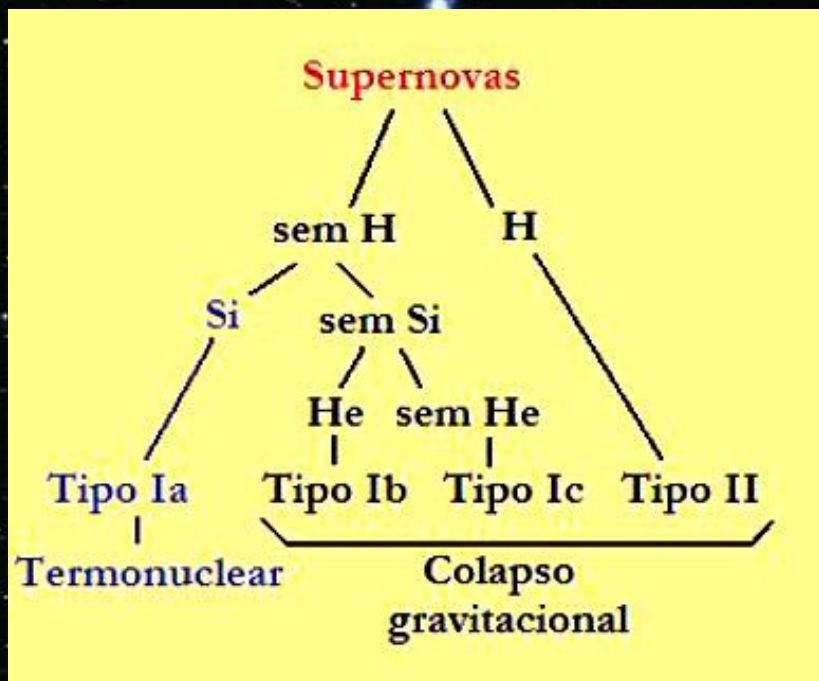
Tycho (1572)

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

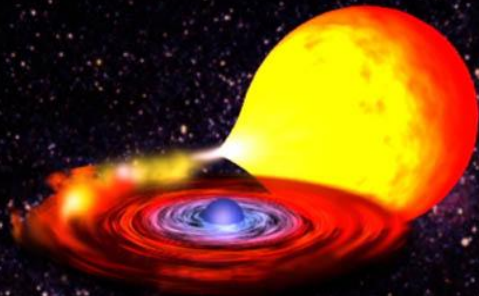
# Classificação das supernovas (espectroscópica)



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

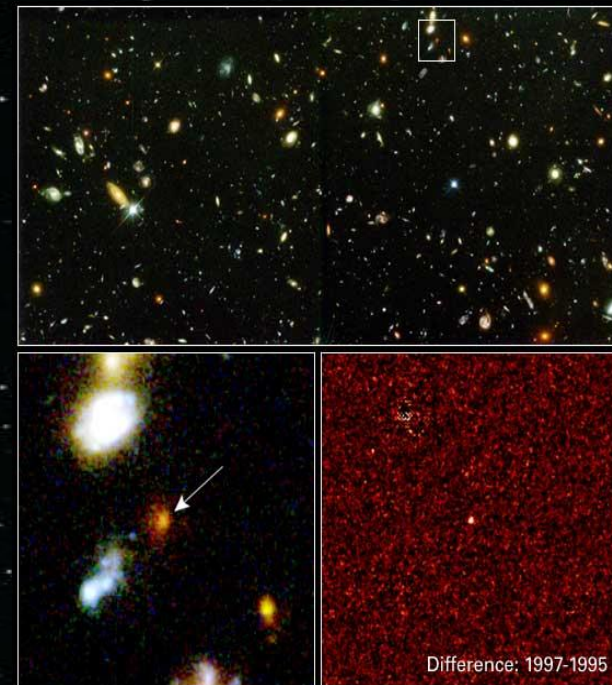
As supernovas atingem magnitudes absolutas negativas, portanto é possível ver elas desde muito longe...

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.

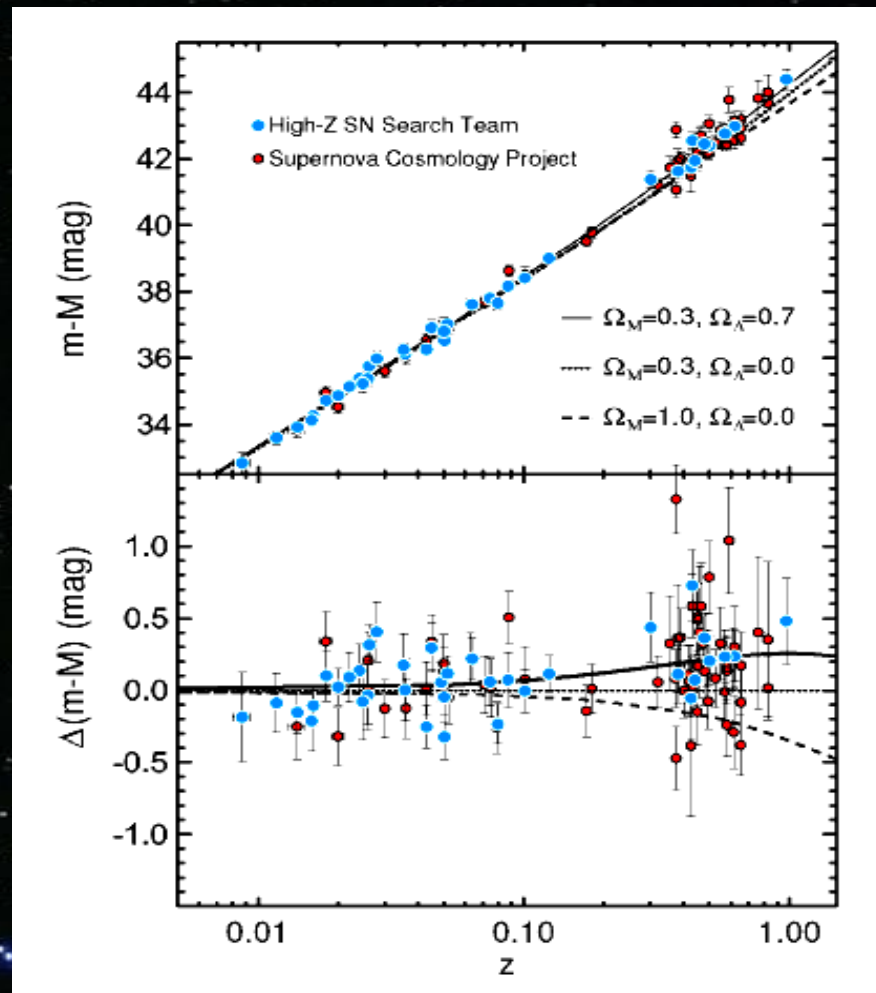
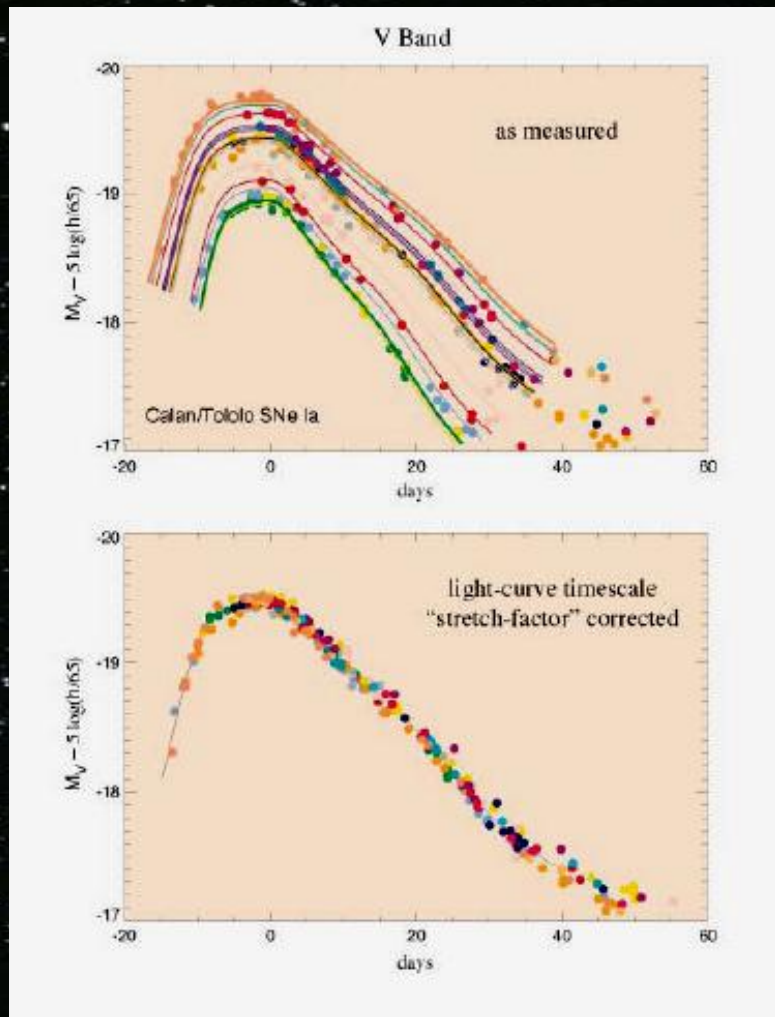
A supernova mais distante já observada até hoje aconteceu a uma distância de 12.7 Gpc, o Universo tinha então somente 3.8 Gyr



Distant Supernova in the Hubble Deep Field HST • WFPC2  
NASA and A. Riess (STScI) • STScI-PRC01-09

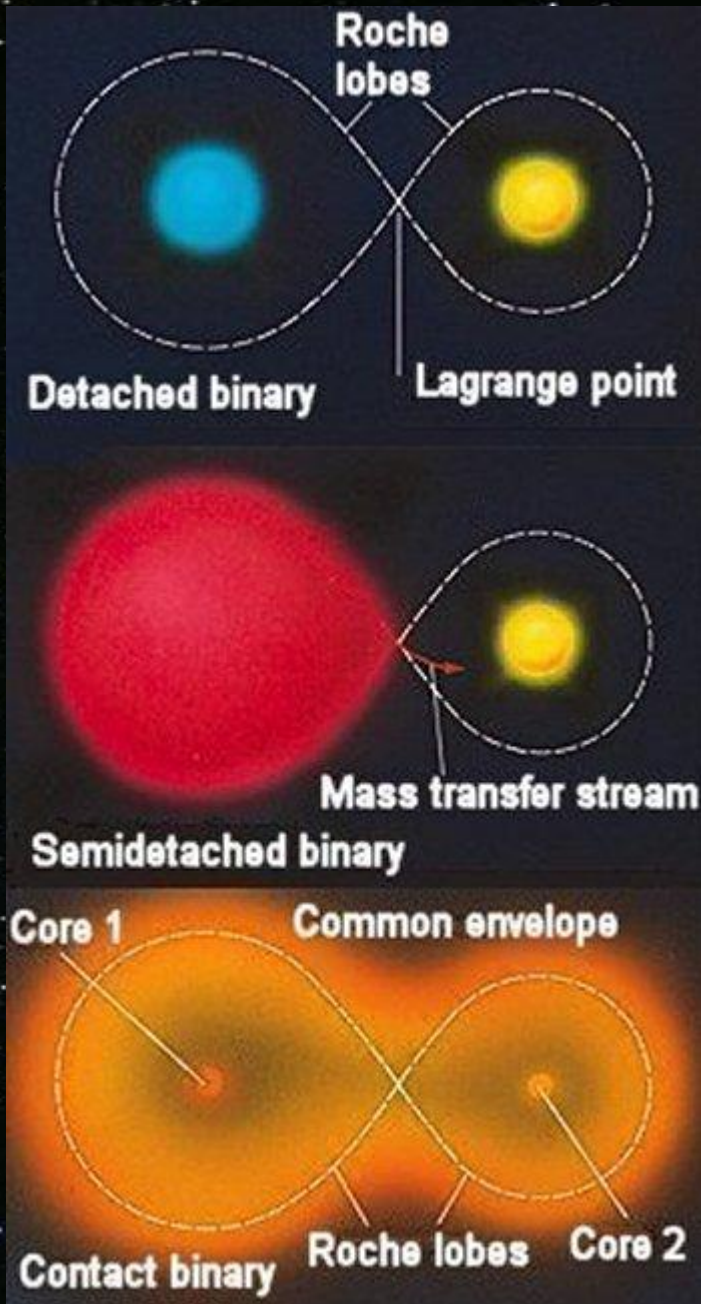


# Cosmologia : Calibração de Hamuy-Phillips



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





Variáveis cataclísmicas

(envelope comum)

$P \sim$  horas

Candidatas a “double-degenerate”

**Intervaloooo**

# 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

$$\tau_{\text{nuc}} \ll [\tau_{\text{cool}}; \tau_{\text{expansão}}]$$



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

Todas as combustões devem satisfazer as condições:

Fluxo de massa

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

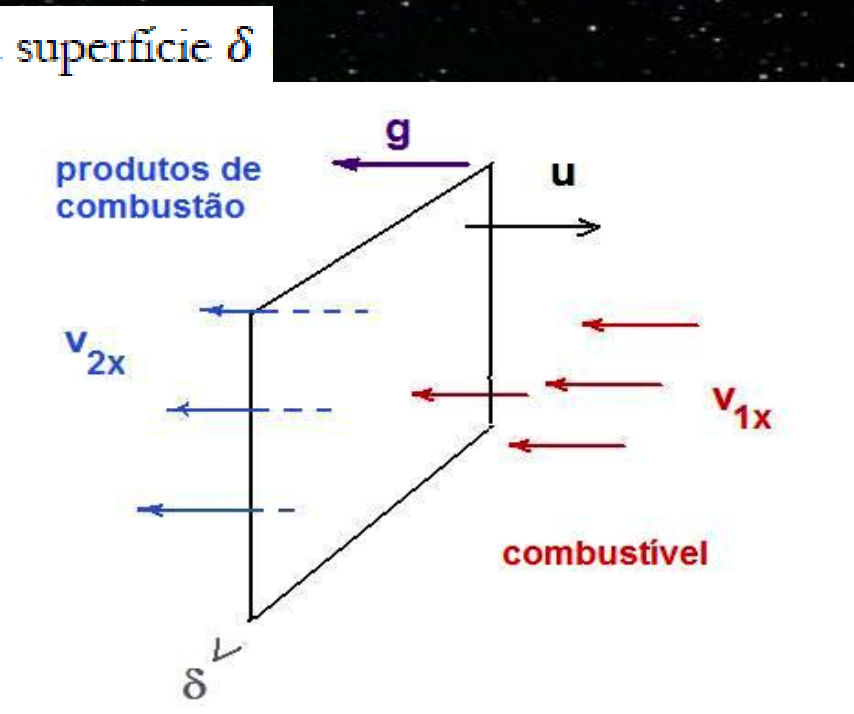
Fluxo de energia

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

Fluxo de momentum

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

sistema de coordenadas fixo



Entalpia: diferente para cada lado

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

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

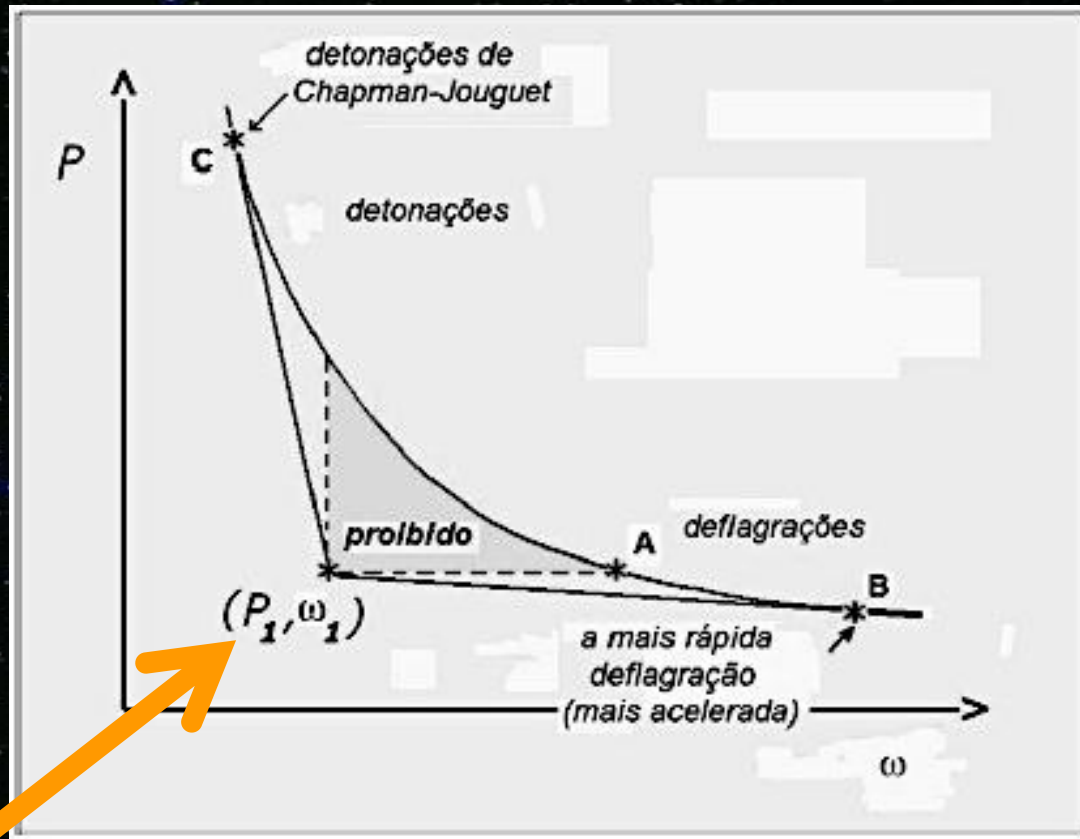
Manipulando chegamos a  
(fluxo de massa acima da superfície)

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

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

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

*subsônica*

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

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)

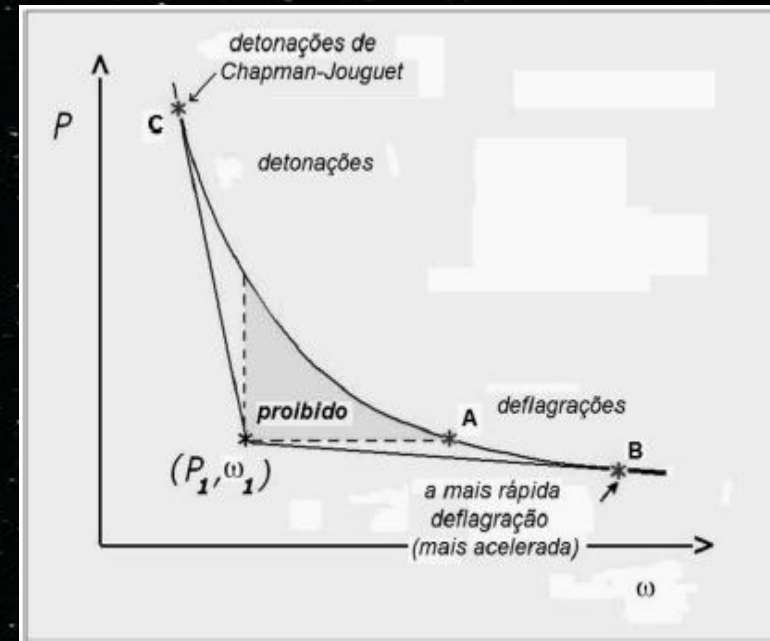
No outro caso, a pre-expansão pelas perturbações consegue que se formem Si, Ne, etc. Que são “brasas” a meio queimar (deflagrações)

## Requisitos de um modelo bem sucedido

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

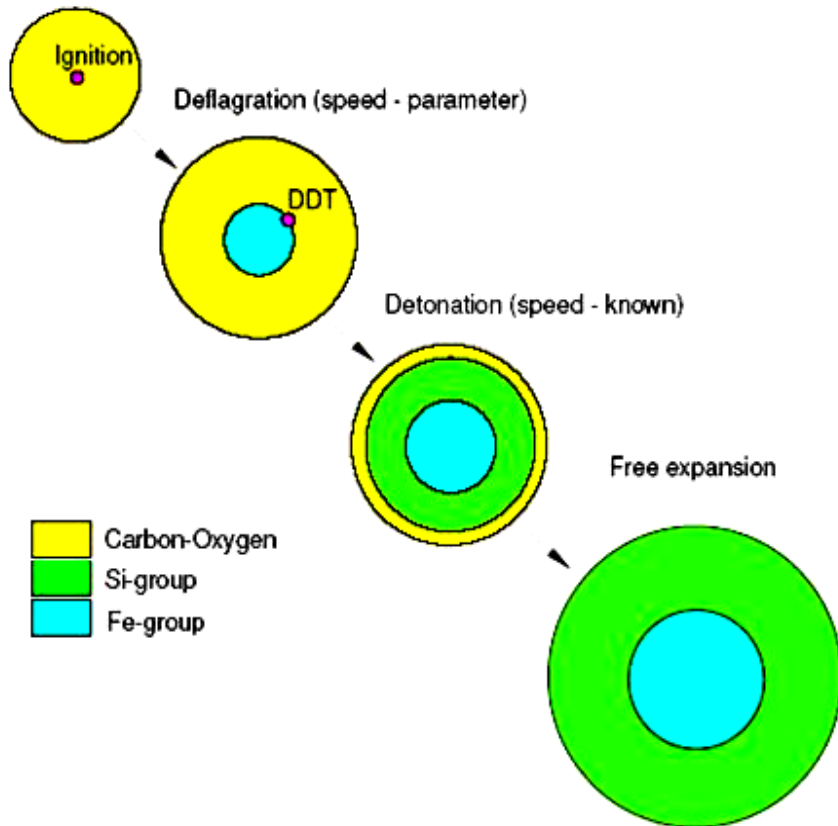
A chama subsônica é muito lenta e não atende, *deve* ser mais rápida

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**

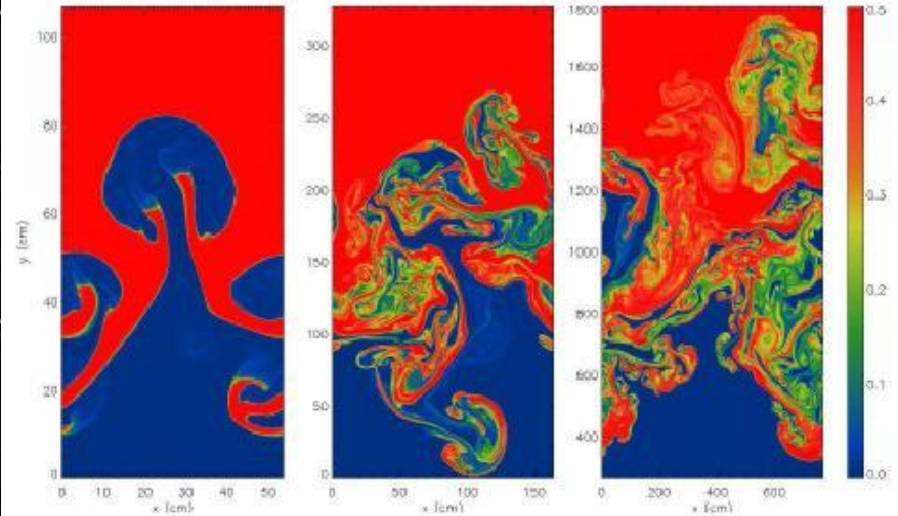


A vida como ela é...  
O número maldito que estraga  
que resulta mais fácil de tratar  
Reynolds

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

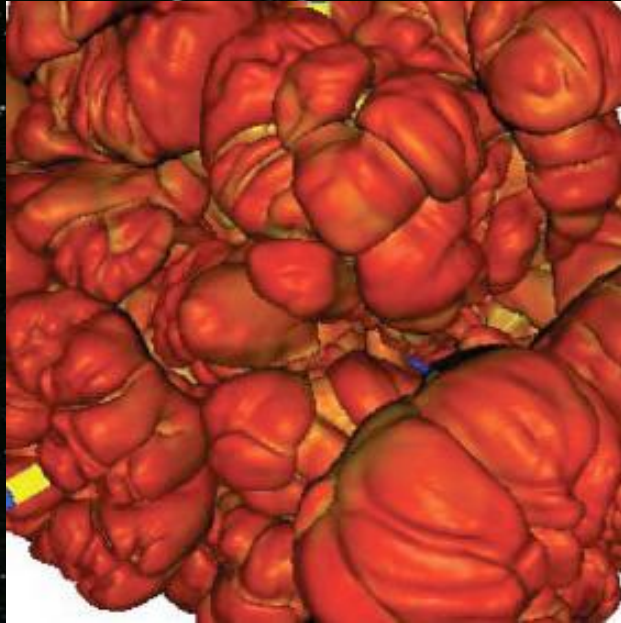
Se o  $Re \gg 1$  não é possível  
usar as eq. de Euler normais etc.

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

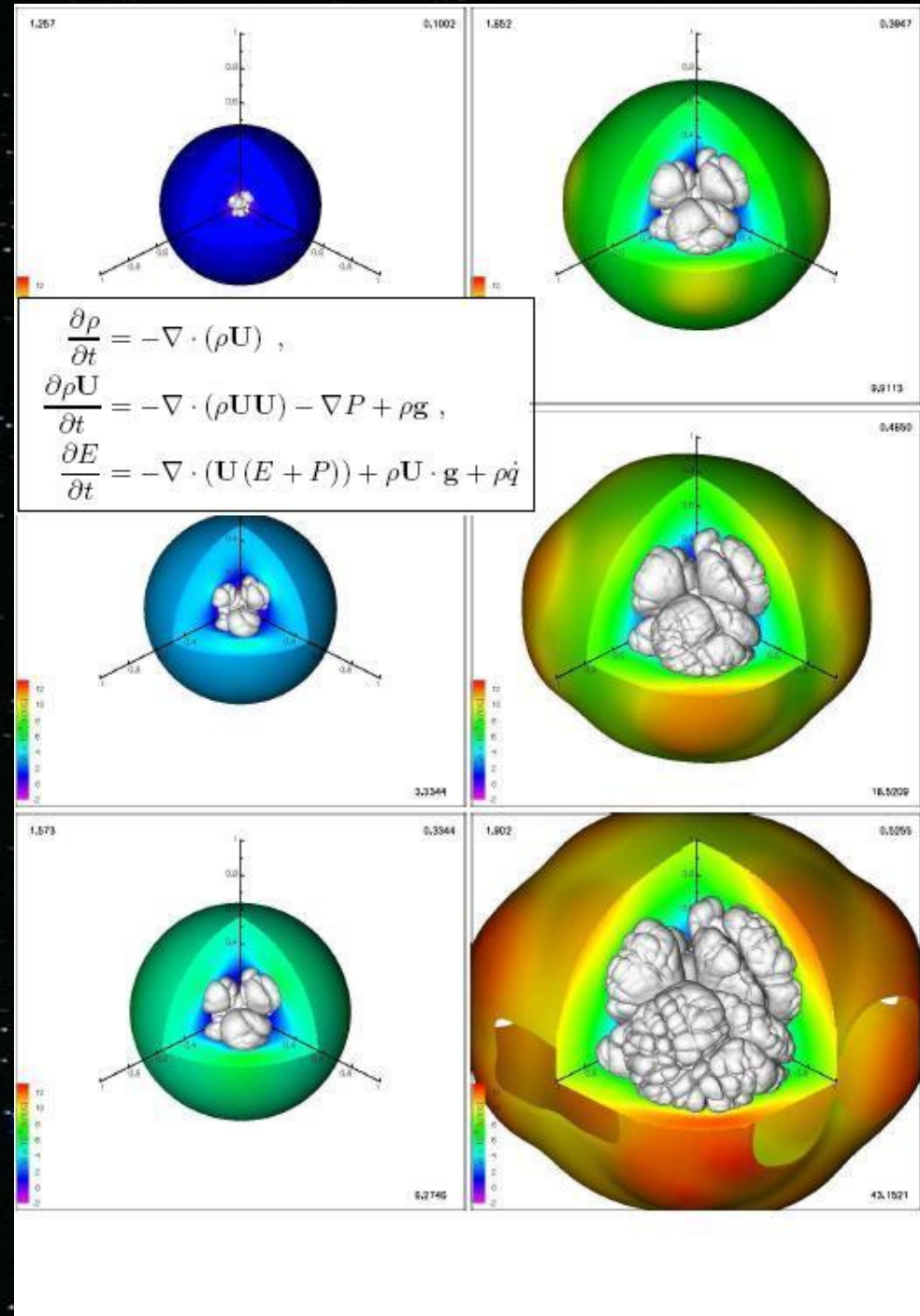


$\rho$  decrescente: a turbulência domina a  
queima e entramos no regime distribuído

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

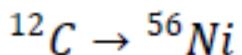


Mas...  
 As deflagrações turbulentas  
 também estão contidas na  
 adiabática de Chapman-Jouget

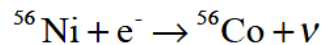


# Curvas de luz: a física elementar

Na queima

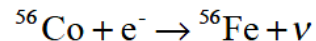


$$q = 9.6 \times 10^{17} (8.64 - Q)$$



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

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



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

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

Evidentemente

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

perdas pequenas

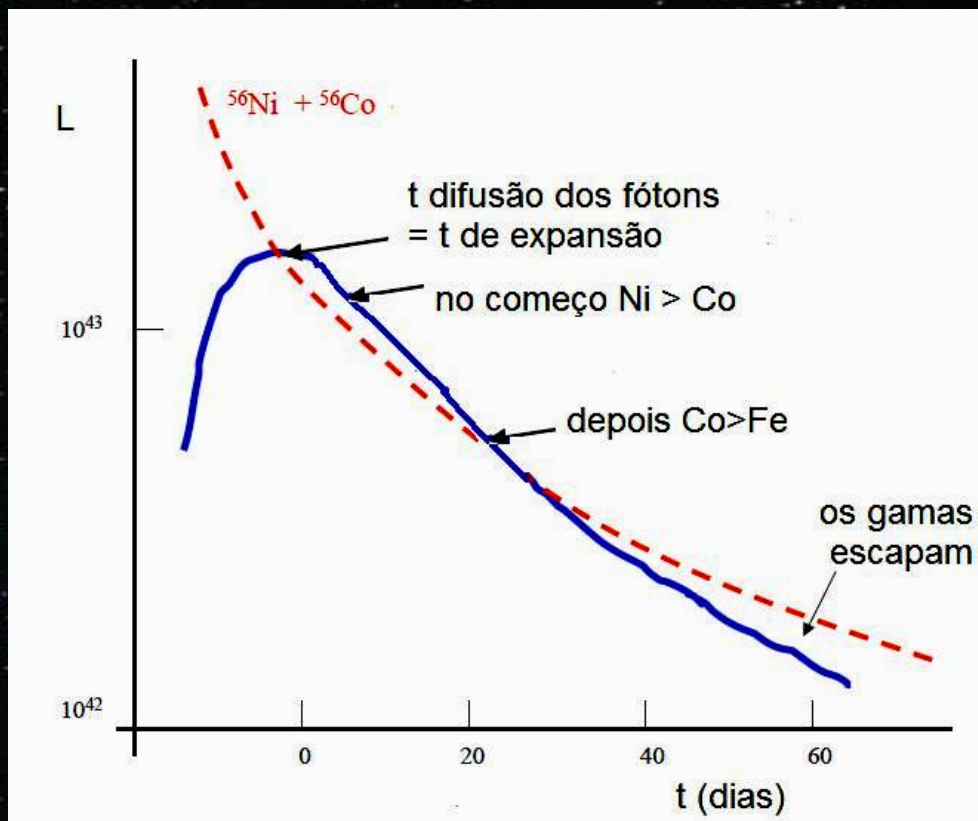
inserindo a  $\langle v \rangle$  observada temos que  $M_q/M_{WD} \leq 1$  (ainda bem!)

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





Acabam as explosões e chegam as  
anãs brancas...