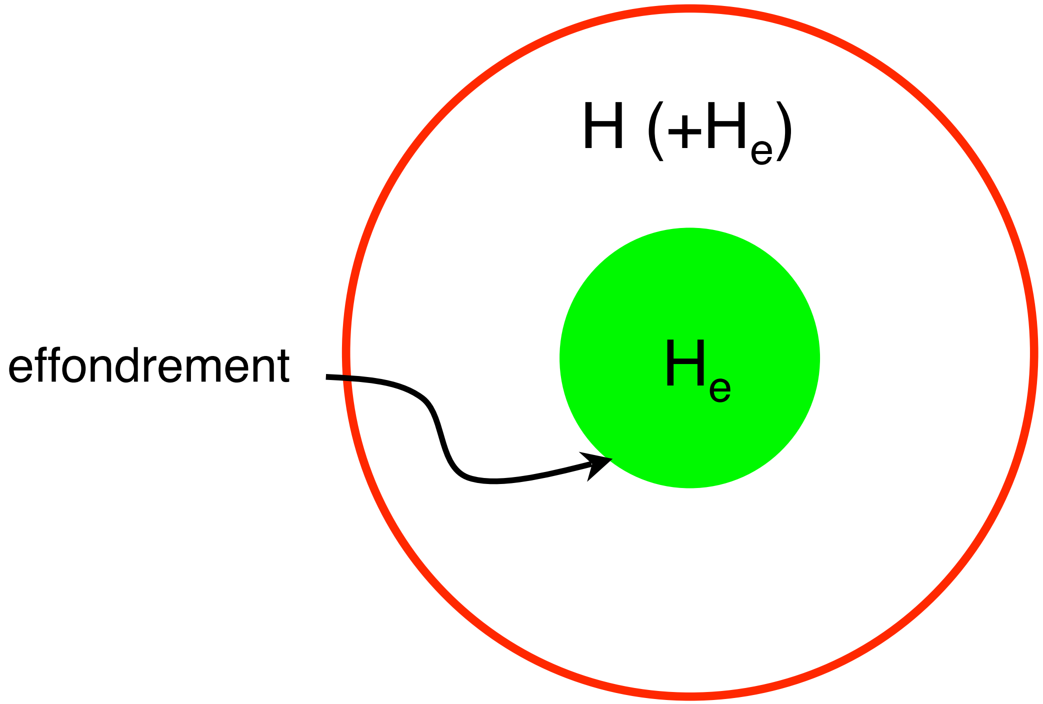
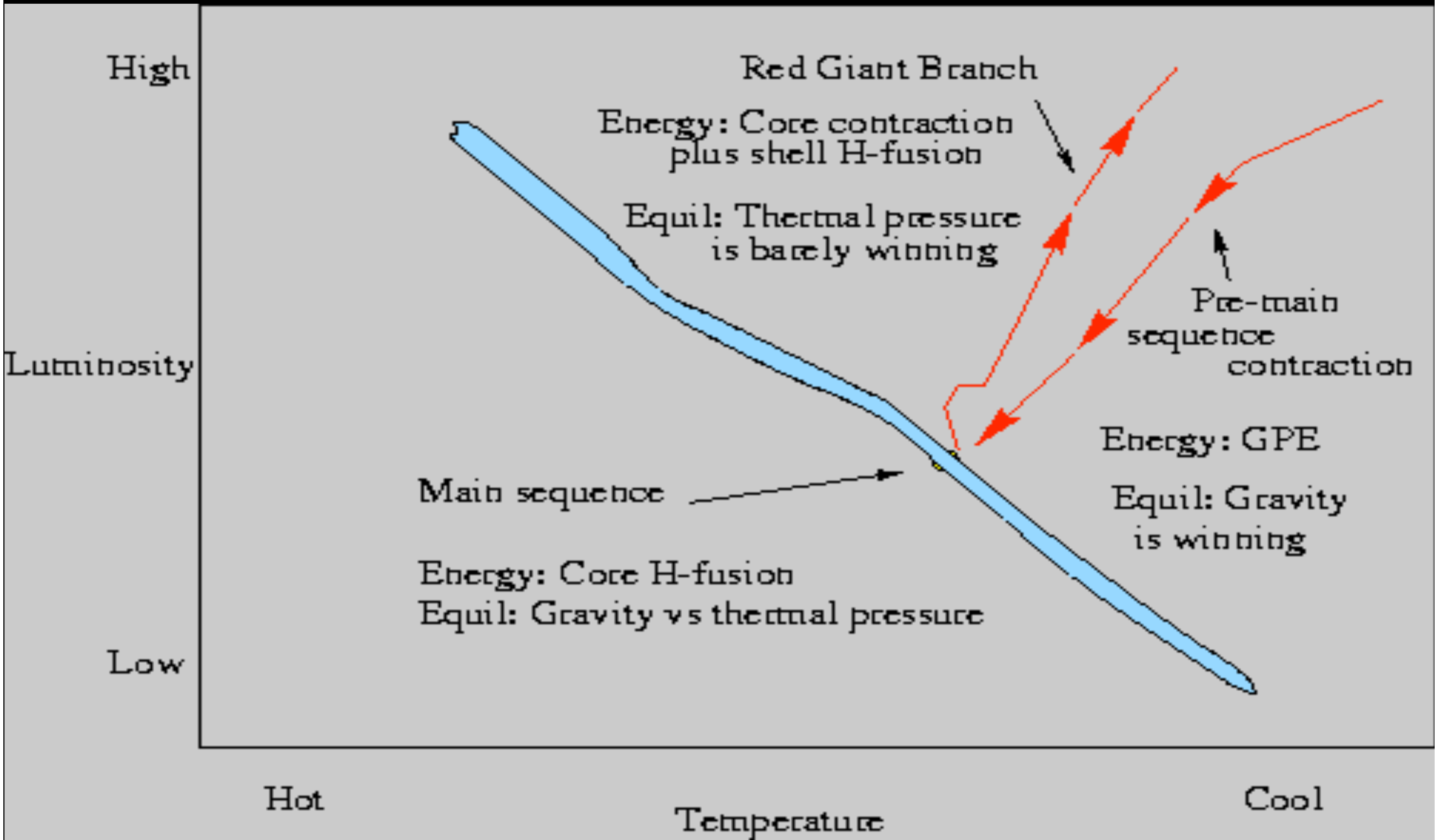
La mort des étoiles

extinction de la fusion de l'hydrogène:



sortie de la séquence principale



le cycle triple alpha

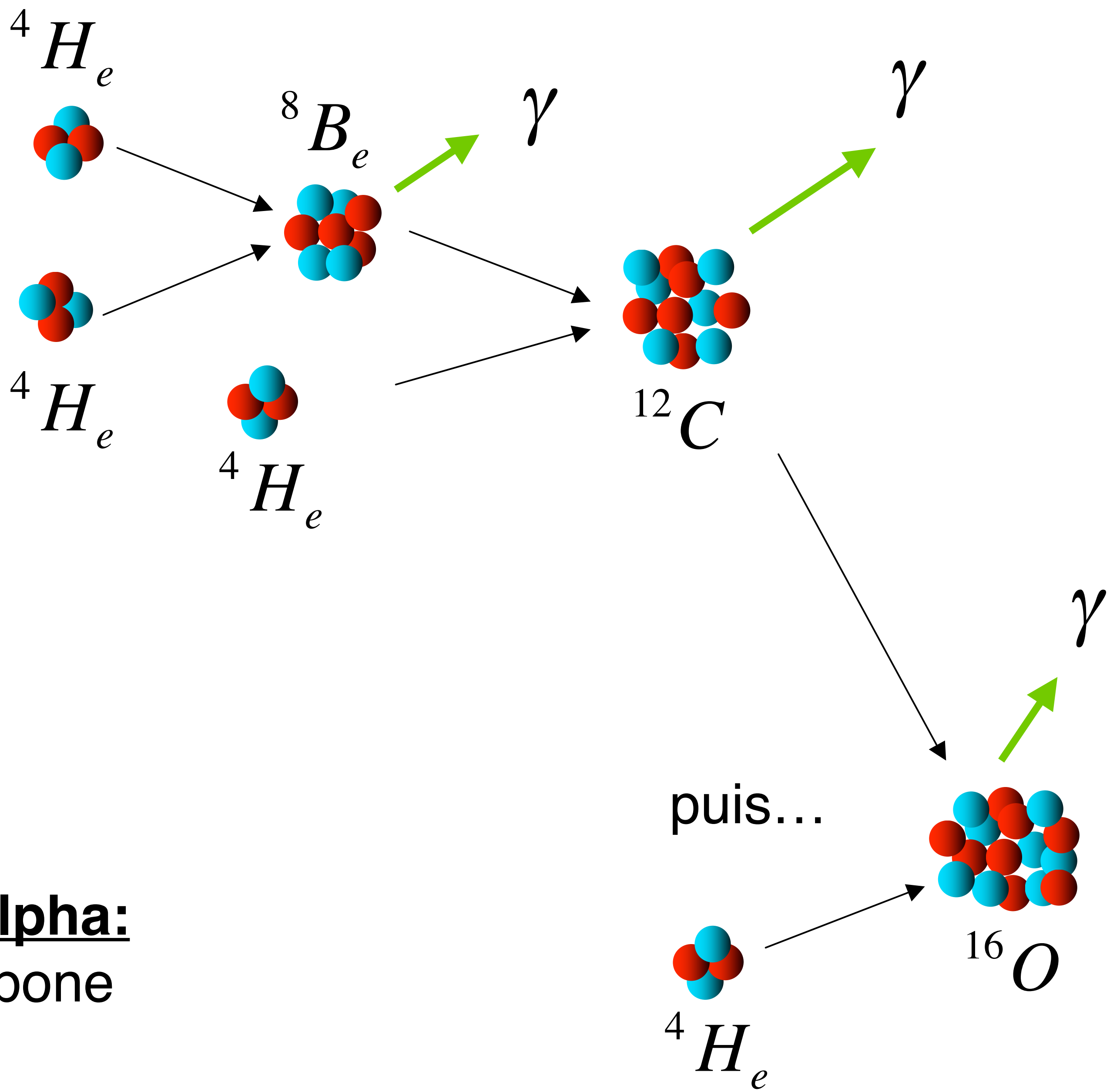
$$^{4}H_{e}^{++} +^{4} H_{e}^{++} \qquad {}^{8}B_{e}^{++++} + \#$$

$$^{4}H_{e}^{++} + {}^{8}B_{e}^{++++} \qquad {}^{12}C^{++++++} + \#$$

bilan:

$$^{4}H_{e} + {}^{4}H_{e} + {}^{4}H_{e} \rightarrow {}^{12}C + 2\gamma$$

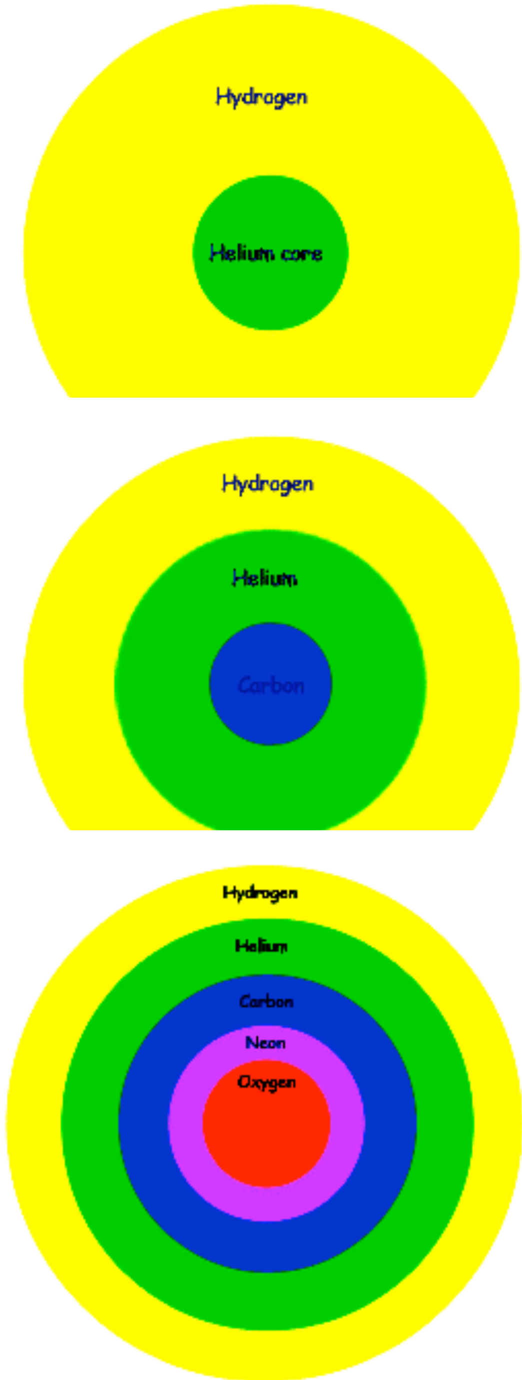
NB. requiert des températures de l’ordre de 10^{8} K



<u>le cycle triple alpha:</u>

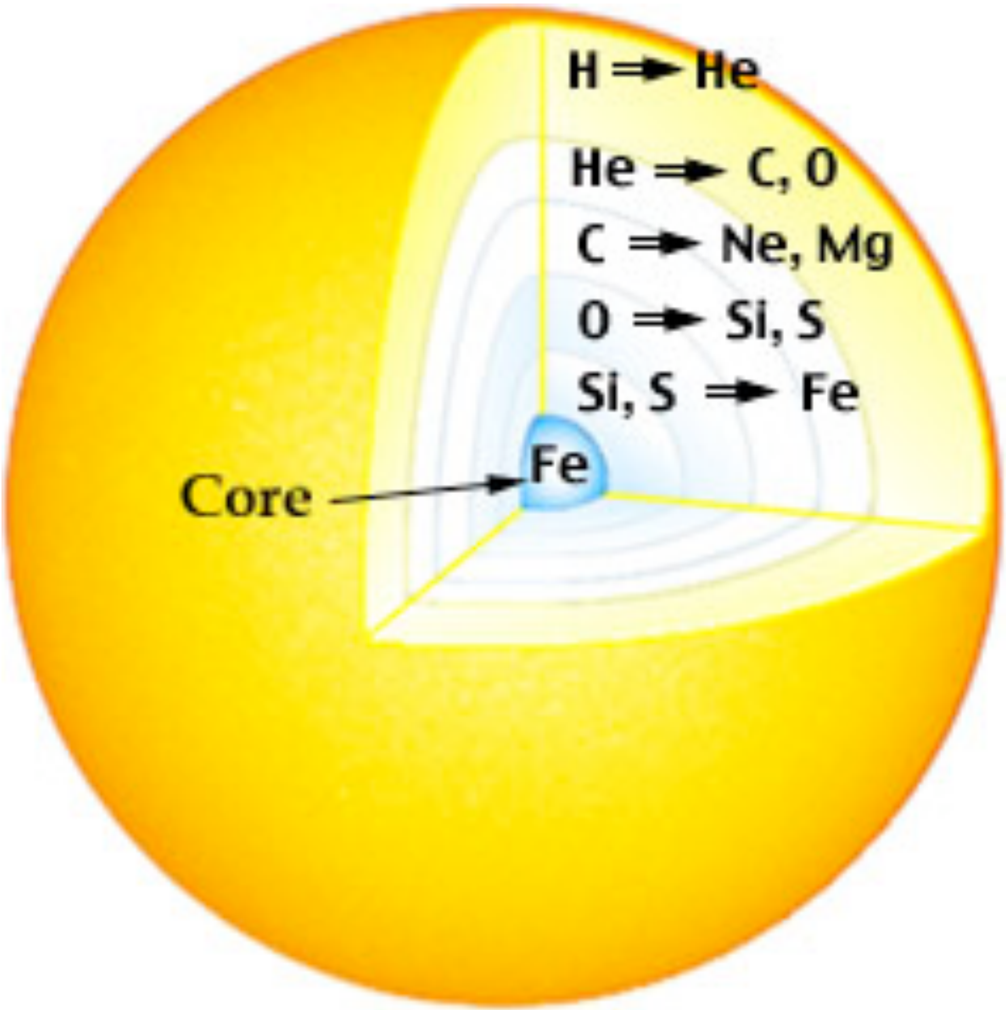
synthèse du carbone

la structure en couche

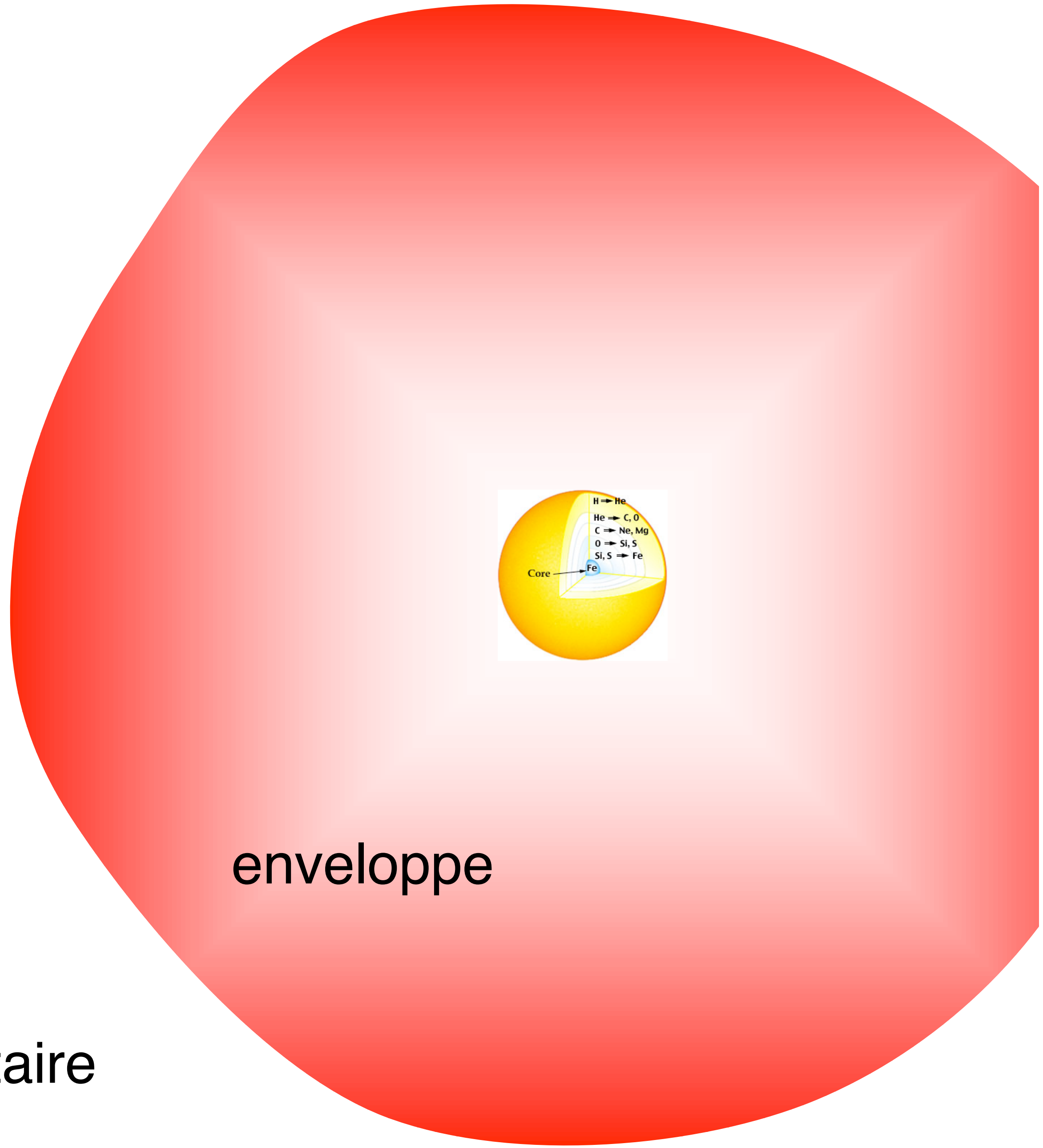


http://www.airynothing.com/high_energy_tutorial/basic_astro/life_cycle02.html

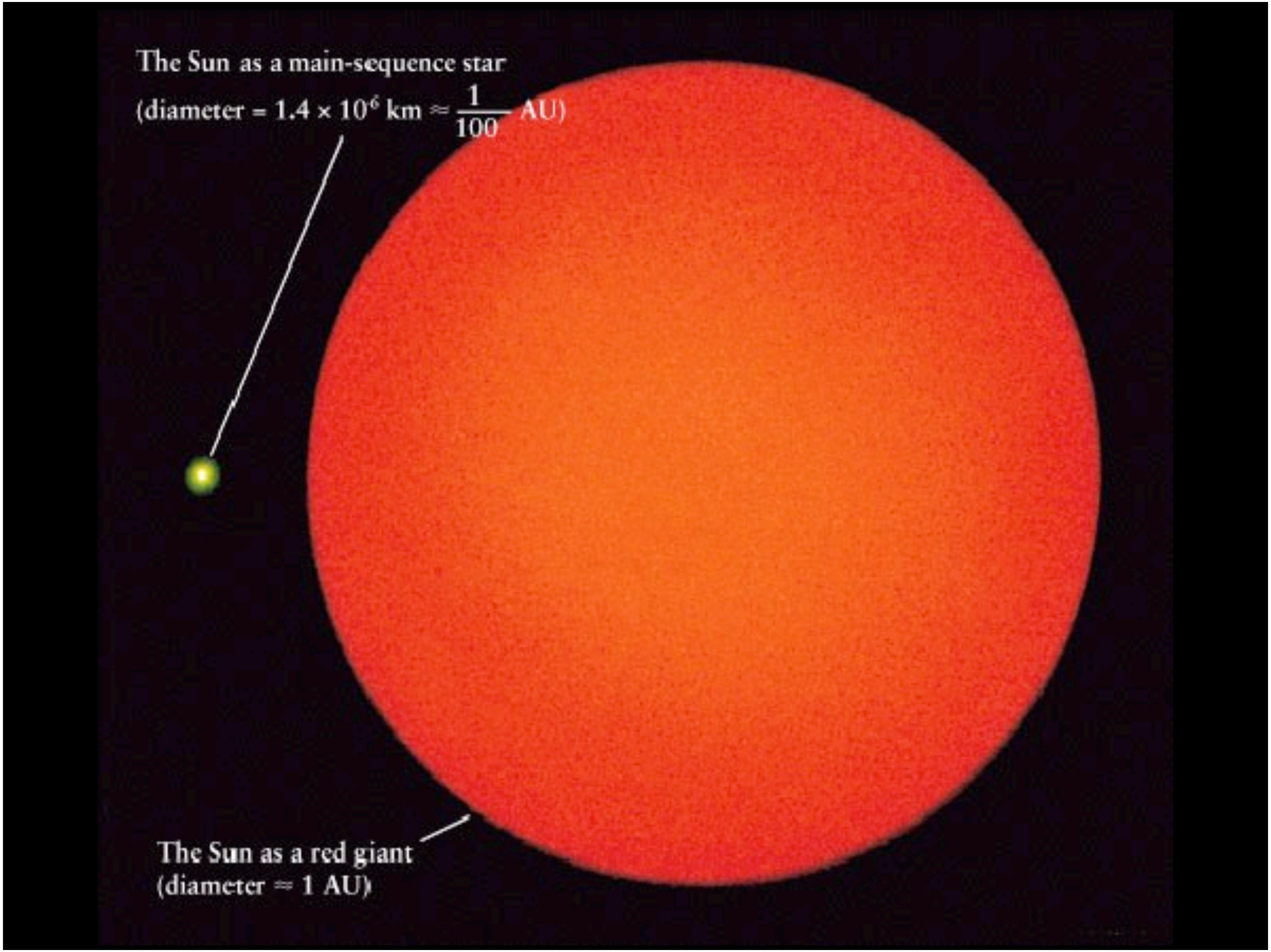
étoile en fin de vie:
usine à éléments lourds

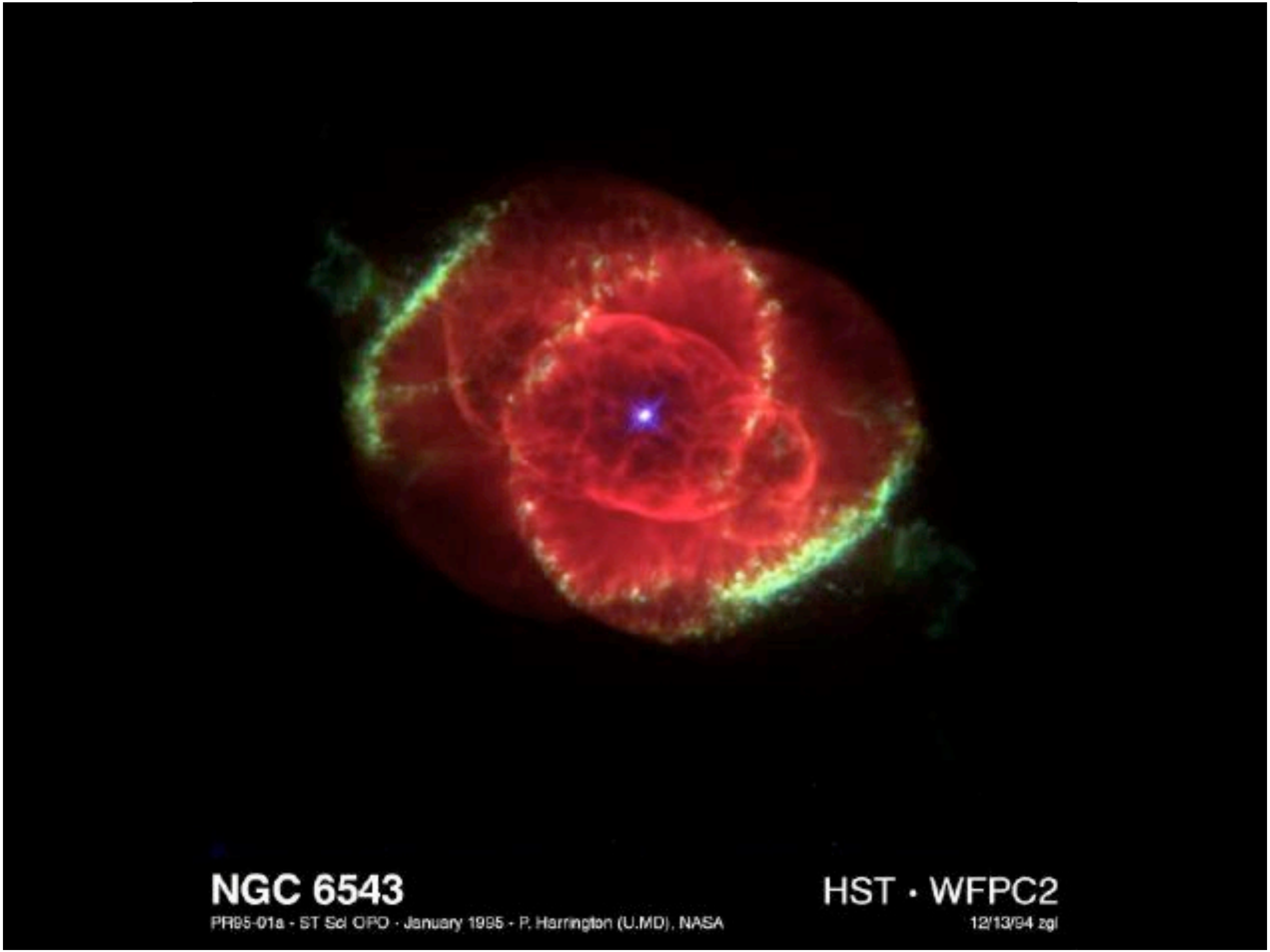


stade de géante rouge



…puis nébuleuse planétaire

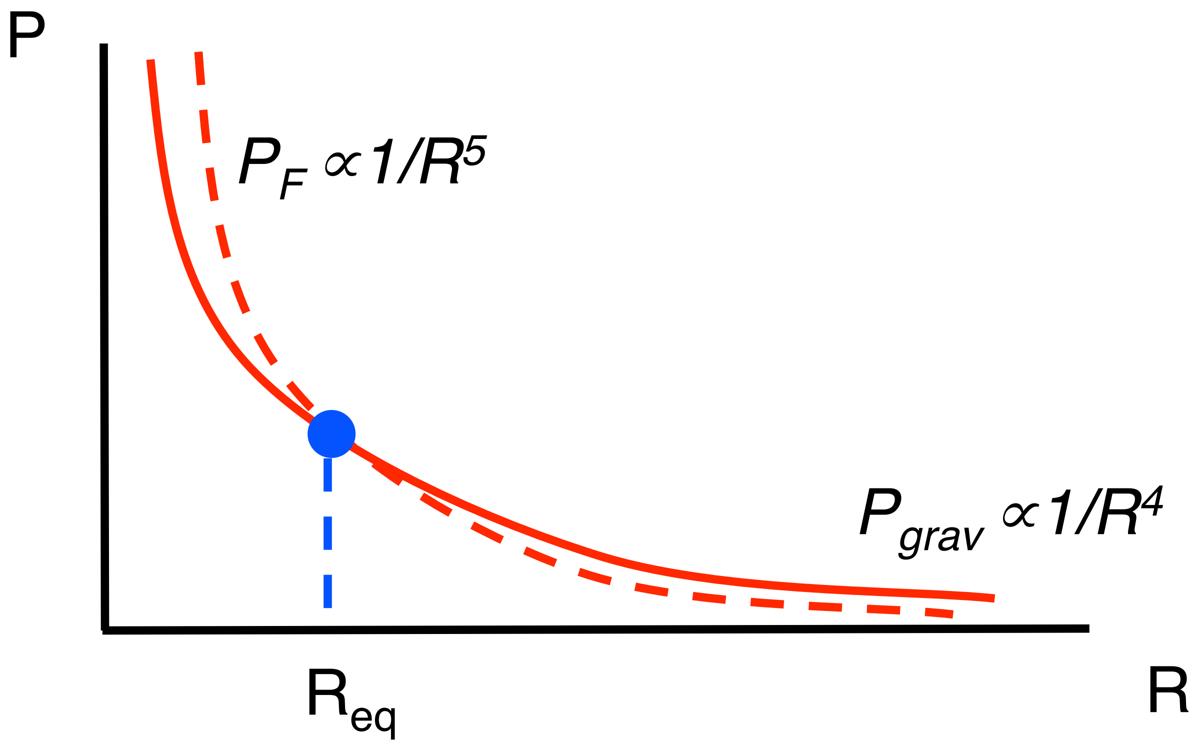

The Sun as a main-sequence star
(diameter = 1.4×10^6 km $\approx \frac{1}{100}$ AU)
The Sun as a red giant
(diameter $\approx$ 1 AU)


NGC 6543
PR95-01a - ST ScI OPO · January 1995 - P. Harrington (U.MD), NASA
HST · WFPC2
12/13/94 zgl

stade de naine blanche

$$P_{grav} \sim \frac{3}{8\pi} \cdot \frac{GM^2}{R^4} \propto \frac{M^2}{R^4}$$

$$P_F(e^-) = 2\frac{\hbar^2}{m_e}\left(\frac{Z}{A}\right)^{5/3}\left(\frac{\rho}{m_p}\right)^{5/3} \propto \frac{M^{5/3}}{R^5}$$



stabilité d'une naine blanche

$$\frac{3}{8\pi} \cdot \frac{GM^2}{R^4} = C \times \frac{M^{5/3}}{R^5}$$

où $C \sim 2.8 \times 10^5$ uSI

$$\boxed{R = \frac{8\pi C}{3G} \times \frac{1}{M^{1/3}}}$$

AN. $R \sim 3000$ km, en fait plutôt 7000 km

$\rho \sim 10^9$ kg m^{-3} = 10^6 ρ_{eau}!

(1 tonne cm^{-3}…)

NB. R diminue quand M augmente

Etoiles à neutrons

pression: $$P_F = n v_x p_x$$

si gaz *classique (v << c):* $$p_x = m v_x$$

si gaz *relativiste (v ~ c):* $$v_x \longrightarrow c$$

naine blanche: $$p_x = m_e v_x$$

et:

$$P_F(e^-) = 2\frac{\hbar^2}{m_e}\left(\frac{Z}{A}\right)^{5/3}\left(\frac{\rho}{m_p}\right)^{5/3}$$

d'où:

$$v_x \sim \frac{\sqrt{6}\hbar}{m_e}\left(\frac{Z}{A}\frac{\rho}{m_p}\right)^{1/3}$$

AN: $M \sim 1\, M_{\odot}$, $\rho \sim 10^9$ kg m^{-3}

$v_x \sim 2 \times 10^8$ m sec $^{-1}$, presque relativiste…

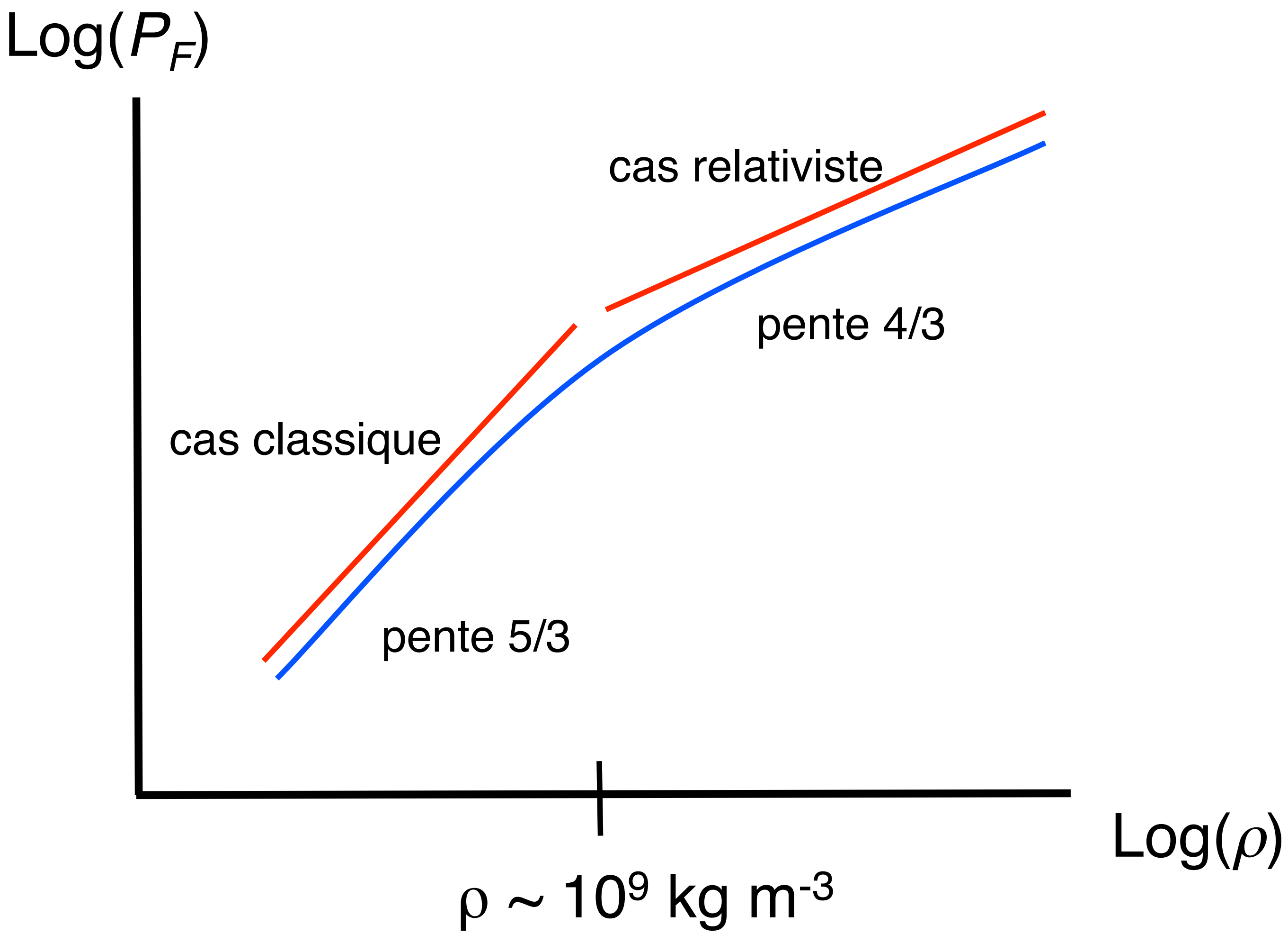
quand le gaz devient relativiste :

$$P_F(e^-) = n_e v_x p_x \rightarrow n_e c p_x$$

…et toujours: $p_x \sim \hbar / \Delta x$

formule relativiste de la pression de Fermi:

$$\boxed{P_F(e^-) = \frac{2\hbar c}{3}\left(\frac{Z}{A}\cdot\frac{\rho}{m_p}\right)^{4/3}}$$



régime relativiste: $P_F(e^-) \sim 4.2 \times 10^9\, \rho^{4/3}$ Pa

masse de Chandrasekhar

$$\begin{cases} P_F(e^-) & \sim & 6.3\times 10^8 \dfrac{M^{4/3}}{R^4} \propto \dfrac{1}{R^4} \\ \\ P_{grav} & \sim & \dfrac{3}{8\pi}\times\dfrac{GM^2}{R^4} \propto \dfrac{1}{R^4} \end{cases}$$

effondrement si: $P_{grav} > P_F$

AN: $M > 1.8\ M_\odot$

en fait:

$$M > M_{chandrasekhar} \sim 1.44\ M_\odot$$

$\Rightarrow$ supernova…

supernovae

neutronisation:

$$p^+ + e^- \rightarrow n + \nu_e$$

en général impossible car:

$m_p \sim 1.6726 \times 10^{-27}$ kg
$m_n \sim 1.6749 \times 10^{-27}$ kg

$\Big\} \quad \Delta m$

donc:

$$\Delta m \cdot c^2 \sim 1.3 \text{ Mev}$$

mais:

$$m_e \cdot c^2 \sim 0.5 \text{ Mev}$$

dans une naine blanche:

$$m_e c^2 \rightarrow \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

énergie de l'électron > 1.3 Mev pour
v > ~ *0.92 c*

alors la neutronisation:

$$p^+ + e^- \rightarrow n + \nu_e$$

est possible → supernova

effondrement en chute libre
pour trois raisons:

1- $P_F(e^-)$ disparaît

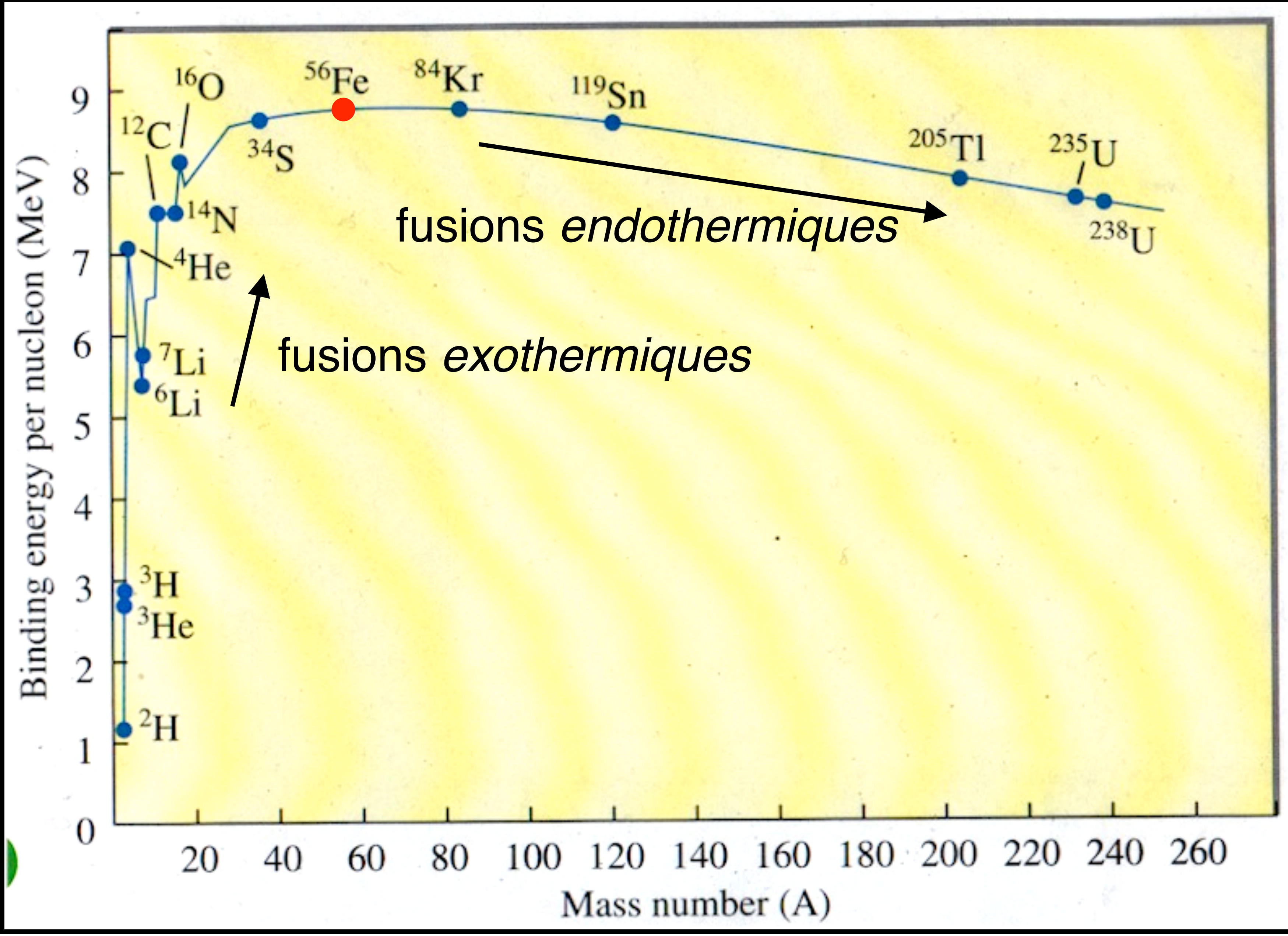
2- les neutrinos emportent toute l'énergie produite

3- les réactions de fusion au-delà du fer sont endothermiques

→ chute libre!

$$t_{ch.libre} \sim \frac{1}{\sqrt{G\rho}} \sim \text{ qqs sec}$$

stabilité des noyaux



taille des étoiles à neutrons

$$P_F(n) = 2\frac{\hbar^2}{m_n}\left(\frac{Z}{A}\right)^{5/3}\left(\frac{\rho}{m_p}\right)^{5/3} \approx P_F(e^-)/1840 \propto \frac{1}{R^5}$$

$$P_{grav} = \frac{3}{8\pi}\cdot\frac{GM^2}{R^4}$$

équilibre pour:

$$R \sim \frac{2\times10^{13}}{M^{1/3}}\ \mathrm{m} \sim 2\left(\frac{M_{Soleil}}{M}\right)^{1/3}\ \mathrm{km}$$

en fait:

$$\boxed{R \sim 15\cdot\left(\frac{M_{Soleil}}{M}\right)^{1/3}\ \mathrm{km}}$$

pour $M \sim 1.44\, M_\odot$, $R \sim 10$ km

d'où:

$\rho \sim 6 \times 10^{17}$ kg m^{-3}

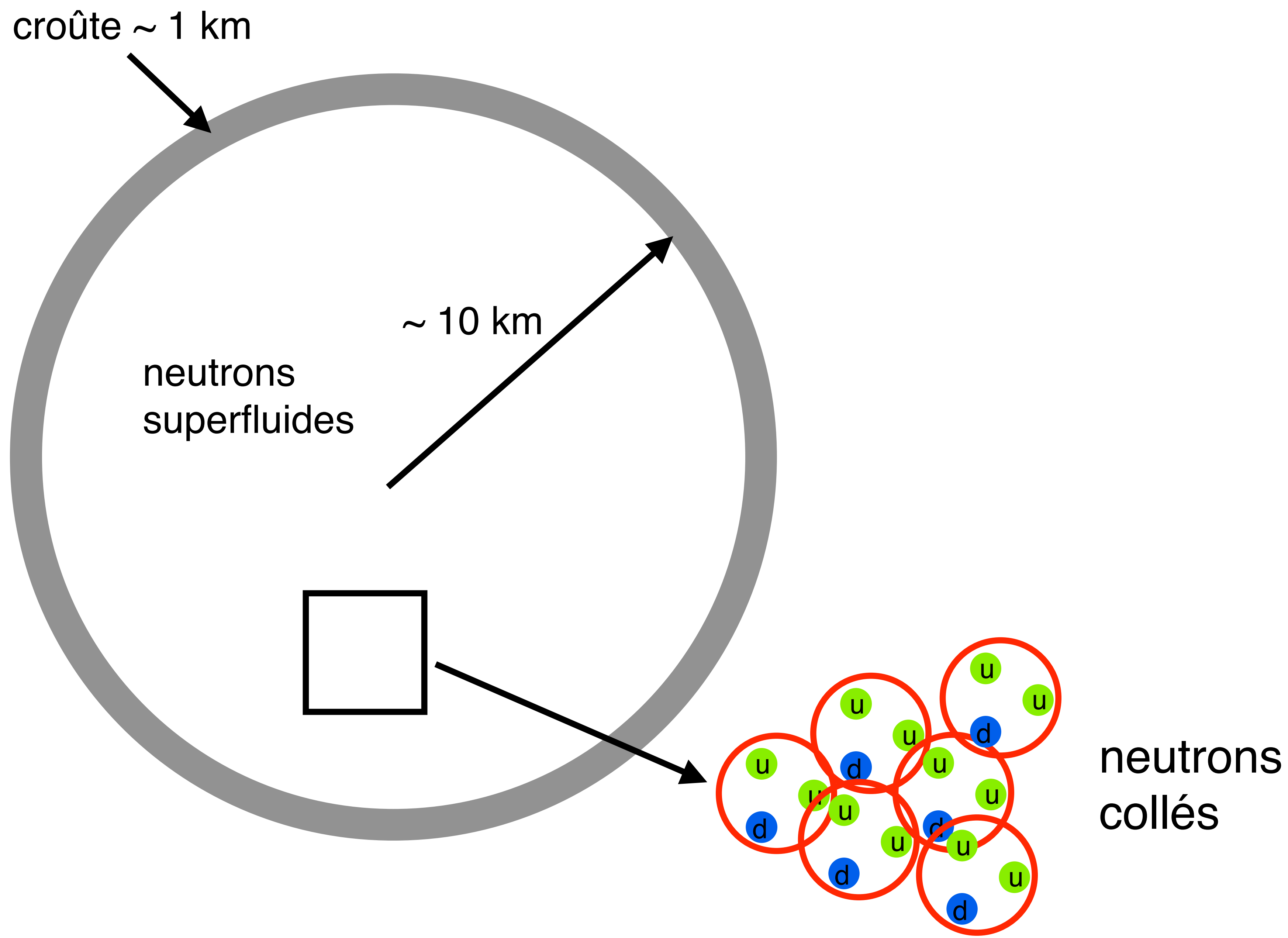
1 cm^3 contient 600 millions de tonnes!

densité de neutrons:

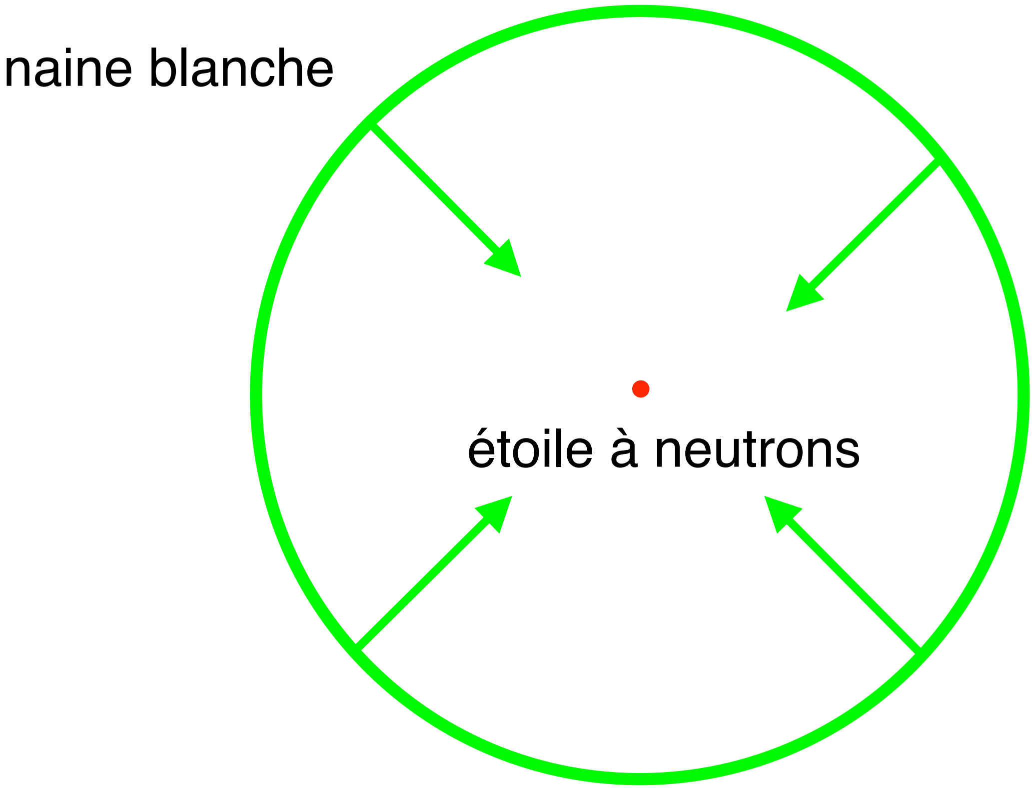
$n_n \sim 4 \times 10^{44}$ neutrons m^{-3}

distance entre neutrons:

$d = 1/n^{1/3} \sim 10^{-15}$ m (1 Fermi)


croûte ~ 1 km
~ 10 km
neutrons
superfluides
neutrons
collés

luminosité d'une supernova



$$\Delta E = -\frac{GM^2}{R_{et.neut.}} - \left(-\frac{GM^2}{R_{nai.blanche}}\right) \sim -\frac{GM^2}{R_{et.neut.}}$$

AN: $|\Delta E| \sim 6 \times 10^{46}$ Joules libérés au cours de l'effondrement

exemple d'une étoile de 25 masses solaires:

TABLE 22-1

Evolutionary Stages of a 25-$M_\odot$ Star

Stage	Temperature (K)	Density (kg/m^3)	Duration of stage
Hydrogen burning	4×10^7	5×10^3	7×10^6 years
Helium burning	2×10^8	7×10^5	7×10^5 years
Carbon burning	6×10^8	2×10^8	600 years
Neon burning	1.2×10^9	4×10^9	1 year
Oxygen burning	1.5×10^9	10^{10}	6 months
Silicon burning	2.7×10^9	3×10^{10}	1 day
Core collapse	5.4×10^9	3×10^{12}	$\frac{1}{4}$ second
Core bounce	2.3×10^{10}	4×10^{15}	milliseconds
Explosive	about 10^9	varies	10 seconds

dont:

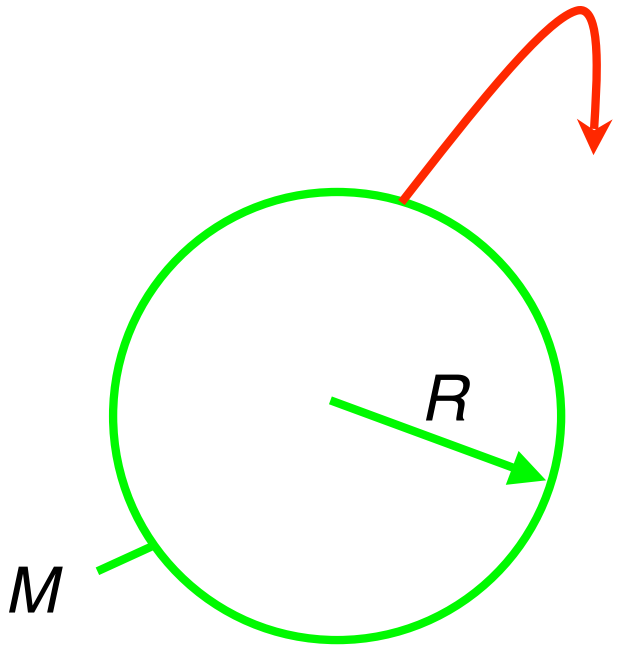
99% $\rightarrow$ neutrinos
1% $\rightarrow$ énergie cinétique (enveloppe)
0.1% $\rightarrow$ lumière

essentiel de la lumière émis au cours d'un mois:

$$L \sim 0.1\% \times \Delta E/(3600 \times 24 \times 30) \sim 6 \times 10^{11}\, L_\odot$$

luminosité supernova ~ luminosité de la galaxie entière!

trou noir



vitesse de libération:

$$v_{lib} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

rayon de Schwarzschild: rayon pour lequel $v_{lib} = c$, donc:

$$R_{Schwarz} = \frac{2GM}{c^2} \sim 3\frac{M}{M_{Soleil}}\ \mathrm{km}$$

trou noir pour $R < R_{schwarrz}$, soit:

$$15 \cdot \left(\frac{M_{Soleil}}{M}\right)^{1/3} < 3 \cdot \frac{M}{M_{Soleil}}$$

i.e.: $M > \sim 3\ M_{\odot}$

en fait:

$$M > \sim 8 M_{\odot}$$