

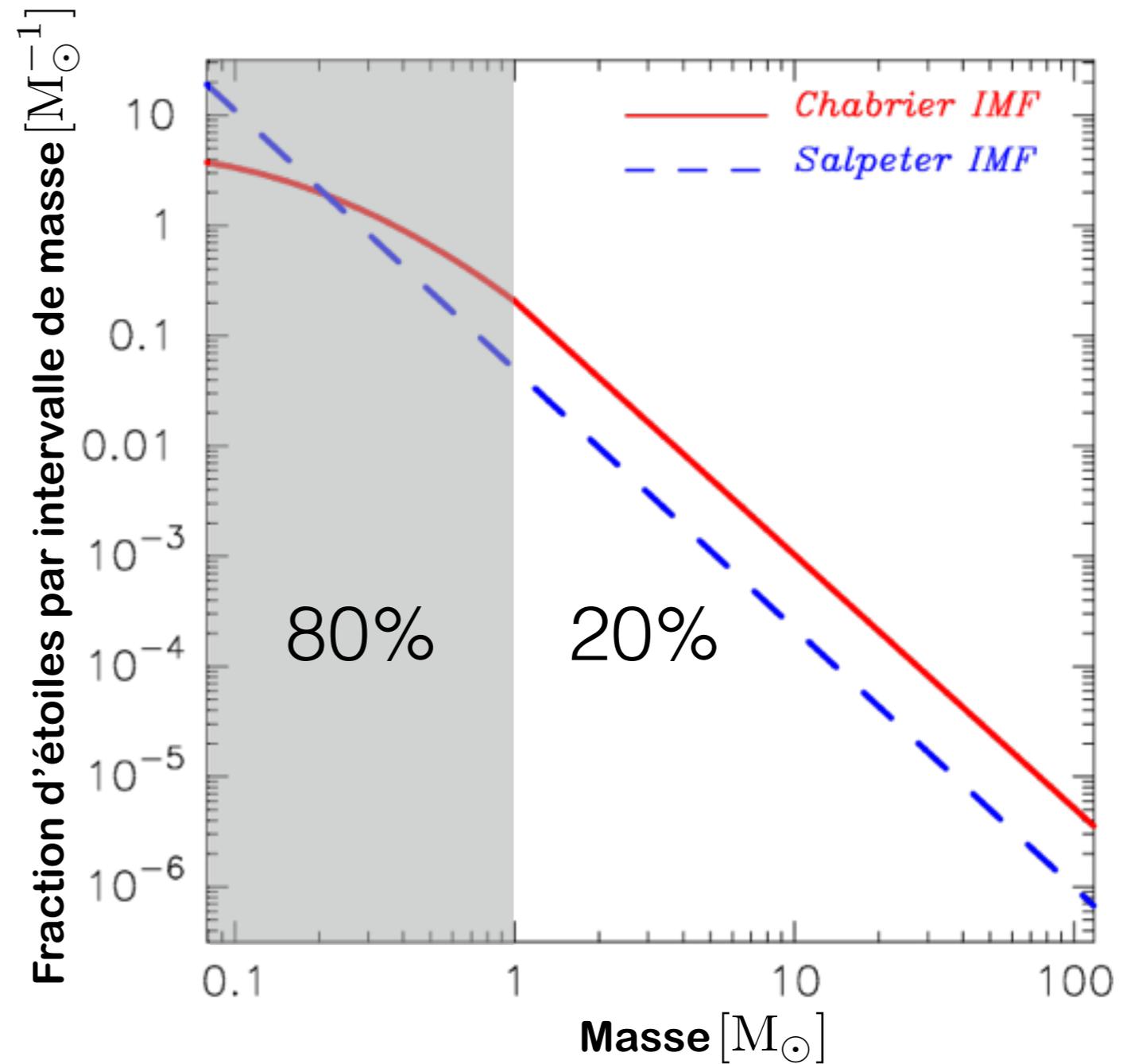
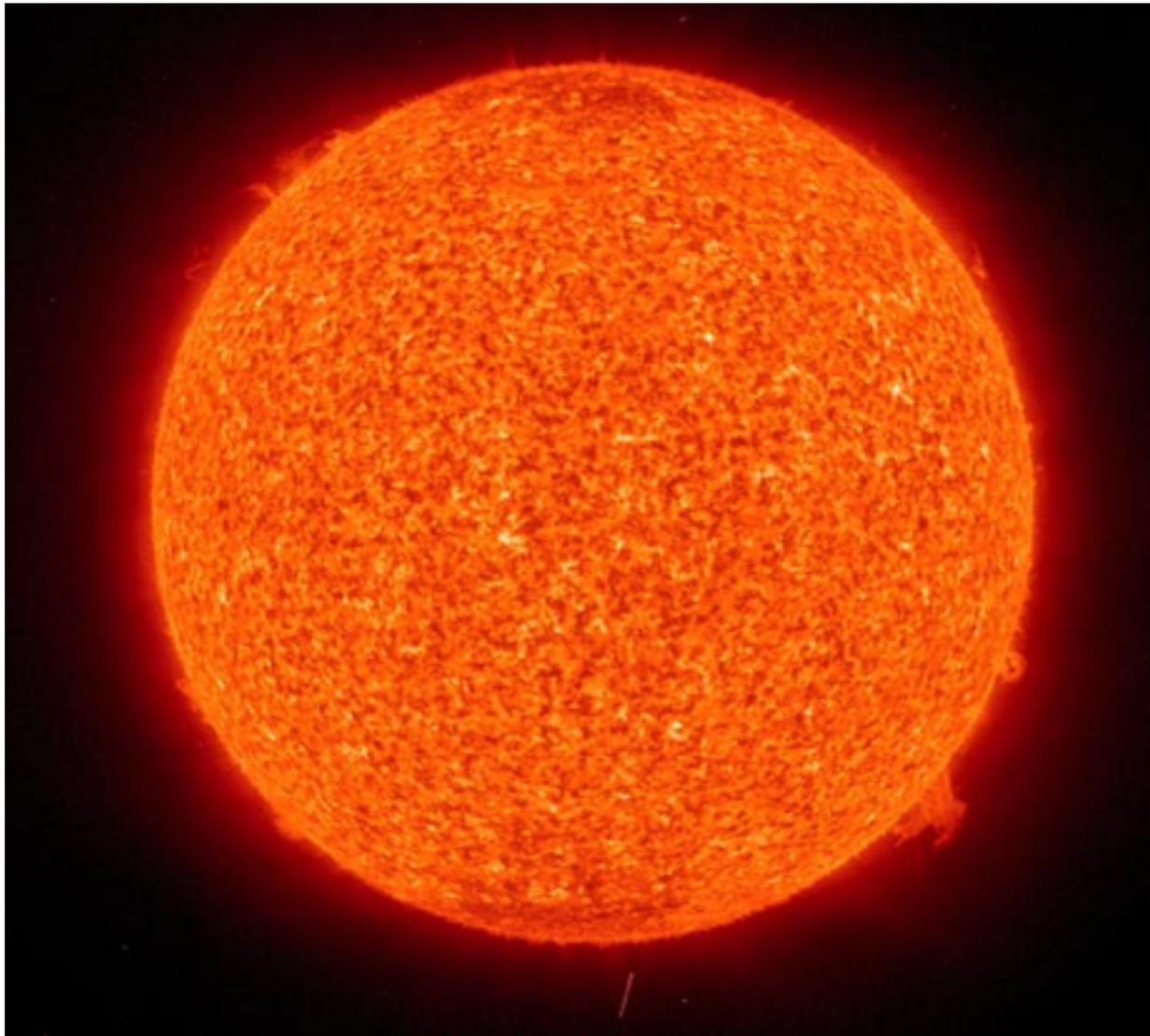
La vie et la mort des étoiles

François LEVRIER

Ecole Normale Supérieure
& Observatoire de Paris



Le Soleil, une étoile banale



My teacher is so dumb. He thought the sun was a star.

Like · Comment · 9 minutes ago near Belmont · 👤

👍 likes this.

ummm that's because it is ...

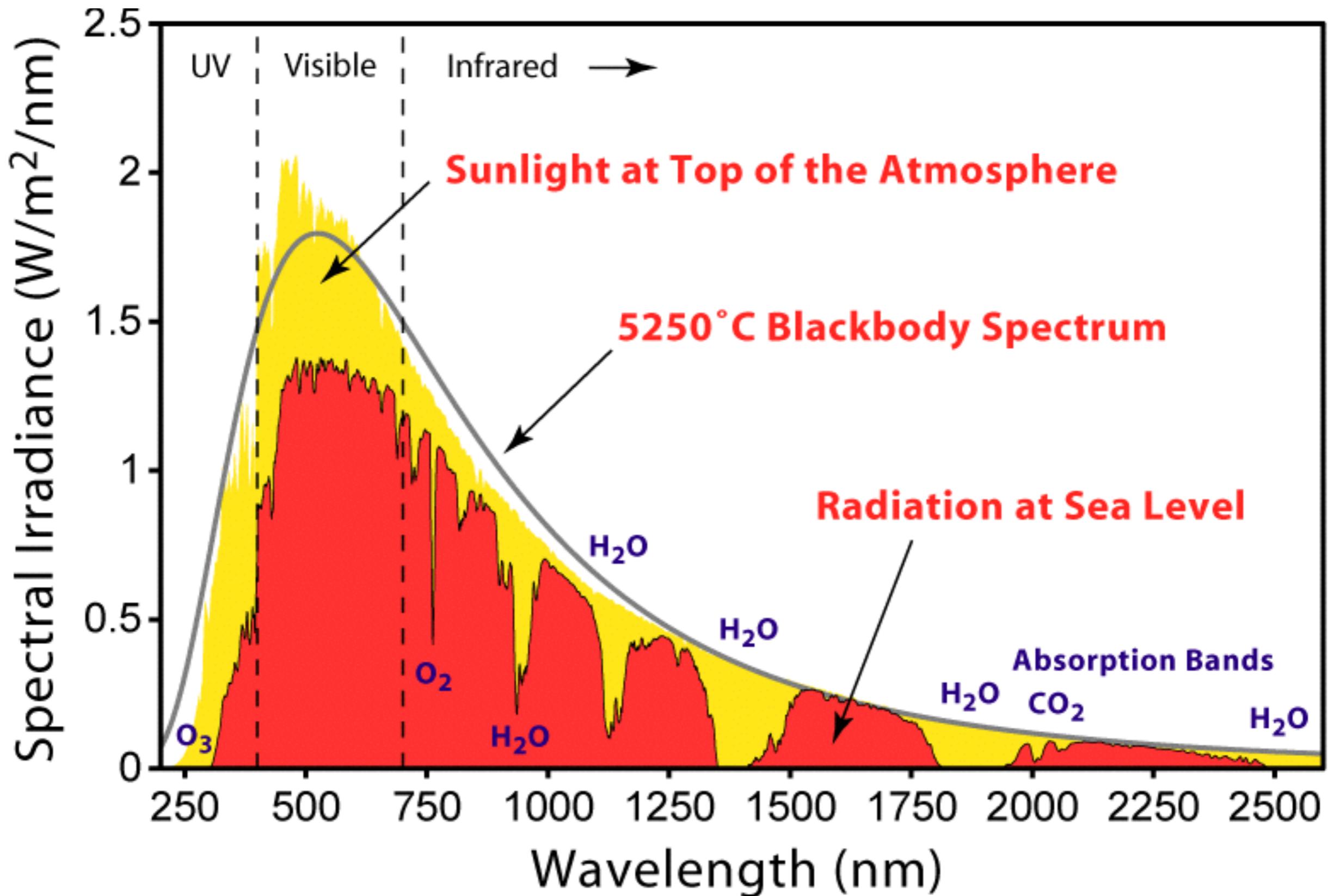
6 minutes ago · Unlike · 🔄 5 people

no it's not. a sun is a sun, and a star is a star. saying that a sun is a star is the same as saying a tomato is a fruit. thats right, its not true

4 minutes ago · Like

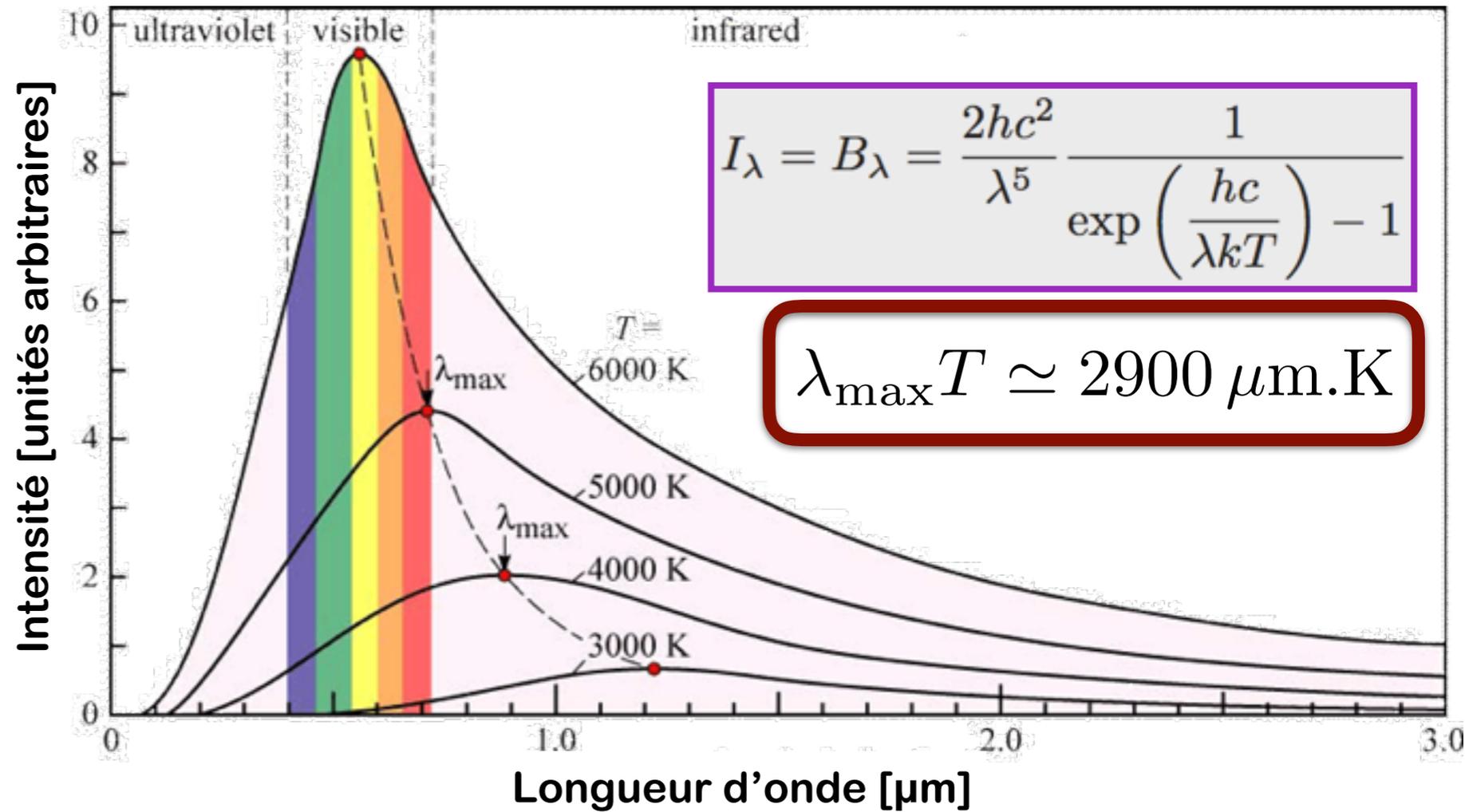
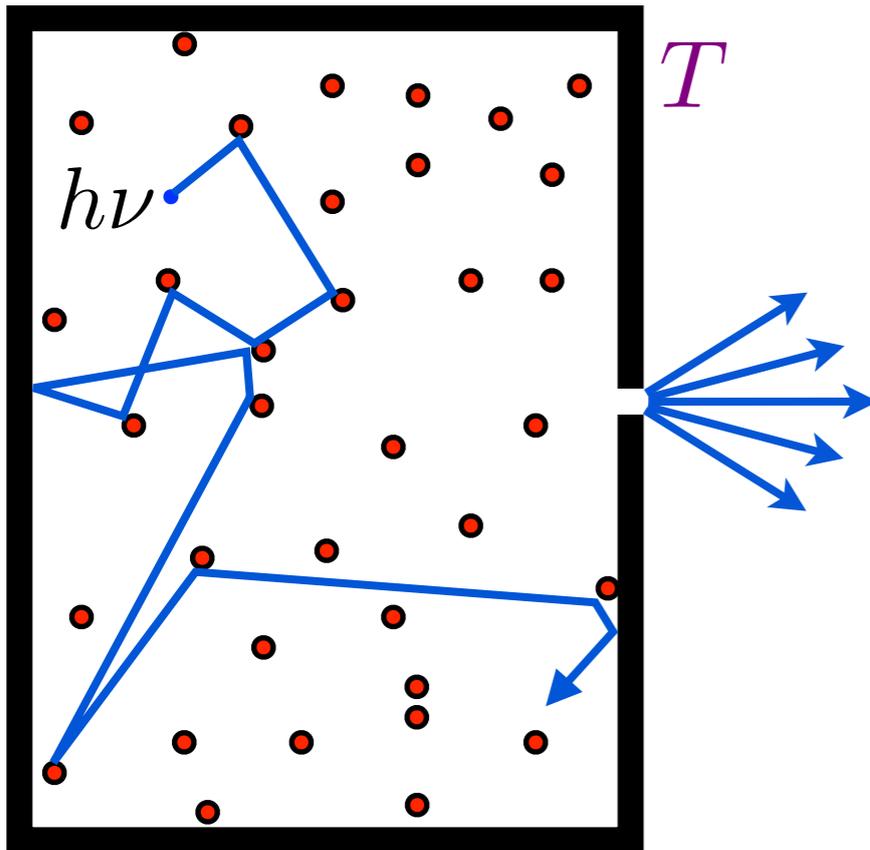
"KNOWLEDGE IS KNOWING A TOMATO IS A FRUIT; WISDOM IS NOT PUTTING IT IN A FRUIT SALAD."

Le spectre du rayonnement solaire

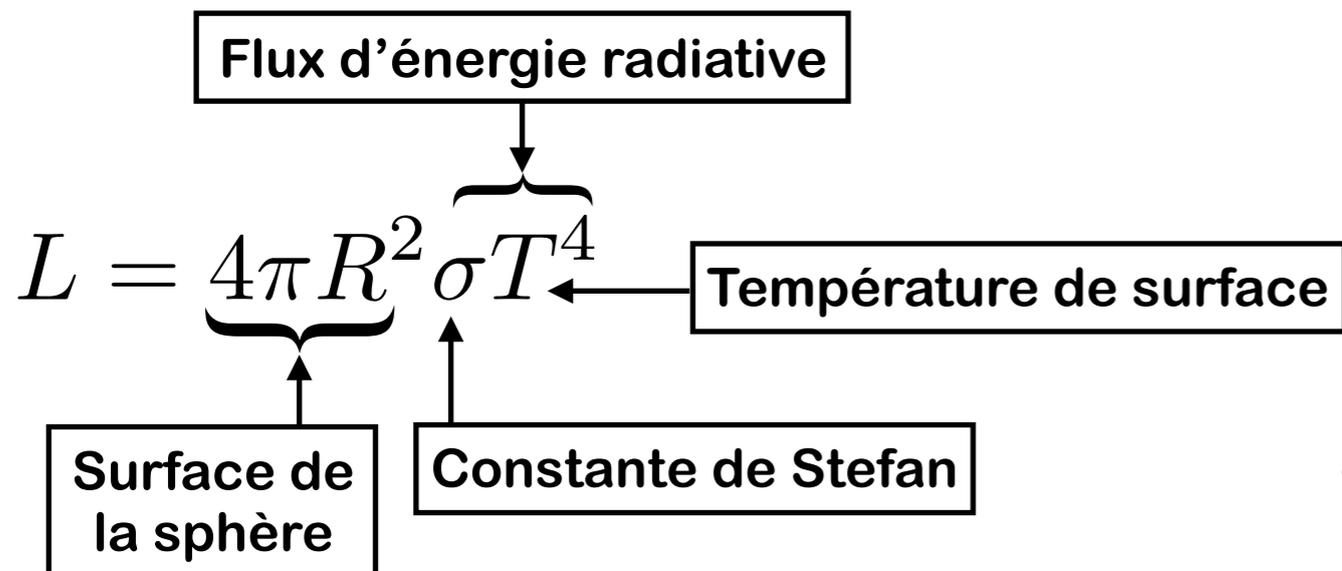


Emission de corps noir

Enceinte opaque à toutes les fréquences, à l'équilibre thermique



Puissance totale (luminosité) émise par un corps noir sphérique



$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$$

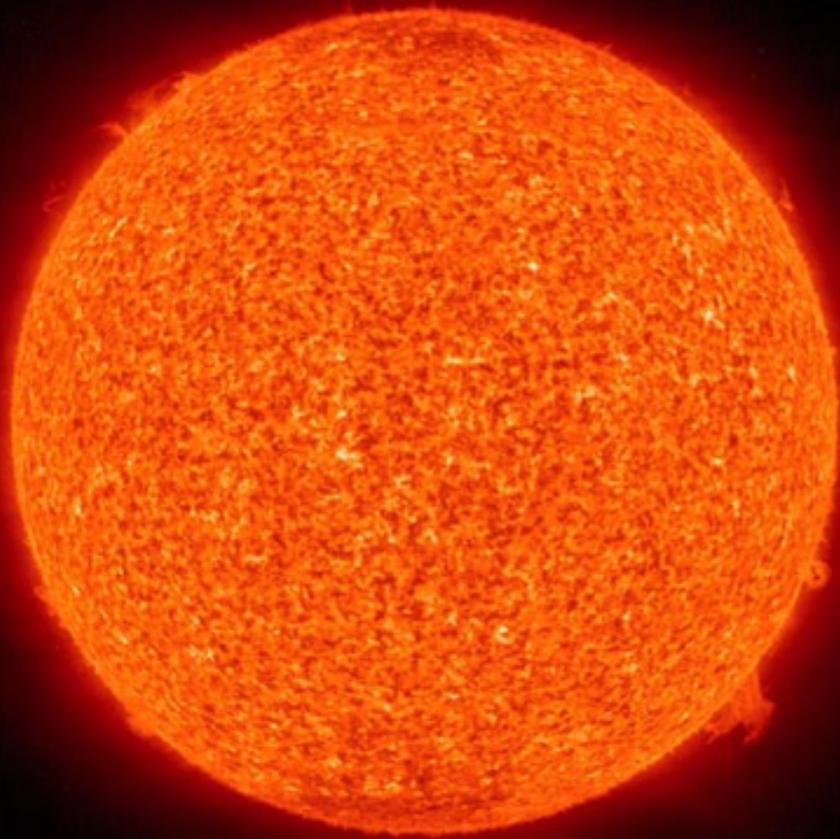
Luminosité du Soleil

Rayon $R = 7 \times 10^8 \text{ m}$

Température de surface $T = 5750 \text{ K}$

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

$$1 L_{\odot} \simeq 3.8 \times 10^{26} \text{ W}$$



Luminosité du Soleil

Rayon $R = 7 \times 10^8 \text{ m}$

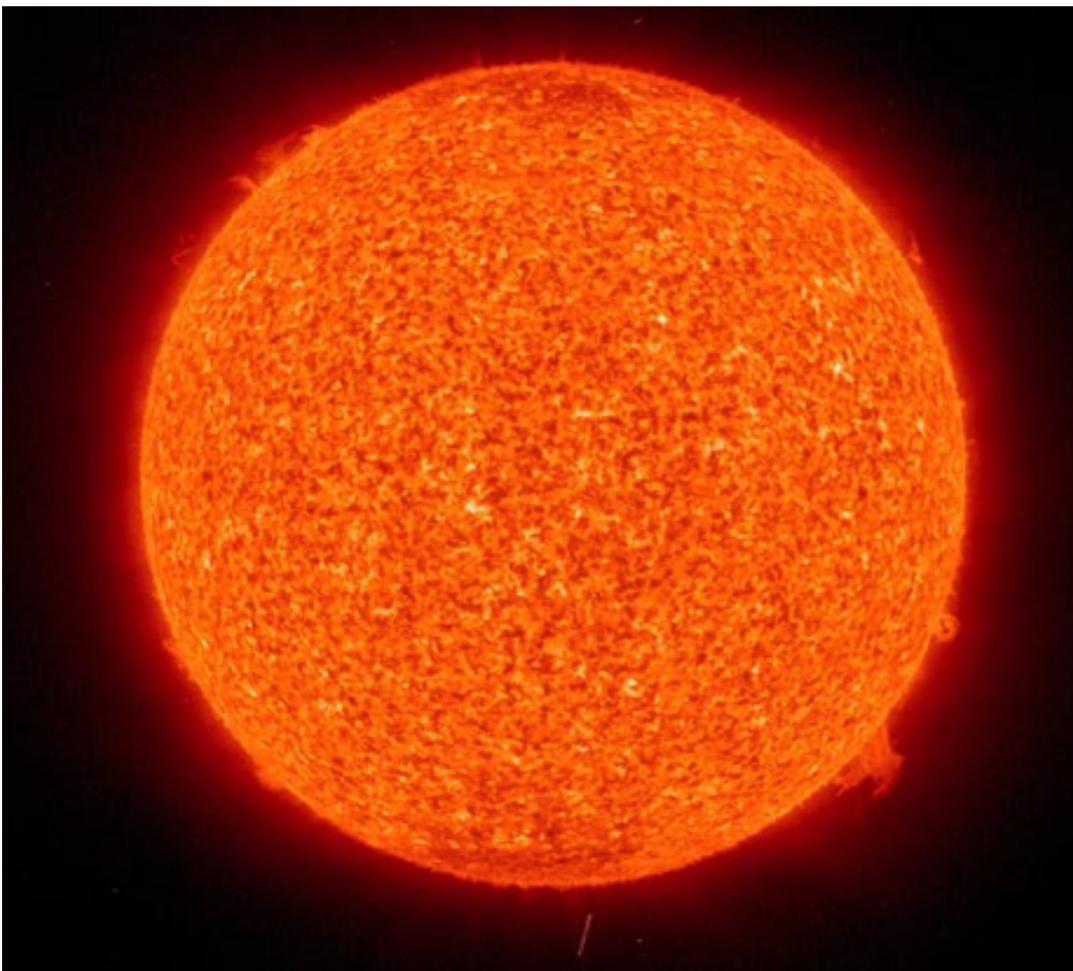
Température de surface $T = 5750 \text{ K}$

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

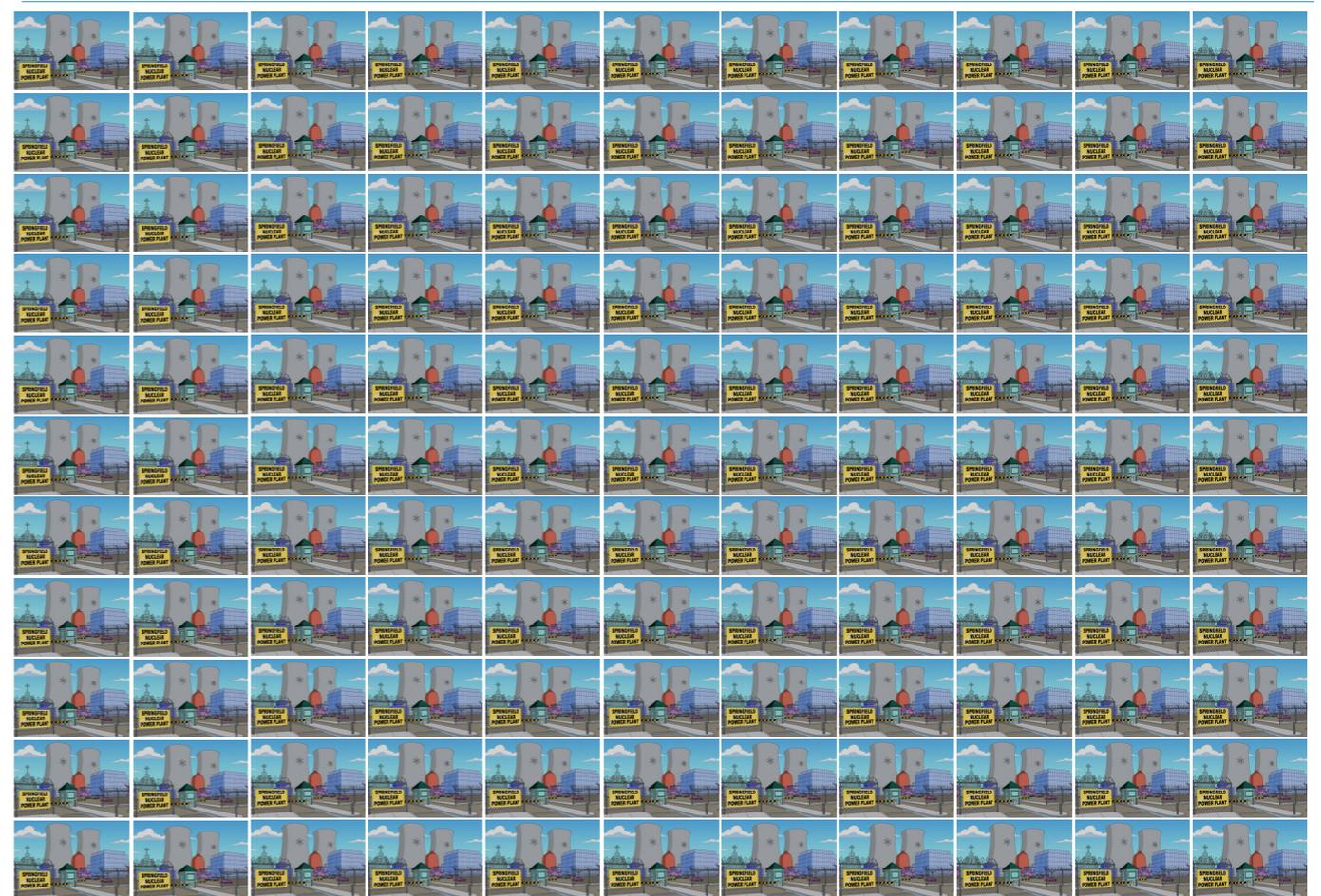
$$1 L_{\odot} \simeq 3.8 \times 10^{26} \text{ W}$$

Un million de milliard de fois la puissance totale des 450 réacteurs nucléaires sur Terre

$$P \sim 4 \times 10^{11} \text{ W}$$



=

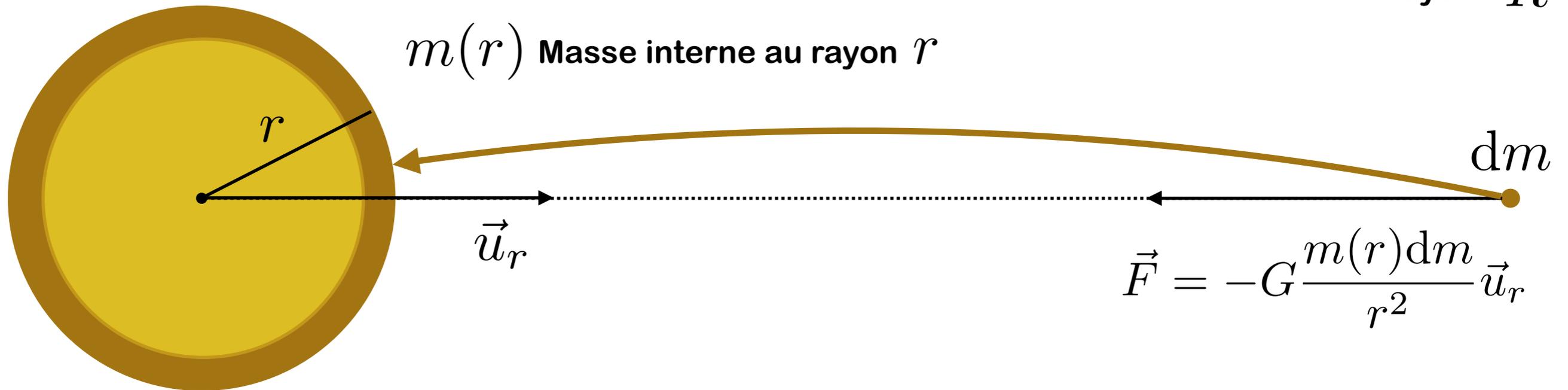


Energie potentielle gravitationnelle

Energie potentielle stockée dans un astre sphérique homogène

Masse M

Rayon R



$$E_g = - \int_0^R G \frac{m(r) dm}{r} = - \frac{3}{5} \frac{GM^2}{R}$$

Energie thermique (interne) $U = - \frac{E_g}{2} \sim \frac{GM^2}{R}$ (Théorème du viriel)

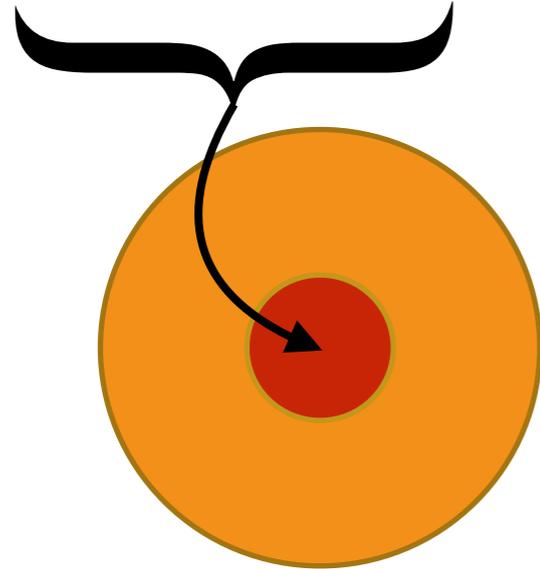
Temps de Kelvin-Helmholtz

$$t_{KH, \odot} = \frac{U}{L_{\odot}} \sim \frac{GM^2}{RL_{\odot}} \simeq 3 \times 10^7 \text{ an}$$



A sample of [gneiss](#) from the site of the Earth's oldest dated rocks (the [Acasta River](#) area of Canada). This sample has been dated at 4.03 billion years old.

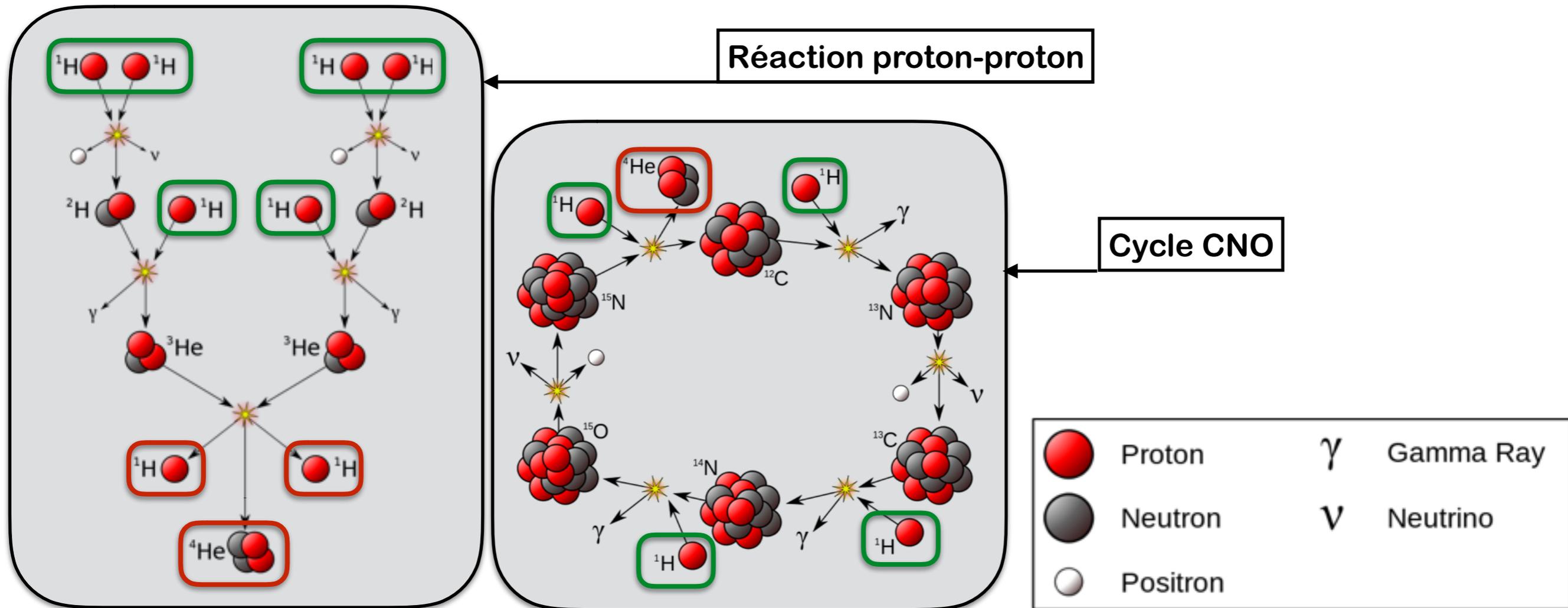
Energie fournie par la fusion thermonucléaire



Energie nucléaire disponible $E_n = 7 \times 10^{-3} x M c^2$

Temps caractéristique

$$t_{n,\odot} = \frac{E_n}{L_{\odot}} \sim 12 \times 10^9 \text{ an}$$



Estimation de la température centrale

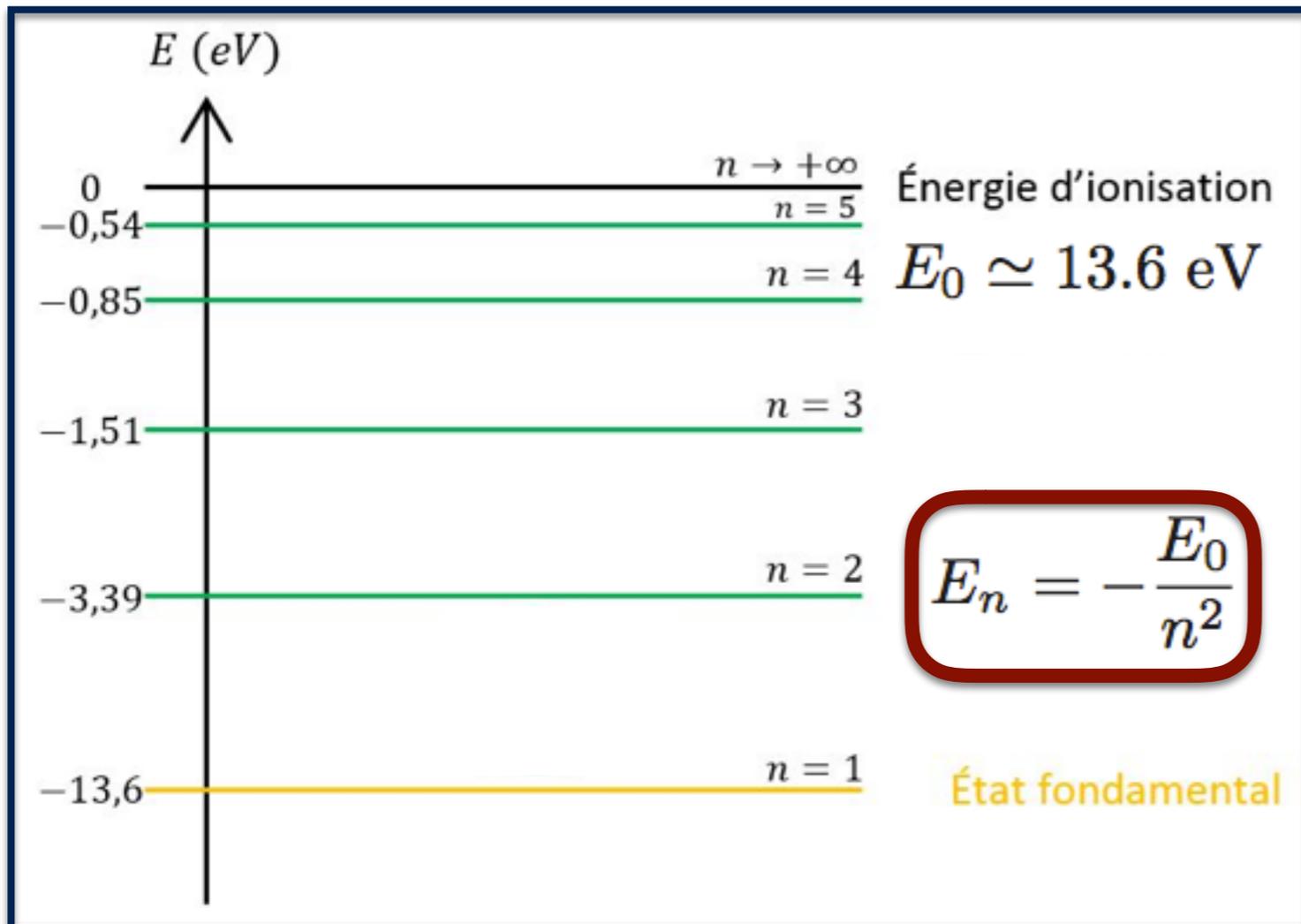
Gaz parfait d'hydrogène monoatomique, homogène...

$$U = \frac{3}{2} N k T \sim E_g \sim G \frac{M^2}{R}$$

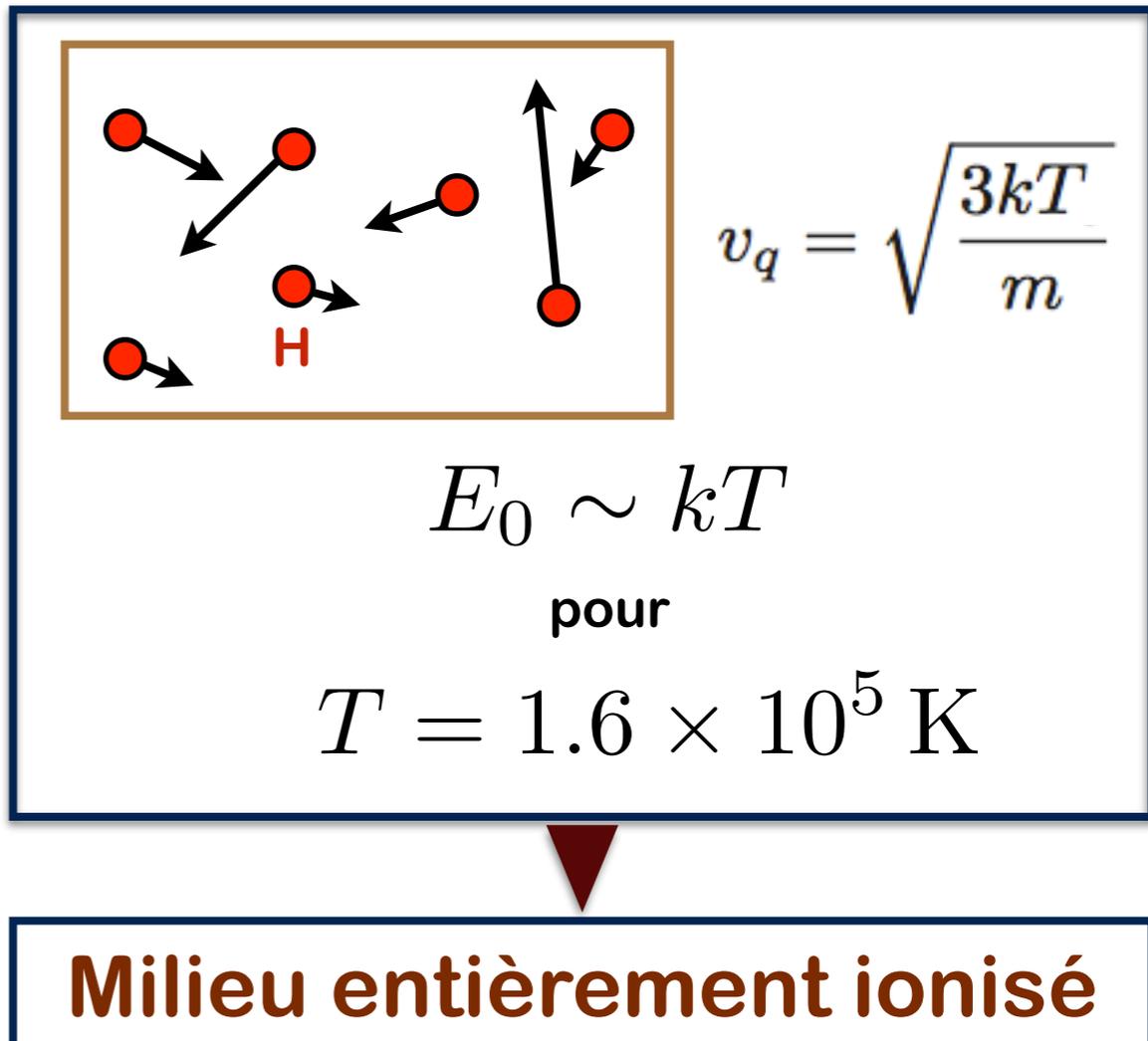
Nombre d'atomes

$$T \sim G \frac{M m_H}{k R} \sim 10^7 \text{ K}$$

Niveaux électroniques de l'hydrogène

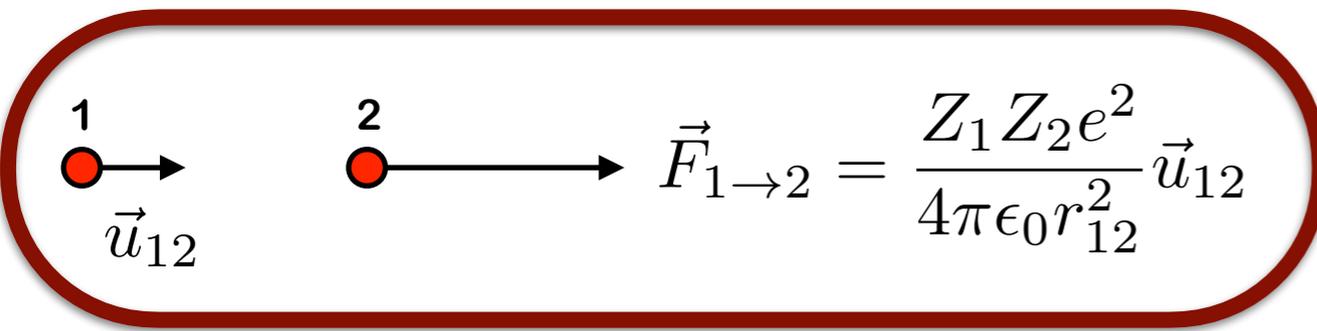


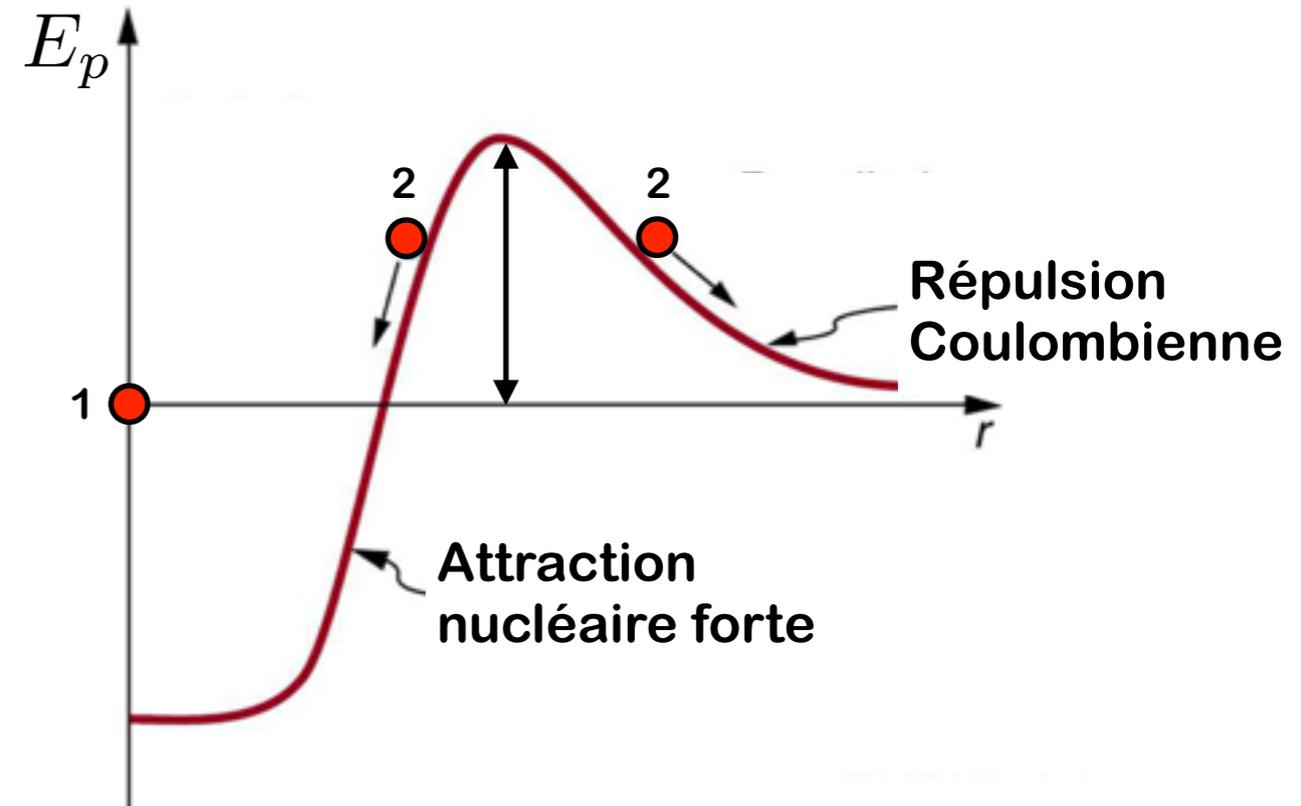
Agitation thermique



Conditions de la fusion de l'hydrogène : pic de Gamow

Barrière Coulombienne opposée au rapprochement des noyaux


$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 r_{12}^2} \vec{u}_{12}$$



Classiquement, pour amener les noyaux à fusionner, il faut apporter une énergie suffisante :

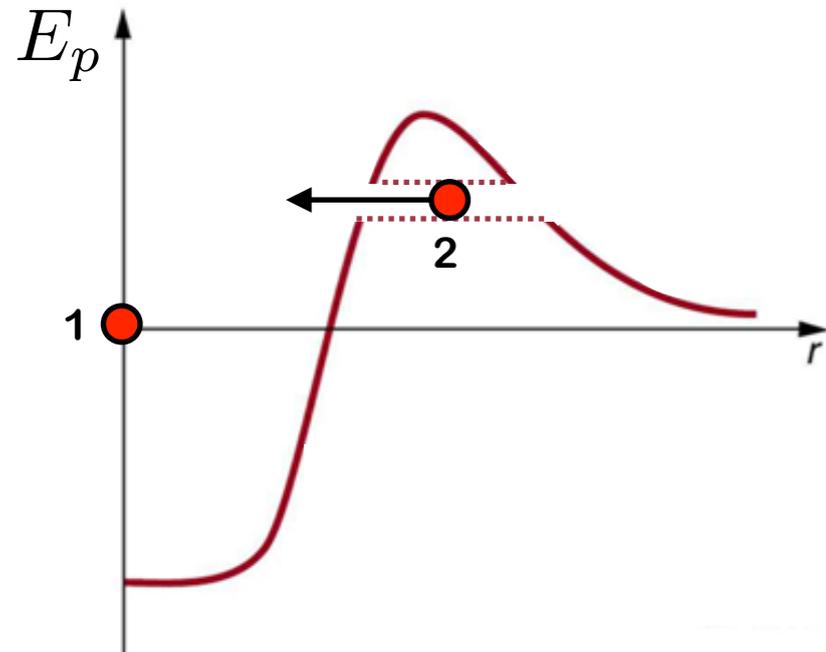
$$kT \sim \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} \quad \text{avec } r_n \sim 10^{-15} \text{ m la taille d'un noyau}$$

Nécessite une température trop élevée :

$$T \sim 10^{10} \text{ K}$$

Conditions de la fusion de l'hydrogène : pic de Gamow

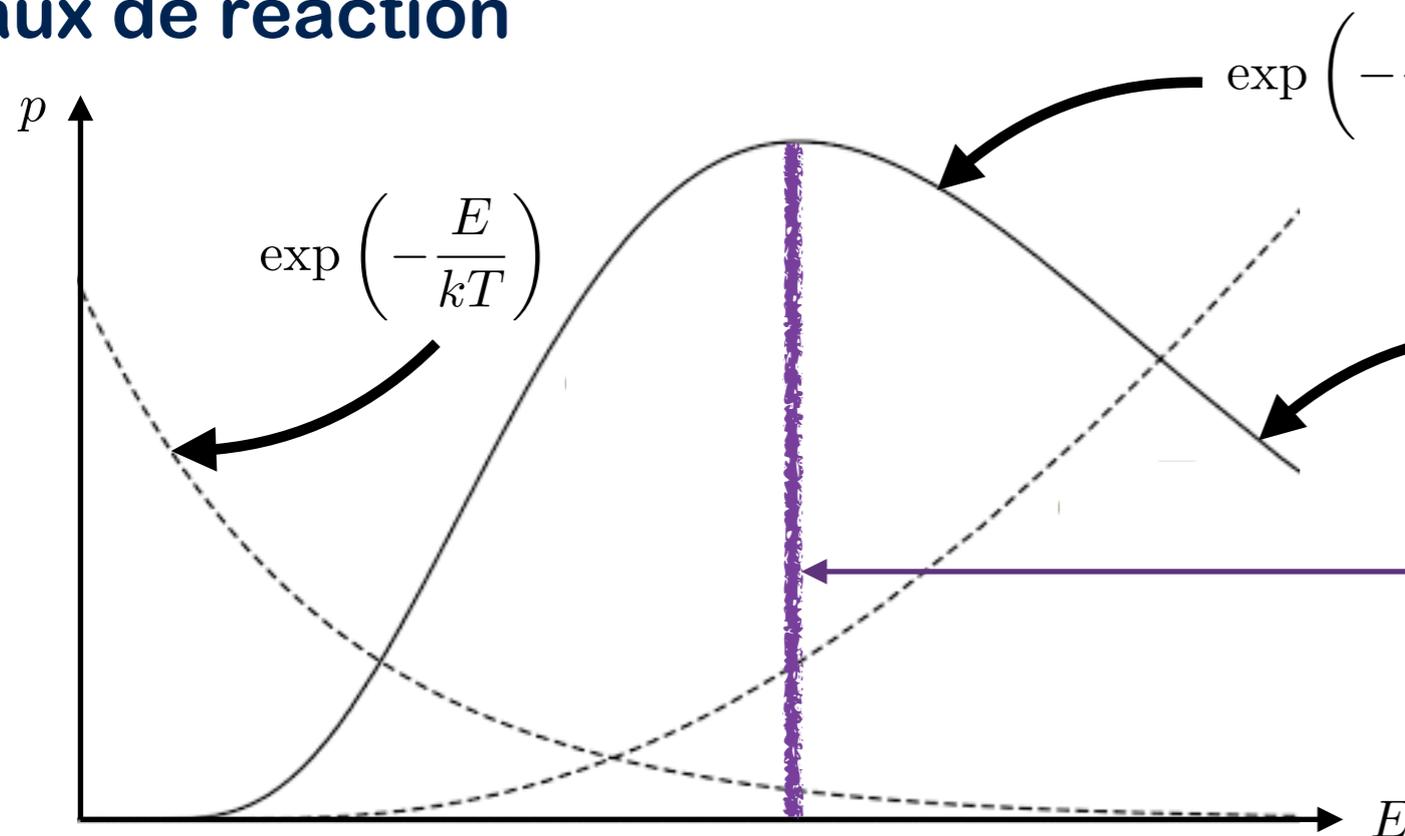
Effet tunnel quantique : pénétration de la barrière Coulombienne



Probabilité de pénétration augmente avec la vitesse relative entre les deux noyaux, donc avec l'énergie

$$\propto \exp\left(-\frac{b}{\sqrt{E}}\right)$$

Taux de réaction

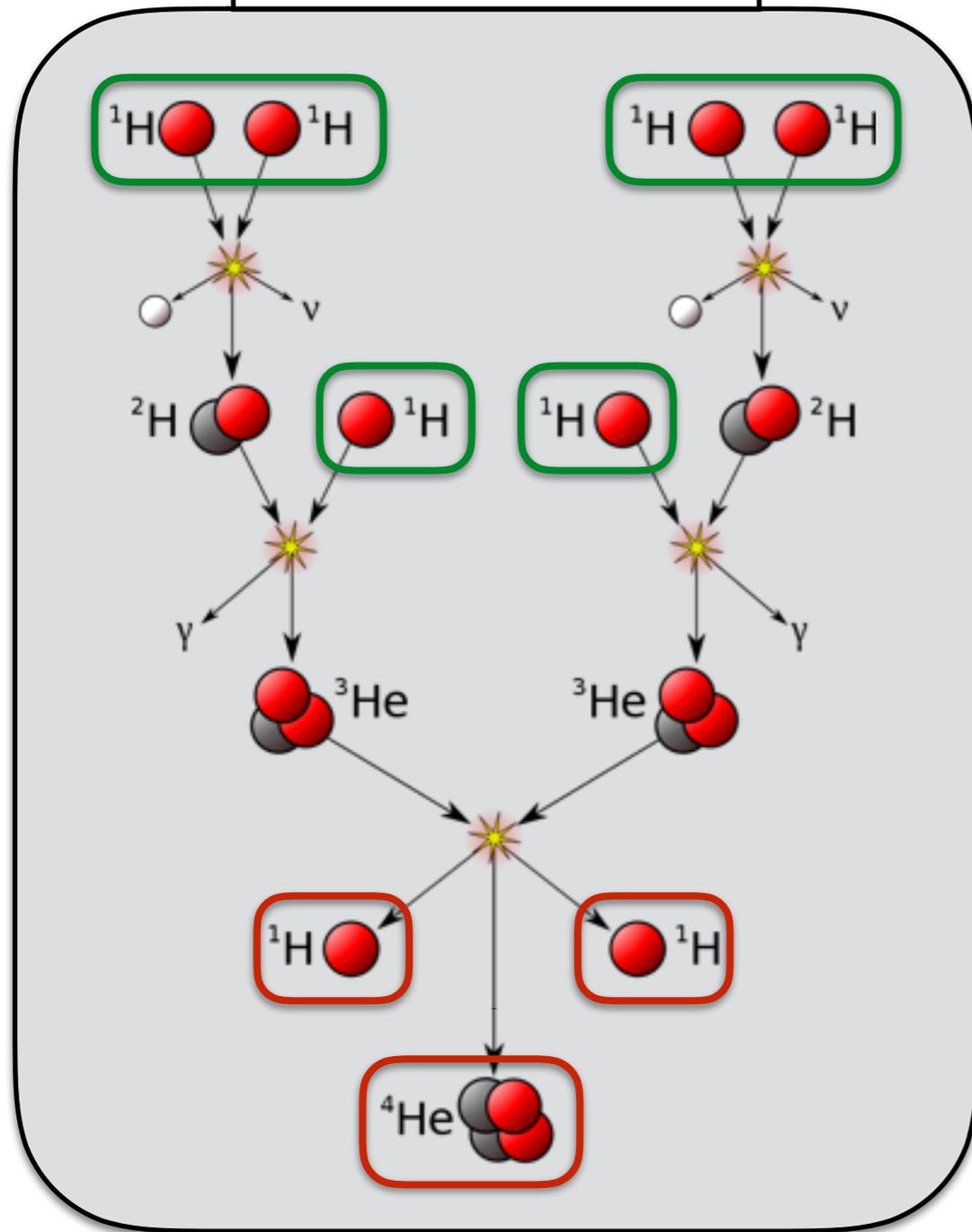


Le pic de Gamow correspond à

$$T \sim 10^7 \text{ K}$$

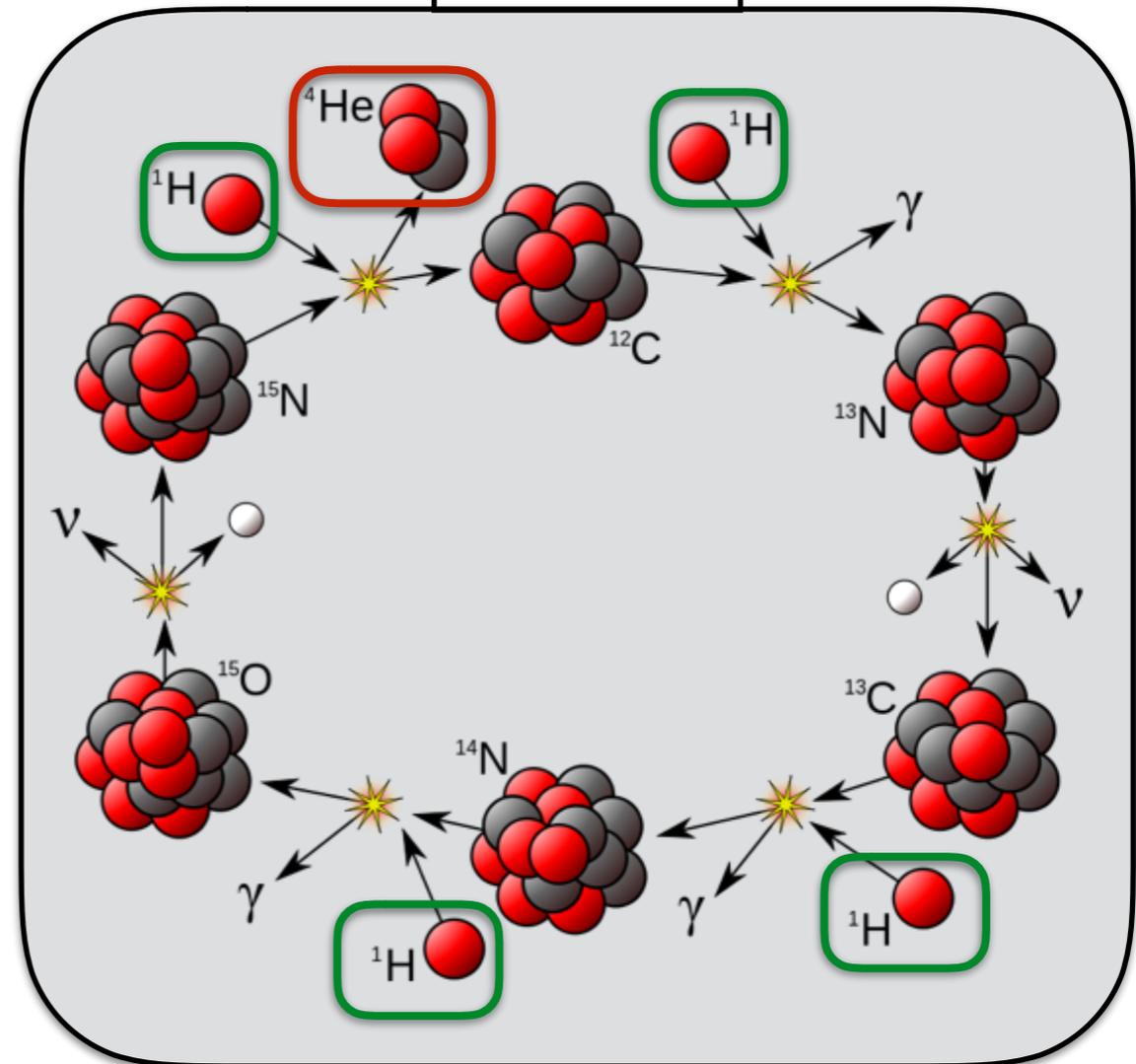
Taux de production énergétique

Chaîne proton-proton



$$\epsilon \propto \rho X_H^2 T^4$$

Cycle CNO



- Noyaux mis en jeu plus massifs
- Température requise plus élevée
- Beaucoup plus efficace

$$\epsilon \propto \rho X_H X_{CNO} T^{19.9}$$

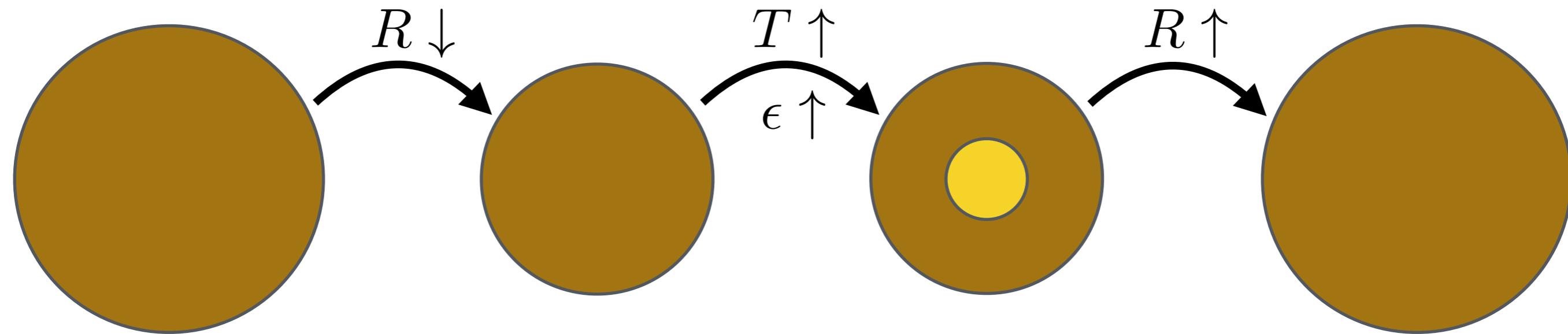
► **Les étoiles massives brûlent leur combustible plus vite**

Stabilité de l'équilibre

On imagine la contraction de l'étoile...

Température centrale $T \sim G \frac{M m_{\text{H}}}{kR}$

Taux de production énergétique $\epsilon \propto \rho X_{\text{H}}^2 T^4$



Stable tant que suffisamment de combustible nucléaire est disponible

Etoiles sur la séquence principale

Le diagramme de Hertzsprung-Russell

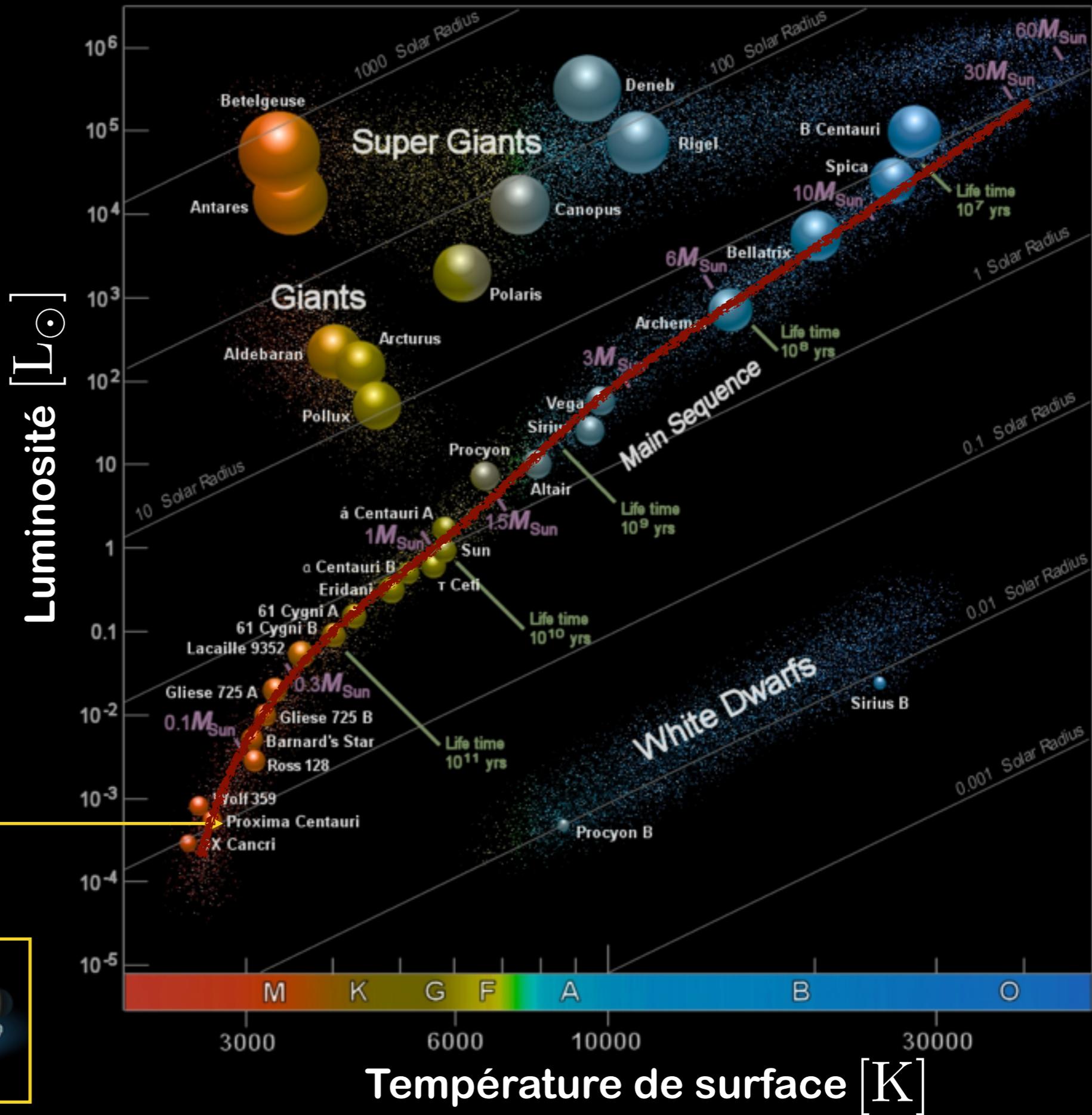
Luminosité

↓

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

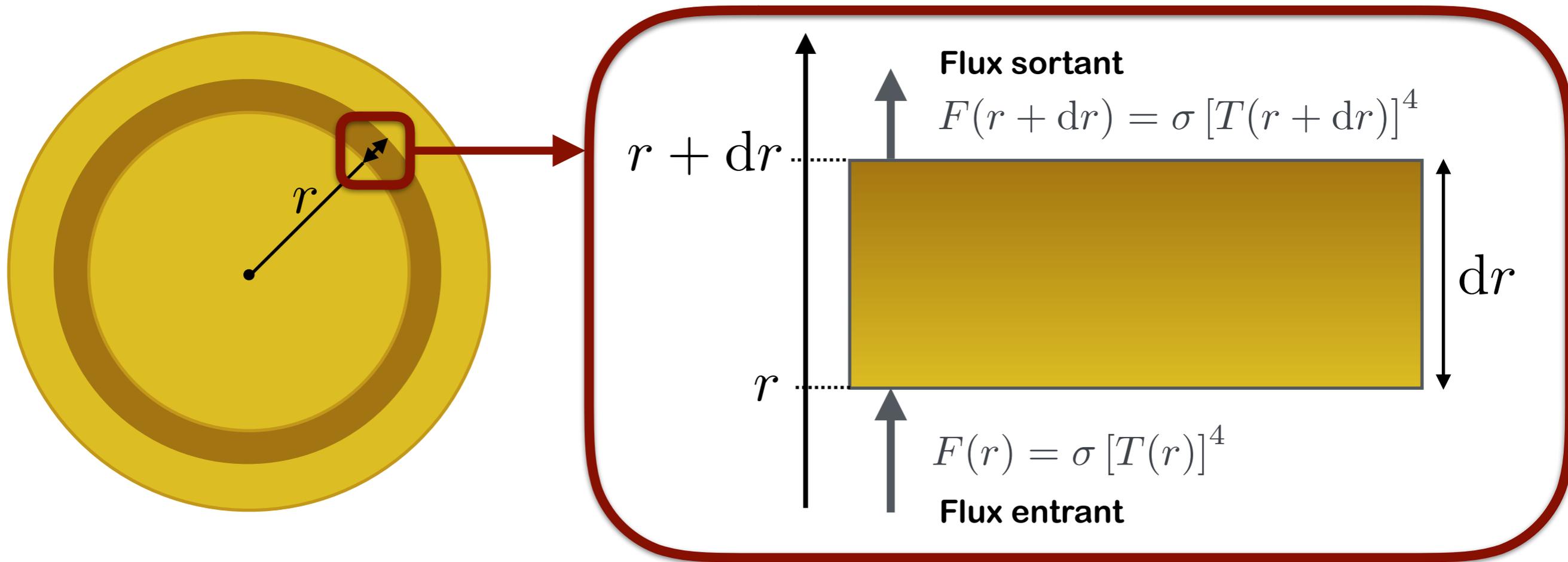
↑ ↑

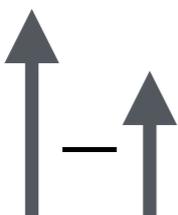
Rayon Température



Transport de l'énergie lumineuse

Un modèle très simple : bilan d'énergie radiative sur une tranche



Flux net = 
 F_{net}

Fraction absorbée dans la tranche

$$-\kappa\rho F_{\text{net}} dr$$

 $F_{\text{net}} \propto \frac{1}{\kappa\rho} T^3 \frac{dT}{dr}$

Relation masse luminosité et « temps de vie »

Ordre de grandeur de la luminosité stellaire...

$$L = 4\pi R^2 \times F_{\text{net}} \propto R^2 \times \boxed{\frac{1}{M/R^3}} \times T^3 \times \boxed{\frac{T}{R}} \propto \frac{R^4 T^4}{M}$$

Masse volumique Gradient de température

Relation d'échelle entre température, masse et rayon

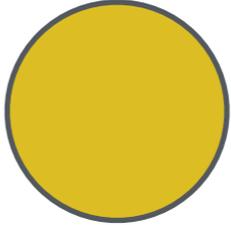
$$T \sim G \frac{M m_{\text{H}}}{kR} \propto \frac{M}{R} \quad \blacktriangleright \quad \boxed{L \propto M^3}$$

Temps de vie sur la séquence principale

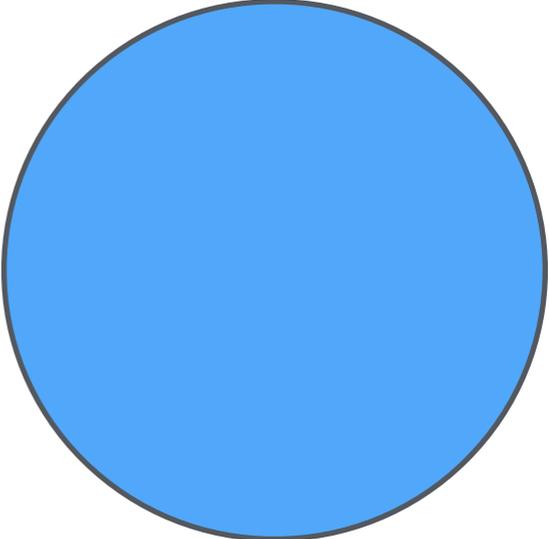
$$\boxed{t_{\text{n}} \propto \frac{E_{\text{n}}}{L} \propto M^{-2}}$$


0.2 M_⊙

$t_{\text{n}} \simeq 2.5 \cdot 10^{11}$ an


1 M_⊙

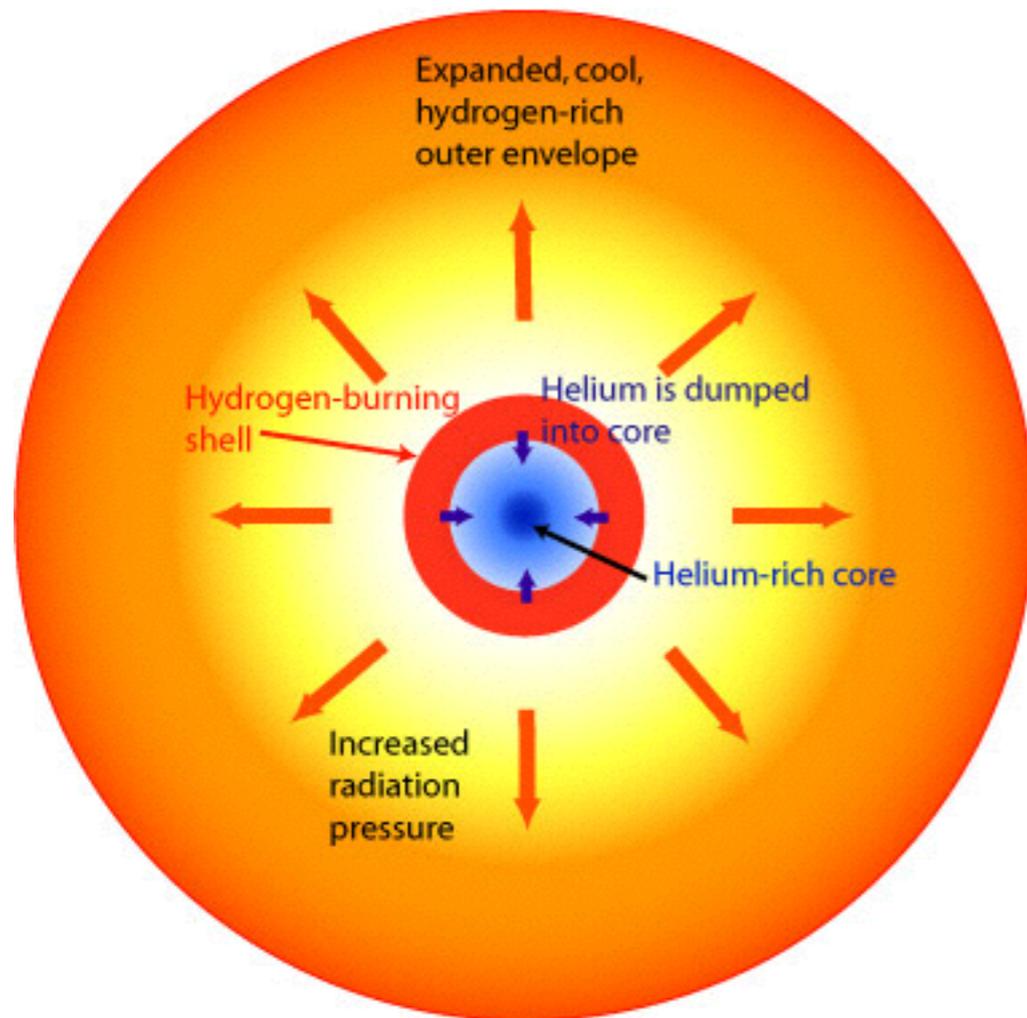
$t_{\text{n}} \simeq 1.2 \cdot 10^{10}$ an


10 M_⊙

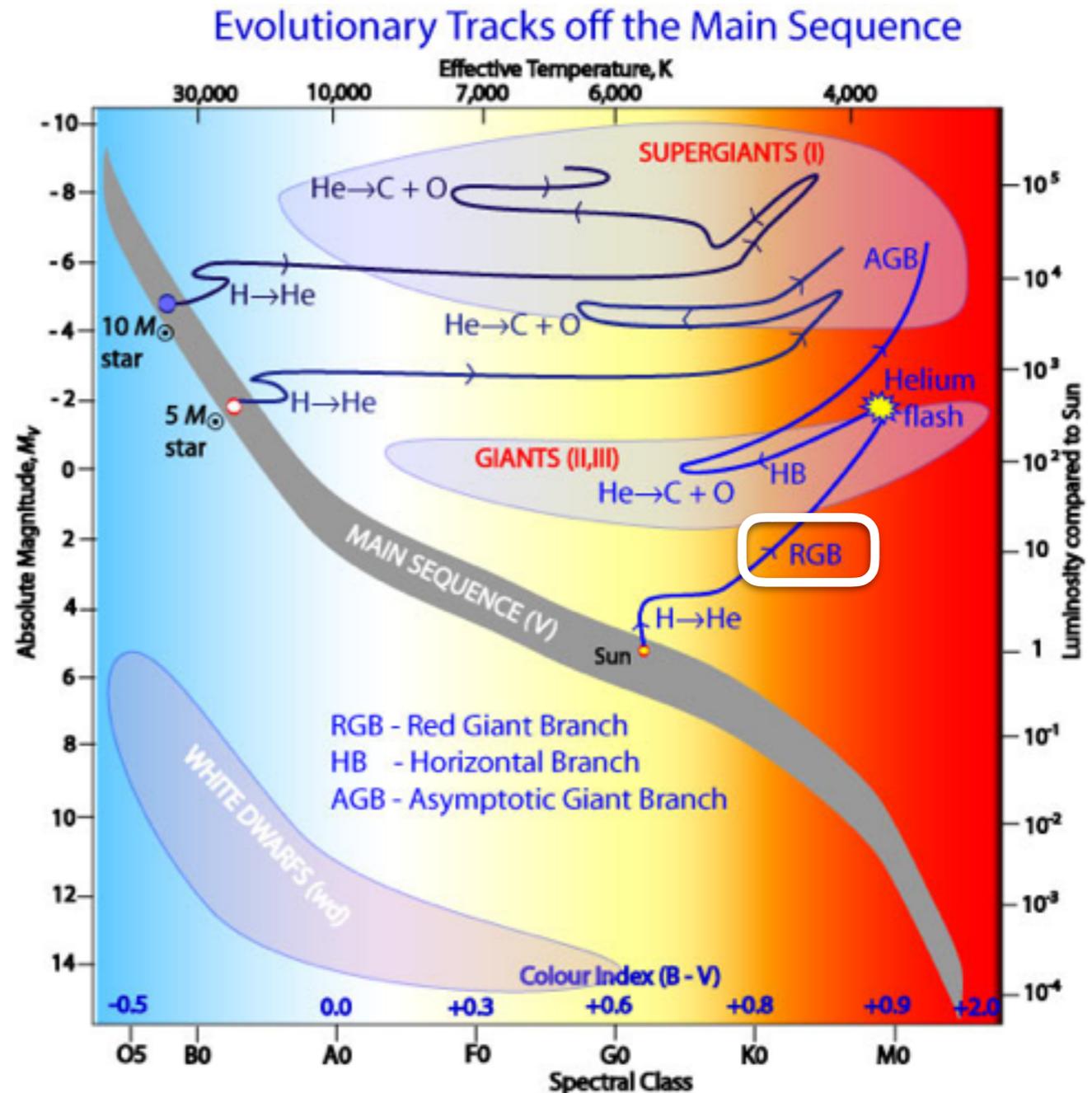
$t_{\text{n}} \simeq 1.2 \cdot 10^8$ an

Evolution des étoiles comparables au Soleil : géantes rouges

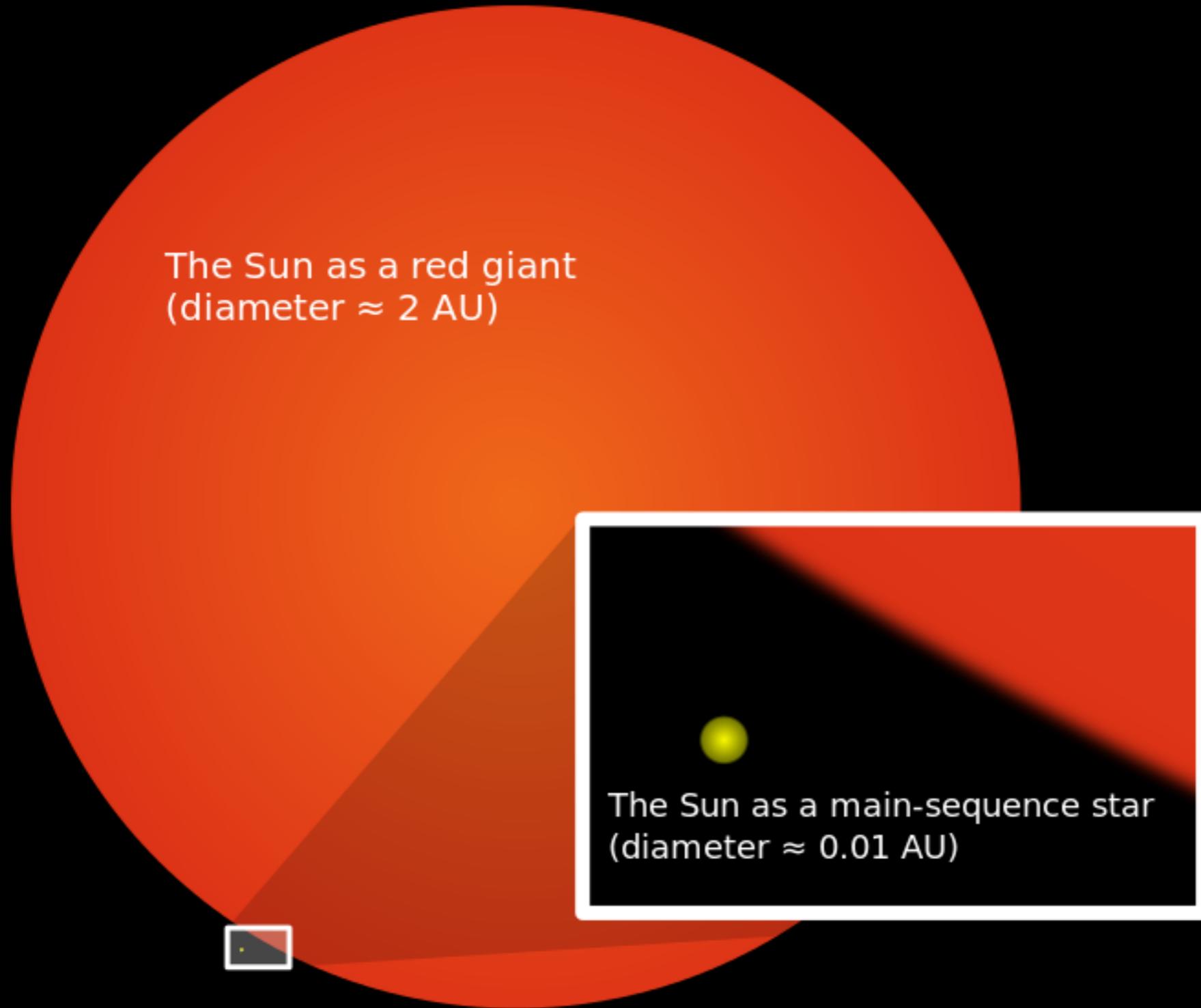
- Epuisement de l'hydrogène au centre
- Fin des réactions de fusion dans le cœur
- Le cœur se contracte et devient plus chaud ← $T \propto \frac{M}{R}$
- Cette chaleur initie la fusion dans une enveloppe
- Elle augmente aussi la pression du rayonnement ← $\propto T^4$
- Les couches externes de l'étoile s'étendent et refroidissent
- L'étoile devient une géante rouge



Hydrogen Shell Burning on the Red Giant Branch



Le Soleil dans sa phase géante rouge



Flash de l'hélium, branche horizontale et phase AGB

Flash de l'hélium

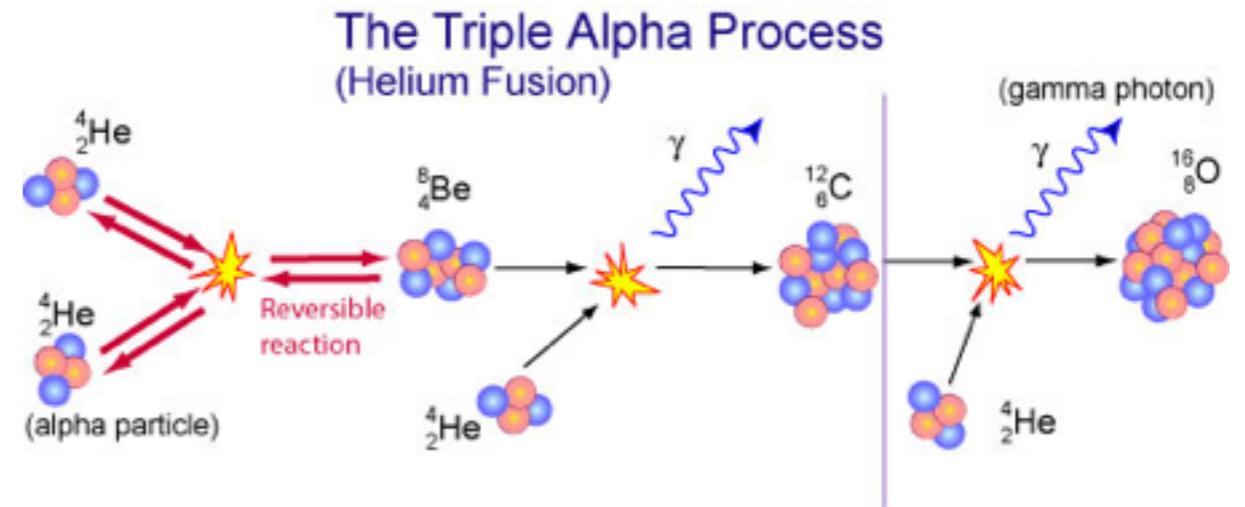
- Fusion de l'hydrogène dans l'enveloppe
- L'hélium produit augmente la masse du cœur
- La température du cœur augmente
- A 10^8 K, fusion très rapide de l'hélium (« flash »)
- Production du carbone et de l'oxygène

Branche horizontale

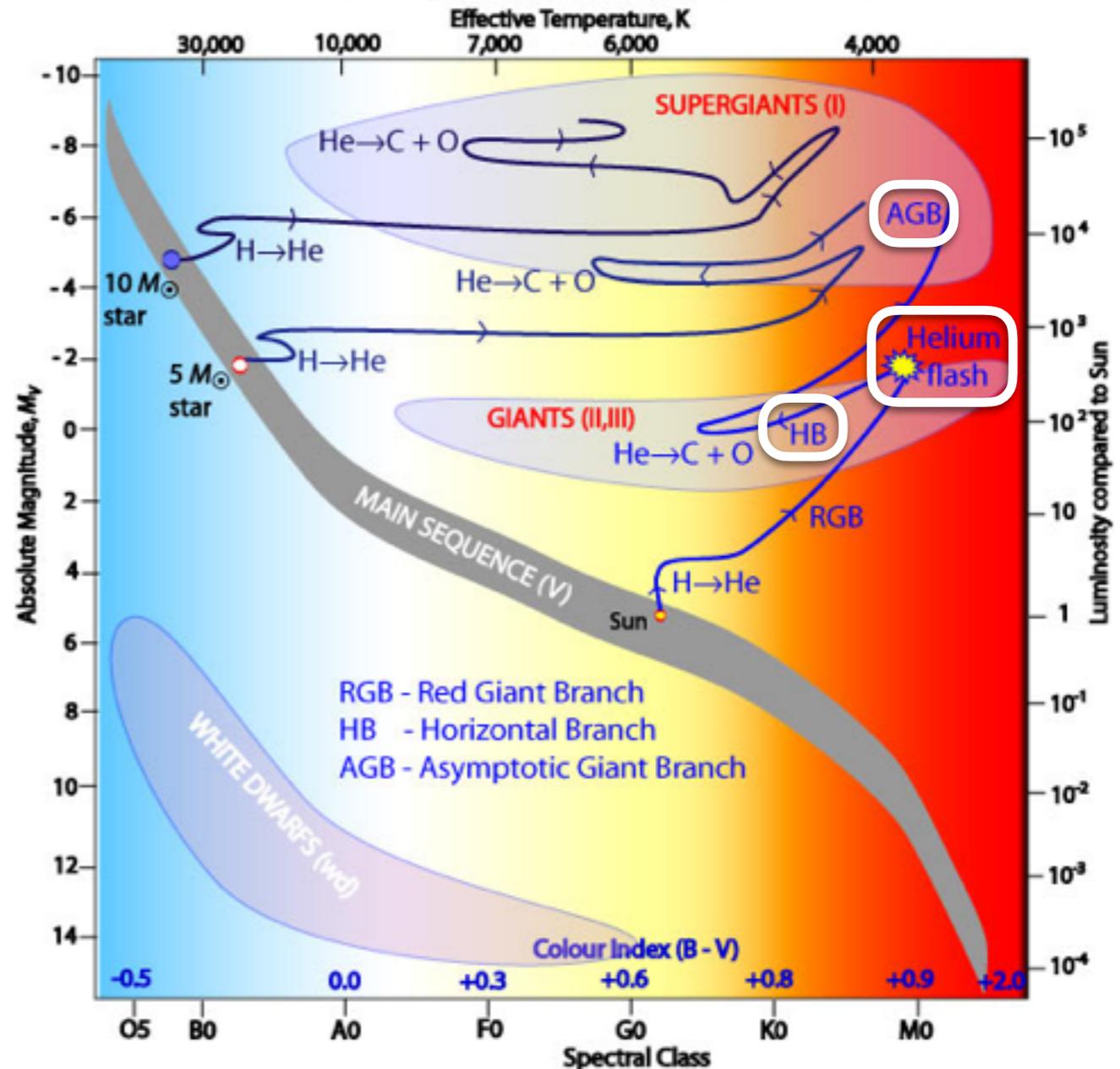
- Fusion de l'hélium dans le cœur
- Fusion de l'hydrogène dans l'enveloppe
- Augmentation de la température centrale
- La luminosité reste à peu près constante
- Déplacement le long de la branche horizontale
- Pour le Soleil, cette phase dure 10^8 ans

Phase AGB

- Epuisement de l'hélium dans le cœur
- Le cœur se contracte et devient plus chaud
- Début de la fusion de l'hélium dans une enveloppe
- Branche asymptotique aux géantes (AGB)



Evolutionary Tracks off the Main Sequence

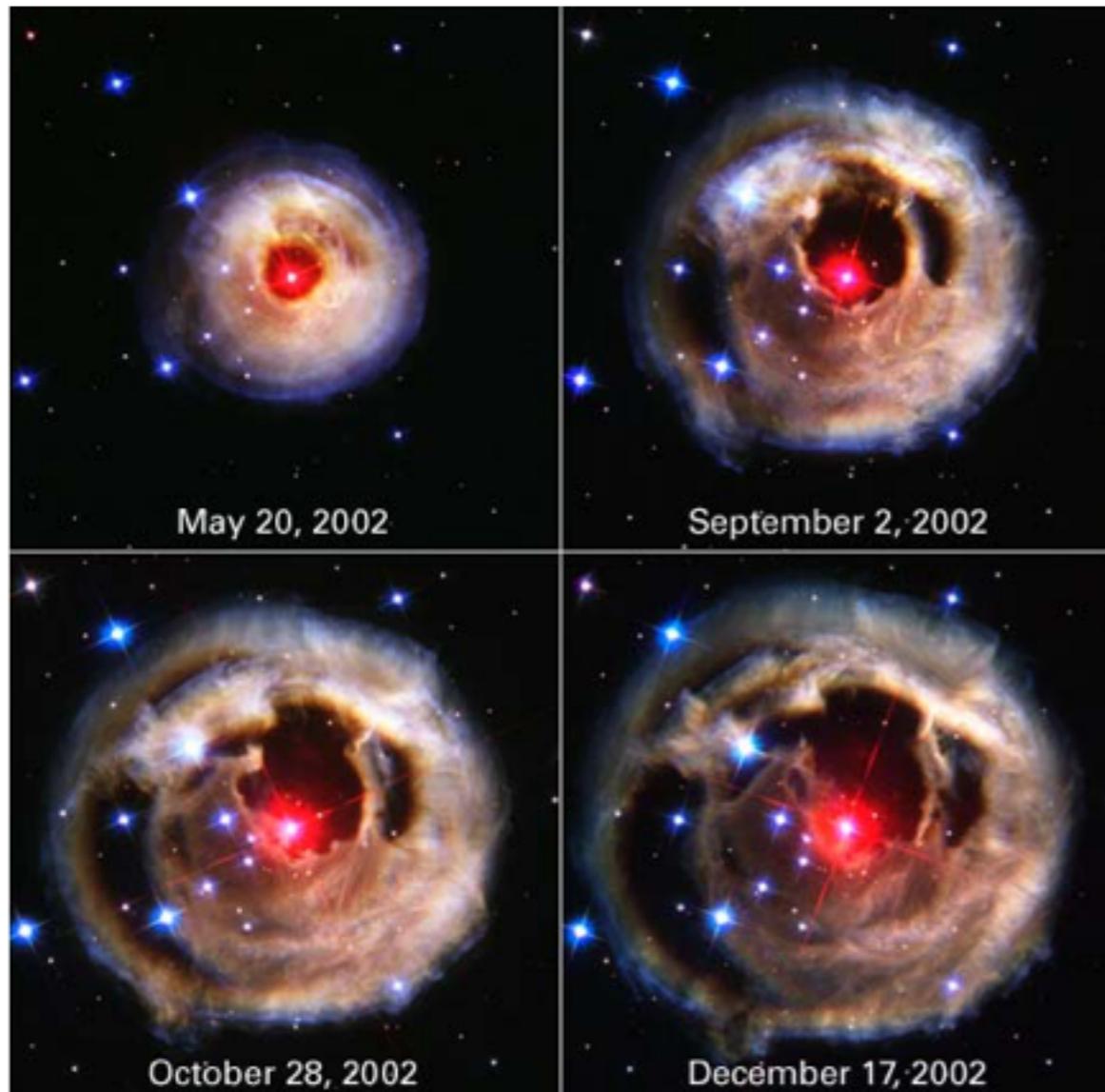


Nébuleuses planétaires

- Sans fusion, le cœur inerte se contracte
- L'hydrogène et l'hélium des couches supérieures « tombent » sur le cœur chaud
- Fusion de l'hydrogène en hélium et de l'hélium en carbone
- L'apport soudain d'énergie souffle les couches externes de l'étoile
- Le cœur de carbone et d'oxygène, très chaud, est mis à nu
- La radiation UV intense qu'il émet ionise le gaz environnant
- Les raies de recombinaison de ces éléments sont responsables des couleurs

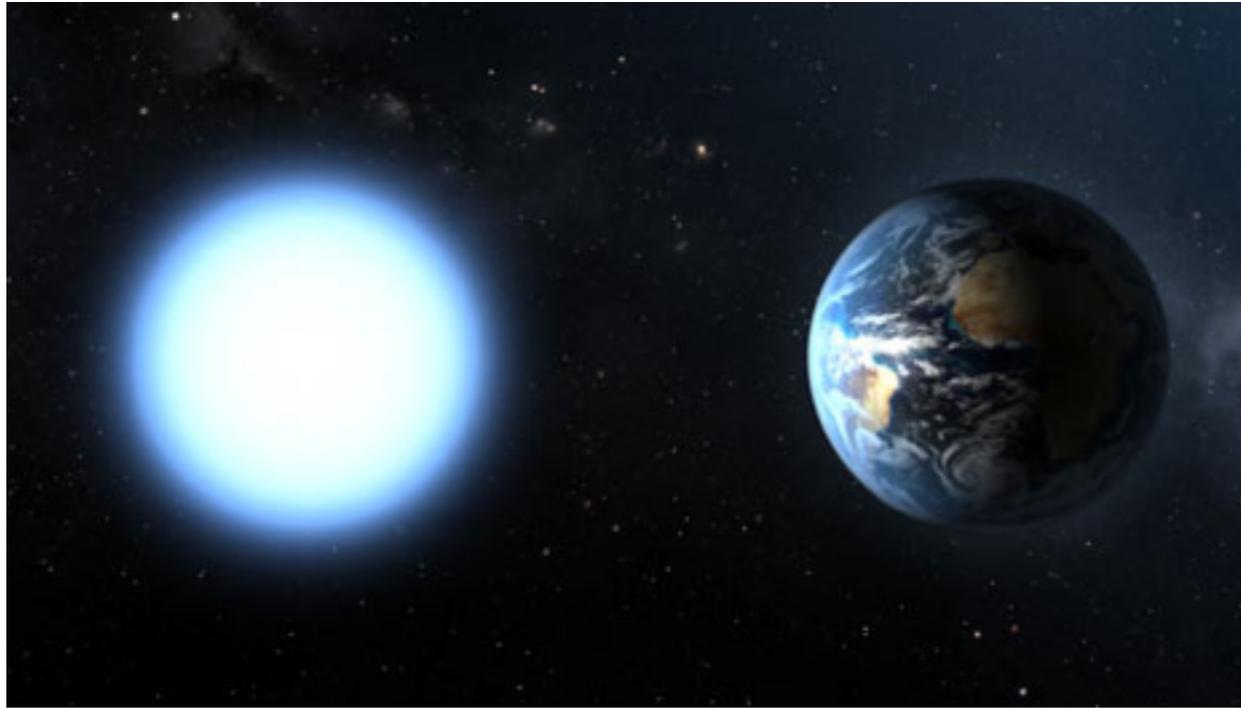
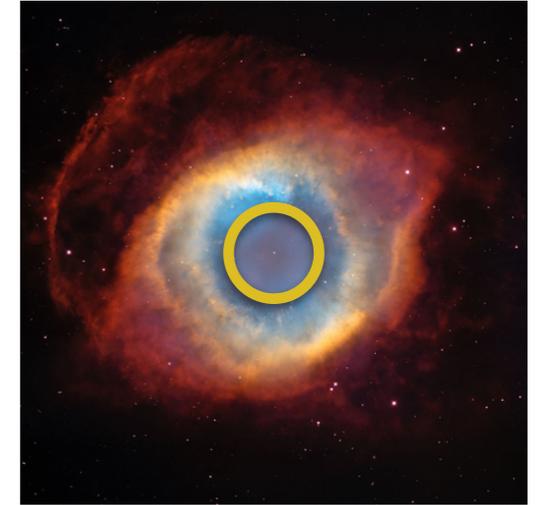
V838 Monocerotis

Nébuleuse de l'Hélice



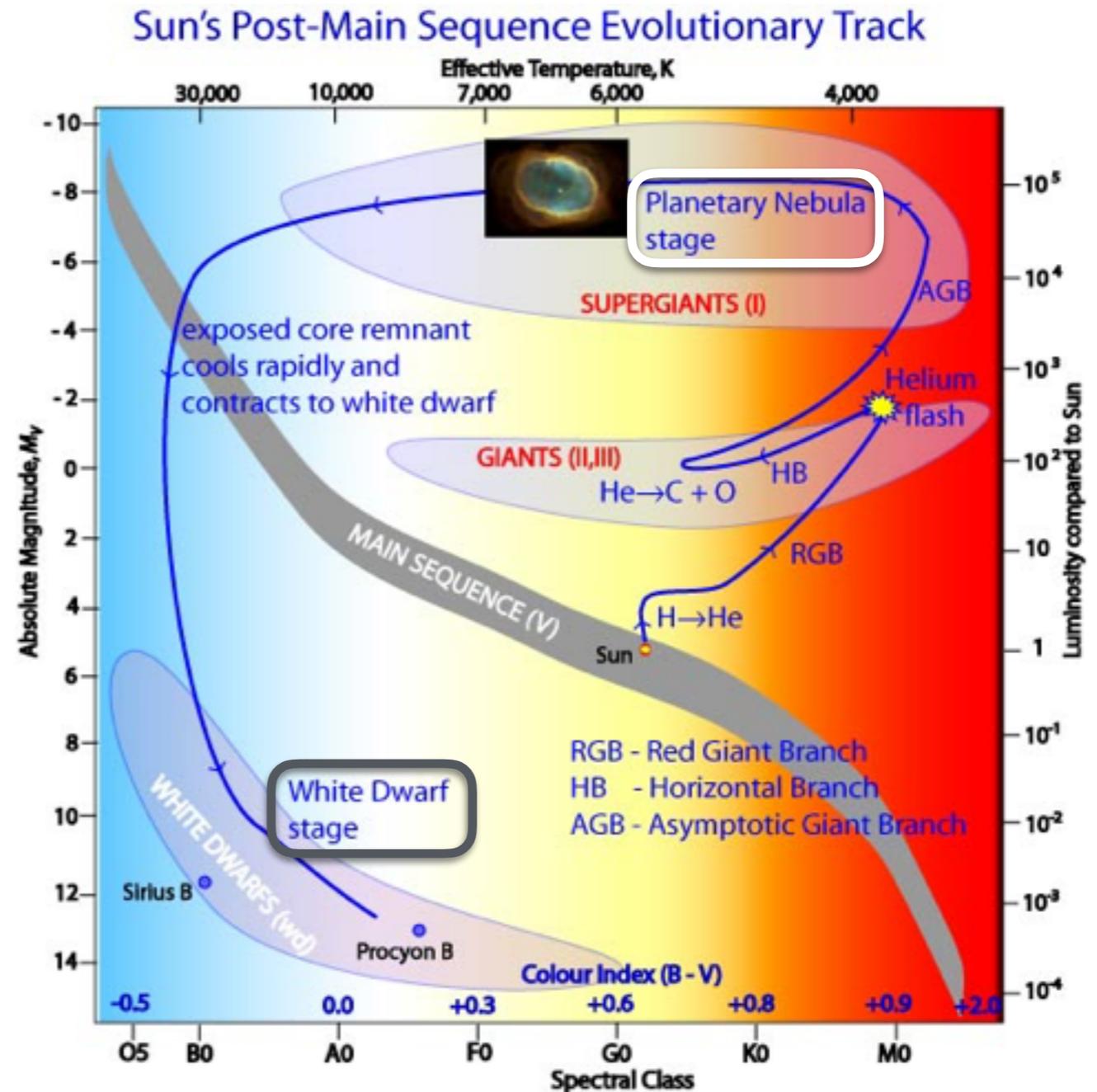
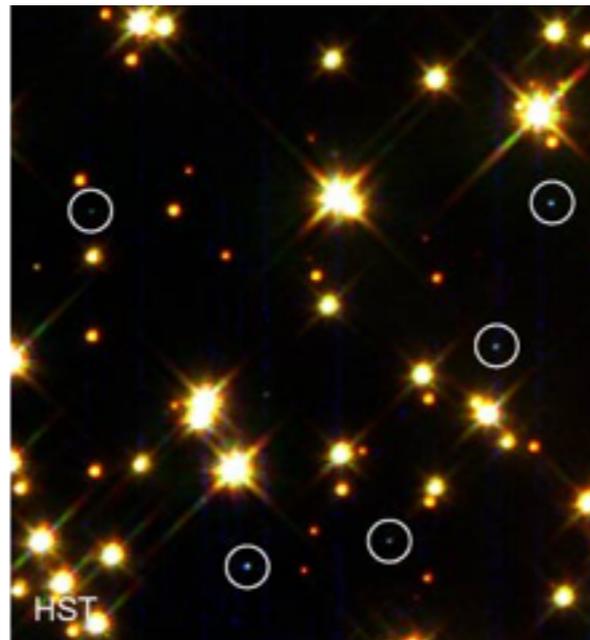
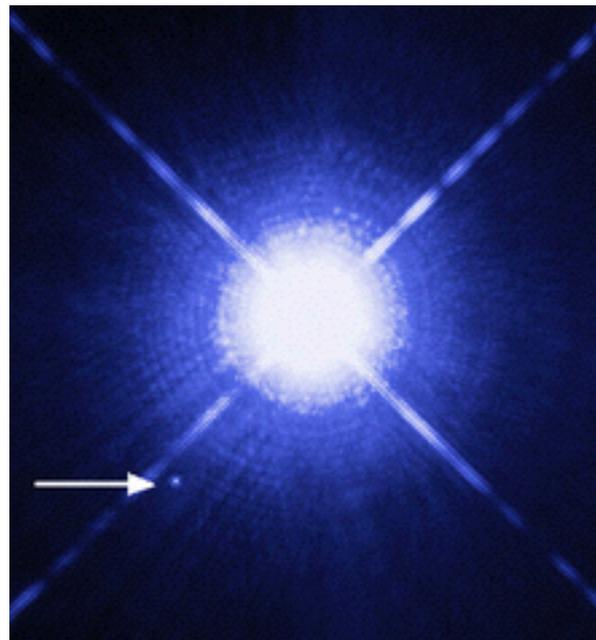
Des nébuleuses planétaires aux naines blanches

- Le cœur de carbone et d'oxygène, inerte et exposé, se refroidit rapidement
- Ce qui reste de l'étoile est devenu une naine blanche
- De masse comparable à celle du Soleil, sa taille est proche de celle de la Terre
- Elle se refroidira lentement, sur des centaines de milliards d'années...



Sirius A et Sirius B

Naines blanches dans un amas globulaire



Naines blanches

Des astres extrêmement denses $\rho \sim 10^9 \text{ kg m}^{-3}$

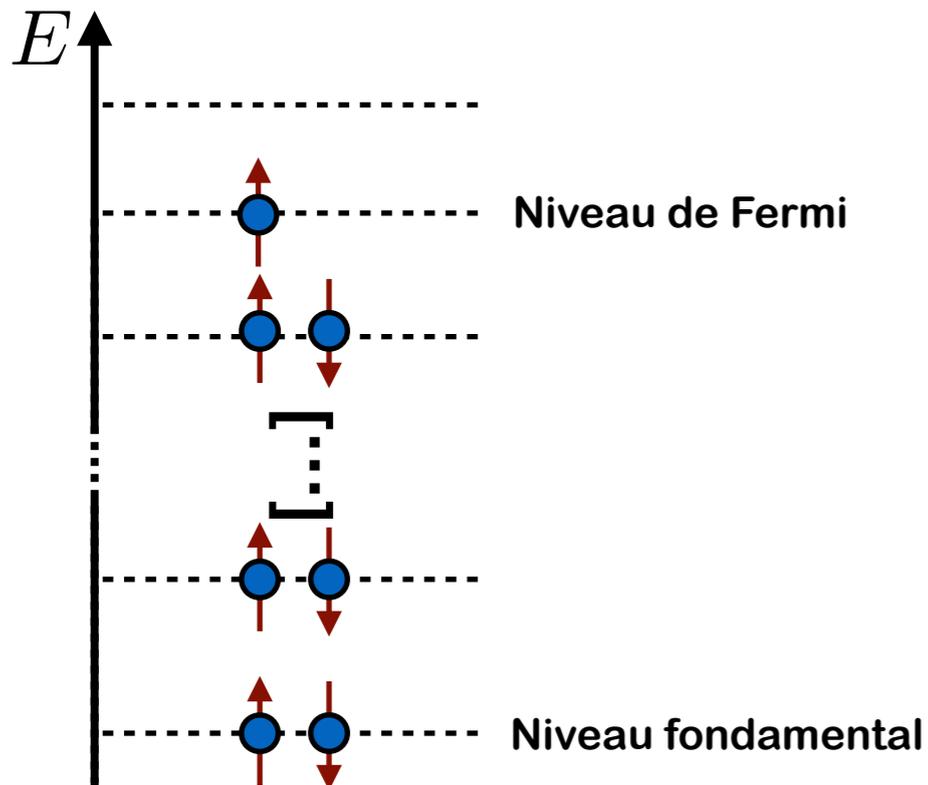


=



Une structure de gaz quantique

- Constitué de noyaux de carbone et d'oxygène, et d'un « gaz » d'électrons libres
- La gravité n'est plus contrebalancée par une pression thermique
- La pression de dégénérescence du gaz d'électrons (principe de Pauli) entre en jeu
- Description par la statistique de Fermi-Dirac



1945



Wolfgang Pauli



1938



Enrico Fermi



1933



Paul Adrien Maurice Dirac

Masse maximale des naines blanches

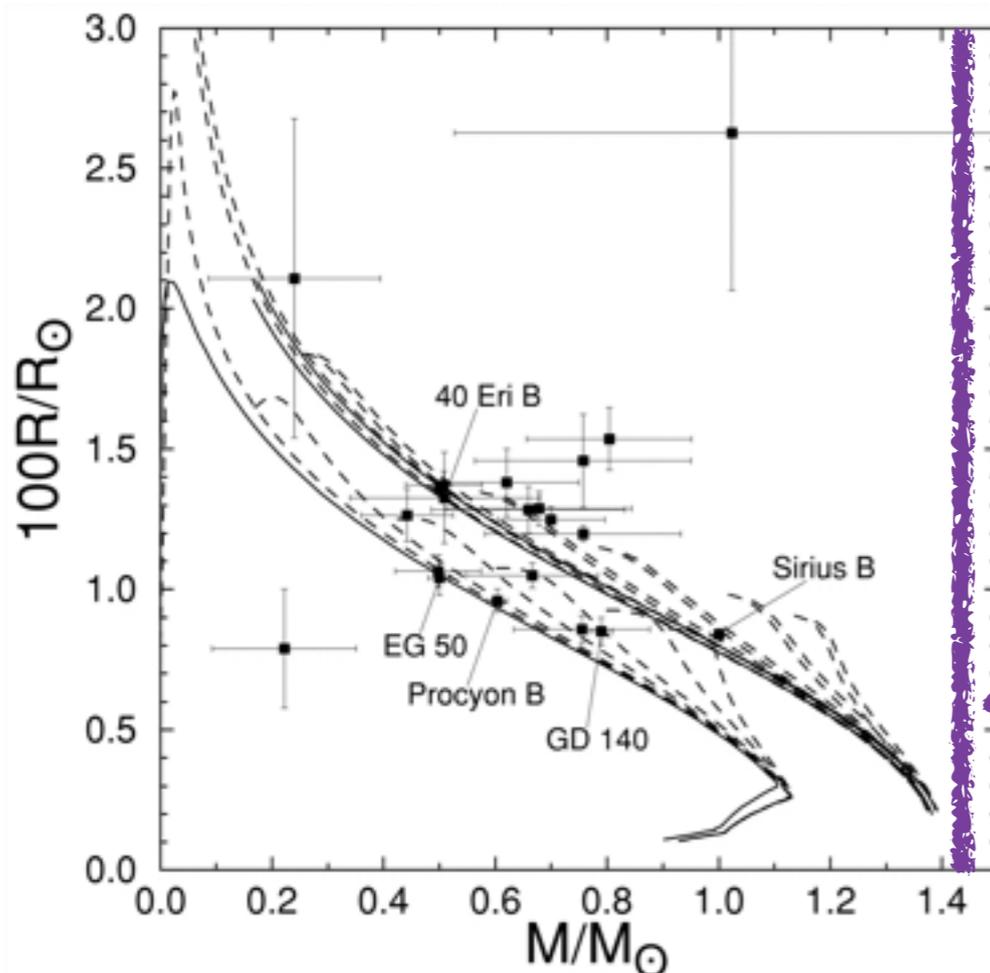
Equilibre des naines blanches décrit par une équation d'état polytropique

- La pression dépend uniquement de la densité, et non de la température
- L'exposant polytropique dépend du caractère relativiste ou non des électrons

$$P \propto \rho^\gamma$$

Ultra-relativiste $\frac{4}{3} \leq \gamma \leq \frac{5}{3}$ Non relativiste

Relation masse-rayon et masse de Chandrasekhar



$$\frac{M^{\gamma-2}}{R^{3\gamma-4}} = C^{te}$$

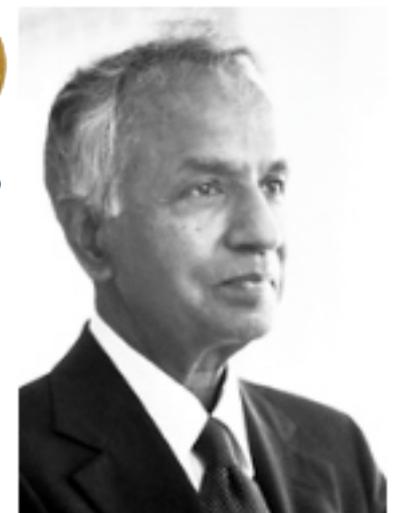
Les naines blanches plus massives sont plus petites

Pour $\gamma \rightarrow \frac{4}{3}$ la masse devient indépendante du rayon

$$M_{\text{Chandra}} = 1.457 M_{\odot}$$



1983



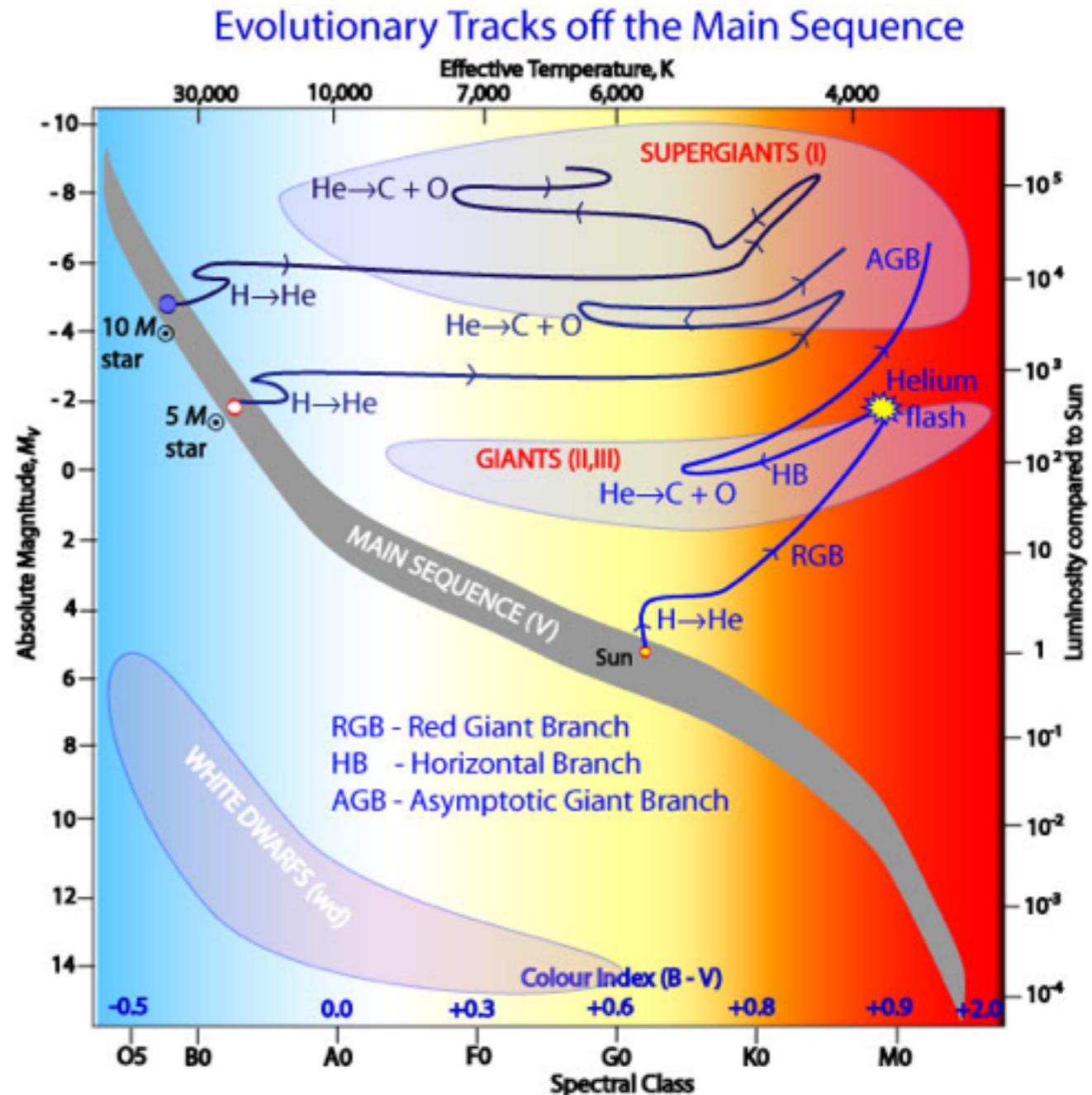
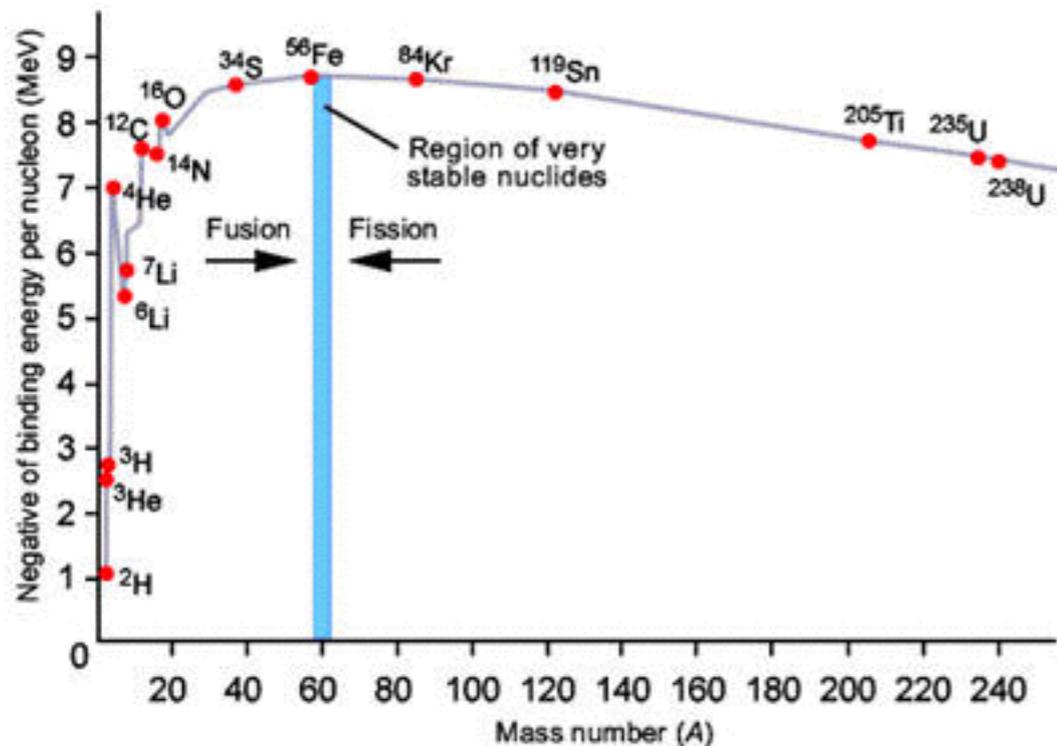
Subramanyan Chandrasekhar

Evolution des étoiles massives

$$M \gtrsim 10 M_{\odot}$$

S. Chandrasekhar : *“The life history of a star of small mass must be essentially different from the life history of a star of large mass. For a star of small mass the natural white-dwarf stage is an initial step towards complete extinction. A star of large mass cannot pass into the white-dwarf stage and one is left speculating on other possibilities.”*

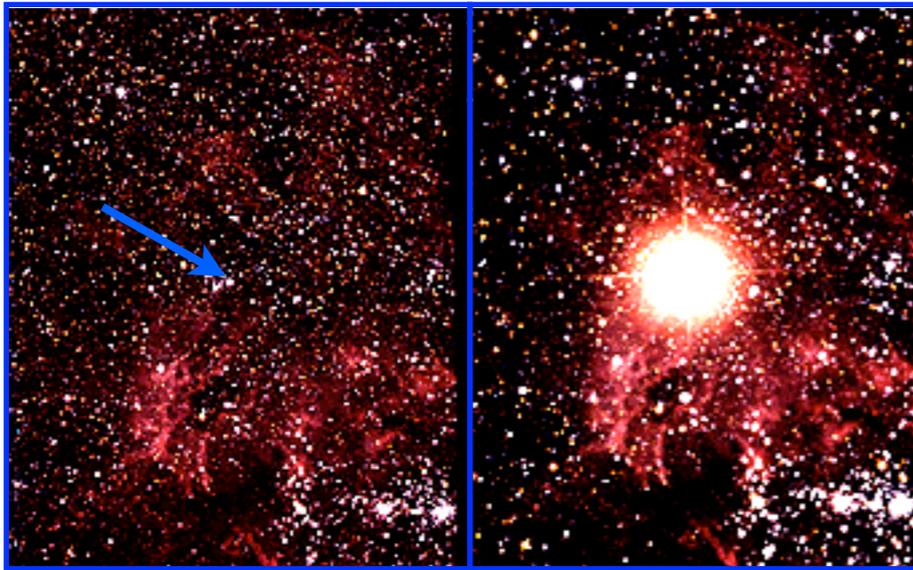
- Court temps de vie sur la séquence principale
- Fusion de l'hélium plus graduelle : pas de « flash »
- Les couches externes s'étendent et refroidissent
- La luminosité reste à peu près constante
- L'hélium épuisé, le cœur se contracte
- Augmentation de la température
- La fusion du carbone produit Na, Ne, Mg
- D'autres éléments suivent : Si, S, Ar, Ca
- Le processus s'arrête au fer



La mort des étoiles massives : supernovæ de type II

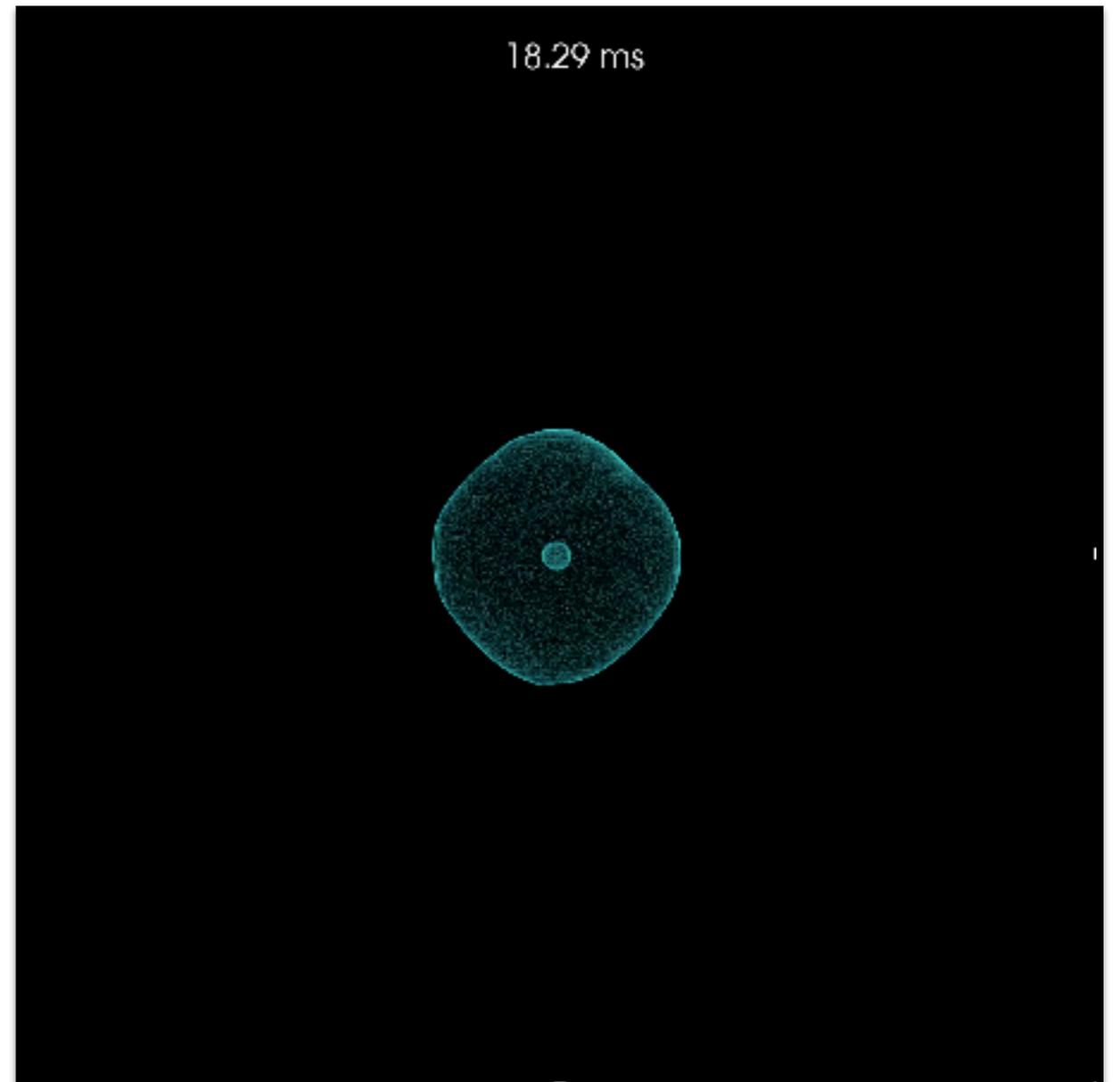
- Température dans le cœur : 10^{10} K
- Photodésintégration du fer : production de protons
- Réaction endoénergétique : chute de pression
- Nouvelle contraction, à des vitesses de $\sim 10^4$ km/s
- Réaction de neutronisation $\longrightarrow p + e^- \mapsto n + \nu_e$
- Disparition de la pression de Fermi des électrons
- A 10^{12} K : pression des neutrons (interaction forte) stoppe l'effondrement du cœur
- Choc violent des couches externes en chute libre sur le cœur dégénéré
- Onde de choc : explosion de l'étoile
- Synthèse des éléments lourds jusqu'à l'uranium

SN 1987A dans le grand nuage de Magellan



Energie libérée $E \simeq 3 \times 10^{46}$ J

- Neutrinos : 99%
- Energie cinétique : 1%
- Rayonnement électromagnétique : 0.1%
- Rayonnement gravitationnel : 0.01%

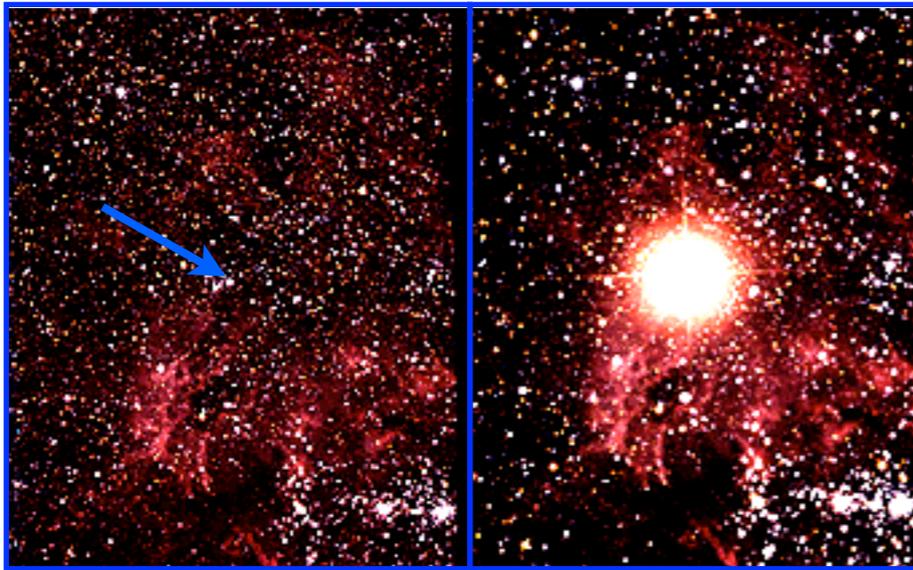


(Christian Ott, Steve Drasco, SXS project)

La mort des étoiles massives : supernovæ de type II

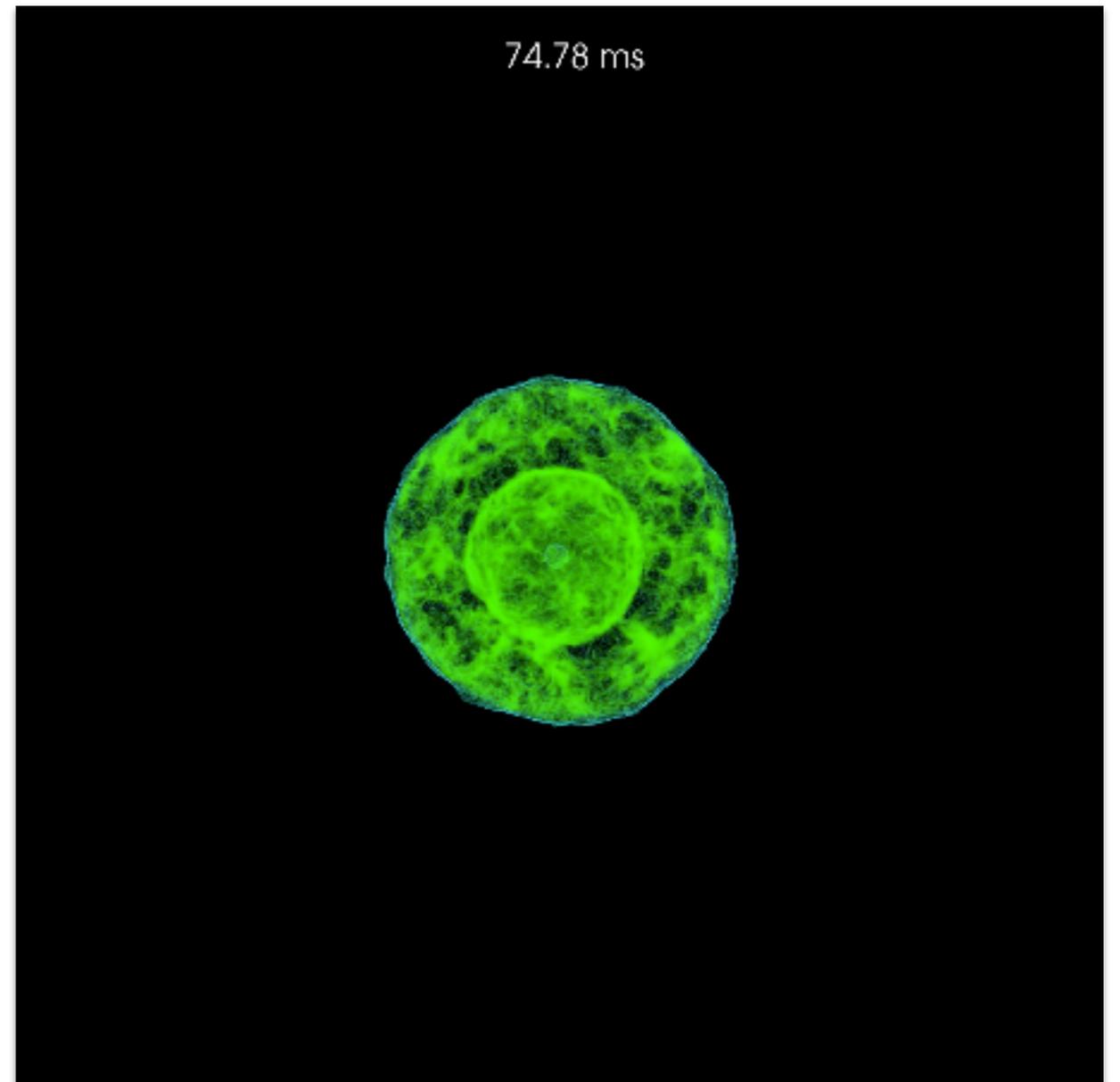
- Température dans le cœur : 10^{10} K
- Photodésintégration du fer : production de protons
- Réaction endoénergétique : chute de pression
- Nouvelle contraction, à des vitesses de $\sim 10^4$ km/s
- Réaction de neutronisation $\longrightarrow p + e^- \mapsto n + \nu_e$
- Disparition de la pression de Fermi des électrons
- A 10^{12} K : pression des neutrons (interaction forte) stoppe l'effondrement du cœur
- Choc violent des couches externes en chute libre sur le cœur dégénéré
- Onde de choc : explosion de l'étoile
- Synthèse des éléments lourds jusqu'à l'uranium

SN 1987A dans le grand nuage de Magellan



Energie libérée $E \simeq 3 \times 10^{46}$ J

- Neutrinos : 99%
- Energie cinétique : 1%
- Rayonnement électromagnétique : 0.1%
- Rayonnement gravitationnel : 0.01%

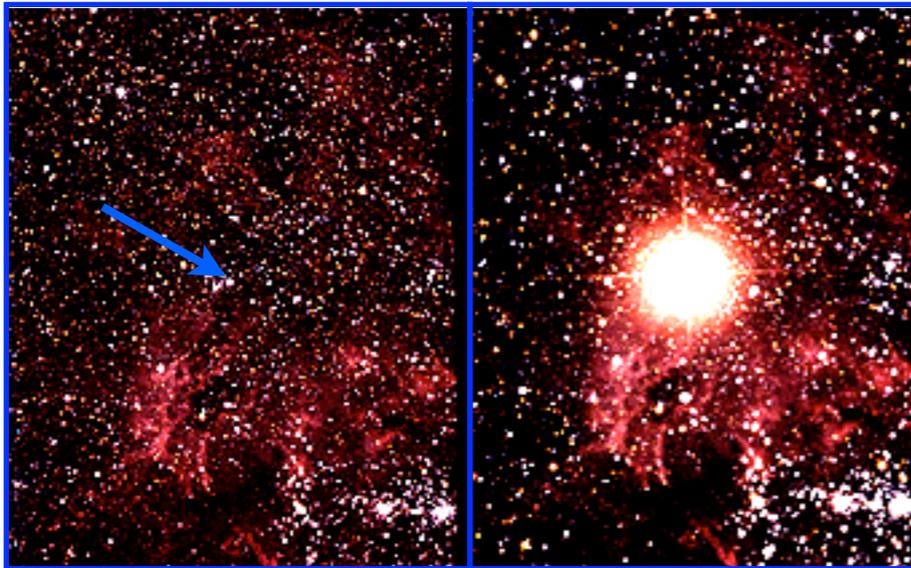


(Christian Ott, Steve Drasco, SXS project)

La mort des étoiles massives : supernovæ de type II

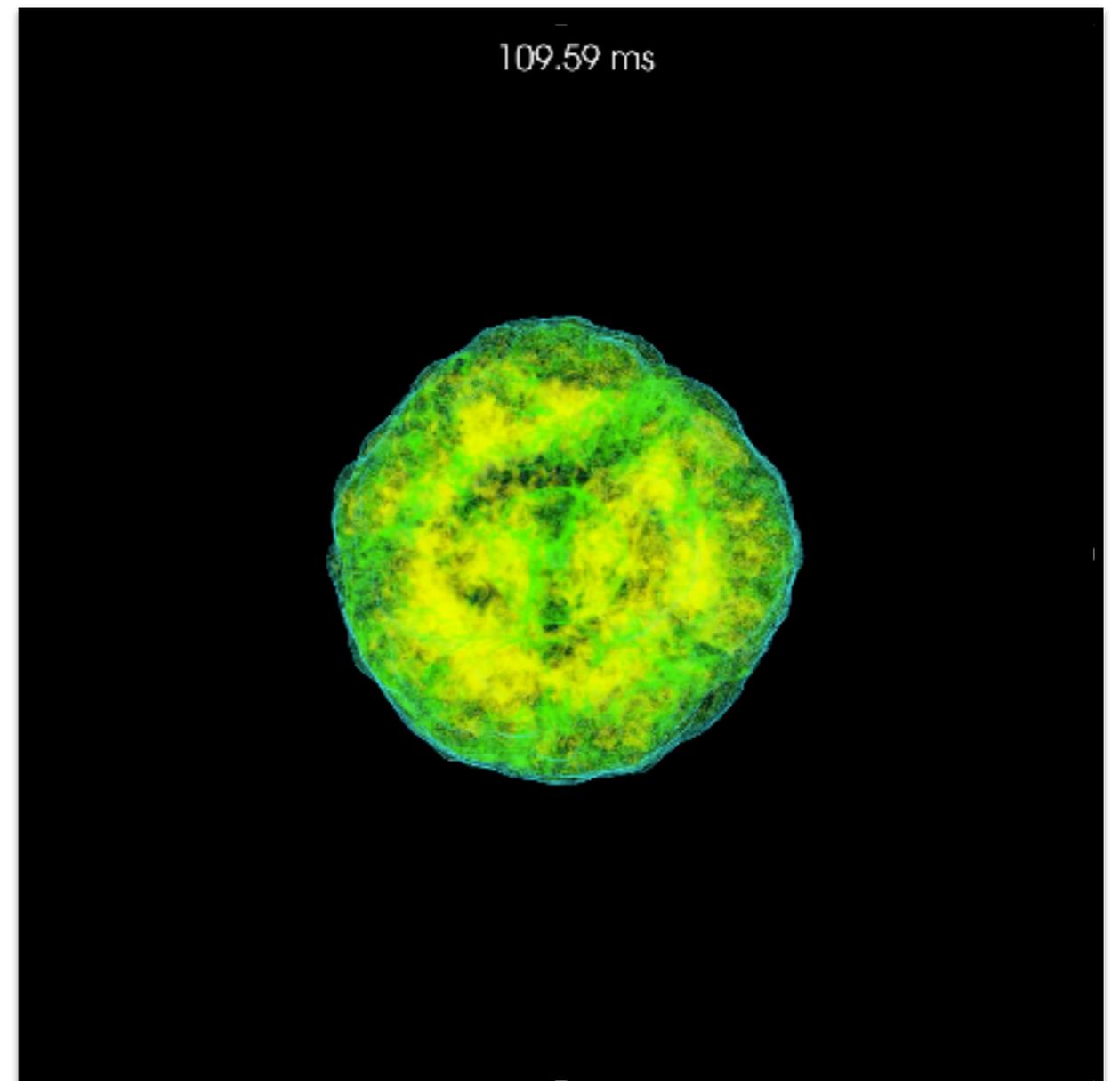
- Température dans le cœur : 10^{10} K
- Photodésintégration du fer : production de protons
- Réaction endoénergétique : chute de pression
- Nouvelle contraction, à des vitesses de $\sim 10^4$ km/s
- Réaction de neutronisation $\longrightarrow p + e^- \mapsto n + \nu_e$
- Disparition de la pression de Fermi des électrons
- A 10^{12} K : pression des neutrons (interaction forte) stoppe l'effondrement du cœur
- Choc violent des couches externes en chute libre sur le cœur dégénéré
- Onde de choc : explosion de l'étoile
- Synthèse des éléments lourds jusqu'à l'uranium

SN 1987A dans le grand nuage de Magellan



Energie libérée $E \simeq 3 \times 10^{46}$ J

- Neutrinos : 99%
- Energie cinétique : 1%
- Rayonnement électromagnétique : 0.1%
- Rayonnement gravitationnel : 0.01%

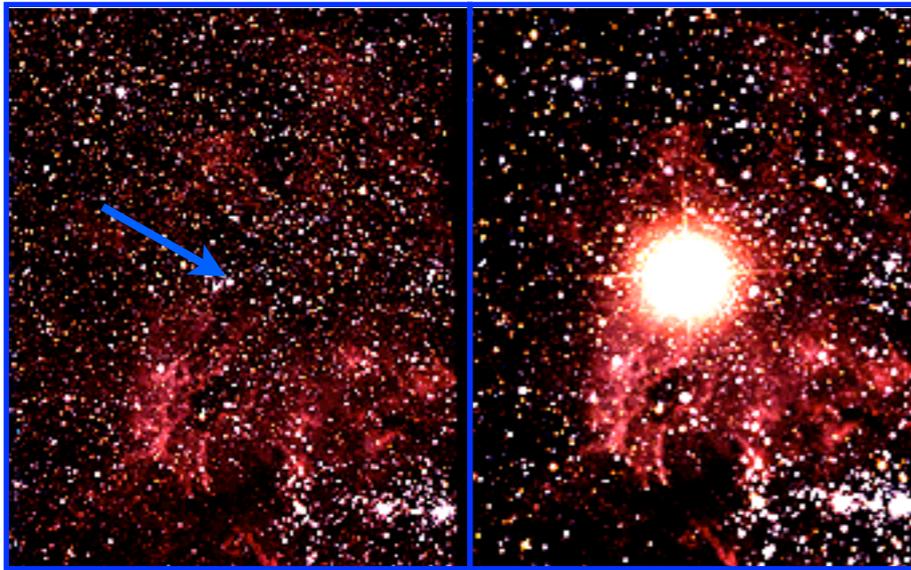


(Christian Ott, Steve Drasco, SXS project)

La mort des étoiles massives : supernovæ de type II

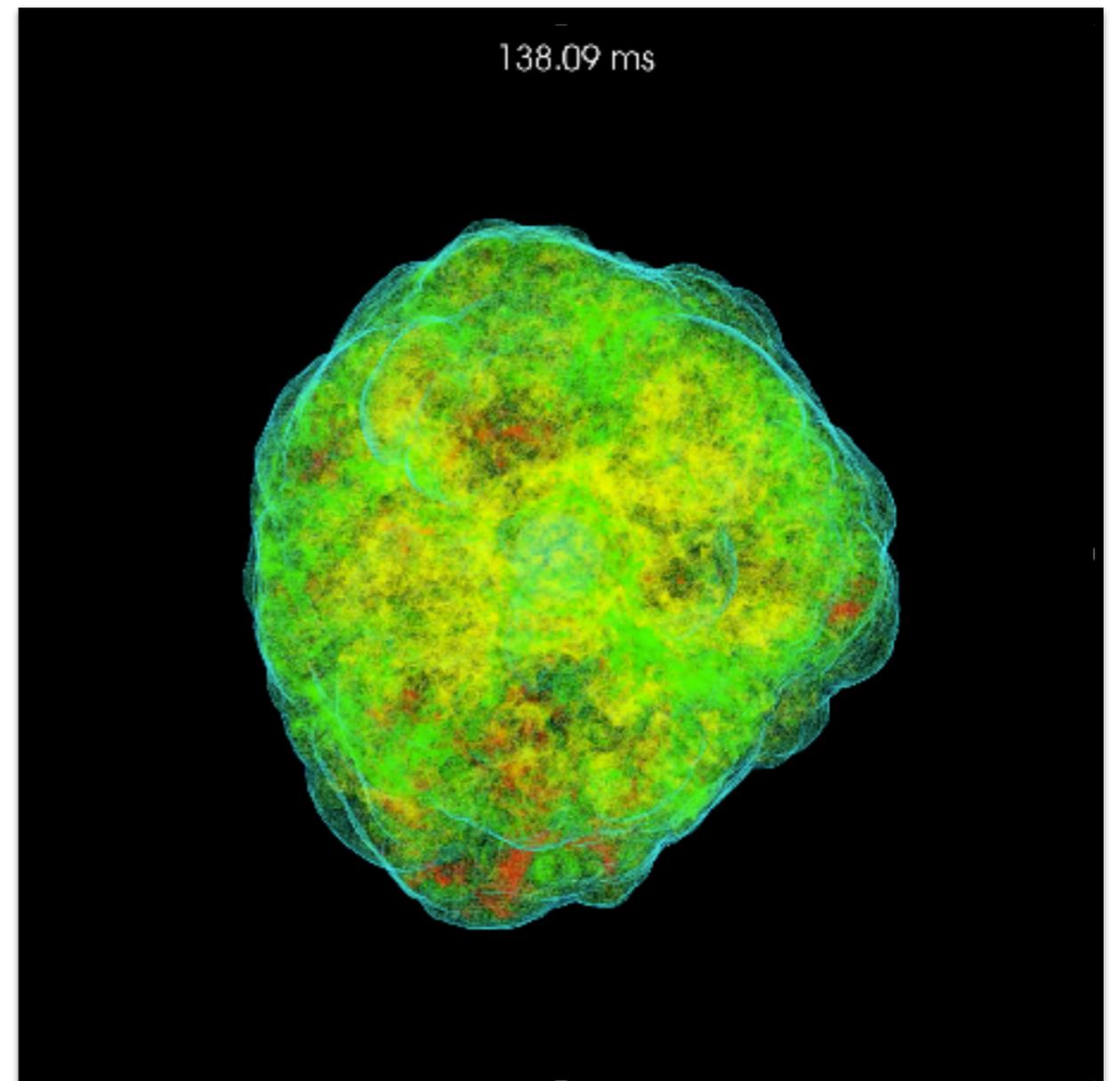
- Température dans le cœur : 10^{10} K
- Photodésintégration du fer : production de protons
- Réaction endoénergétique : chute de pression
- Nouvelle contraction, à des vitesses de $\sim 10^4$ km/s
- Réaction de neutronisation $\longrightarrow p + e^- \mapsto n + \nu_e$
- Disparition de la pression de Fermi des électrons
- A 10^{12} K : pression des neutrons (interaction forte) stoppe l'effondrement du cœur
- Choc violent des couches externes en chute libre sur le cœur dégénéré
- Onde de choc : explosion de l'étoile
- Synthèse des éléments lourds jusqu'à l'uranium

SN 1987A dans le grand nuage de Magellan



Energie libérée $E \simeq 3 \times 10^{46}$ J

- Neutrinos : 99%
- Energie cinétique : 1%
- Rayonnement électromagnétique : 0.1%
- Rayonnement gravitationnel : 0.01%

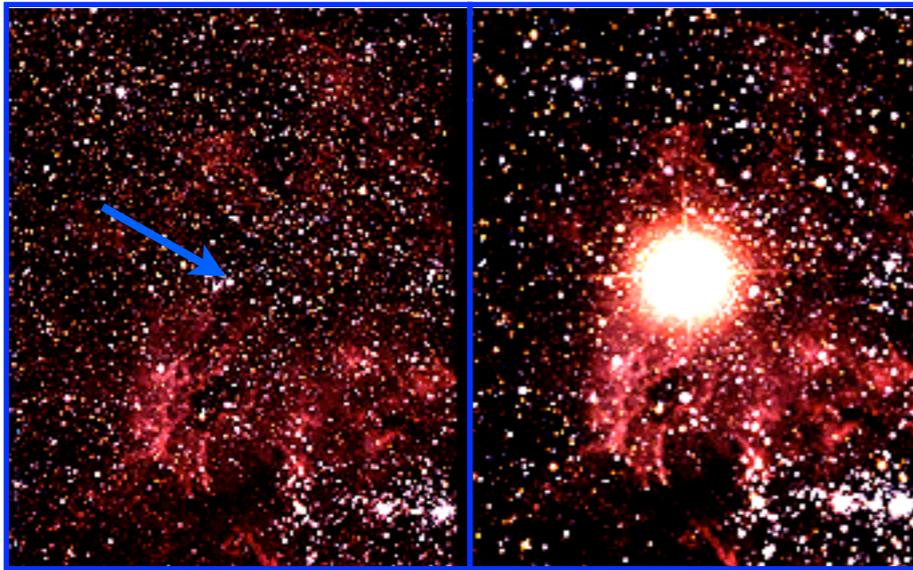


(Christian Ott, Steve Drasco, SXS project)

La mort des étoiles massives : supernovæ de type II

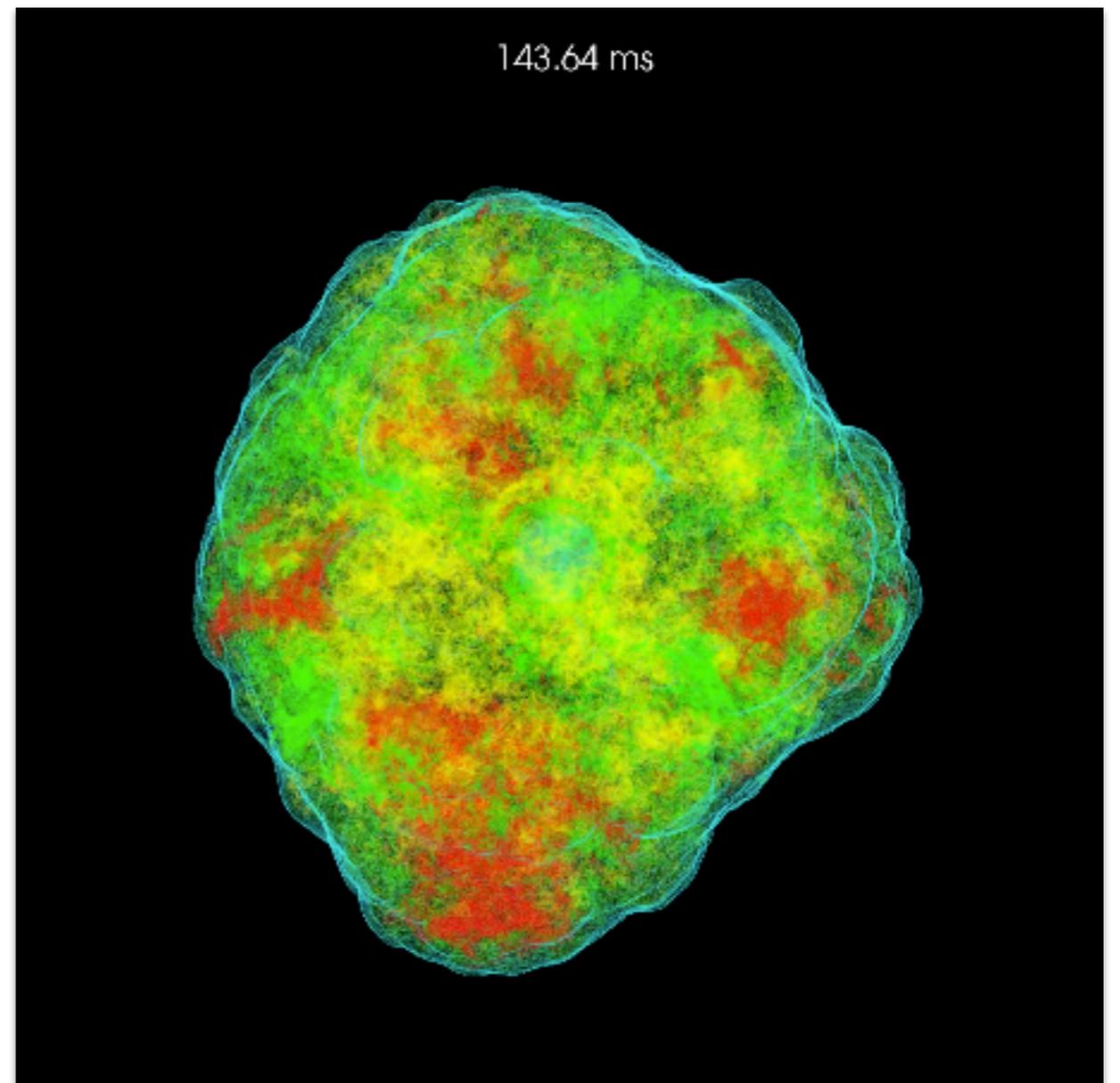
- Température dans le cœur : 10^{10} K
- Photodésintégration du fer : production de protons
- Réaction endoénergétique : chute de pression
- Nouvelle contraction, à des vitesses de $\sim 10^4$ km/s
- Réaction de neutronisation $\longrightarrow p + e^- \mapsto n + \nu_e$
- Disparition de la pression de Fermi des électrons
- A 10^{12} K : pression des neutrons (interaction forte) stoppe l'effondrement du cœur
- Choc violent des couches externes en chute libre sur le cœur dégénéré
- Onde de choc : explosion de l'étoile
- Synthèse des éléments lourds jusqu'à l'uranium

SN 1987A dans le grand nuage de Magellan



Energie libérée $E \simeq 3 \times 10^{46}$ J

- Neutrinos : 99%
- Energie cinétique : 1%
- Rayonnement électromagnétique : 0.1%
- Rayonnement gravitationnel : 0.01%

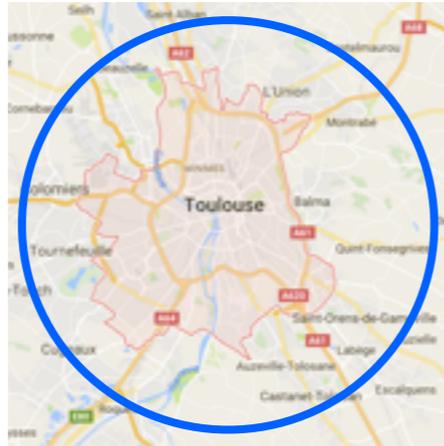
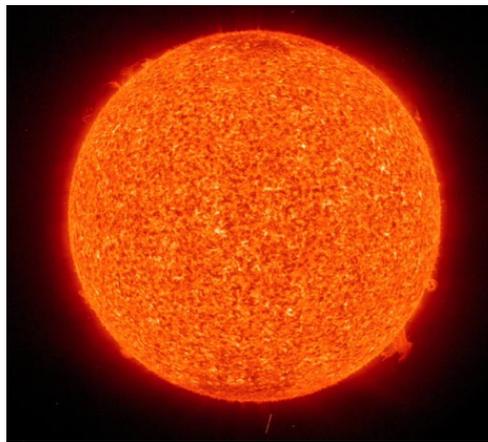


(Christian Ott, Steve Drasco, SXS project)

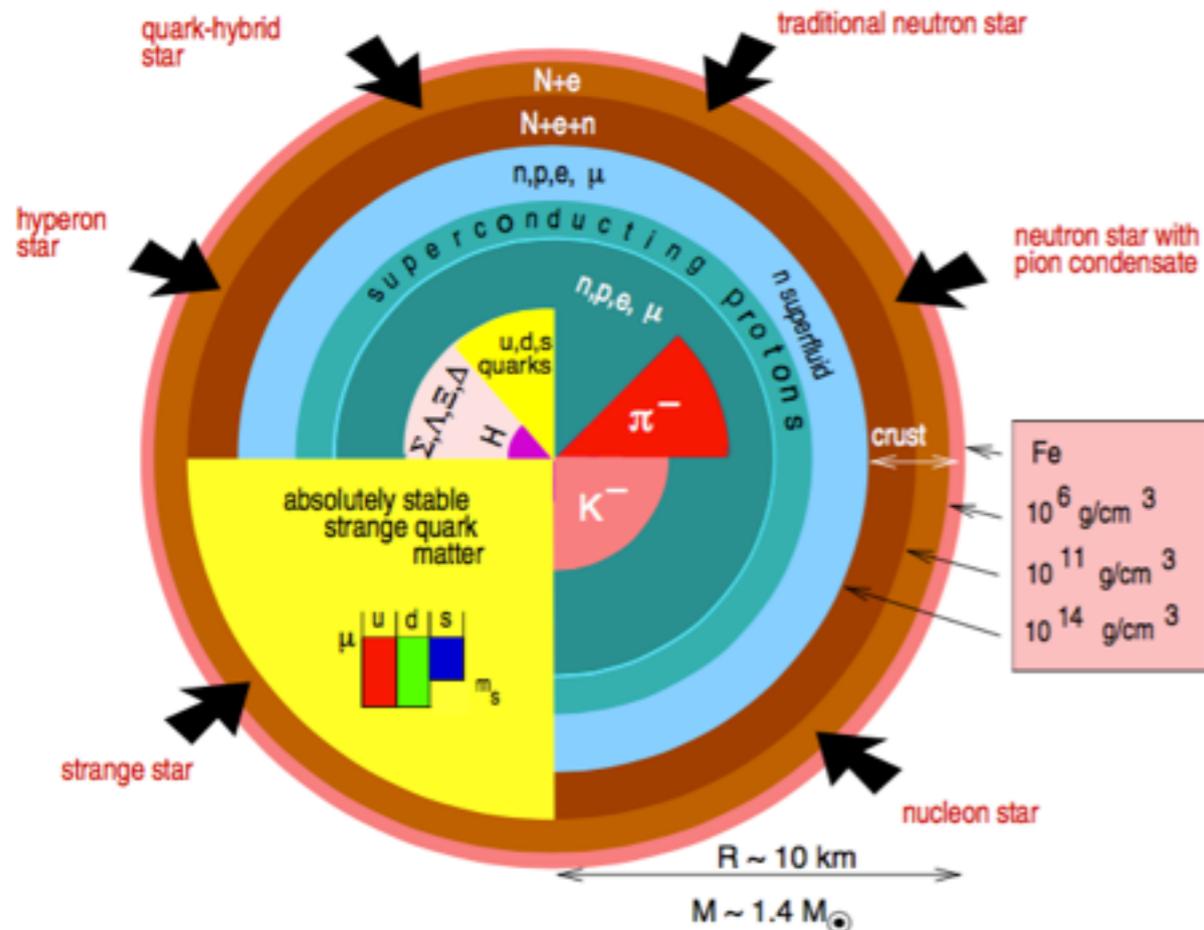
Etoiles à neutrons

Des astres encore plus denses que les naines blanches $\rho \sim 10^{17} \text{ kg m}^{-3}$

- Etat final si la masse du cœur de neutrons est inférieure à environ 3 masses solaires
- Masse comparable à celle du Soleil, dans un rayon de ~10 km



Equation d'état de la matière ultra condensée encore mal connue



- Interaction forte difficile à traiter : QCD
- Description en relativité générale impérative

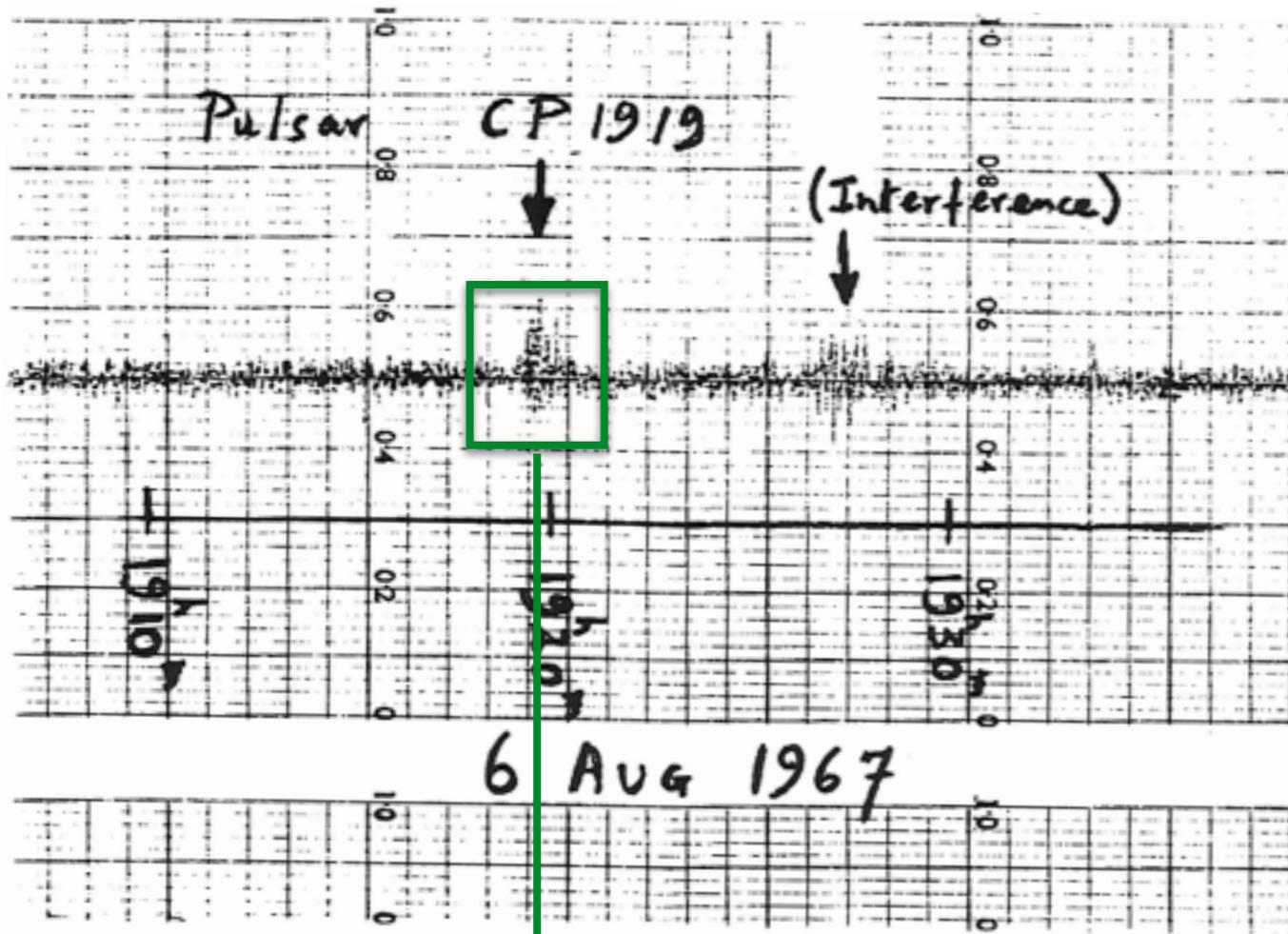
Paramètre de relativité

$$\Xi_{NS} = \frac{GM}{Rc^2} \simeq 0.2$$

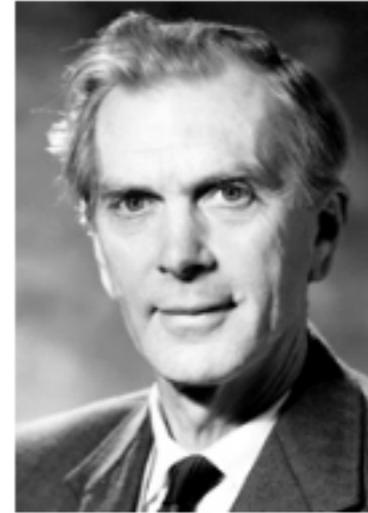
Naine blanche $\Xi_{WD} \simeq 10^{-3}$

Soleil $\Xi_{\odot} \simeq 10^{-6}$

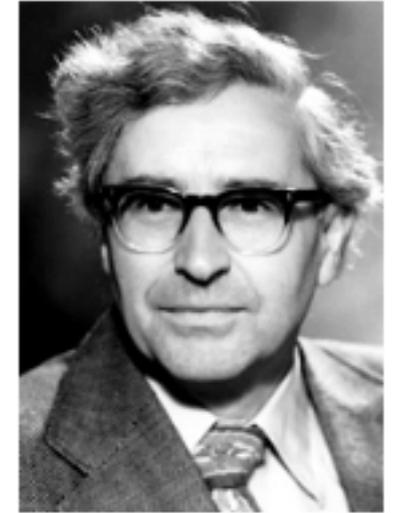
Découverte des pulsars



1974



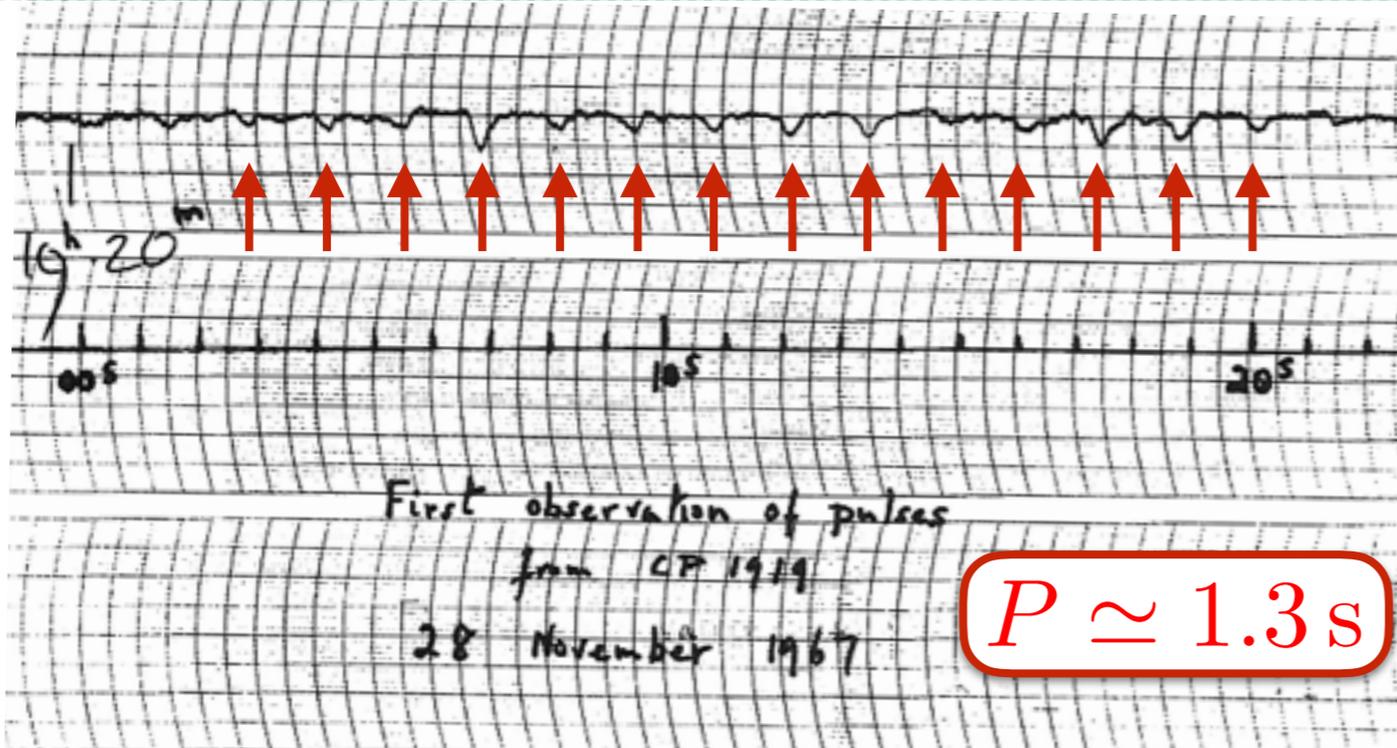
Sir Martin Ryle



Antony Hewish

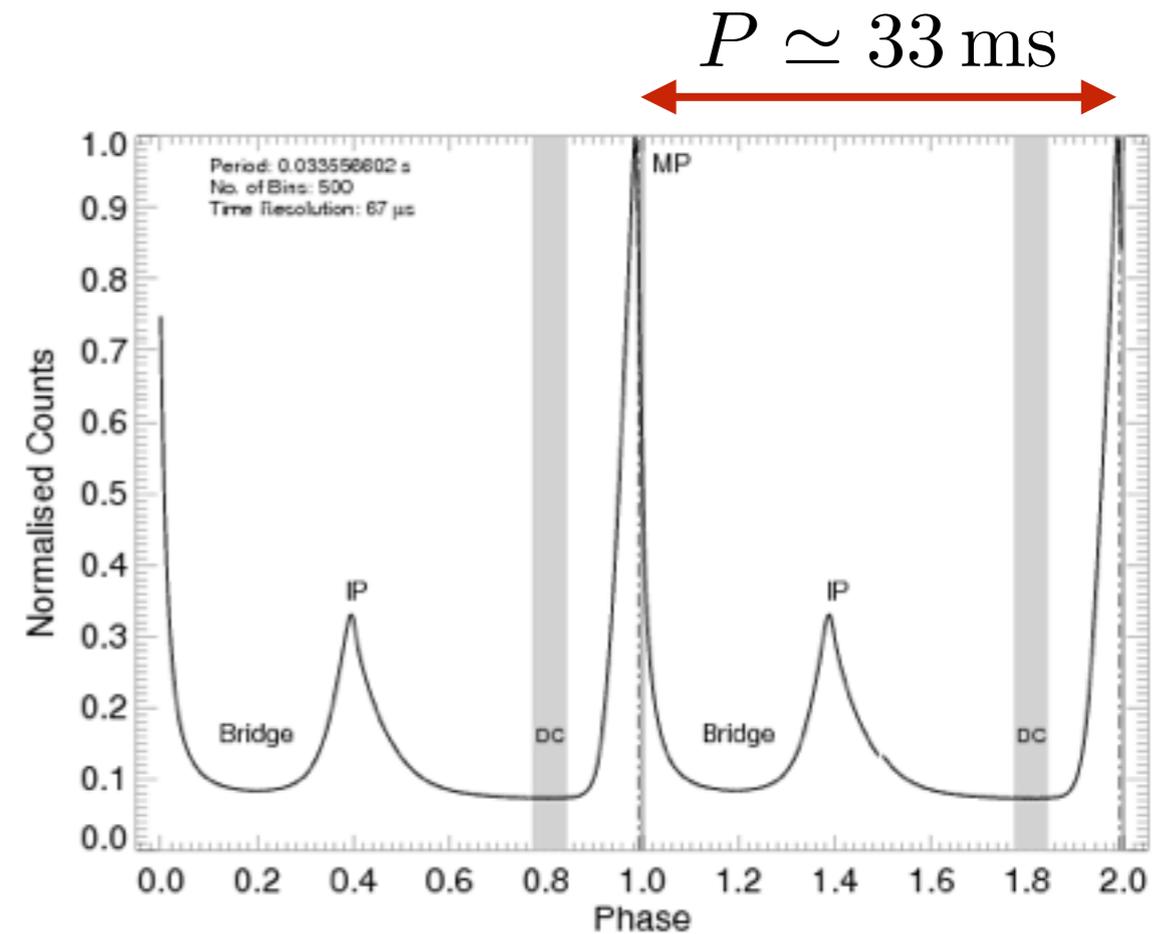
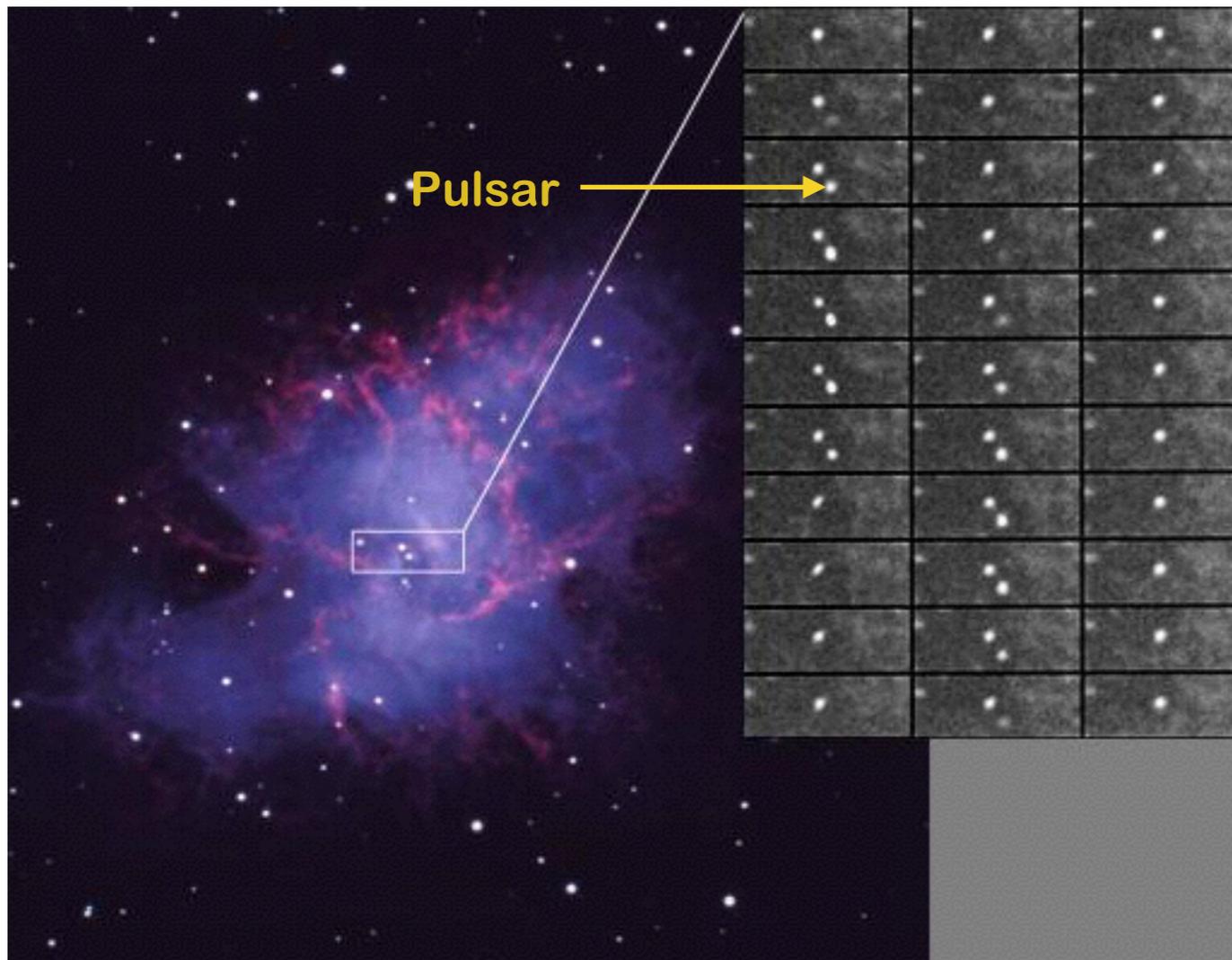


Jocely Bell Burnell



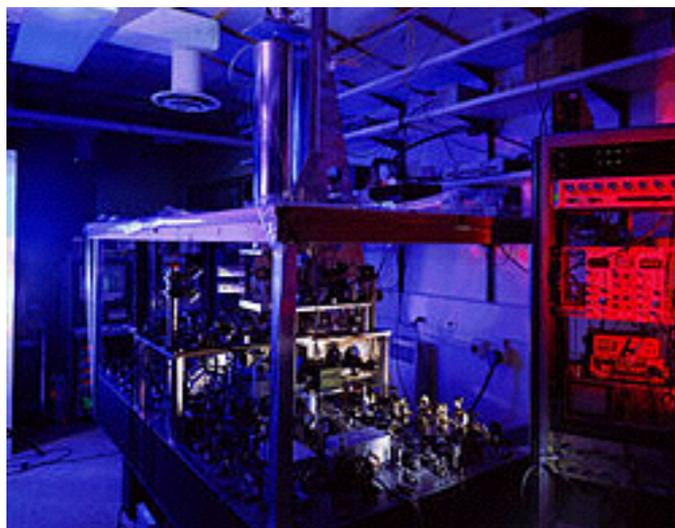
Des horloges ultra-précises

Pulsar du Crabe, dans le reste d'une supernova observée en 1054



$$\dot{P} \simeq 10^{-12.4}$$

La période augmente d'une seconde en 80000 ans

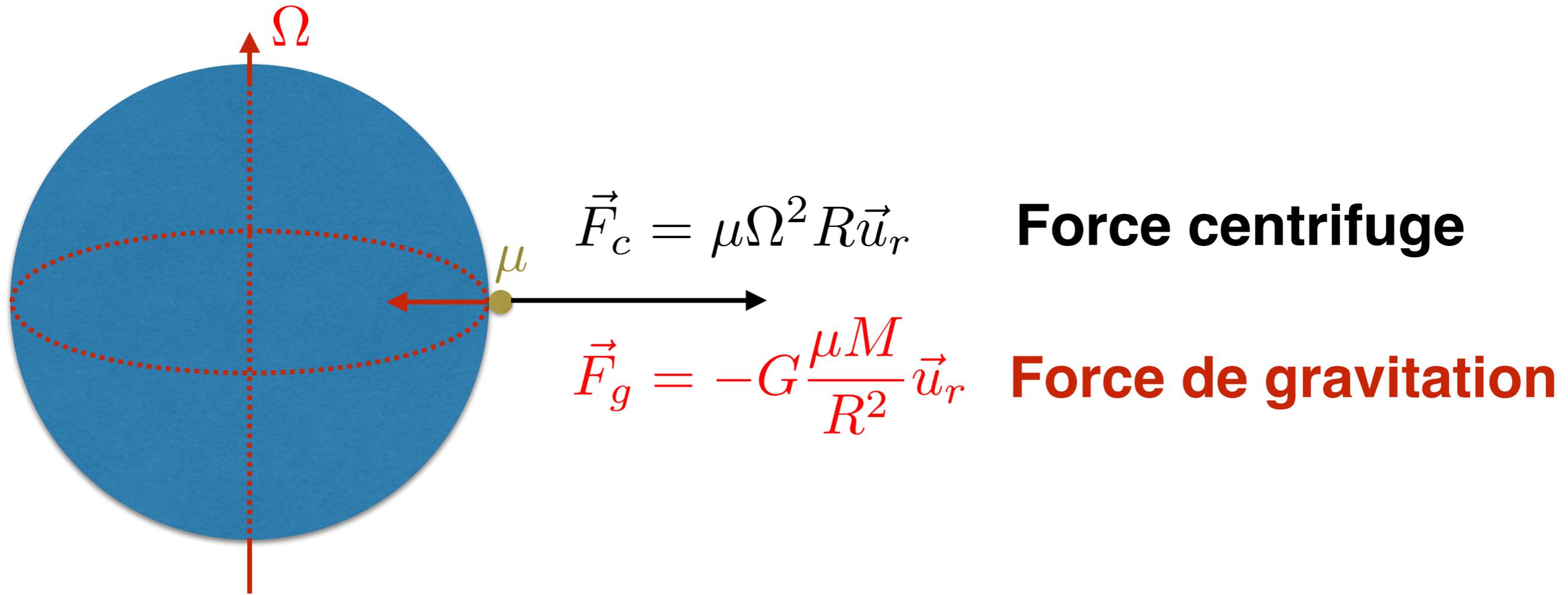


Horloges atomiques au césium :

$$\dot{P} \simeq 2 \times 10^{-16}$$



Les pulsars sont des étoiles à neutrons en rotation rapide



L'équilibre mécanique impose une limite inférieure à la période de rotation

$$P \geq 2\pi \sqrt{\frac{R^3}{GM}}$$

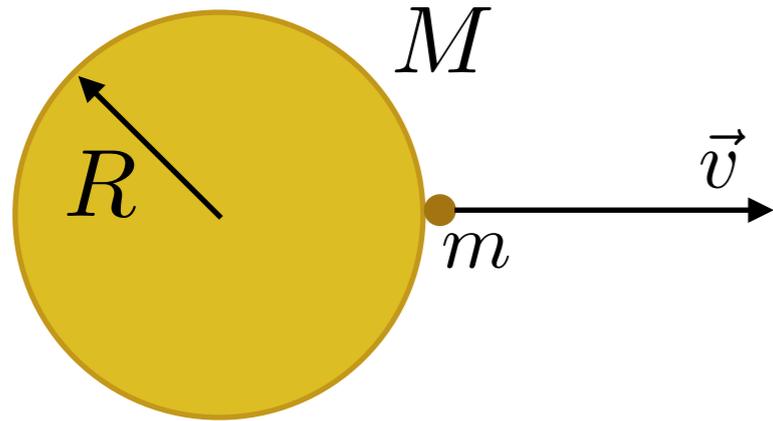
Un signal périodique impose une limite inférieure à la densité de l'astre

$$\bar{\rho} \geq \frac{3\pi}{GP^2}$$

Cas du pulsar du Crabe : $\bar{\rho} \geq 1.5 \times 10^{14} \text{ kg m}^{-3}$

Effondrement inarrêtable : les trous noirs

- Etat final si la masse du cœur de neutrons est supérieure à environ 3 masses solaires
- Imaginés par Mitchell et Laplace au XVIII^e siècle



Vitesse de libération et rayon de Schwarzschild

$$E_m = E_c + E_p = \frac{1}{2}mv_l^2 - G\frac{Mm}{R} = 0$$

$$v_l = c \text{ pour } R = R_S = \frac{2GM}{c^2}$$

~ 10 km pour un trou noir de 3 masses solaires

- Rien ne peut sortir de l'horizon des événements, pas même la lumière
- Courbure de l'espace-temps au voisinage de l'astre : effets de relativité générale importants

Différents types de trous noirs

- Trous noirs stellaires : de 3 masses solaires à ~10 masses solaires
- Trous noirs massifs au centre des galaxies : 10^5 à 10^9 masses solaires

Orbites stellaires autour du trou noir central de la Voie Lactée (4 millions de masses solaires)

