

L'Univers de haute énergie

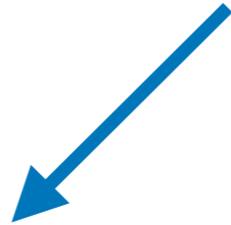
1ère partie



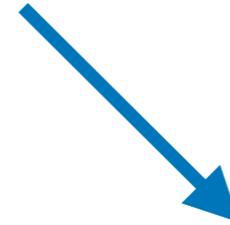
Alexis Coleiro
Laboratoire APC / Université de Paris
coleiro@apc.univ-paris-diderot.fr

université
**PARIS
DIDEROT**

Univers de haute énergie



Univers primordial
(cosmologie)



Sources de haute énergie
(astrophysique)

- **Nucléosynthèse: primordiale, stellaire, explosive**
- **Sources de haute énergie, processus de rayonnement et méthodes d'observations**

Plan

Cours I

1. **Nucléosynthèse primordiale**
2. **Evolution stellaire** (focus sur les étoiles les plus massives)
 - A. Connaître et analyser les étoiles
 - B. Evolution des étoiles: formation, séquence principale, nucléosynthèse stellaire, **fin de vie et stades finaux (naines blanches, étoiles à neutrons, trous noirs).**

Plan

Cours II

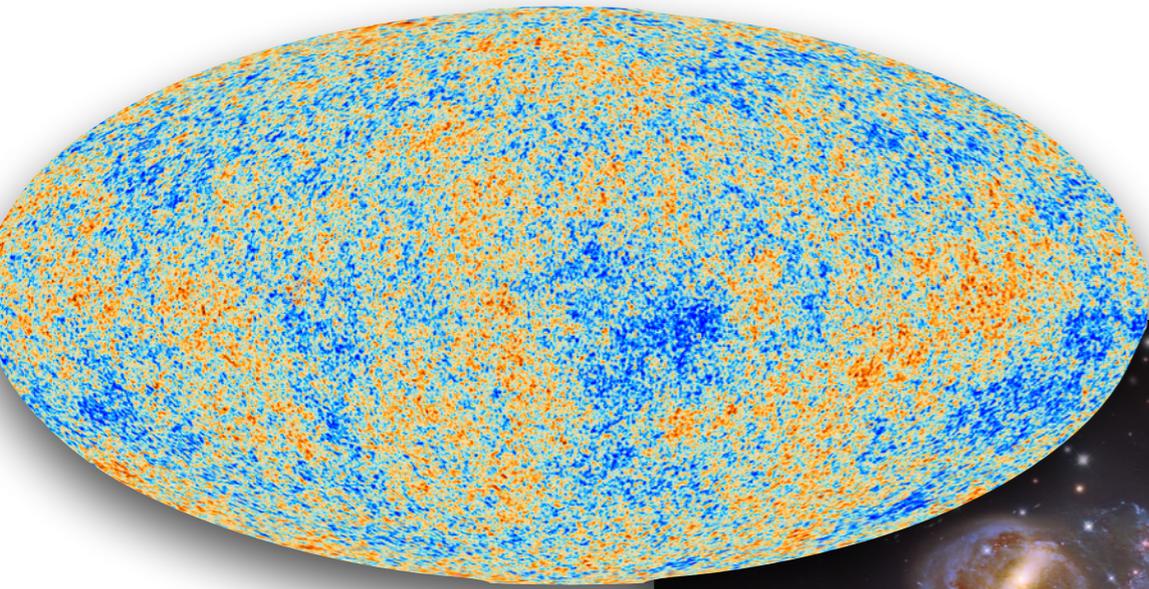
1. De l'astronomie multi-longueurs d'onde à l'astronomie multi-messager

- A. Histoire de l'observation en astronomie (de l'astronomie « visible » au ciel radio et gamma)
- B. Ondes gravitationnelles
- C. Rayons cosmiques
- D. Neutrinos (neutrinos de supernovae et neutrinos de très haute énergie)

2. Deux exemples marquants et récents

- E. Coalescences de deux objets compacts
- F. Jets relativistes des noyaux actifs de galaxies

Structuration de l'Univers

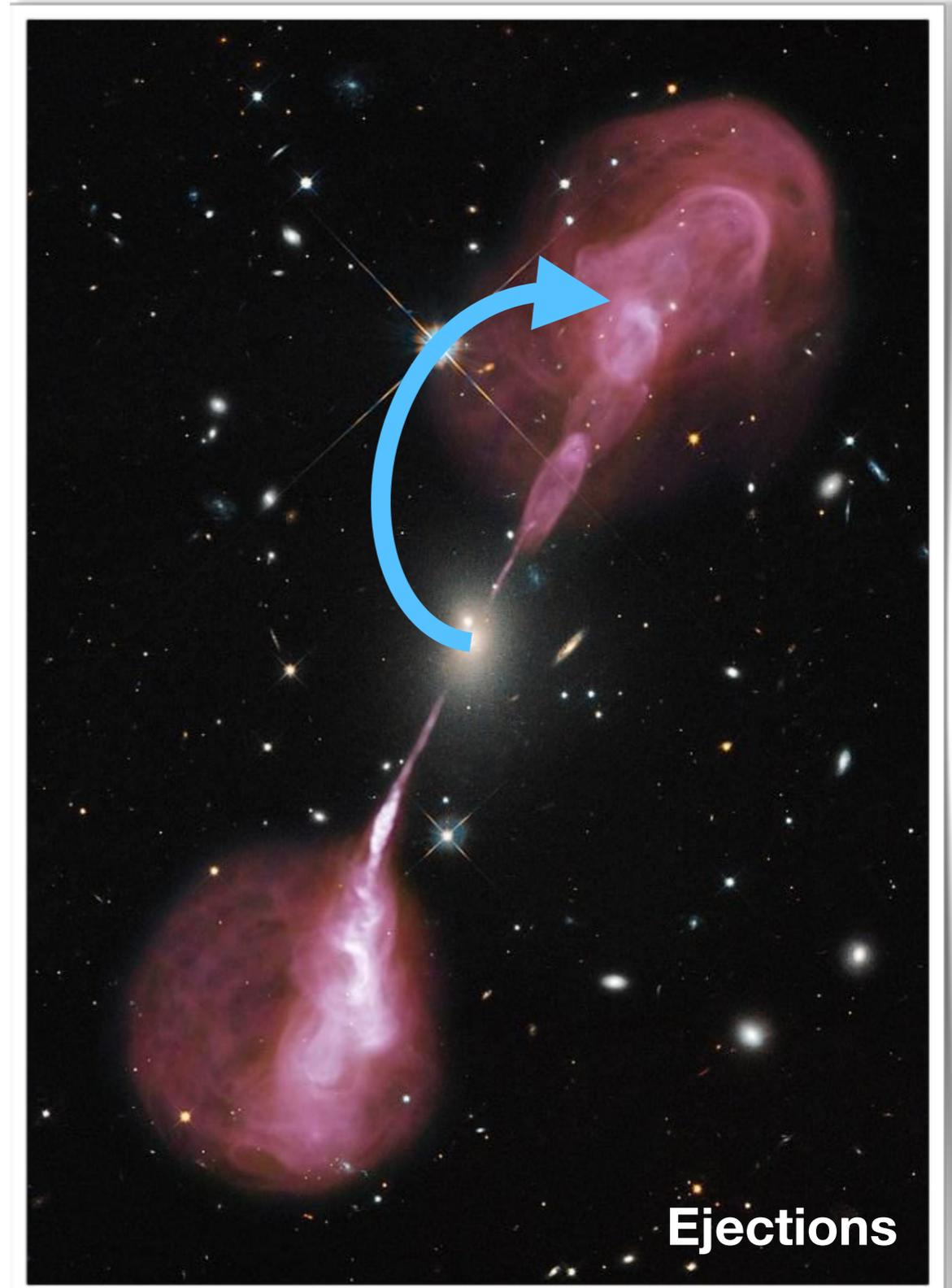
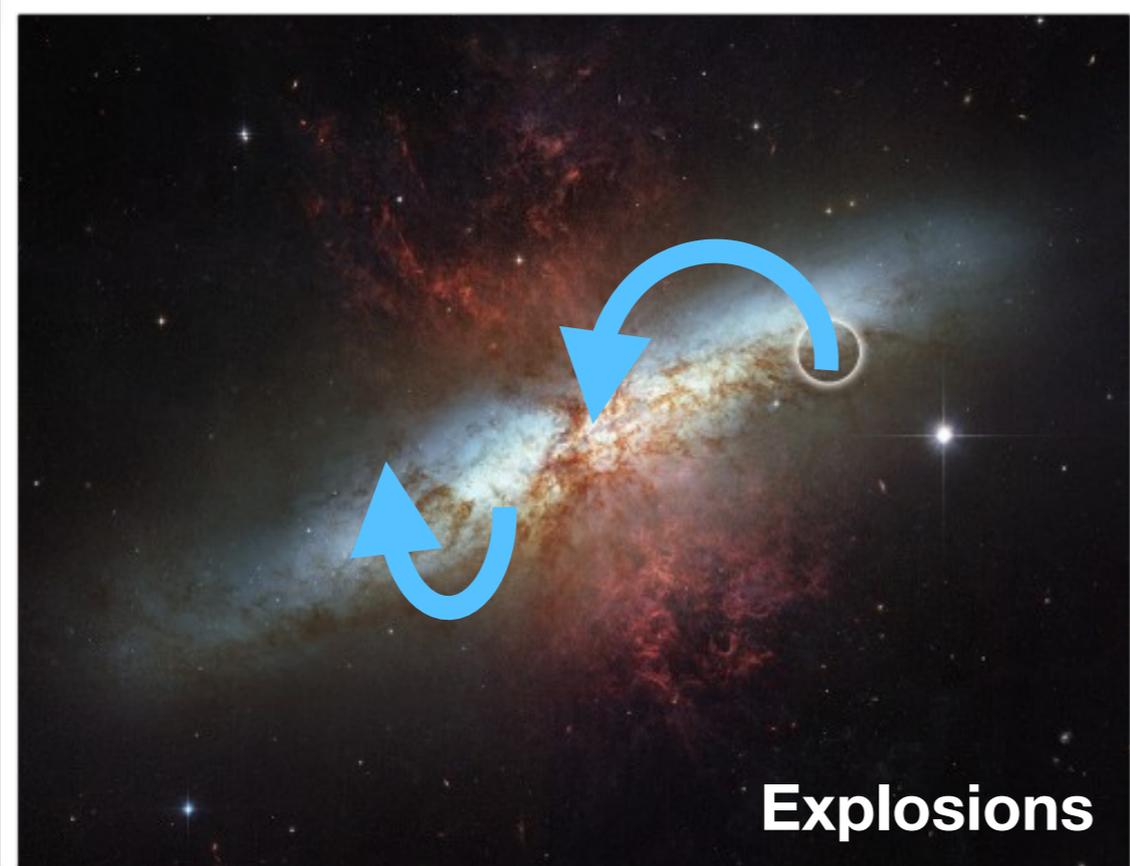
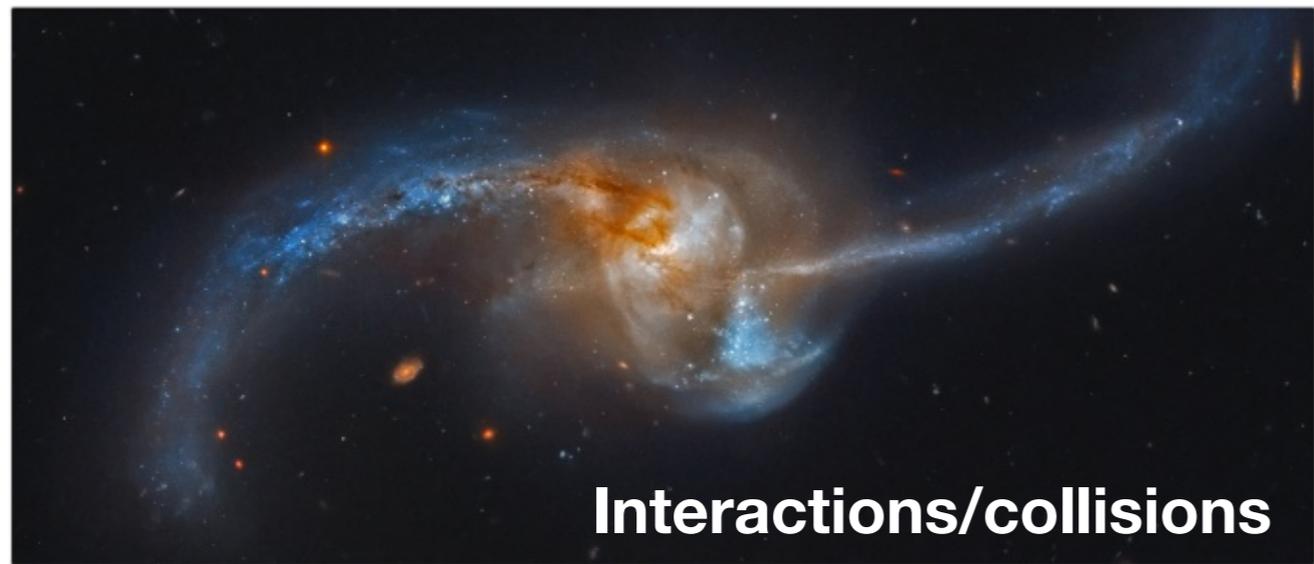


+ abondance des éléments chimiques



13.8 milliards d'années

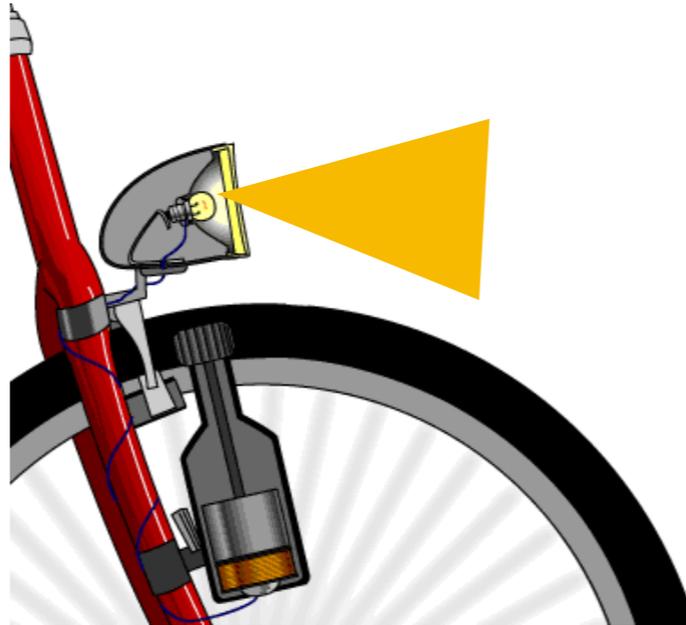
Processus de haute énergie



Sources d'énergie



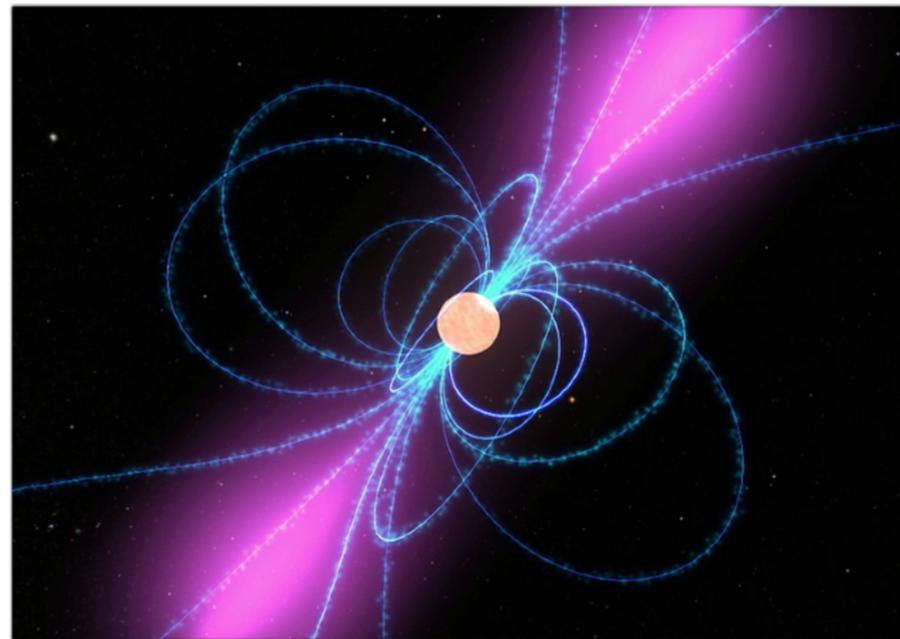
Gravitation



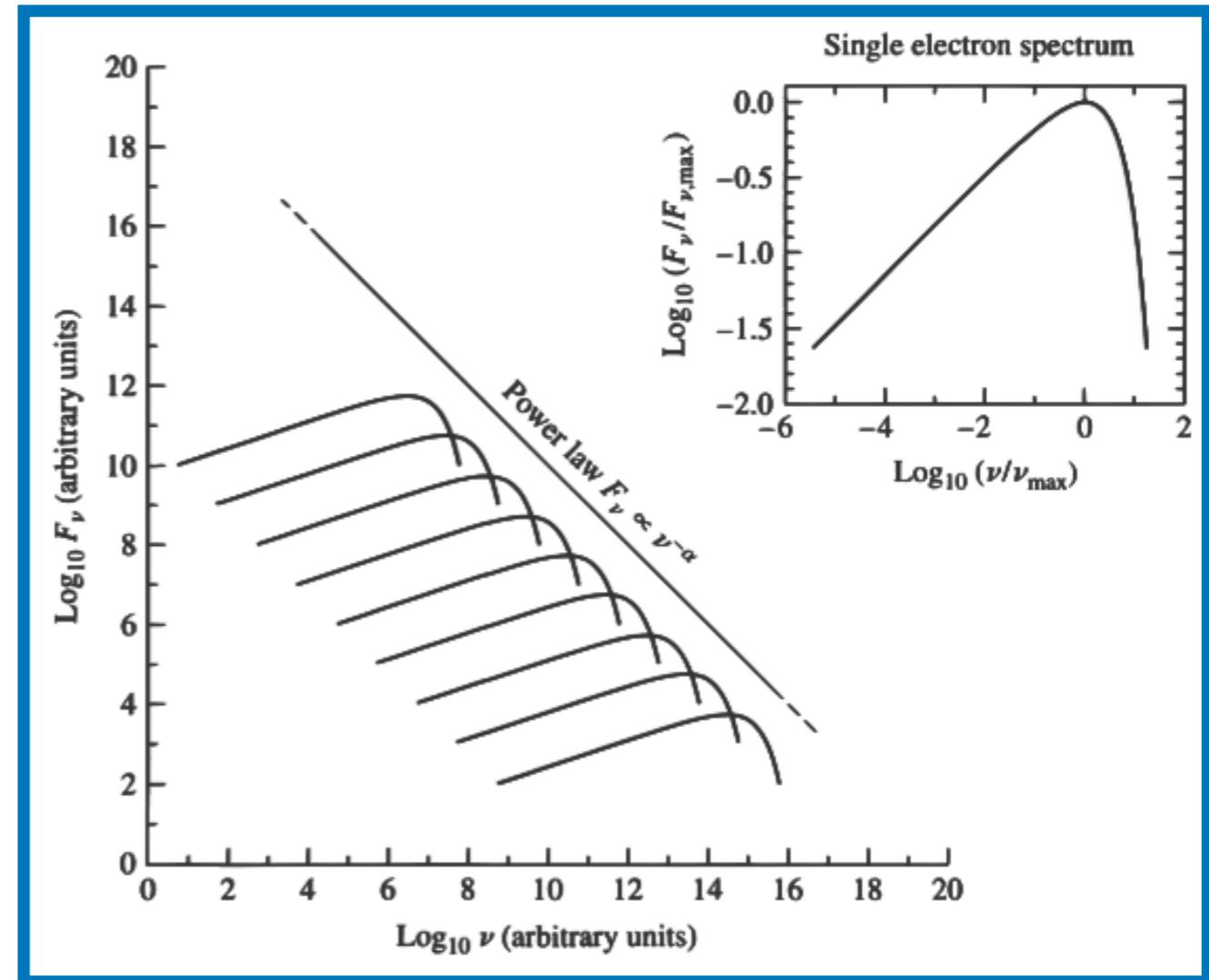
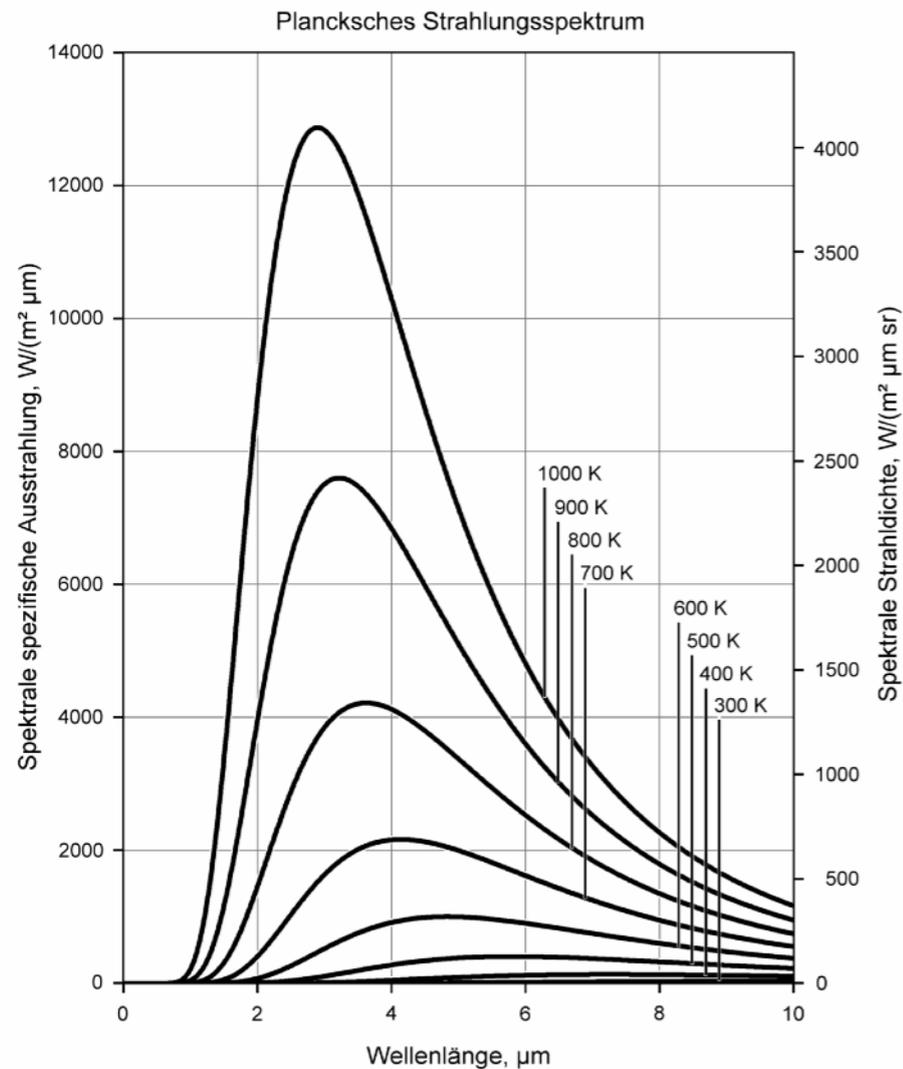
**Effet dynamo
d'un aimant en rotation**



**« Surf » sur une
onde de choc**



Rayonnement thermique / non thermique



Equilibre thermodynamique: état que tout système isolé atteint après un temps suffisamment long (ou système dont les paramètres macro. évoluent très lentement)

Nucléosynthèse primordiale



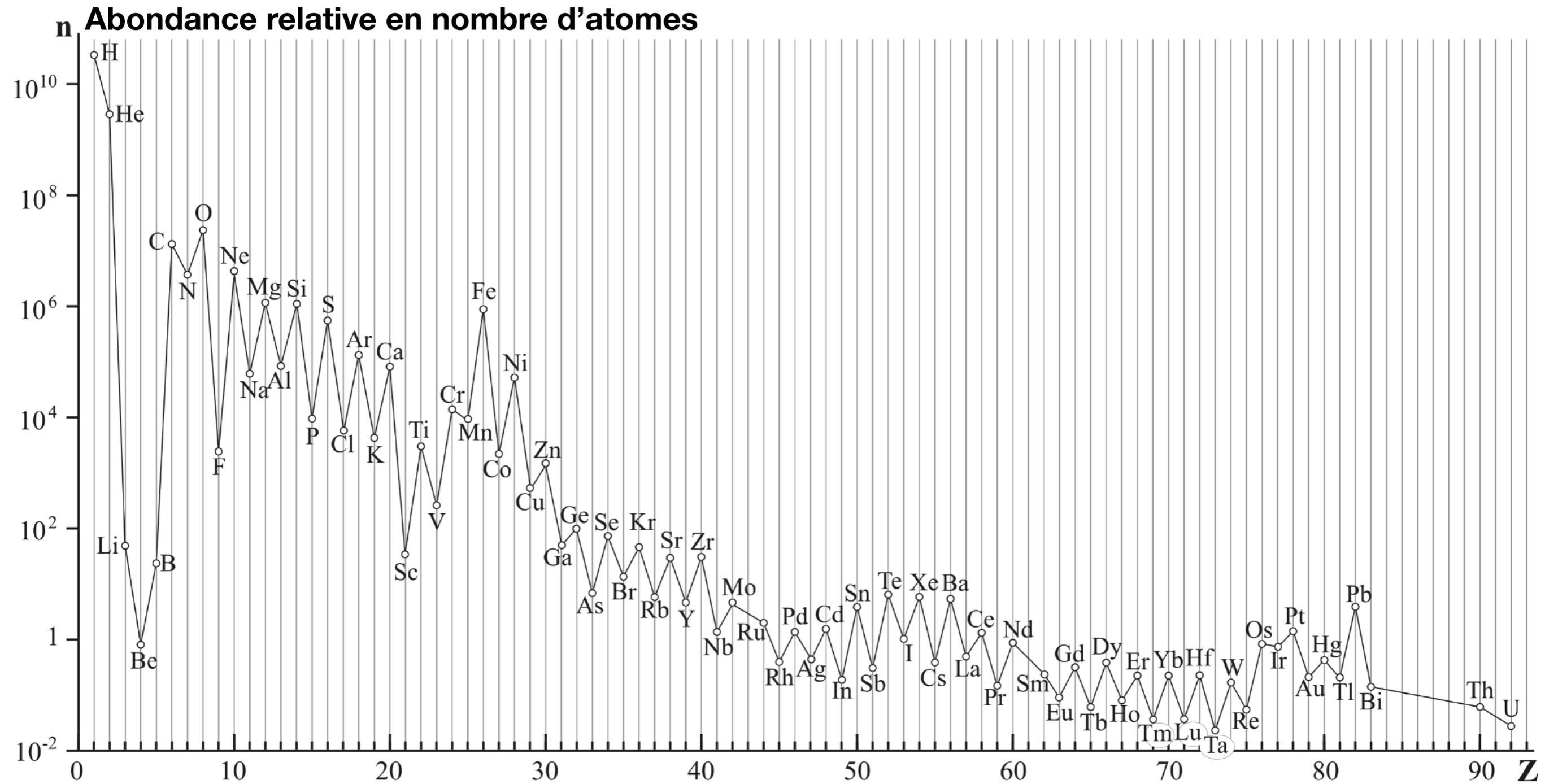
Tableau périodique des éléments chimiques

Groupe	I A	II A											III B	IV B	V B	VI B	VII B	0
Période	1	2											13	14	15	16	17	18
1	Hydrogène 1 H 1,007975																	Hélium 2 He 4,002602
2	Lithium 3 Li 6,9395	Béryllium 4 Be 9,0121831											Bore 5 B 10,8135	Carbone 6 C 12,0106	Azote 7 N 14,006855	Oxygène 8 O 15,99940	Fluor 9 F 18,99840316	Néon 10 Ne 20,1797 (6)
3	Sodium 11 Na 22,98976928	Magnésium 12 Mg 24,3055	III A	IV A	V A	VI A	VII A	VIII			IB	II B	Aluminium 13 Al 26,9815385	Silicium 14 Si 28,085 (1)	Phosphore 15 P 30,97376200	Soufre 16 S 32,0675	Chlore 17 Cl 35,4515	Argon 18 Ar 39,948 (1)
4	Potassium 19 K 39,0983 (1)	Calcium 20 Ca 40,078 (4)	Scandium 21 Sc 44,955908 (5)	Titane 22 Ti 47,867 (1)	Vanadium 23 V 50,9415 (1)	Chrome 24 Cr 51,9961 (6)	Manganèse 25 Mn 54,938044	Fer 26 Fe 55,845 (2)	Cobalt 27 Co 58,933194	Nickel 28 Ni 58,6934 (4)	Cuivre 29 Cu 63,546 (3)	Zinc 30 Zn 65,38 (2)	Gallium 31 Ga 69,723 (1)	Germanium 32 Ge 72,630 (8)	Arsenic 33 As 74,921595	Sélénium 34 Se 78,971 (8)	Brome 35 Br 79,904	Krypton 36 Kr 83,798 (2)
5	Rubidium 37 Rb 85,4678 (3)	Strontium 38 Sr 87,62 (1)	Yttrium 39 Y 88,90584	Zirconium 40 Zr 91,224 (2)	Niobium 41 Nb 92,90637	Molybdène 42 Mo 95,95 (1)	Technétium 43 Tc [98]	Ruthénium 44 Ru 101,07 (2)	Rhodium 45 Rh 102,90550	Palladium 46 Pd 106,42 (1)	Argent 47 Ag 107,8682 (2)	Cadmium 48 Cd 112,414 (4)	Indium 49 In 114,818 (1)	Étain 50 Sn 118,710 (7)	Antimoine 51 Sb 121,760 (1)	Tellure 52 Te 127,60 (3)	Iode 53 I 126,90447	Xénon 54 Xe 131,293 (6)
6	Césium 55 Cs 132,905452	Baryum 56 Ba 137,327 (7)	Lanthanides 57-71	Hafnium 72 Hf 178,49 (2)	Tantale 73 Ta 180,94788	Tungstène 74 W 183,84 (1)	Rhénium 75 Re 186,207 (1)	Osmium 76 Os 190,23 (3)	Iridium 77 Ir 192,217 (3)	Platine 78 Pt 195,084 (9)	Or 79 Au 196,966569	Mercur 80 Hg 200,592 (3)	Thallium 81 Tl 204,3835	Plomb 82 Pb 207,2 (1)	Bismuth 83 Bi 208,98040	Polonium 84 Po [209]	Astate 85 At [210]	Radon 86 Rn [222]
7	Francium 87 Fr [223]	Radium 88 Ra [226]	Actinides 89-103	Rutherfordium 104 Rf [267]	Dubnium 105 Db [268]	Seaborgium 106 Sg [269]	Bohrium 107 Bh [270]	Hassium 108 Hs [277]	Meitnérium 109 Mt [278]	Darmstadtium 110 Ds [281]	Roentgenium 111 Rg [282]	Copernicium 112 Cn [285]	Nihonium 113 Nh [286]	Flérovium 114 Fl [289]	Moscovium 115 Mc [289]	Livermorium 116 Lv [293]	Tennessee 117 Ts [294]	Oganesson 118 Og [294]
			Lanthane 57 La 138,90547	Cérium 58 Ce 140,116 (1)	Praséodyme 59 Pr 140,90766	Néodyme 60 Nd 144,242 (3)	Prométhium 61 Pm [145]	Samarium 62 Sm 150,36 (2)	Europium 63 Eu 151,964 (1)	Gadolinium 64 Gd 157,25 (3)	Terbium 65 Tb 158,92535	Dysprosium 66 Dy 162,500 (1)	Holmium 67 Ho 164,93033	Erbium 68 Er 167,259 (3)	Thulium 69 Tm 168,93422	Ytterbium 70 Yb 173,045	Lutécium 71 Lu 174,9668	
			Actinium 89 Ac [227]	Thorium 90 Th 232,0377	Protactinium 91 Pa 231,03588	Uranium 92 U 238,02891	Neptunium 93 Np [237]	Plutonium 94 Pu [244]	Américium 95 Am [243]	Curium 96 Cm [247]	Berkélium 97 Bk [247]	Californium 98 Cf [251]	Einsteinium 99 Es [252]	Fermium 100 Fm [257]	Mendélévium 101 Md [258]	Nobélium 102 No [259]	Lawrencium 103 Lr [266]	

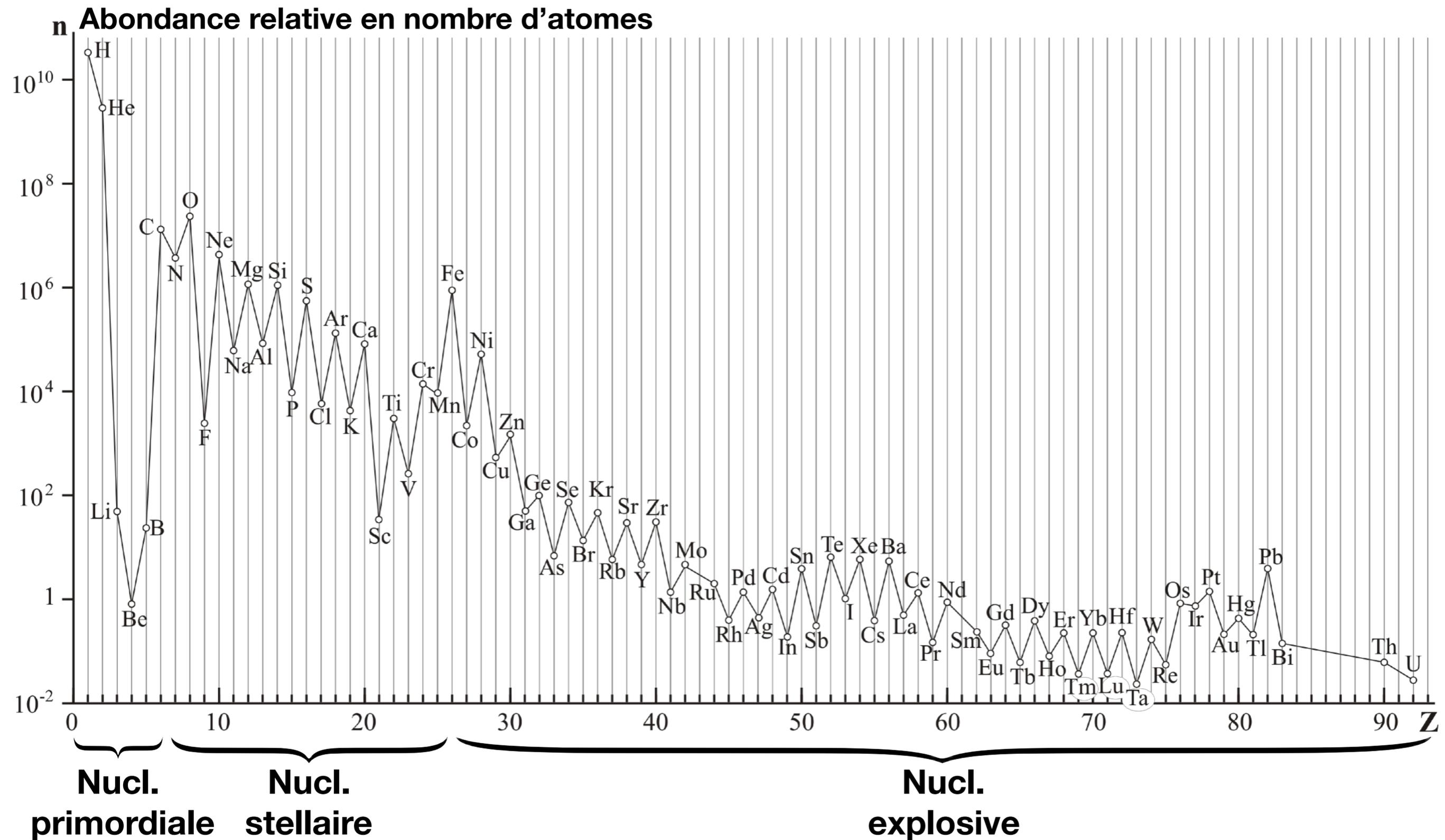
← nom de l'élément (**gaz**, **liquide** ou **solide** à 0°C et 101,3 kPa)
 ← numéro atomique
 ← symbole chimique
 ← masse atomique relative [ou celle de l'isotope le plus stable]
 [CIAAW "Atomic Weights 2013" + rev. 2015]

Métaux							Non métaux							
Alcalins	Alcalino-terreux	Lanthanides	Actinides	Métaux de transition	Métaux pauvres	Métalloïdes	Autres non-métaux	Halogènes	Gaz nobles	Non classés	primordial	désintégration d'autres éléments	synthétique	

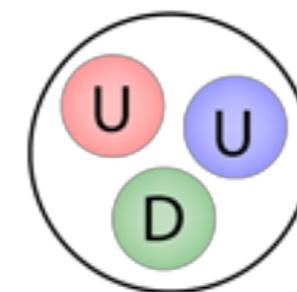
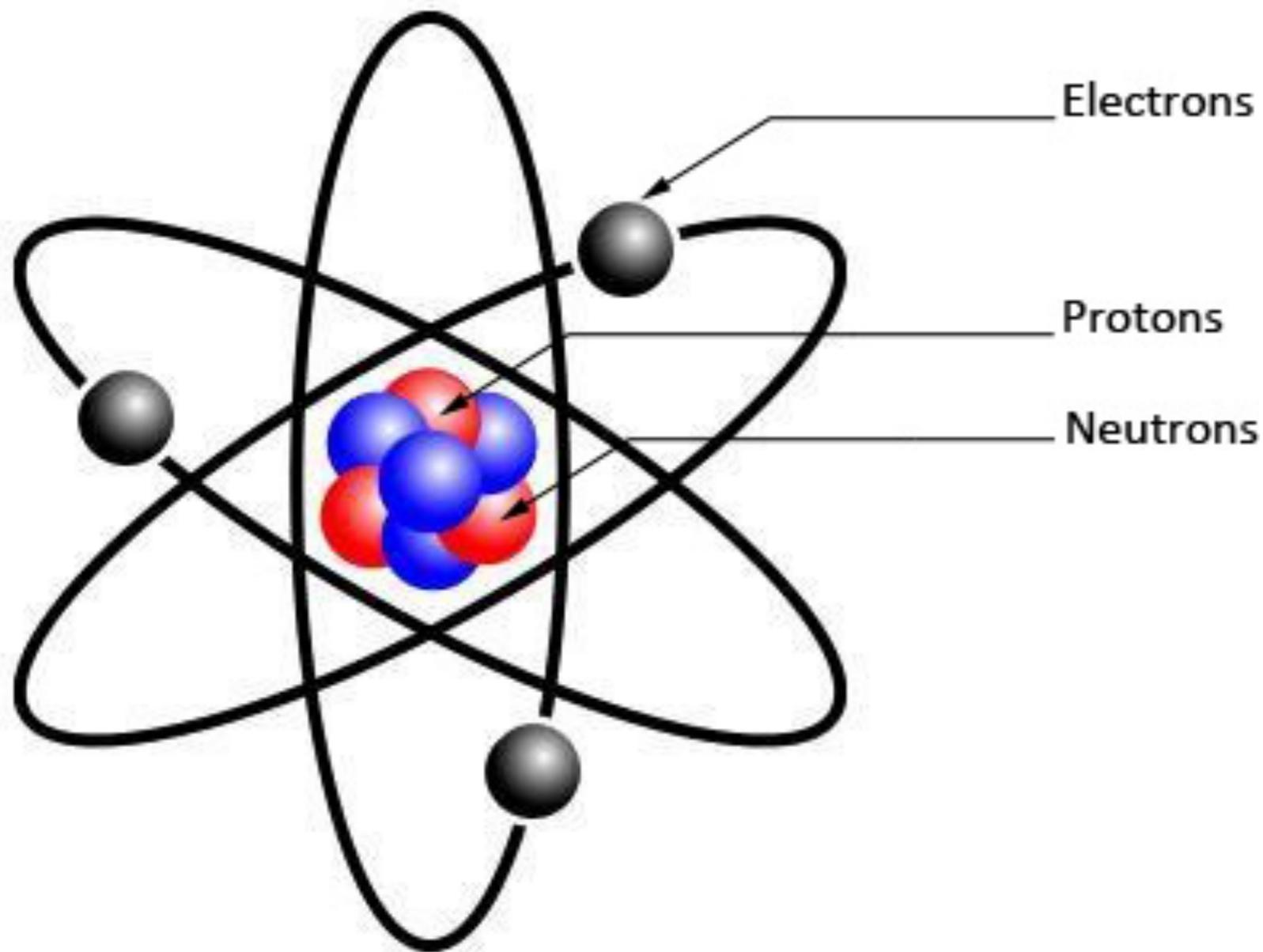
Abondance naturelle (cosmique) des éléments chimiques



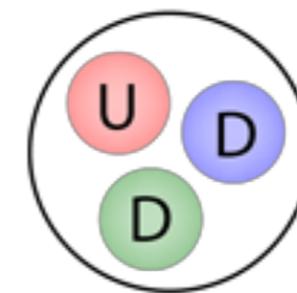
Abondance naturelle (cosmique) des éléments chimiques



Un soupçon de physique des particules et nucléaire



Proton

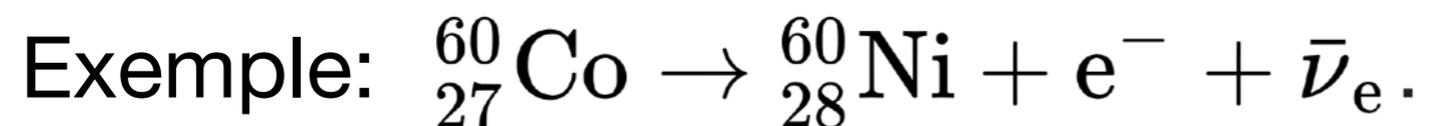


Neutron

 = "up" quark $+\frac{2}{3} e$
 = "down" quark $-\frac{1}{3} e$

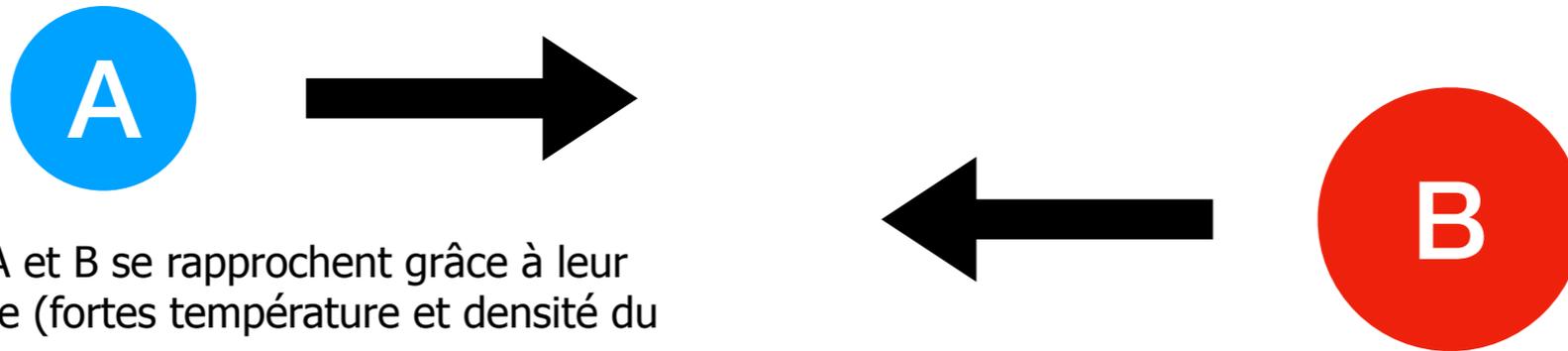
Réactions nucléaires

- Spontanées: radioactivité (perte de particules constitutives): exemple désintégration β (émission d'un électron ou d'un positron).



- Provoquées par collision avec une particule: fission (brisure du noyau en deux ou plusieurs fragments) et fusion (construction d'un noyau plus lourd).

Fusion thermonucléaire

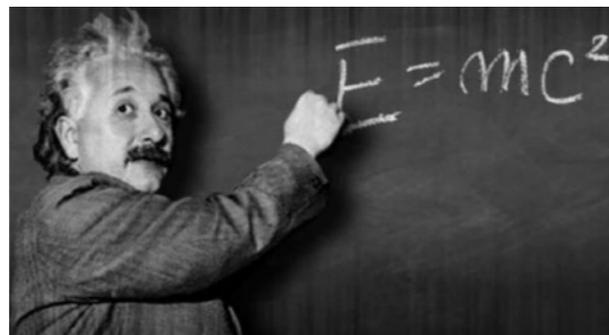
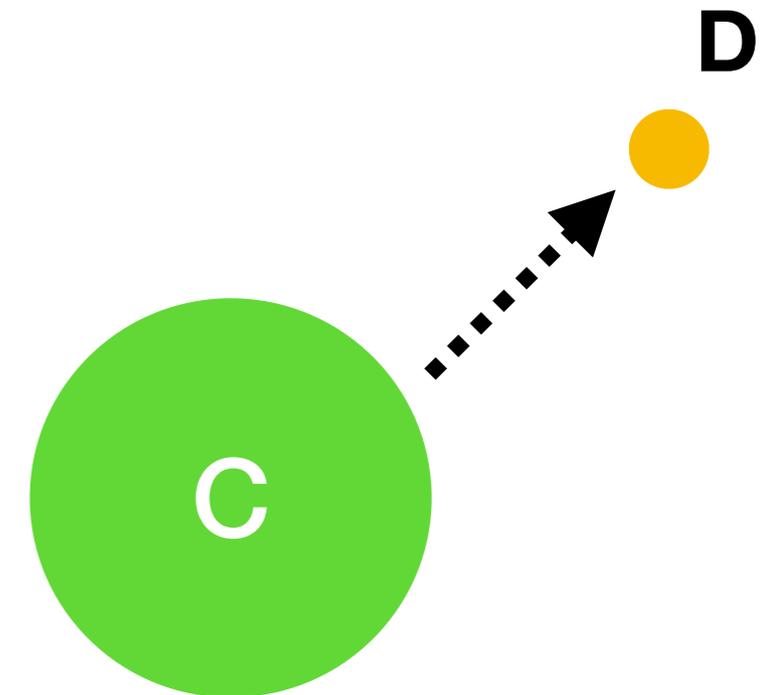


1) deux noyaux légers A et B se rapprochent grâce à leur grande énergie cinétique (fortes température et densité du milieu).



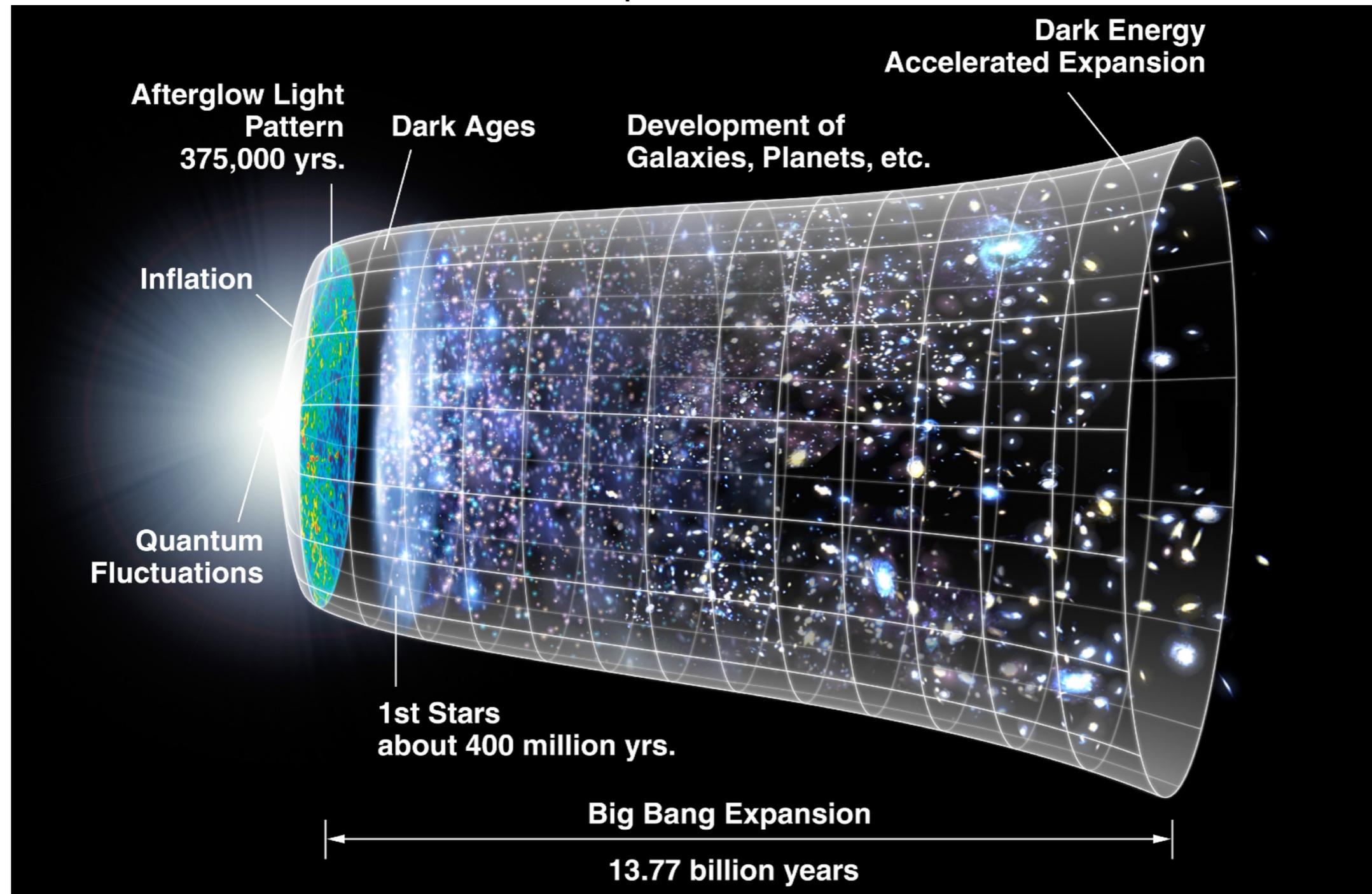
2) les noyaux parviennent à vaincre la répulsion électrostatique et l'interaction nucléaire forte prend le dessus.

3) le noyau C résultant est formé avec libération d'énergie ($m_C < m_A + m_B$) et éjection de particule(s) D.

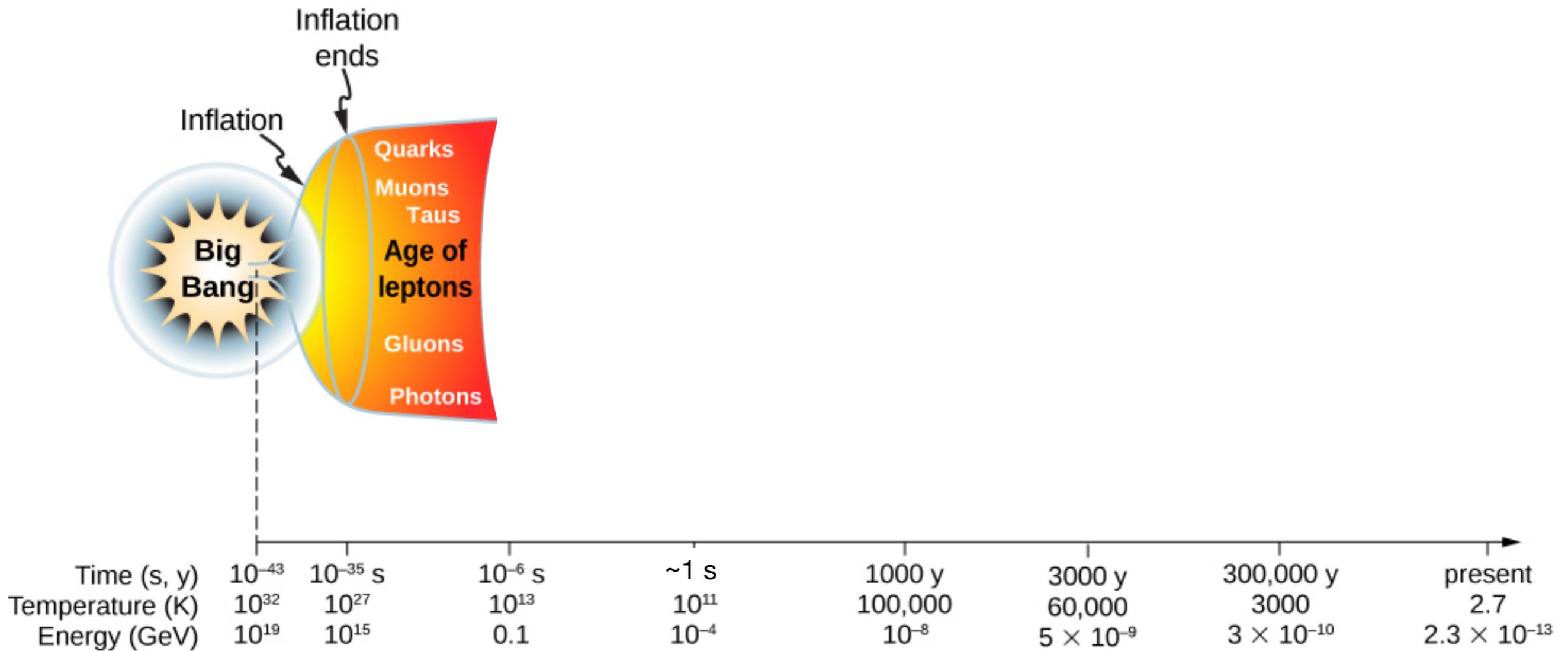


Nucléosynthèse primordiale

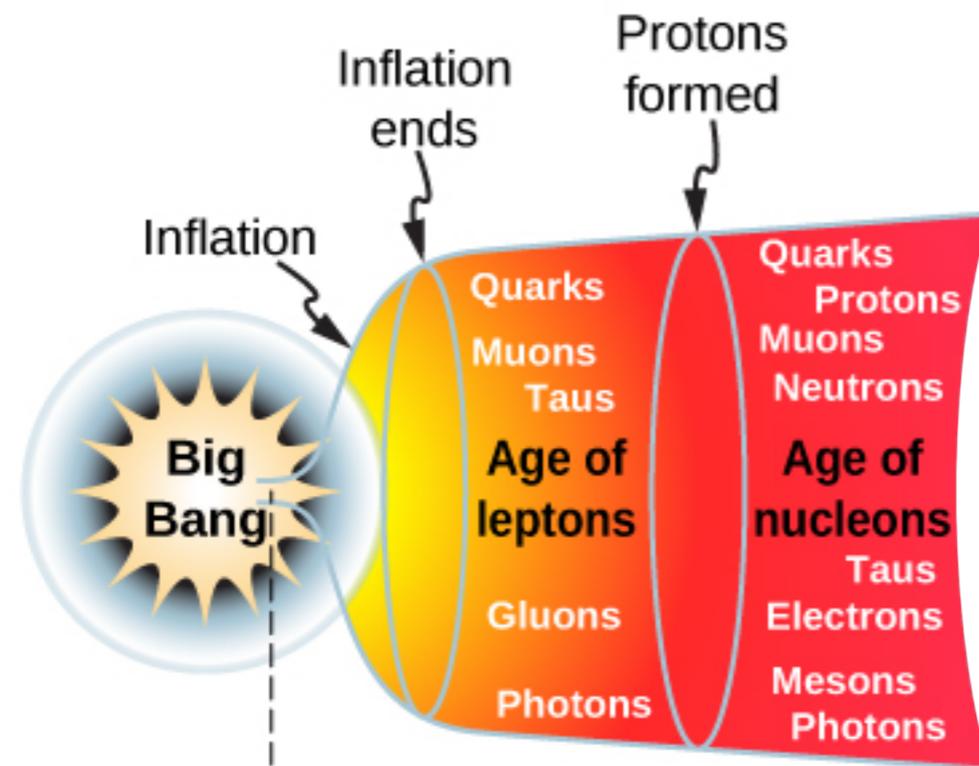
Univers en expansion \rightarrow T diminue



Nucléosynthèse primordiale



Nucléosynthèse primordiale



Formation des nucléons

Équilibre thermique: $n/p = f(T) \sim 1$

Transmutation: $p + e^- \leftrightarrow n + \nu_e$

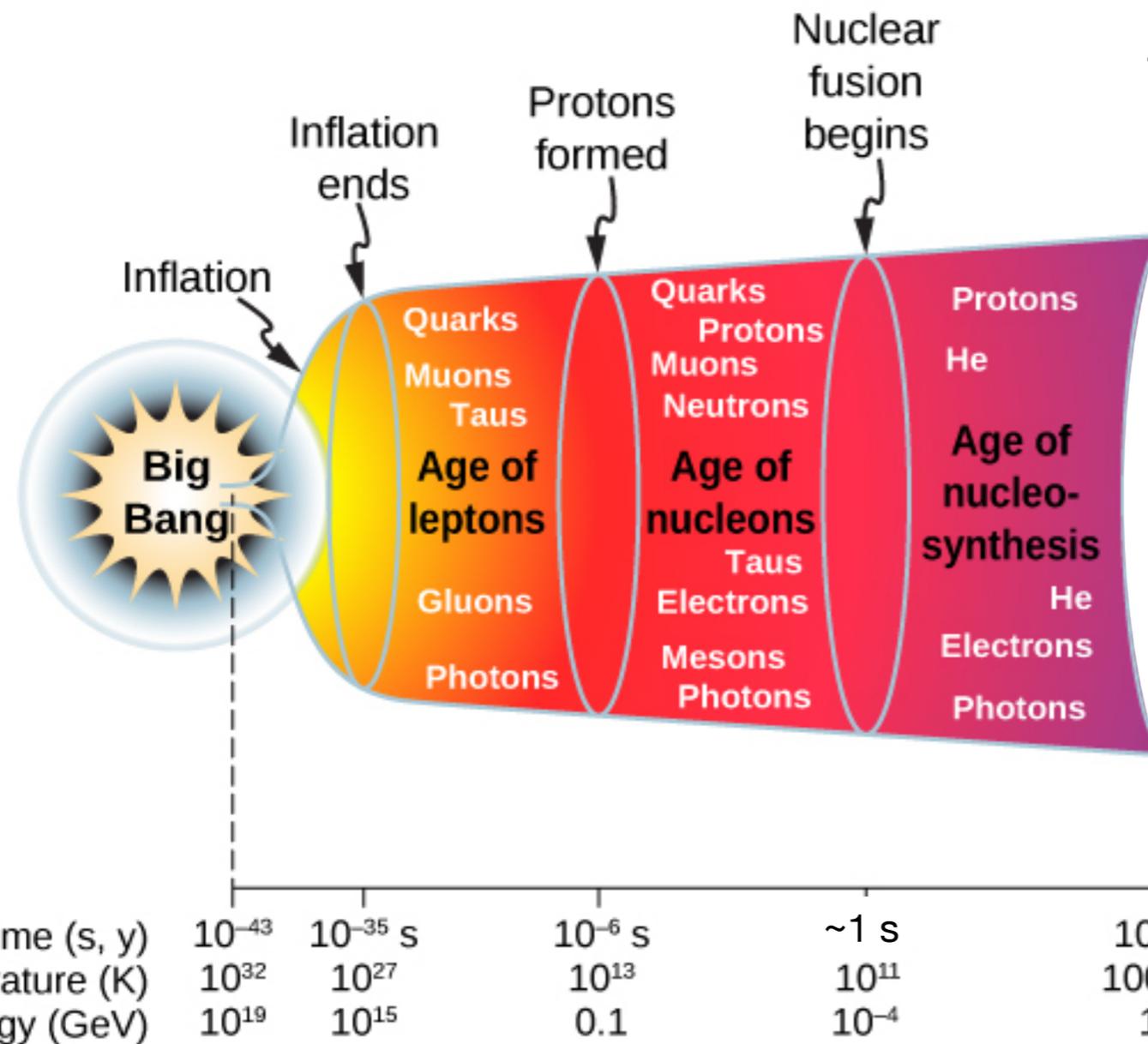
Perdure jusqu'à ~ 1 s après le Big-Bang

Ensuite: T diminue ($\sim 10^{10}$ K) à cause de l'expansion

n/p diminue ($\sim 1/3$)

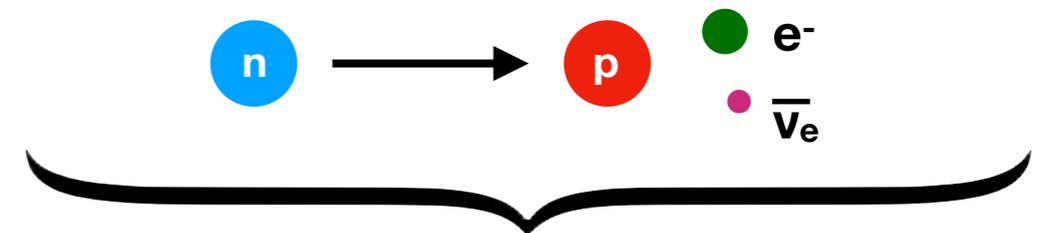
Time (s, y)	10^{-43}	10^{-35} s	10^{-6} s	~ 1 s	1000 y	3000 y	300,000 y	present
Temperature (K)	10^{32}	10^{27}	10^{13}	10^{11}	100,000	60,000	3000	2.7
Energy (GeV)	10^{19}	10^{15}	0.1	10^{-4}	10^{-8}	5×10^{-9}	3×10^{-10}	2.3×10^{-13}

Nucléosynthèse primordiale



T diminue: nucléons se lient pour former des noyaux:

- n/p continue de diminuer avec T
- formation ^2H (mais instable car faible énergie de liaison)
- désintégration β des neutrons (instables)

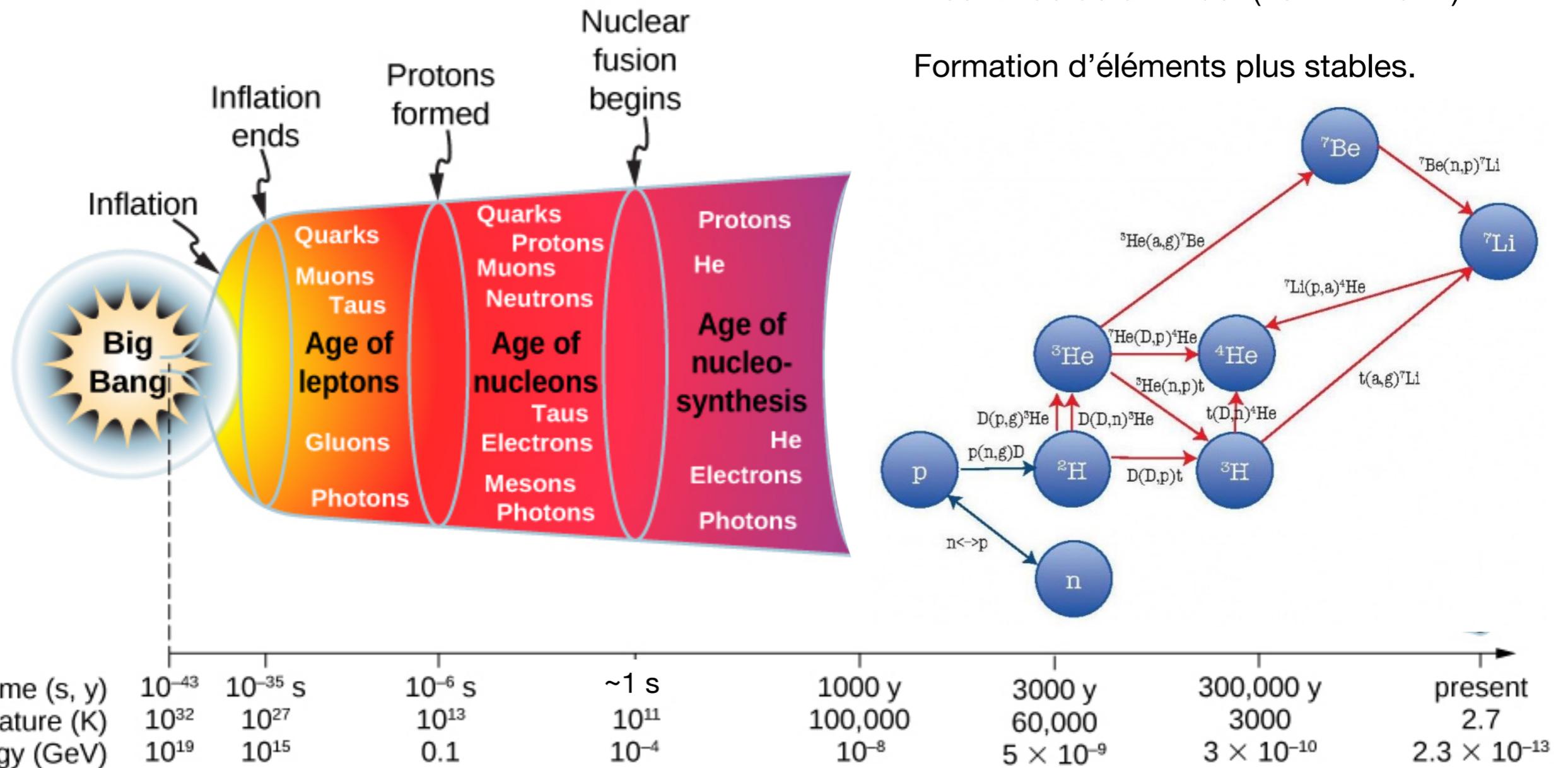


Densités de protons, neutrons et deutérium :
déterminent l'abondance des éléments formés
ensuite...

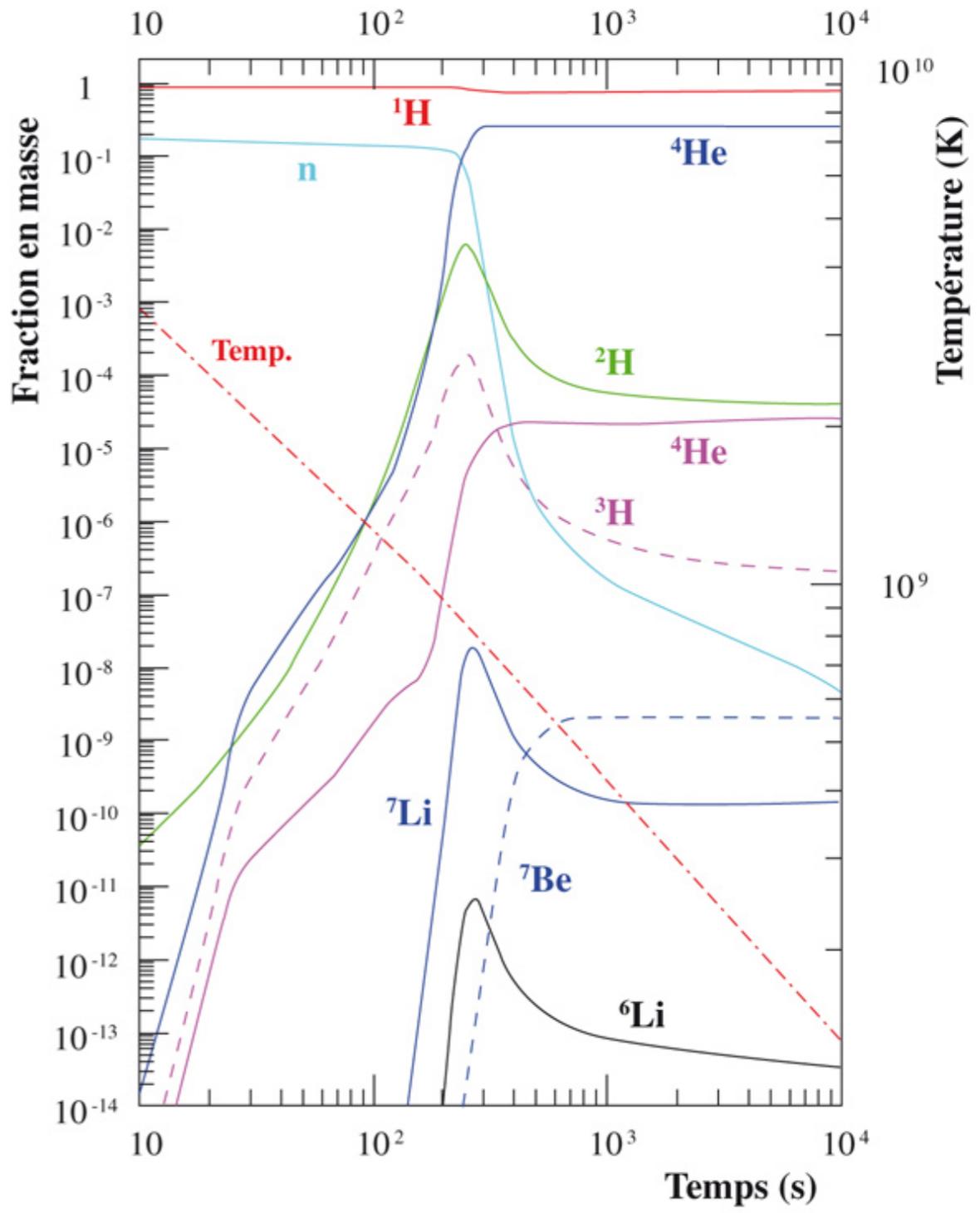
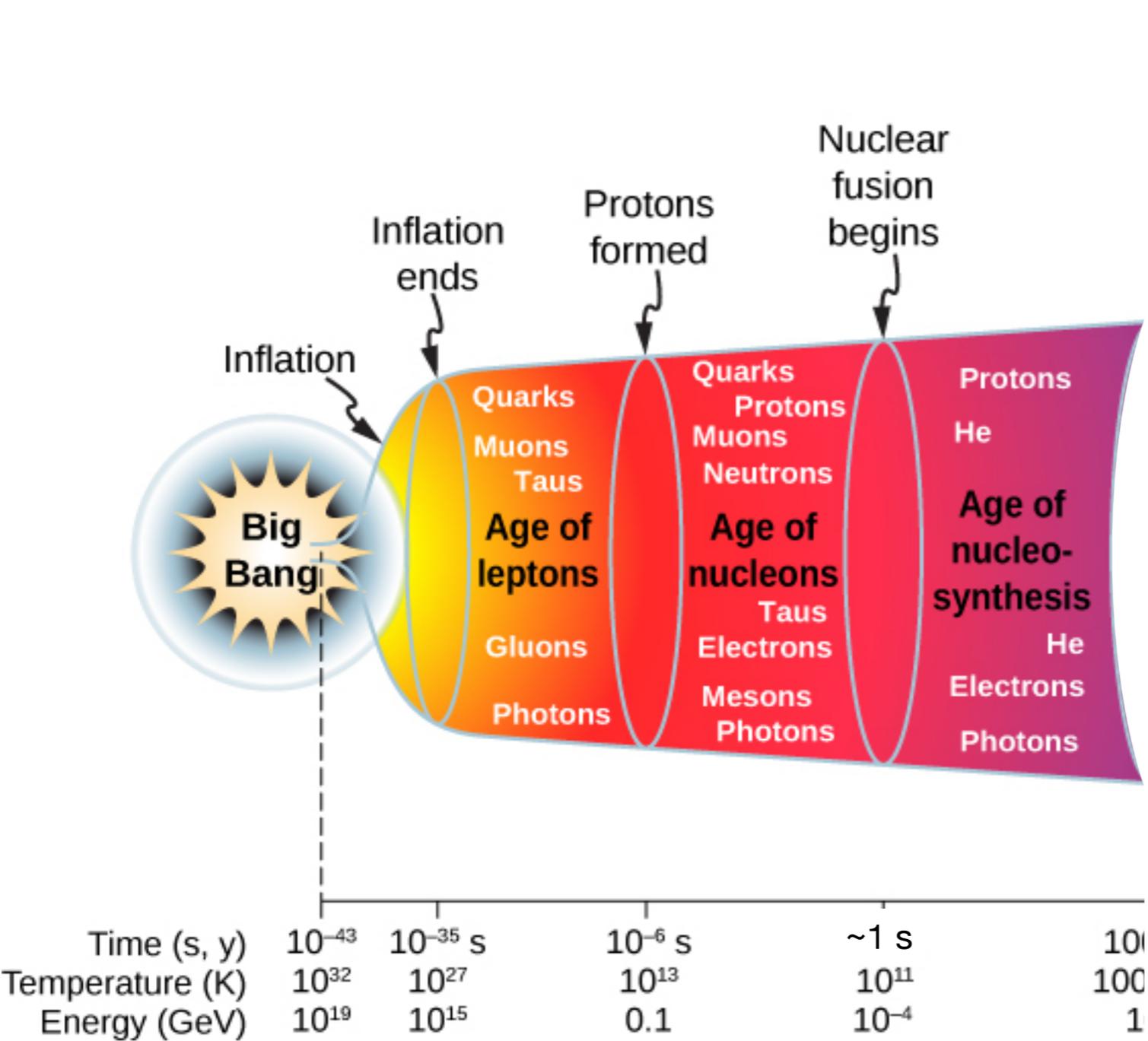
Nucléosynthèse primordiale

T continue de diminuer ($10^{11} > T > 10^5$ K):

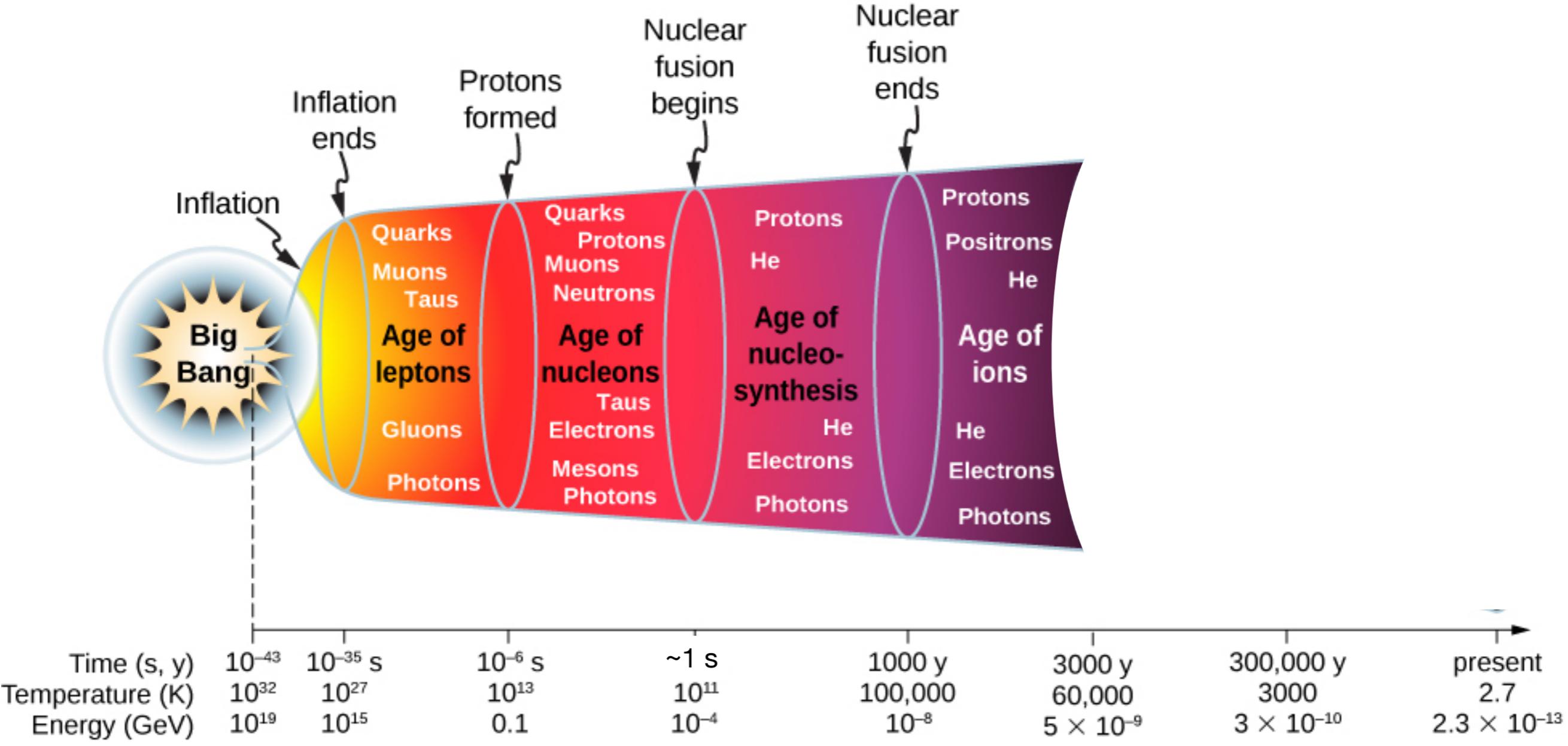
Formation d'éléments plus stables.



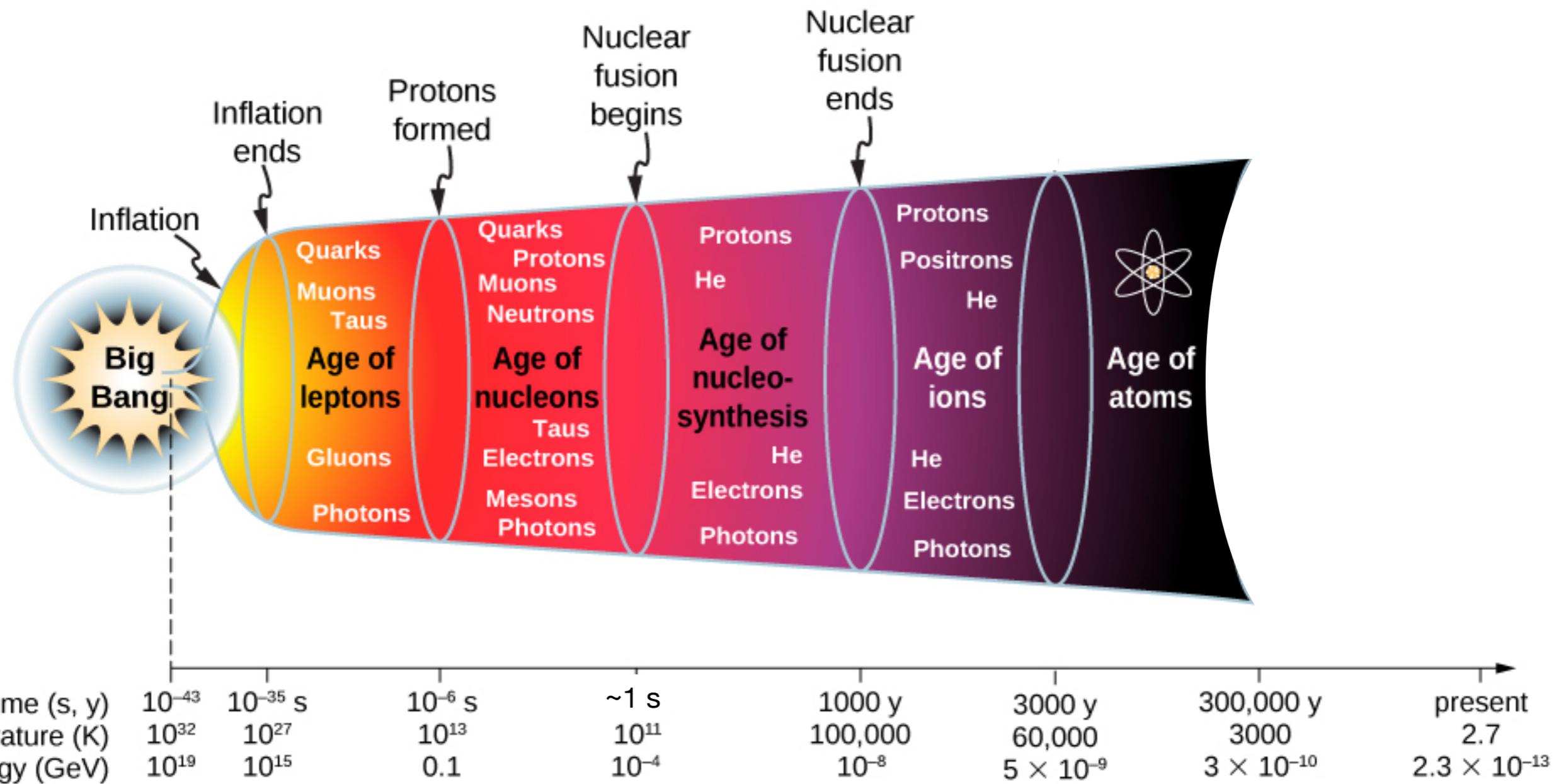
Nucléosynthèse primordiale



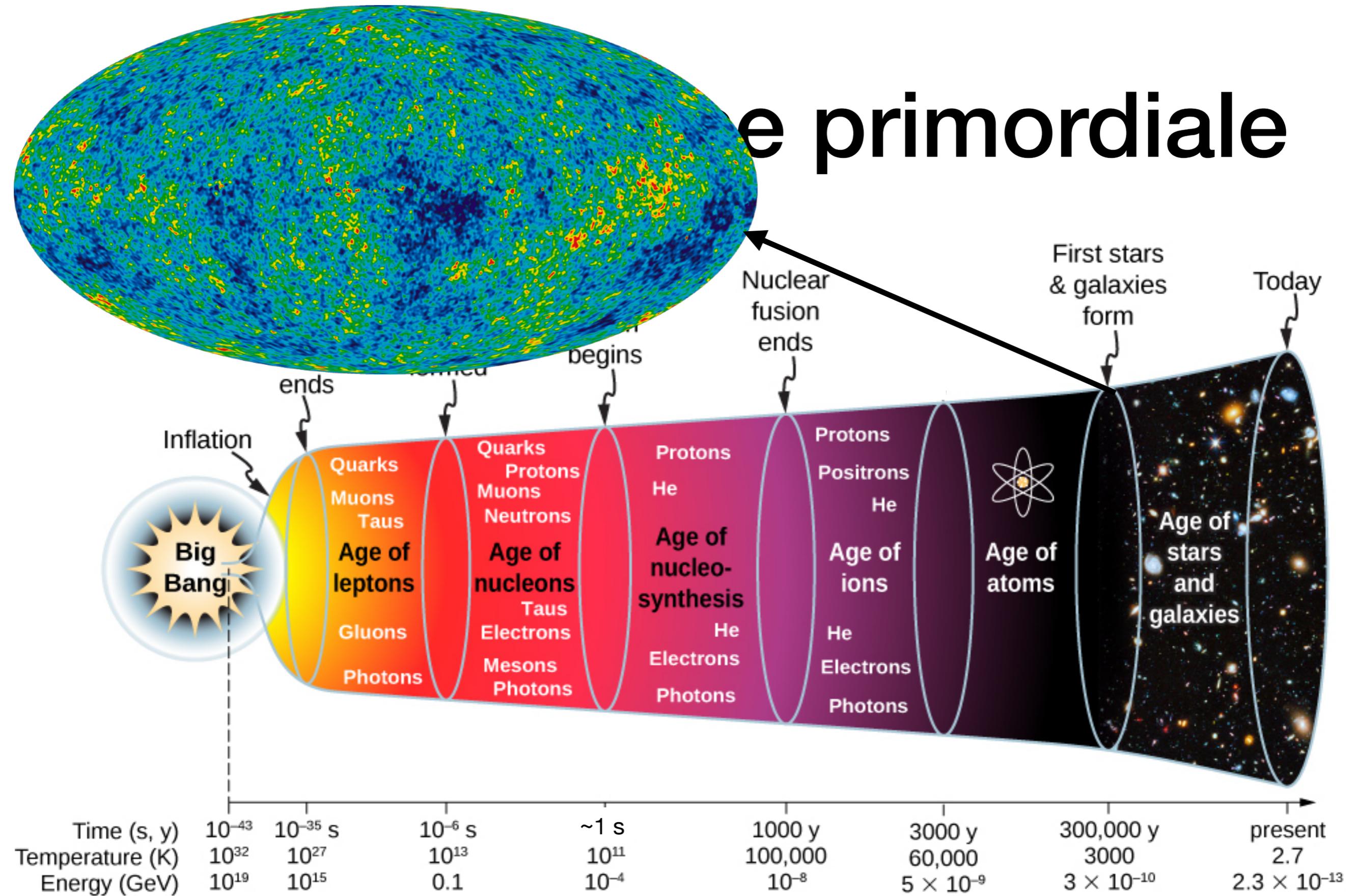
Nucléosynthèse primordiale



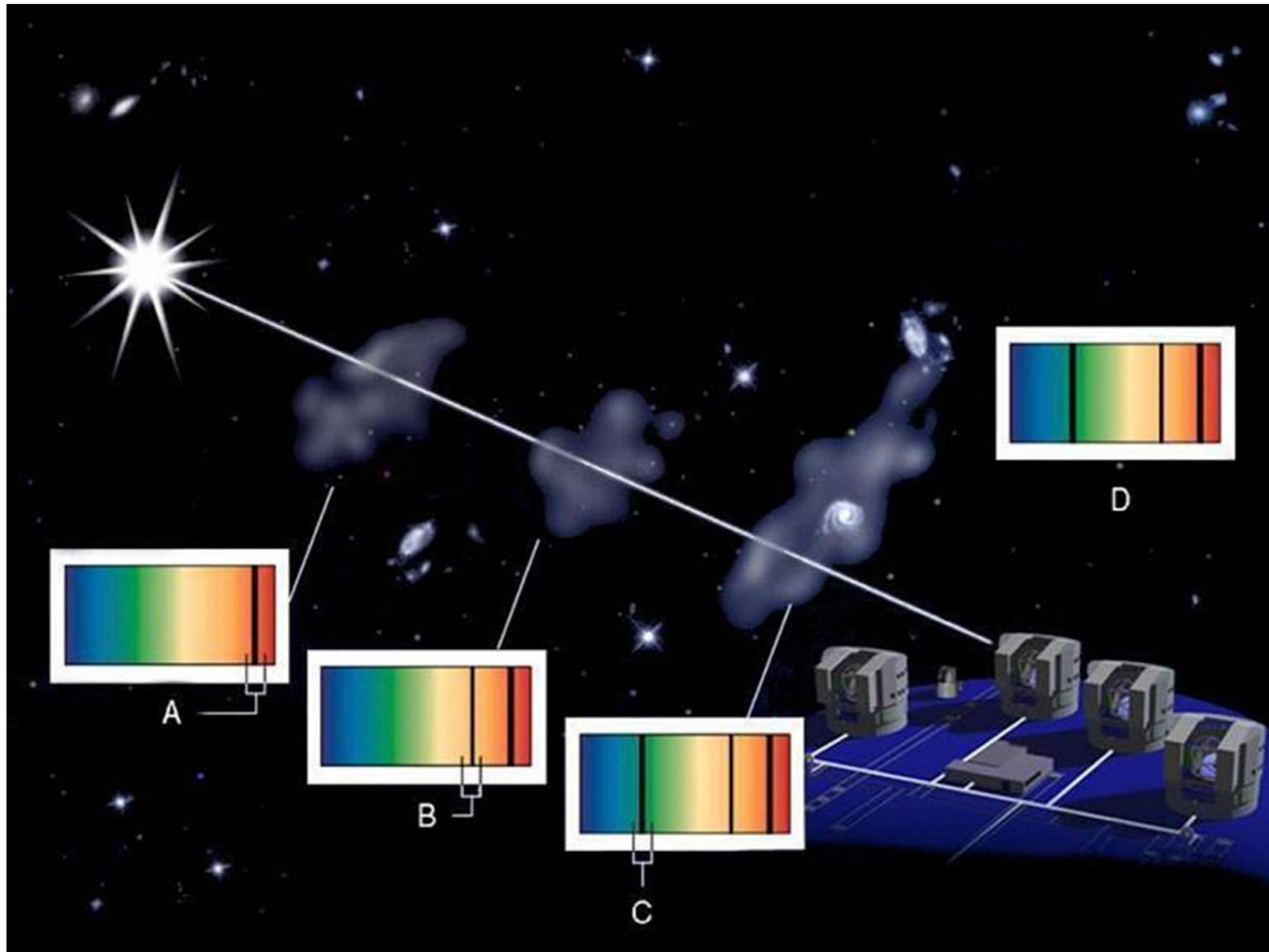
Nucléosynthèse primordiale



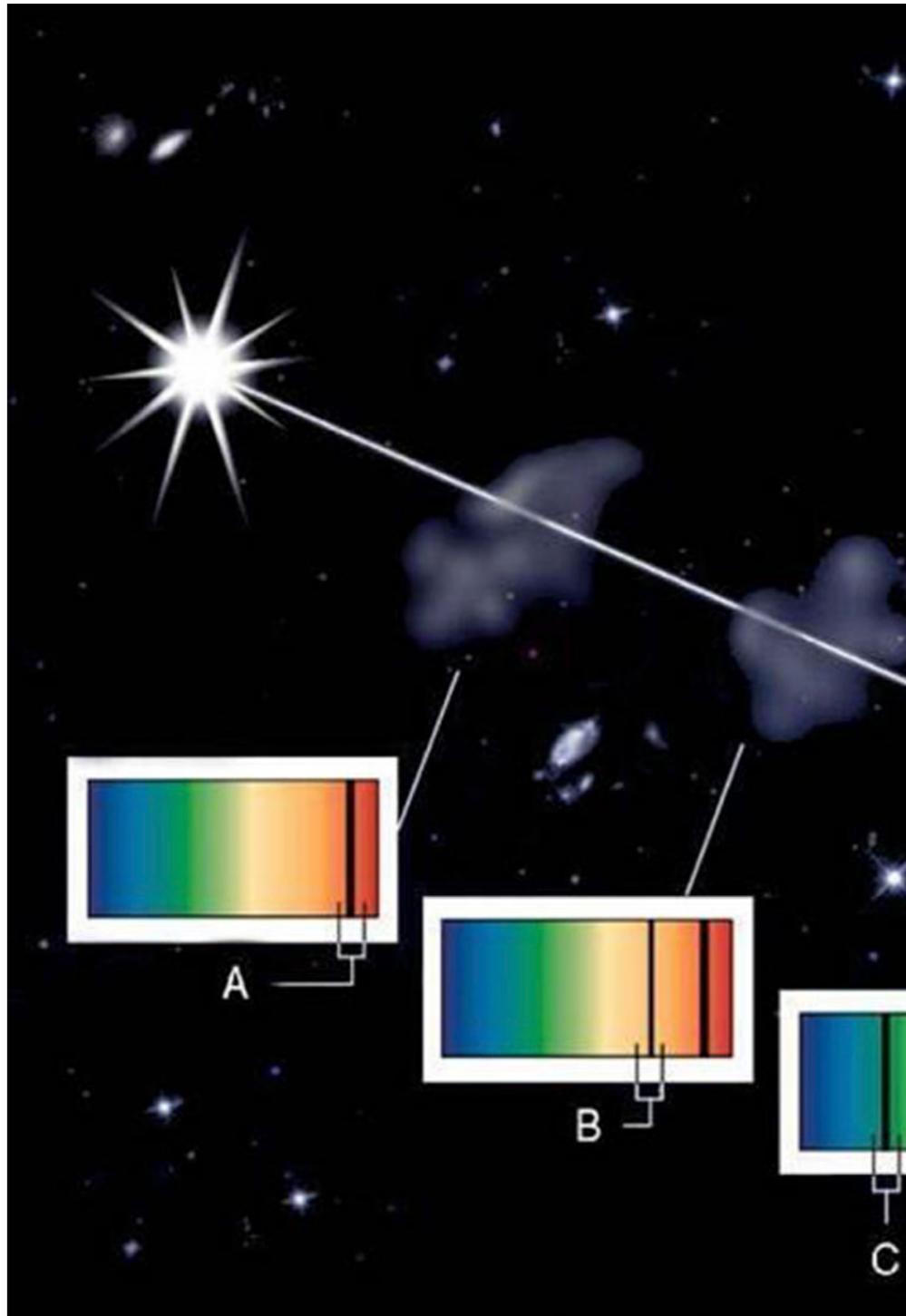
la primordiale



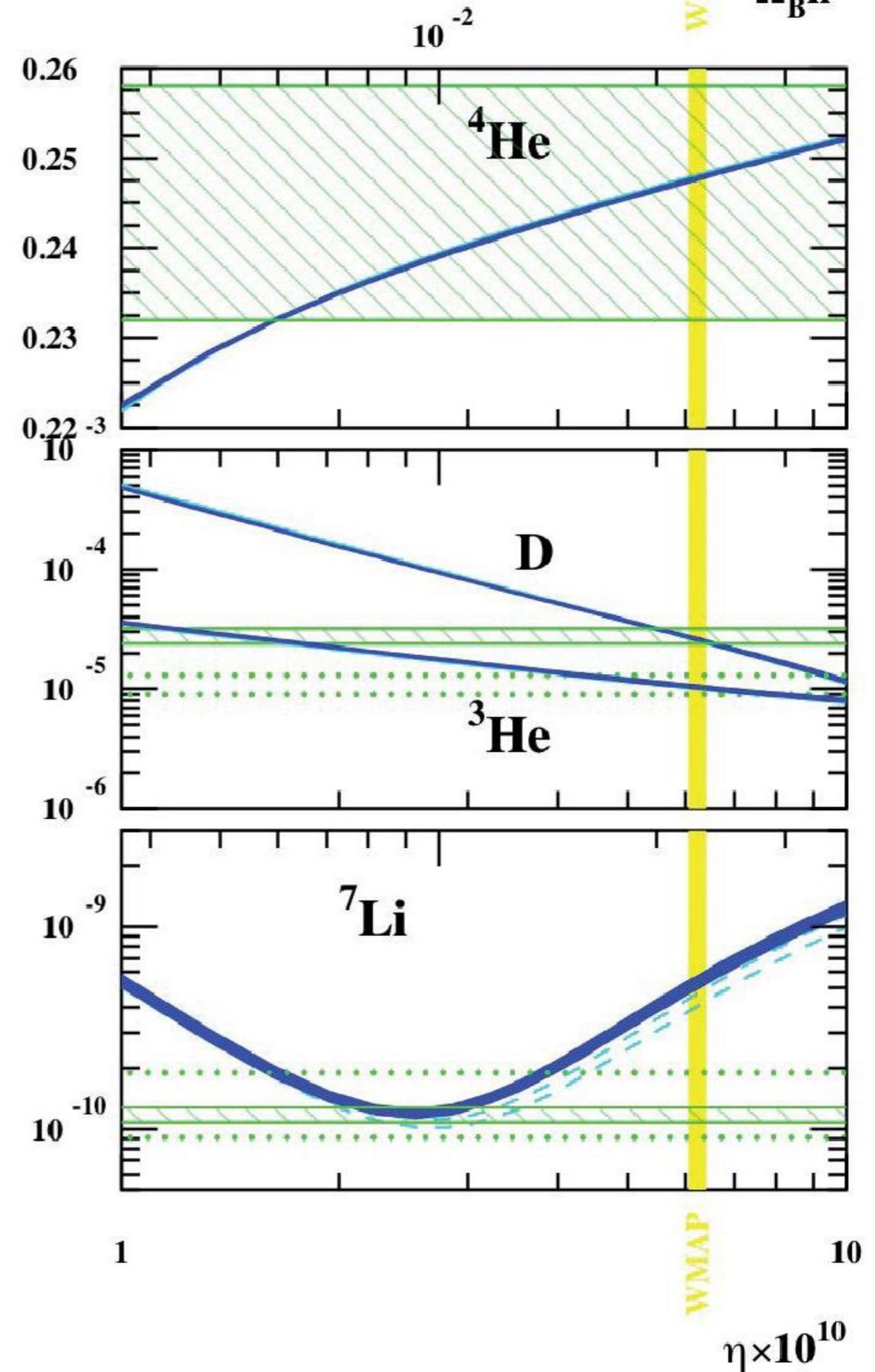
Nucléosynthèse primordiale



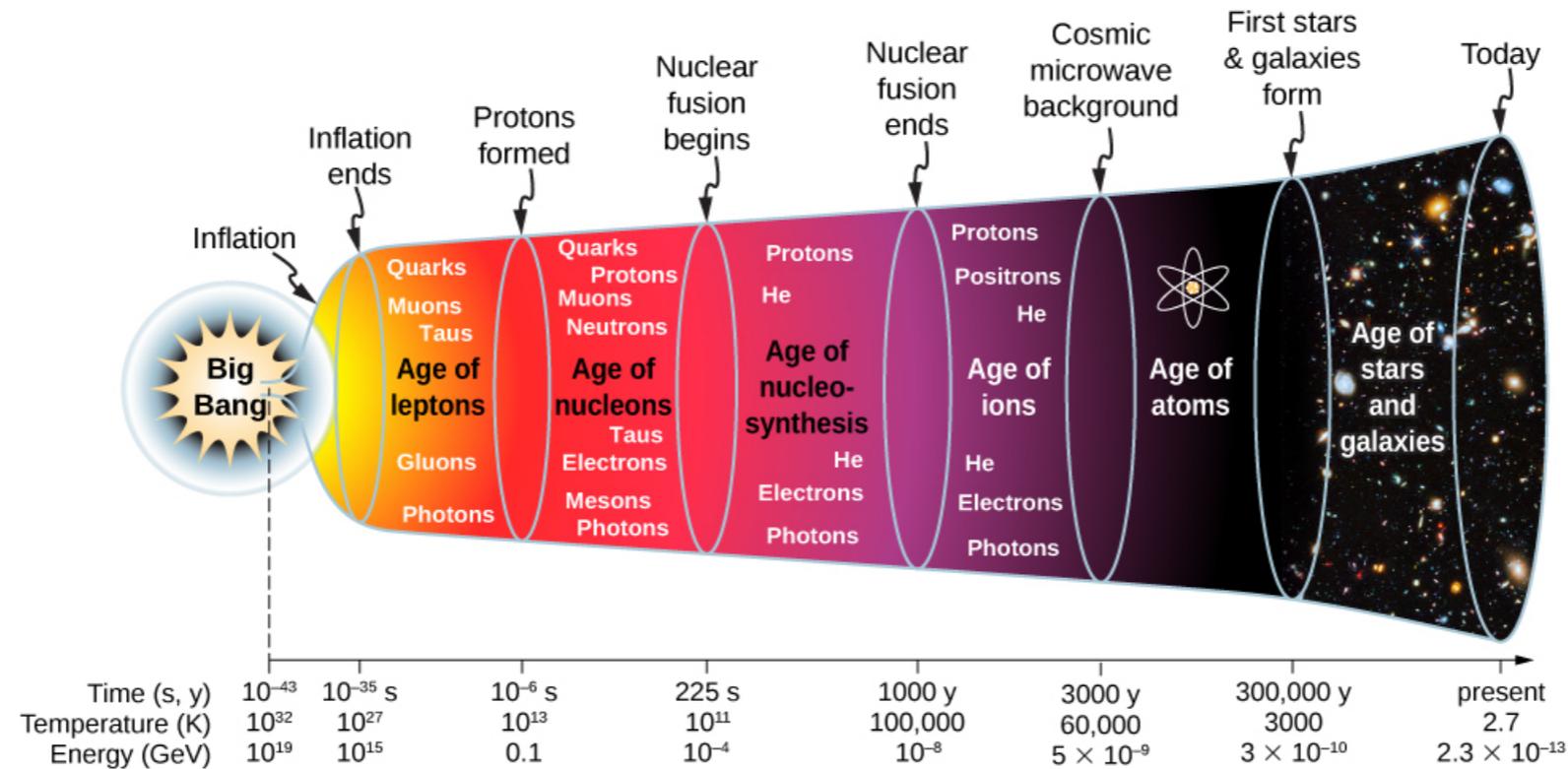
Nucléosynthèse



Fraction en masse
 $^3\text{He}/\text{H}, \text{D}/\text{H}$
 $^7\text{Li}/\text{H}$

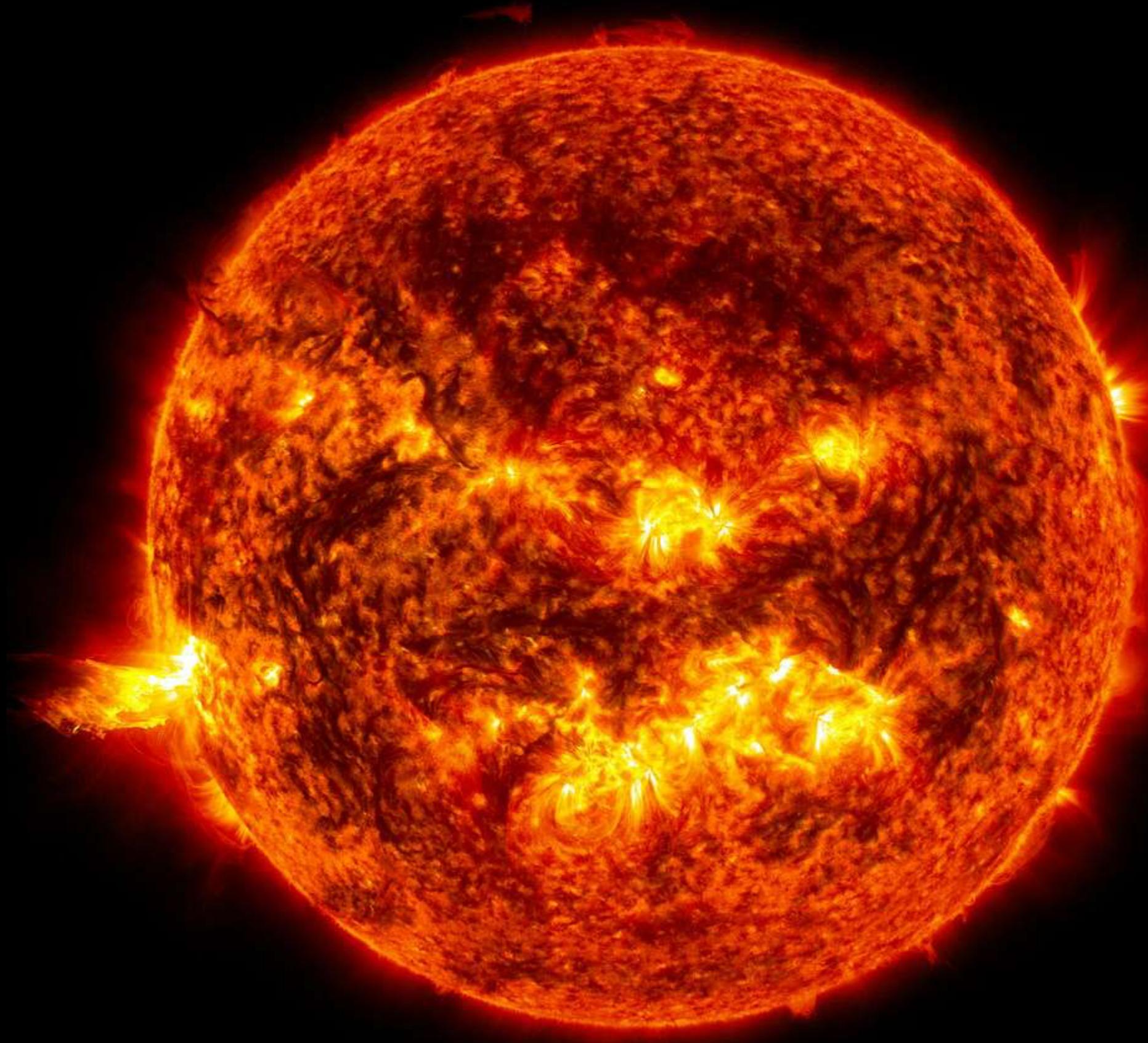


Evolution stellaire



- Pendant des centaines de millions d'années, l'univers est un gaz d'H et He...
- Lentement, l'attraction gravitationnelle amplifie les infimes inhomogénéités de densité de l'Univers primordial. Peu à peu le gaz se condense pour former des galaxies !
- Surdensités à petite échelle (nuages moléculaires): formation de coeurs denses et chauds, pression et température augmentent et...

Formation des étoiles !

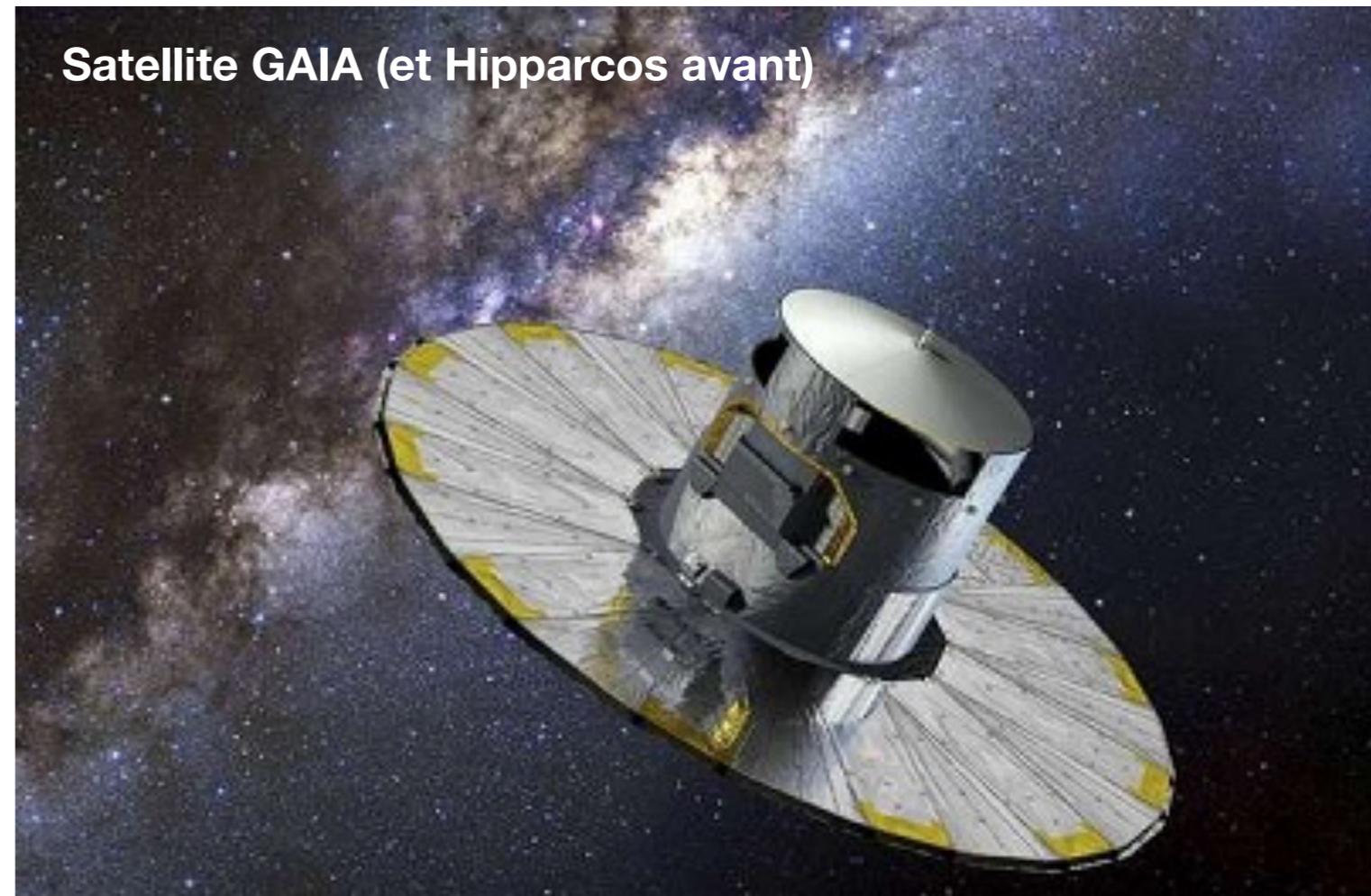
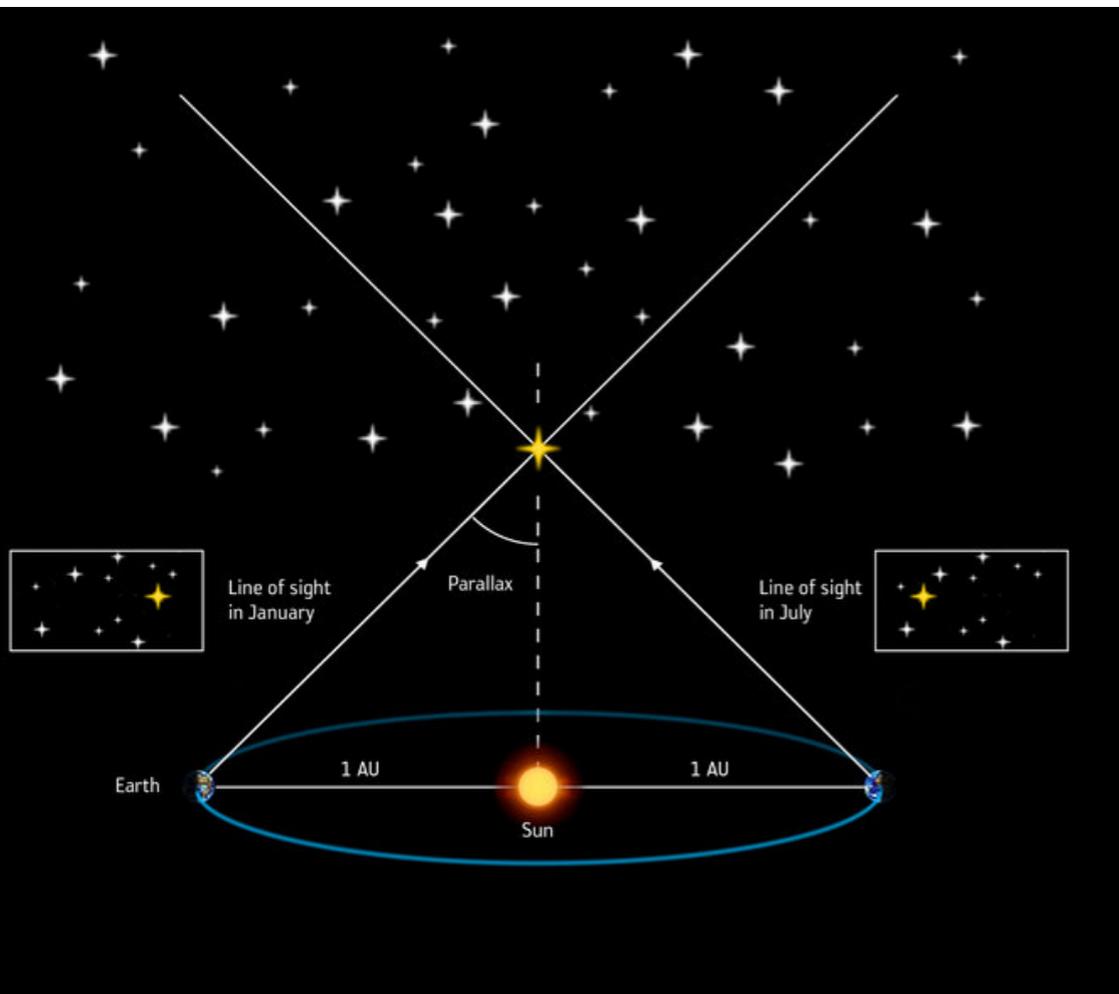


Evolution stellaire



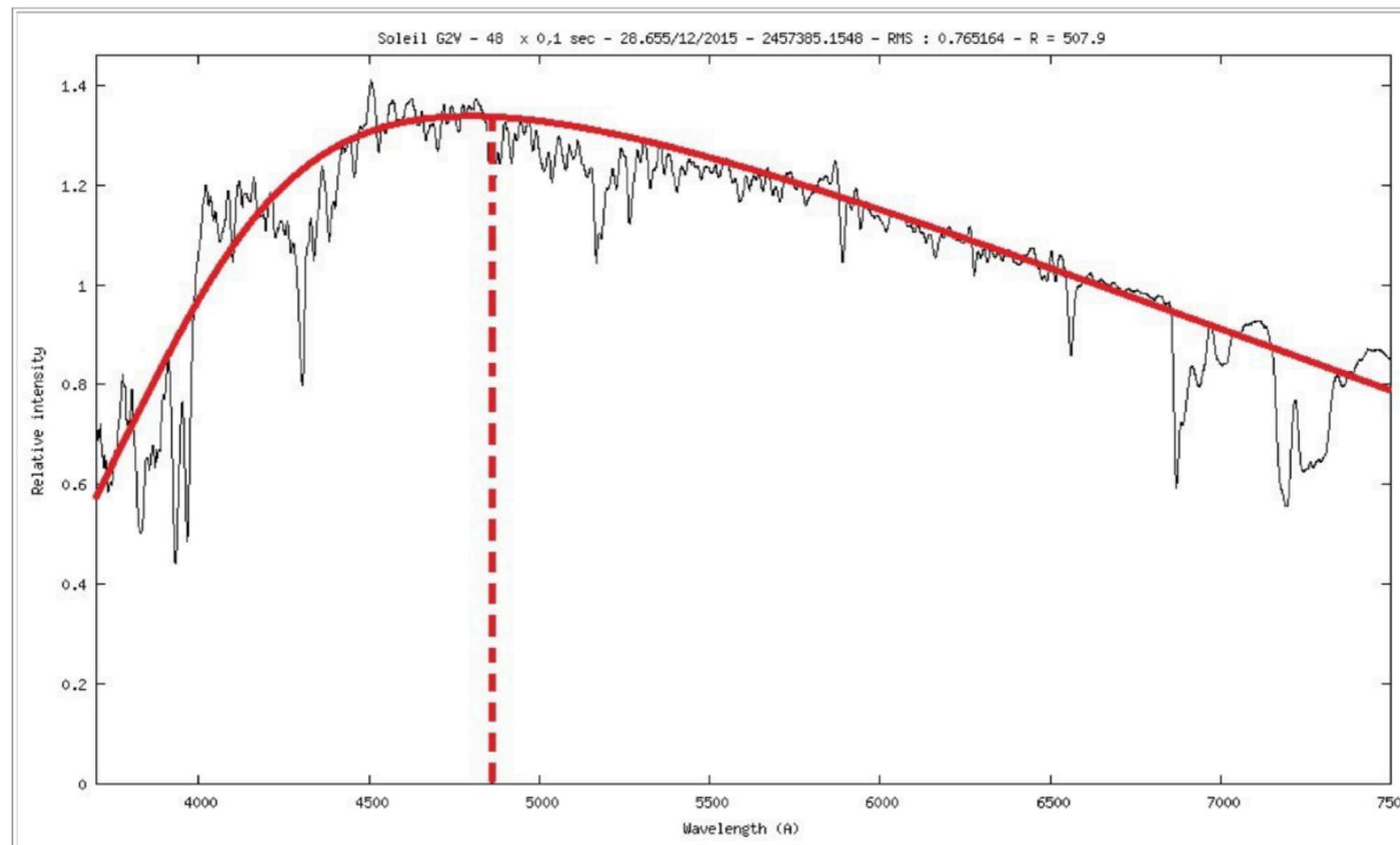
Connaître et analyser les étoiles

- Tout ce qui nous parvient d'une étoile: rayonnement électromagnétique
- La plupart des propriétés intrinsèques ne peuvent être déterminées que si la distance est connue ! (en particulier la luminosité).
 - Parallaxe trigonométrique (triangulation) :



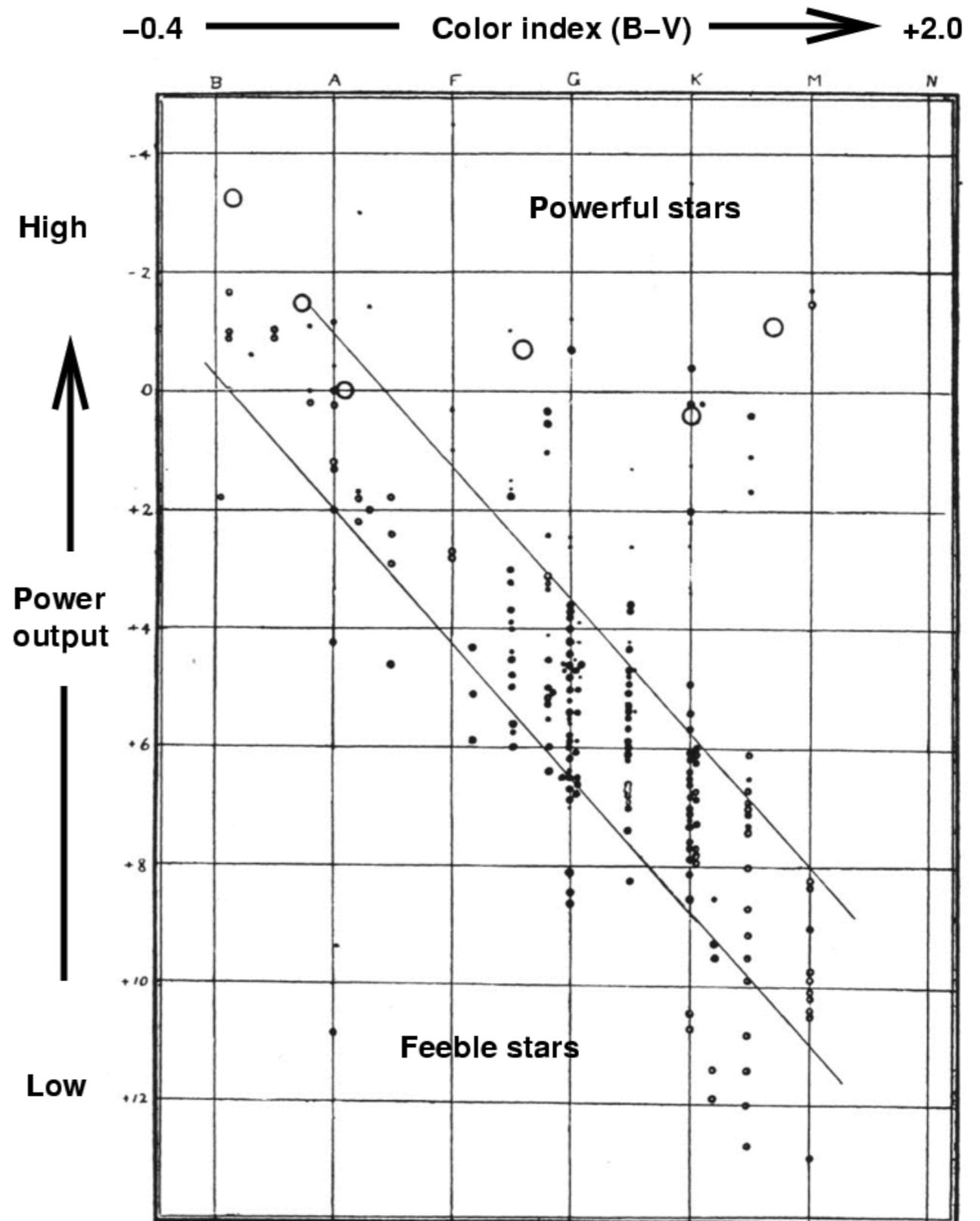
Connaître et analyser les étoiles

- Une fois la distance connue: possibilité de mesurer le flux lumineux (en W/s/cm^2) corrigé de l'absorption (interstellaire + atmosphérique: diffusion Rayleigh) et donc la **luminosité** (en W/s).
- Spectroscopie: donne accès au spectre de l'étoile: corps noir en première approximation. Loi de Wien donne accès à sa **température** de surface.
- Estimation confirmée par étude des raies spectrales (loi de Boltzmann).



Connaître et analyser les étoiles

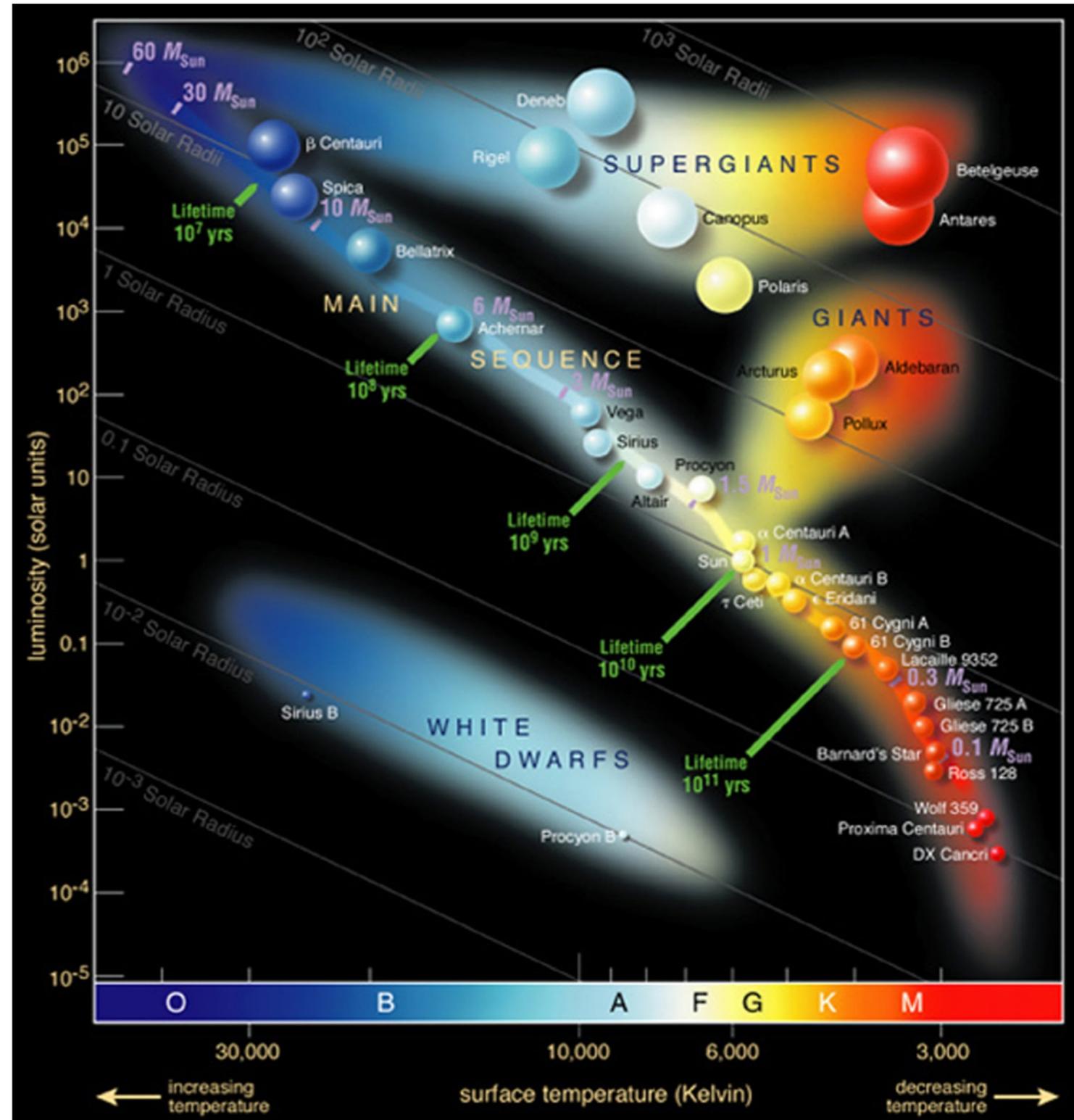
- Diagramme de Hertzsprung-Russel (1913) luminosité = f(température)
- Majorité des étoiles sur la séquence principale
- Etoiles à différents stades évolutifs
- Plus les étoiles sont massives plus elles sont rares (durée de vie plus faible)



Connaître et analyser les étoiles

- Diagramme de Hertzsprung-Russel (1913) luminosité = f(température)
- Majorité des étoiles sur la séquence principale
- Etoiles à différents stades évolutifs
- Plus les étoiles sont massives plus elles sont rares (durée de vie plus faible)
- Quelle est la source d'énergie ?

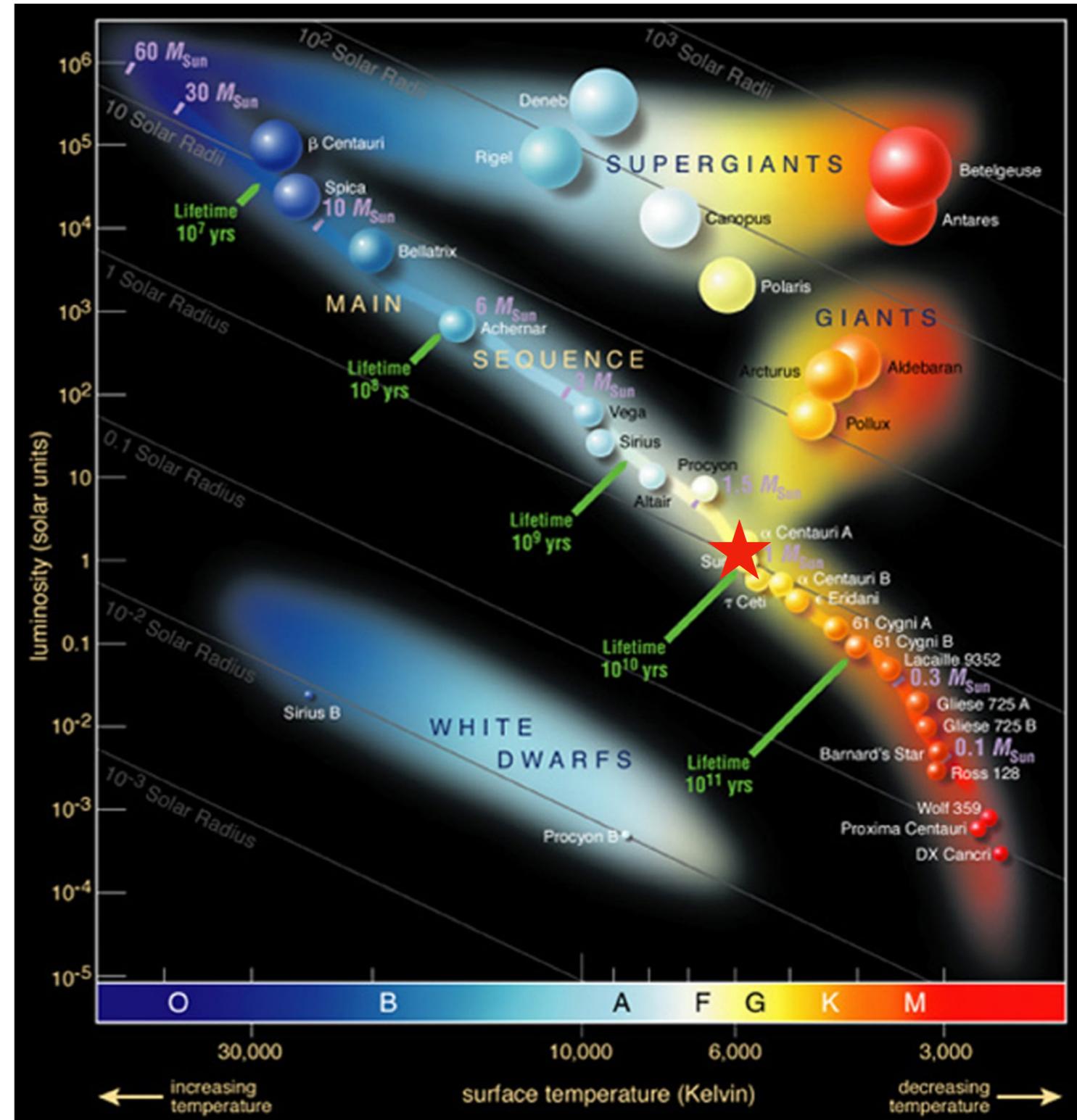
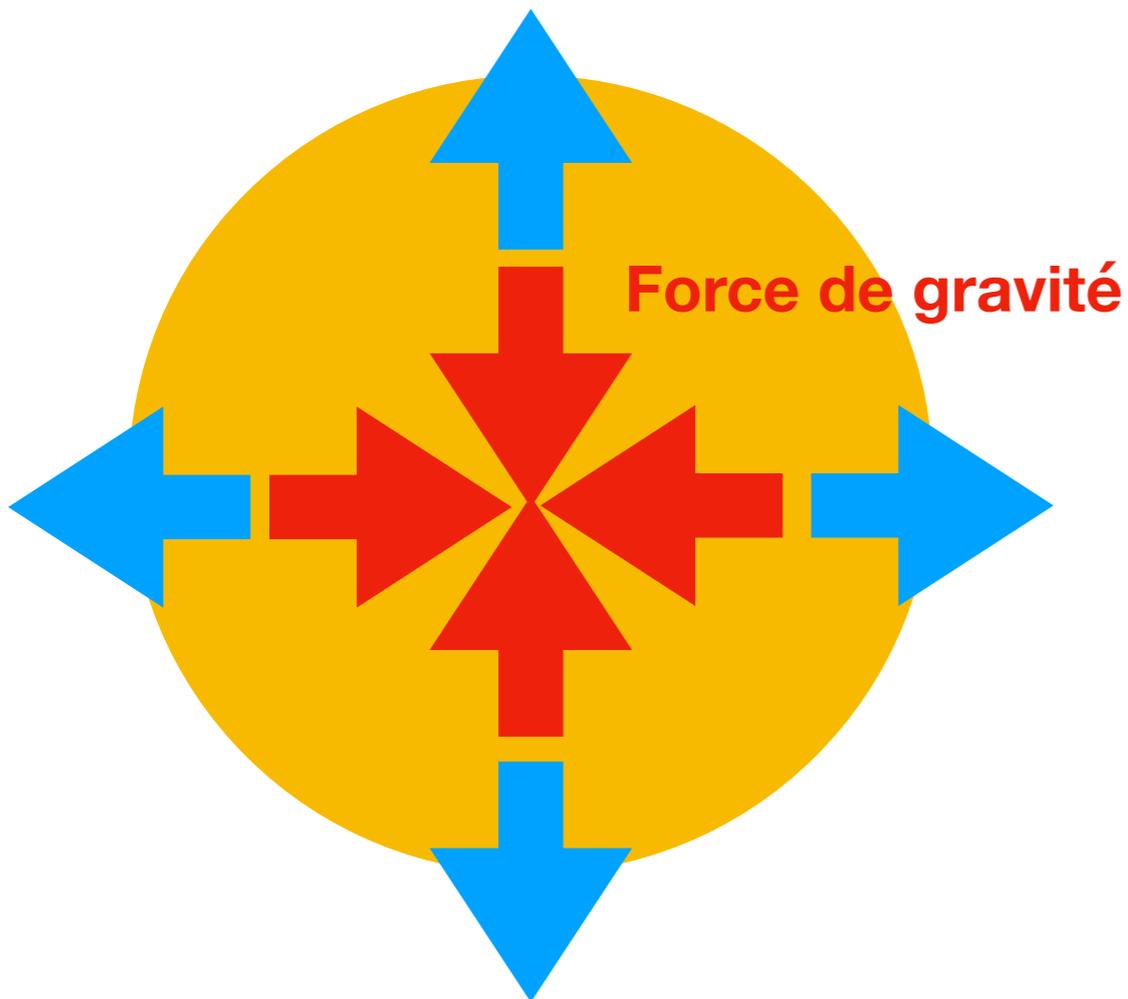
$$t_{\text{nuc}} \propto \frac{Mc^2}{L} \gg t_{\odot}$$



Fusion nucléaire et nucléosynthèse stellaire

- Etoile à l'équilibre sur la séquence principale: gravitation compensée par le gradient de pression (gaz + radiation)

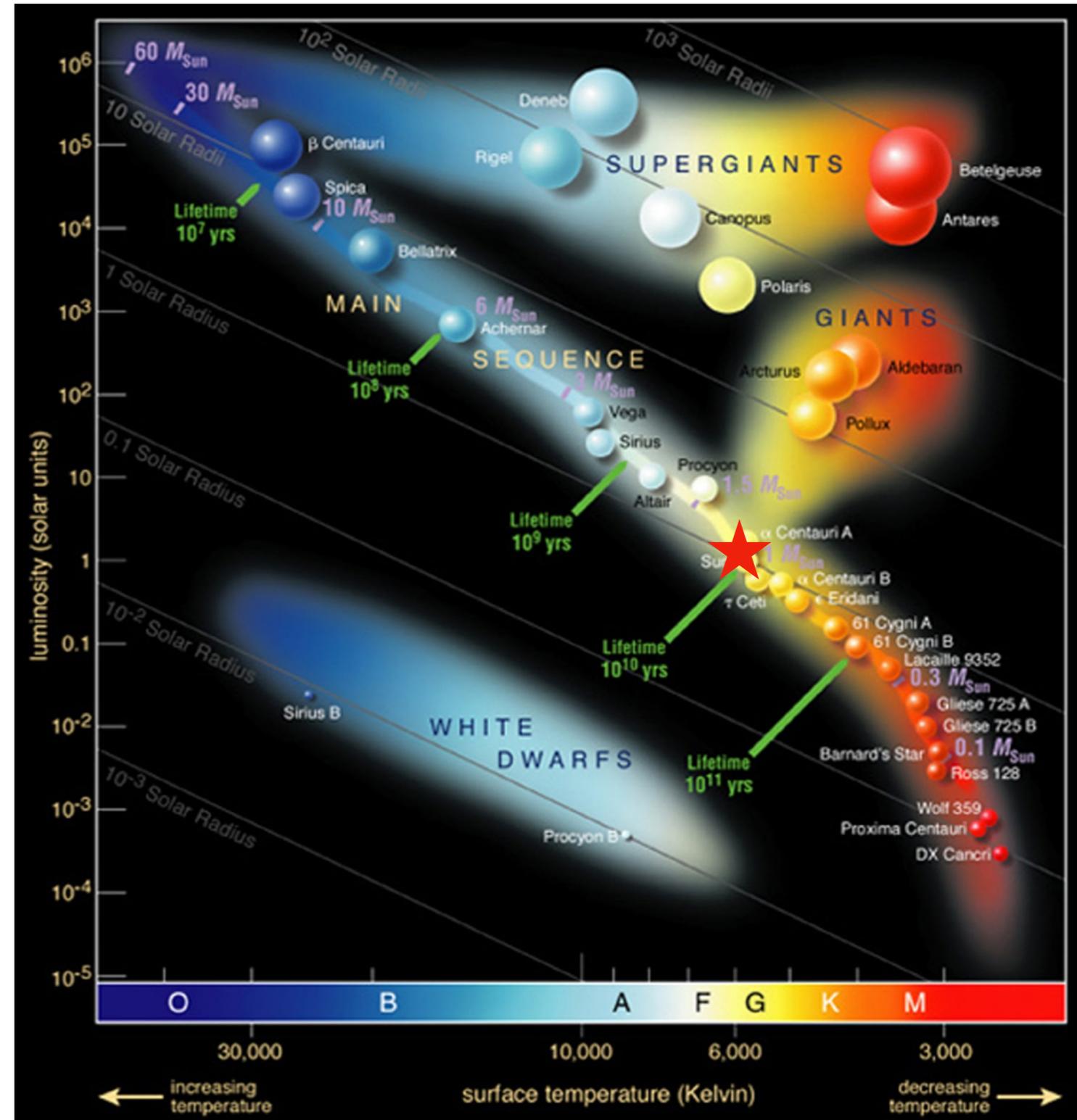
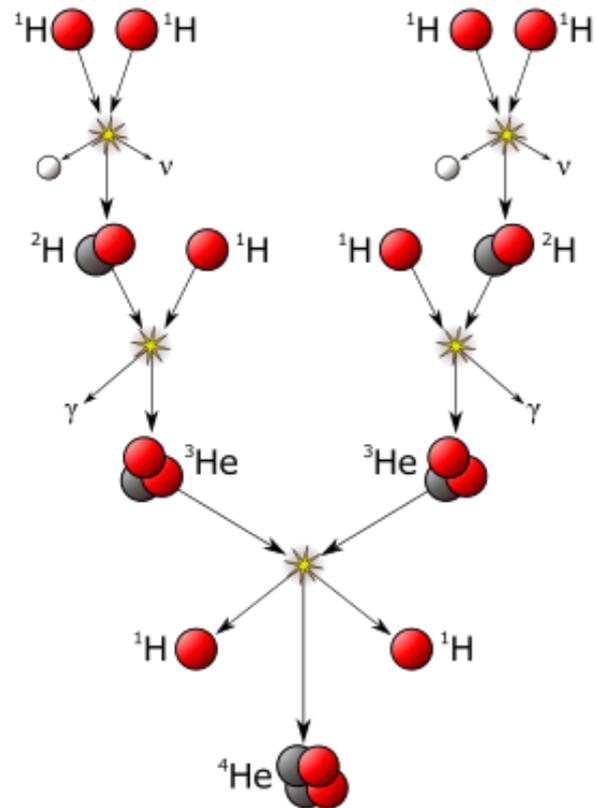
Pression radiative + gazeuse



Fusion nucléaire et nucléosynthèse stellaire

- Etoile à l'équilibre sur la séquence principale: gravitation compensée par le gradient de pression (gaz + radiation)
- Réactions nucléaires produisent l'énergie rayonnée

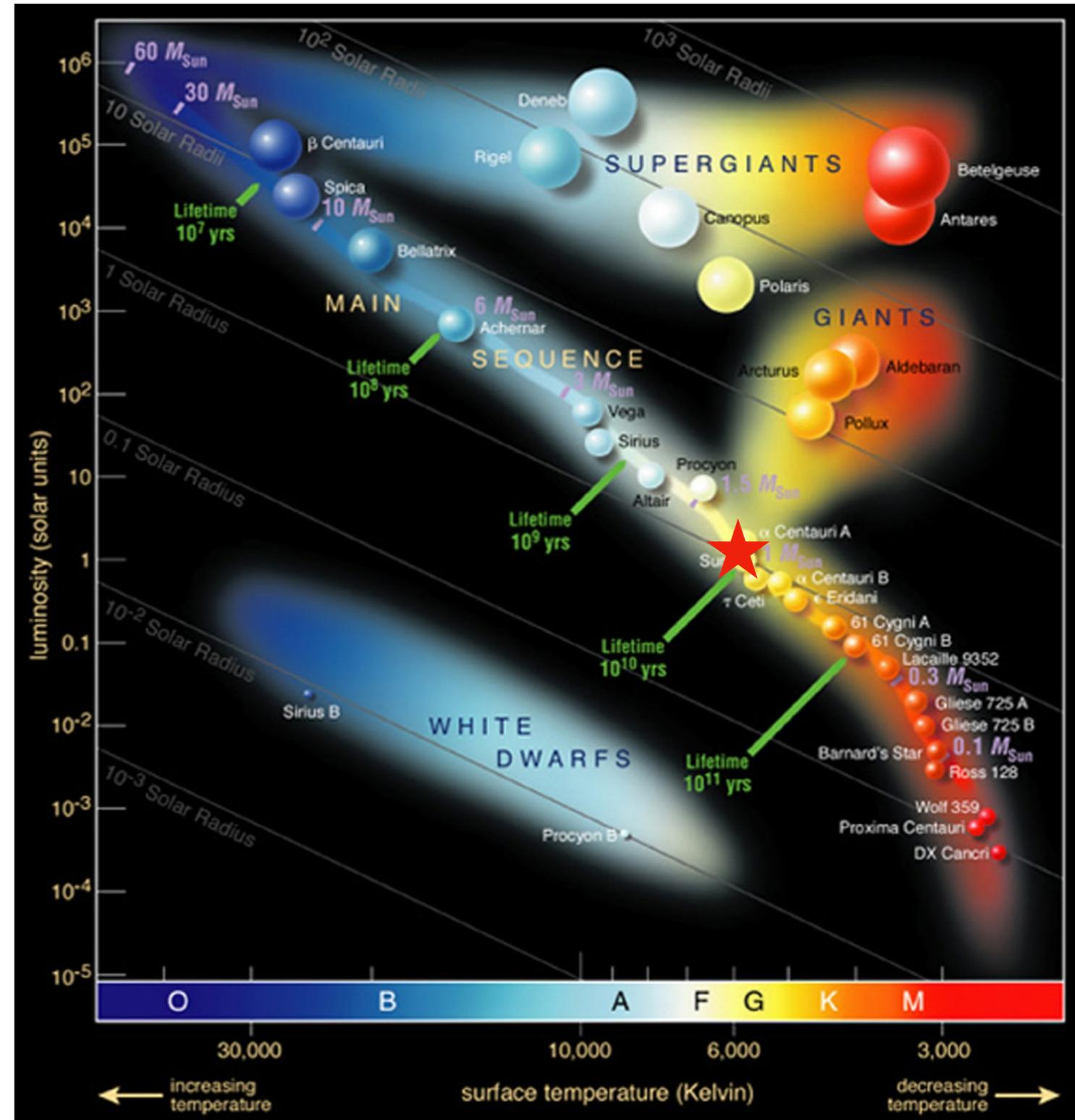
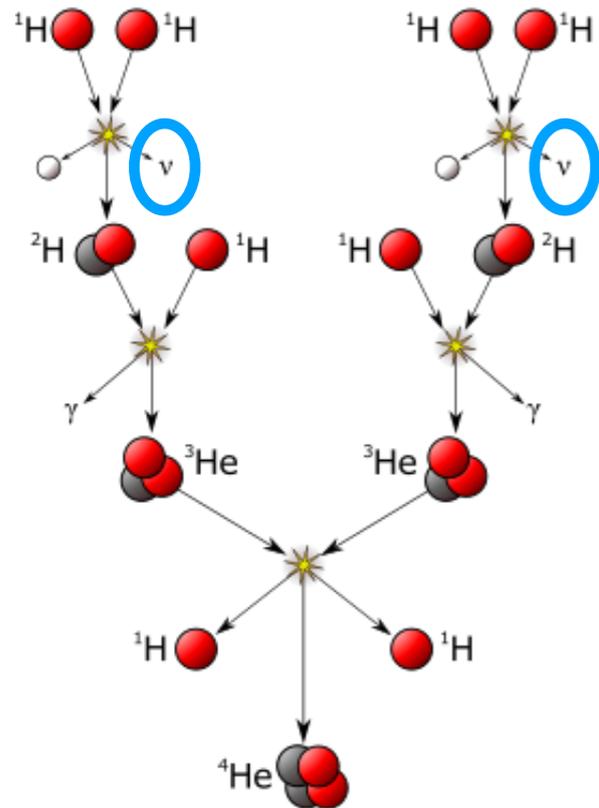
Chaîne proton-proton



Fusion nucléaire et nucléosynthèse stellaire

- Etoile à l'équilibre sur la séquence principale: gravitation compensée par le gradient de pression (gaz + radiation)
- Réactions nucléaires produisent l'énergie rayonnée

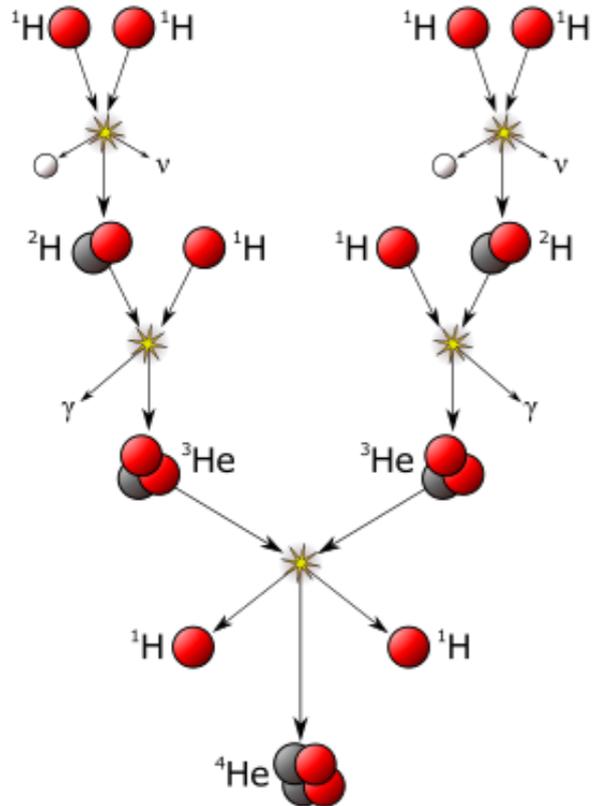
Chaîne proton-proton



Fusion nucléaire et nucléosynthèse stellaire

- Etoile à l'équilibre sur la séquence principale: gravitation compensée par le gradient de pression (gaz + radiation)
- Réactions nucléaires produisent l'énergie rayonnée

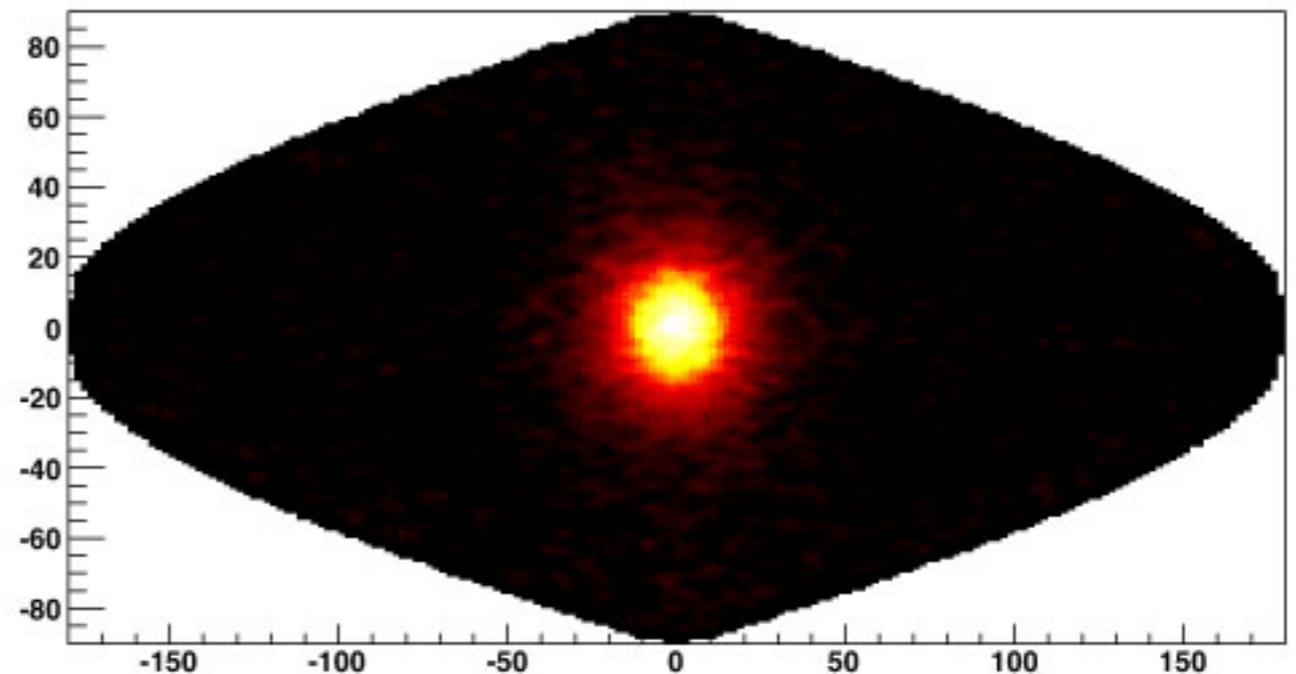
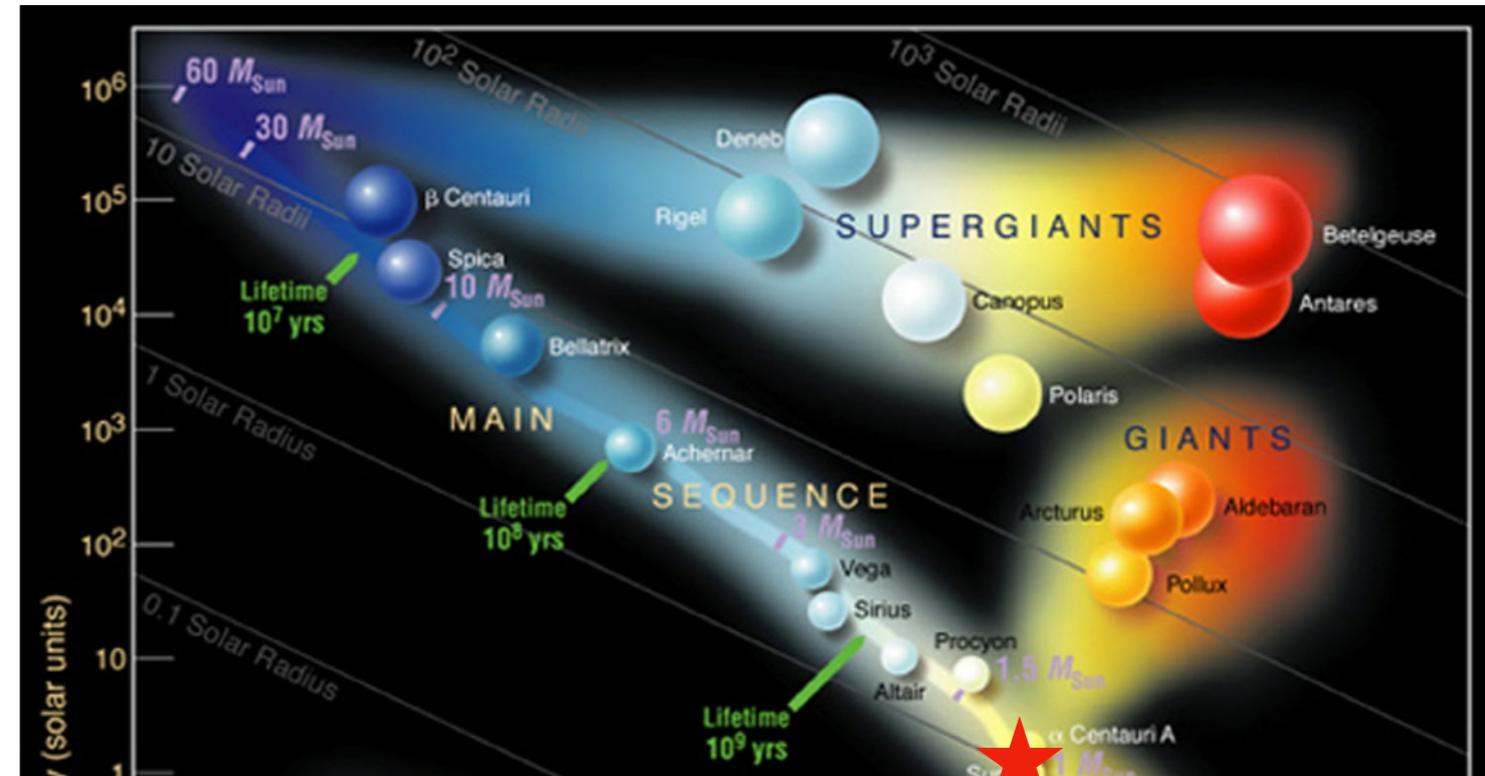
Chaîne proton-proton



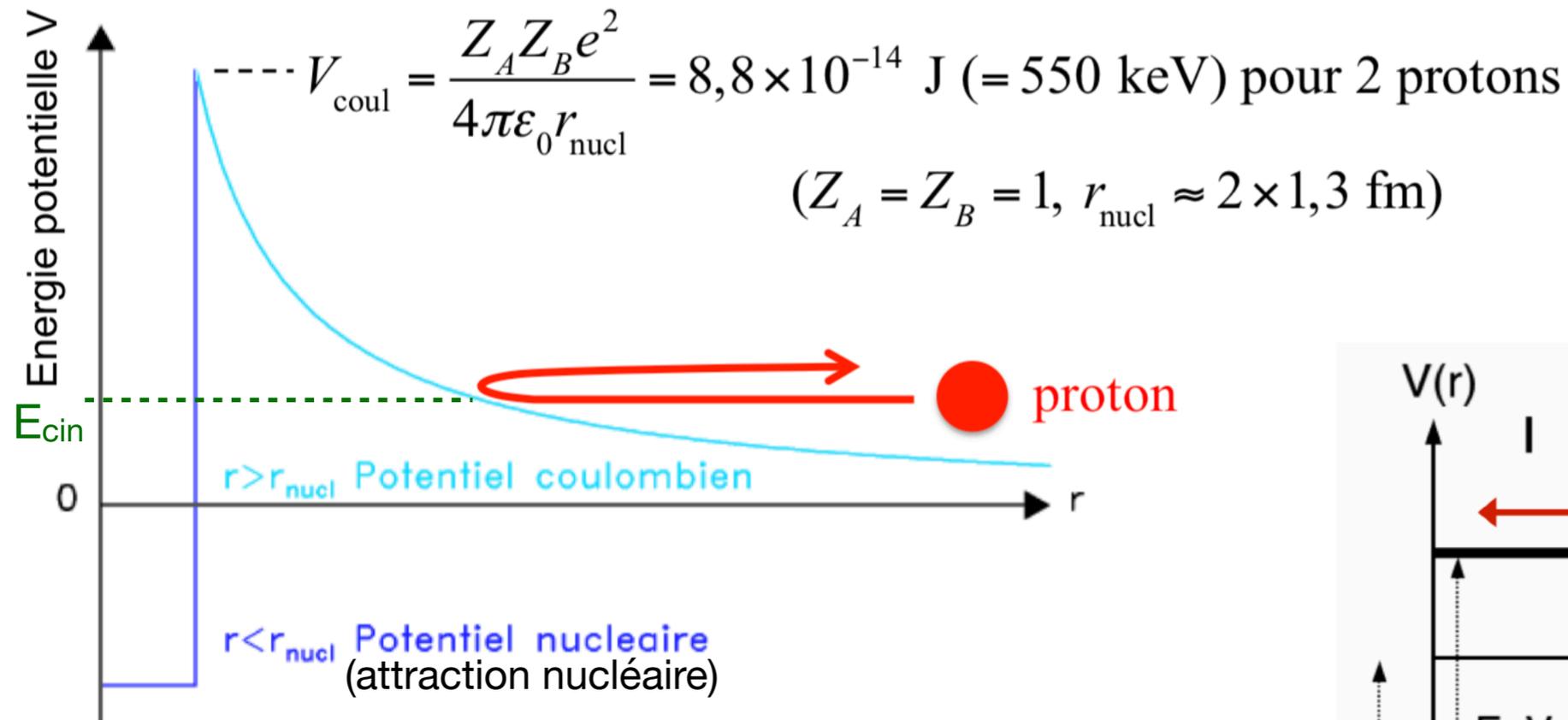
26.2 MeV libérés pour un ${}^4\text{He}$ formé

$$F_{\nu e} \simeq 2 \frac{L_{\odot} / 26.7 \text{ MeV}}{4\pi D^2}$$

$$\simeq 6.6 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$



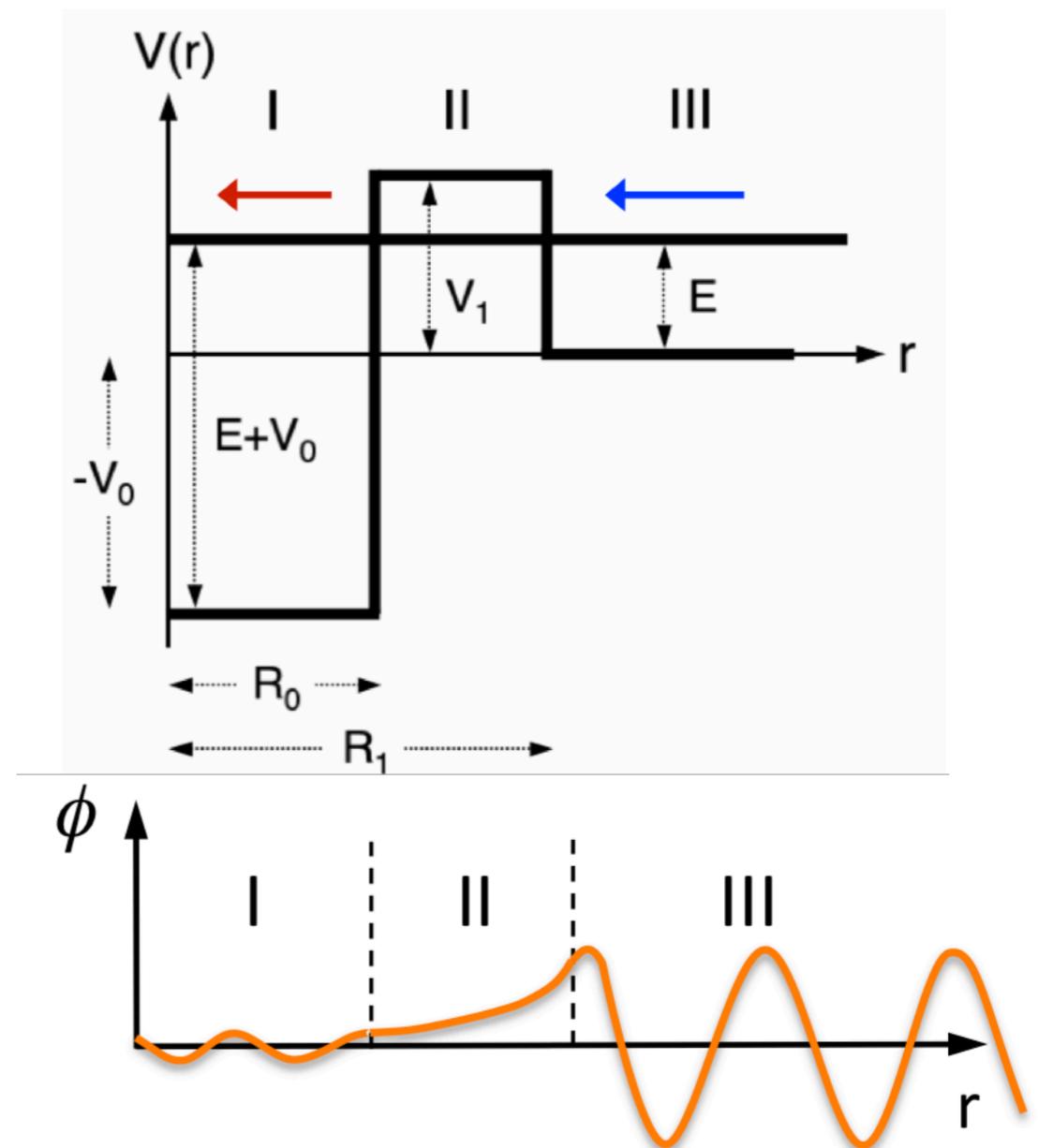
Un brin de mécanique quantique...



Dans un plasma à 15 millions de kelvins, seul un proton sur $\sim 10^{180}$ possède une énergie cinétique d'agitation thermique supérieure à la hauteur de la barrière coulombienne entre deux protons (si distribution de vitesse maxwellienne) !

Problème résolu en 1928 par Gamow: probabilité qu'une particule chargée traverse une barrière coulombienne non nulle en mécanique quantique = effet tunnel.

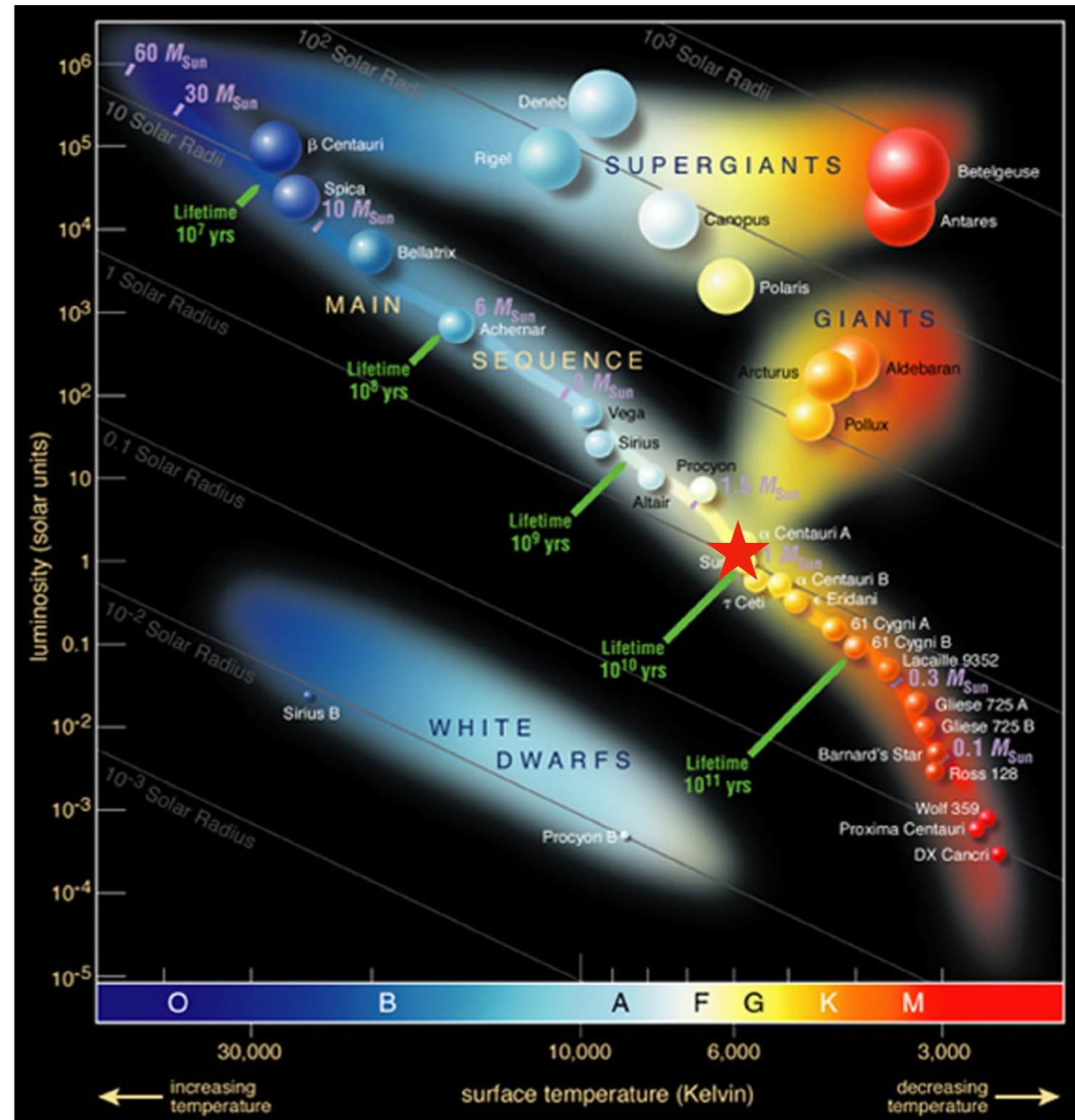
Equation de Shrödinger (\sim équivalent quantique du PFD): calcul 1D du mouvement « quantique » d'un projectile de masse m dans le potentiel coulombien de la cible:



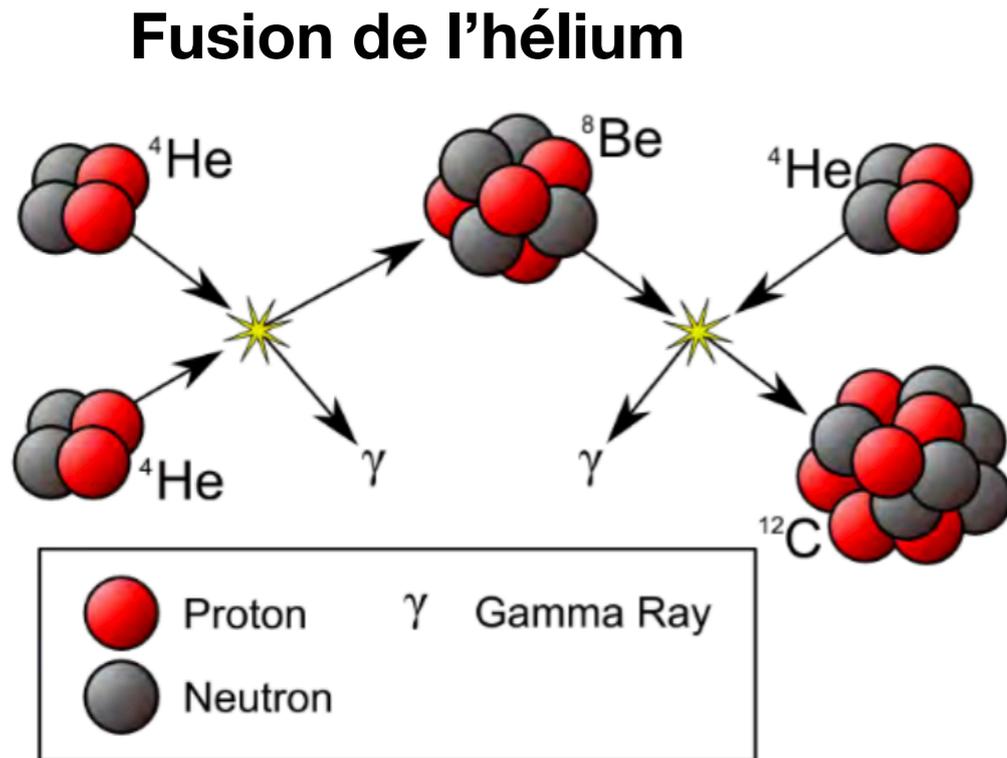
Fusion nucléaire et nucléosynthèse stellaire

- Etoile à l'équilibre sur la séquence principale: gravitation compensée par le gradient de pression
- Réactions nucléaires produisent l'énergie rayonnée

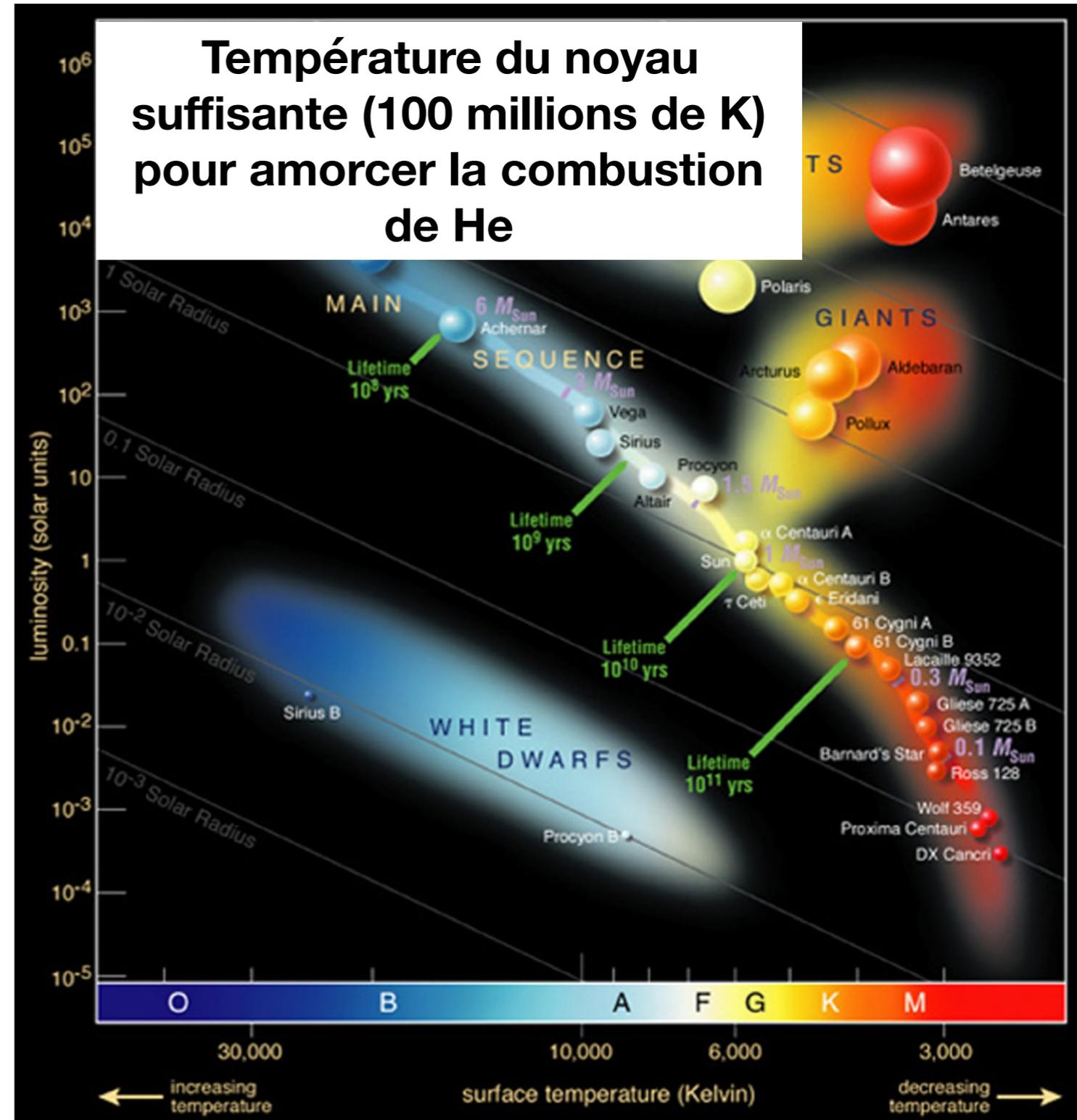
- Lorsque H est consommé, étoile quitte la séquence principale
- H remplacé au centre par He
- He inerte à température ambiante
- Contraction du coeur (1 He prend moins de place que 4 H)
- Augmentation de la température



Fusion nucléaire et nucléosynthèse stellaire

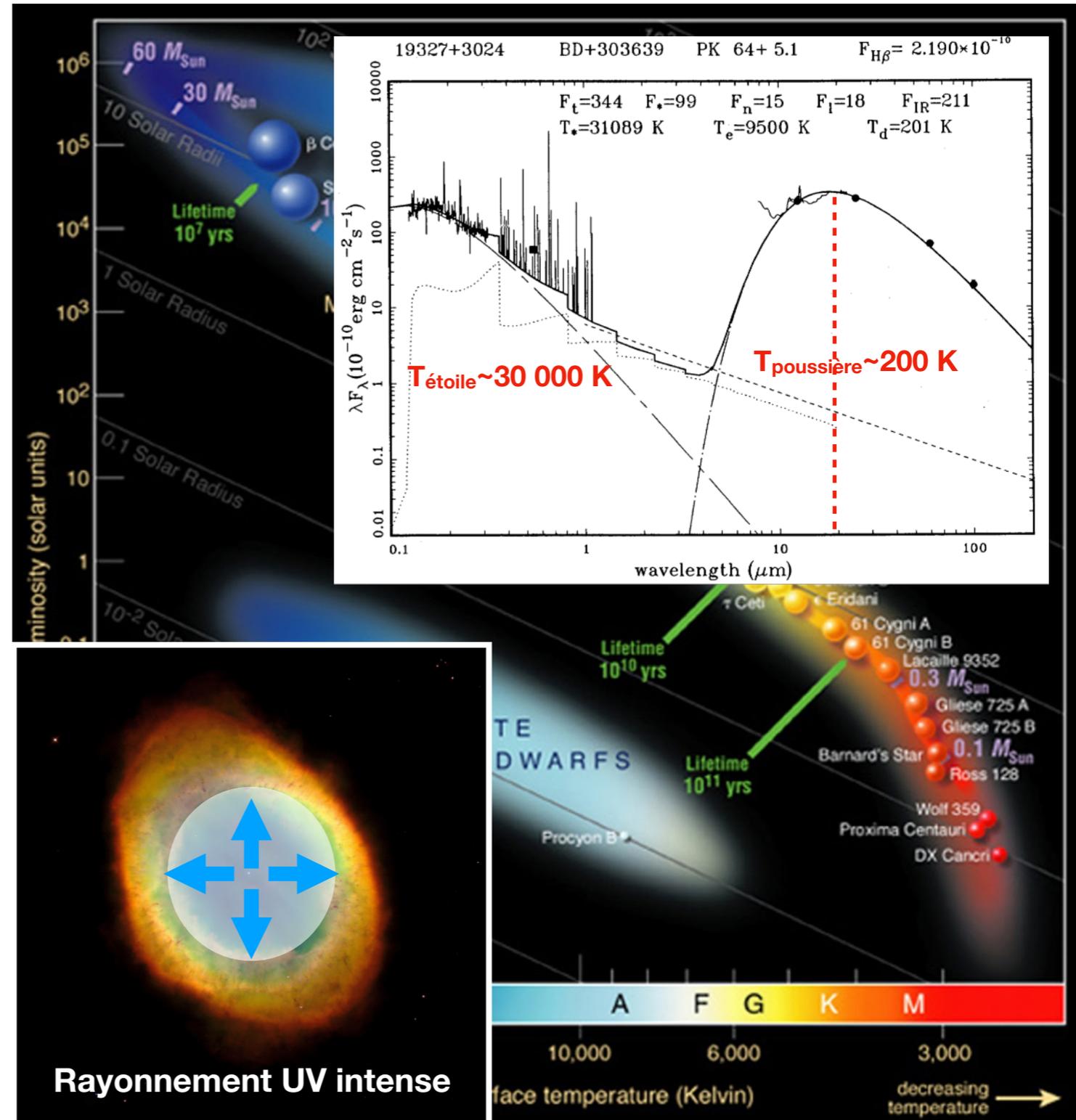


+ formation O, Ne, Mg



Fusion nucléaire et nucléosynthèse stellaire

- **Consommation de He → étoile dominée par la gravitation → se contracte et s'échauffe**
- **Puissant rayonnement UV ionise l'enveloppe → expansion**
- **Ejection de l'enveloppe → nébuleuse planétaire**



Fin de vie des étoiles de faible masse: les naines blanches

Si $M < 8M_{\odot}$: production d'éléments stables s'arrête à C, O, Ne, Mg

Que se passe-t-il à ce moment là ?

Sources de pression interne conditionnant l'équilibre (contreponds):

- Pour la Terre: gravitation \leftrightarrow forces de répulsion coulombienne
- Pour une étoile: gravitation \leftrightarrow pression des gaz + radiations (équilibre hydrostatique)

Ici les réactions nucléaires s'arrêtent ! Et pourtant l'astre final ne s'effondre pas...

Fin de vie des étoiles de faible masse: les naines blanches

Si $M < 8M_{\odot}$: production d'éléments stables s'arrête à C, O, Ne, Mg

Que se passe-t-il à ce moment là ?

Sources de pression interne conditionnant l'équilibre (contreponds):

- Pour la Terre: gravitation \leftrightarrow forces de répulsion coulombienne
- Pour une étoile: gravitation \leftrightarrow pression des gaz + radiations (équilibre hydrostatique)

Ici les réactions nucléaires s'arrêtent ! Et pourtant l'astre final ne s'effondre pas...

La gravitation comprime le corps « froid » formé d'un gaz de noyaux et d'électrons qui peuvent devenir relativistes à cause de leur grande agitation thermique: ceci crée une pression qui s'oppose à l'effondrement gravitationnel.

Dans ce cas: $P \neq \mathcal{R}\rho T/\mu$ Et on a plutôt: $P_e \propto \rho^{4/3} \propto \frac{\sqrt[3]{M^4}}{R^4}$

La pression des électrons assure l'équilibre en compensant la gravité $\rightarrow M \lesssim 1.44M_{\odot}$

Fin de vie des étoiles de faible masse: les naines blanches

Si $M < 8M_{\odot}$: production d'éléments stables s'arrête à C, O, Ne, Mg

Que se passe-t-il à ce moment là ?

Sources de pression interne conditionnant l'équilibre (contreponds):

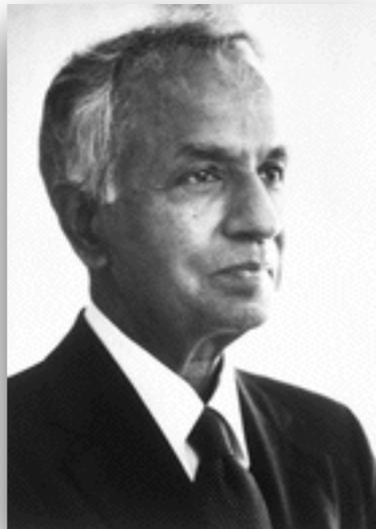
- Pour la Terre: gravitation \leftrightarrow forces de répulsion Coulombienne
- Pour une étoile: gravitation \leftrightarrow pression des gaz + radiations (équilibre hydrostatique)

Ici les réactions nucléaires s'arrêtent

La gravitation comprime le corps « froid »
devenir relativistes à cause de leur grande densité
l'effondrement gravitationnel.

Dans ce cas: $P \neq \mathcal{R}\rho T / \mu$

La pression des électrons assure

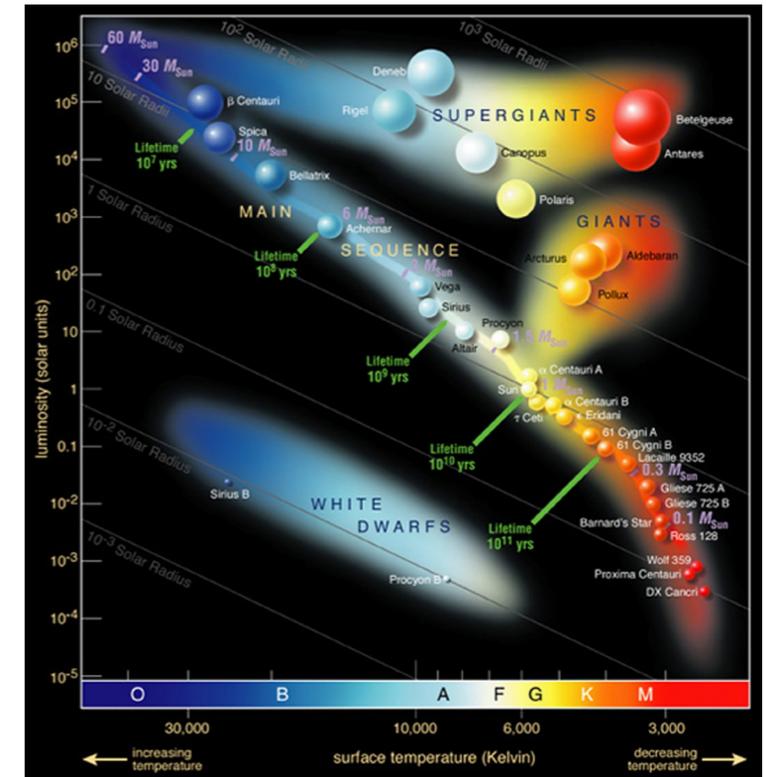


Subrahmanyan Chandrasekhar
1910-1995 (Prix Nobel 1983)

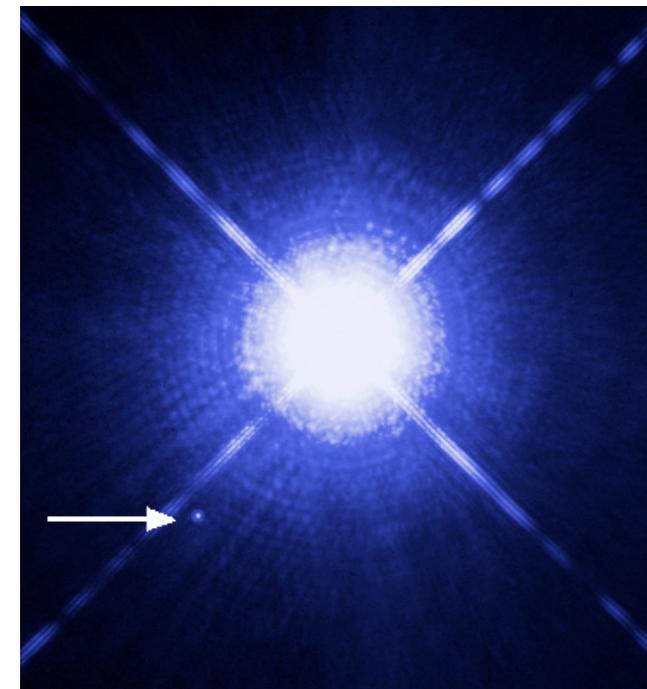
Eddington devant la Royal Astronomical Society (1935): « *I think there should be a law of nature to prevent a star from behaving in this absurd way* ».

Fin de vie des étoiles de faible masse: les naines blanches

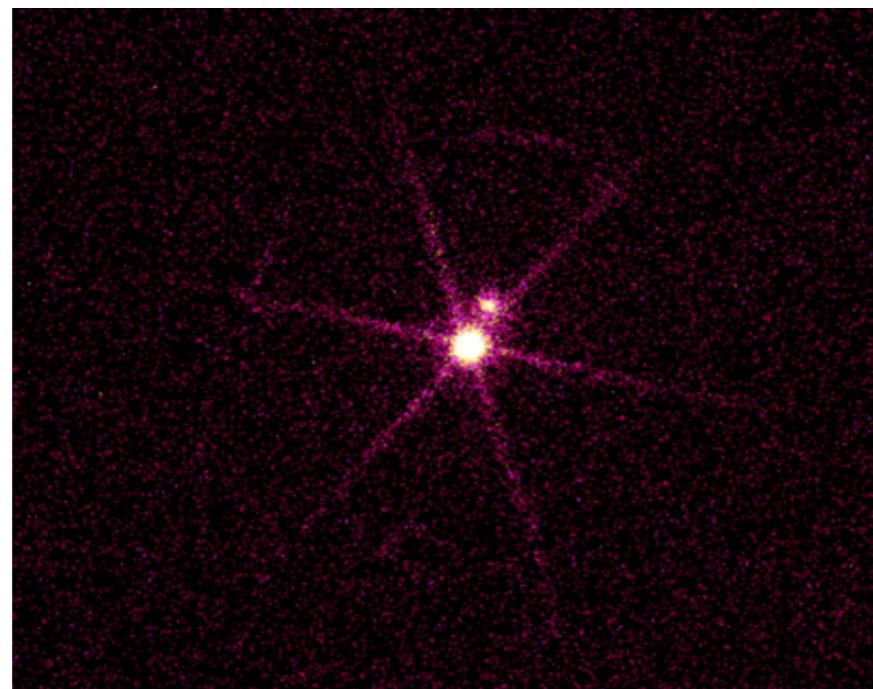
- Seules les naines blanches proches peuvent être observées (~2500 à l'heure actuelle).
- A température égale, luminosité bien plus faible qu'une étoile de la séquence principale car $R \sim 5000$ km.



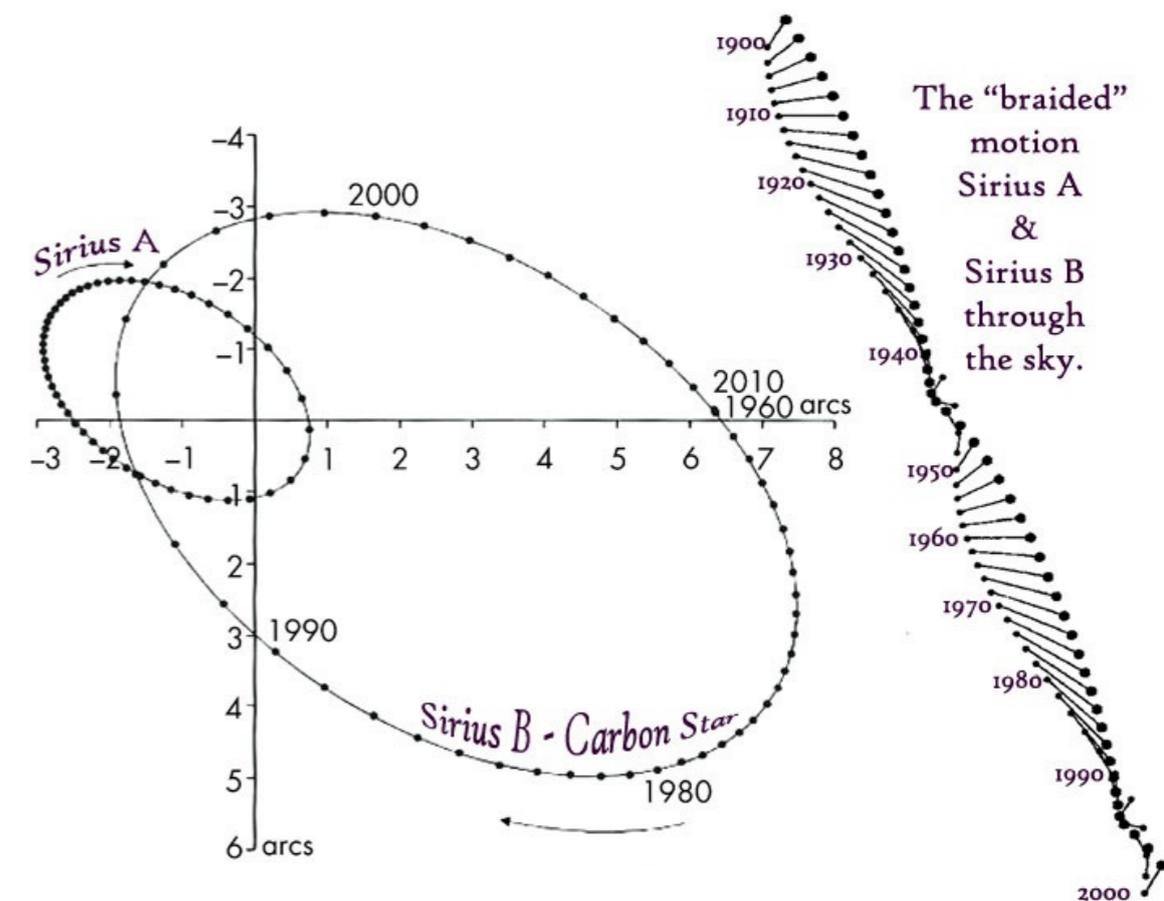
Systeme binaire Sirius A/B



HST / visible



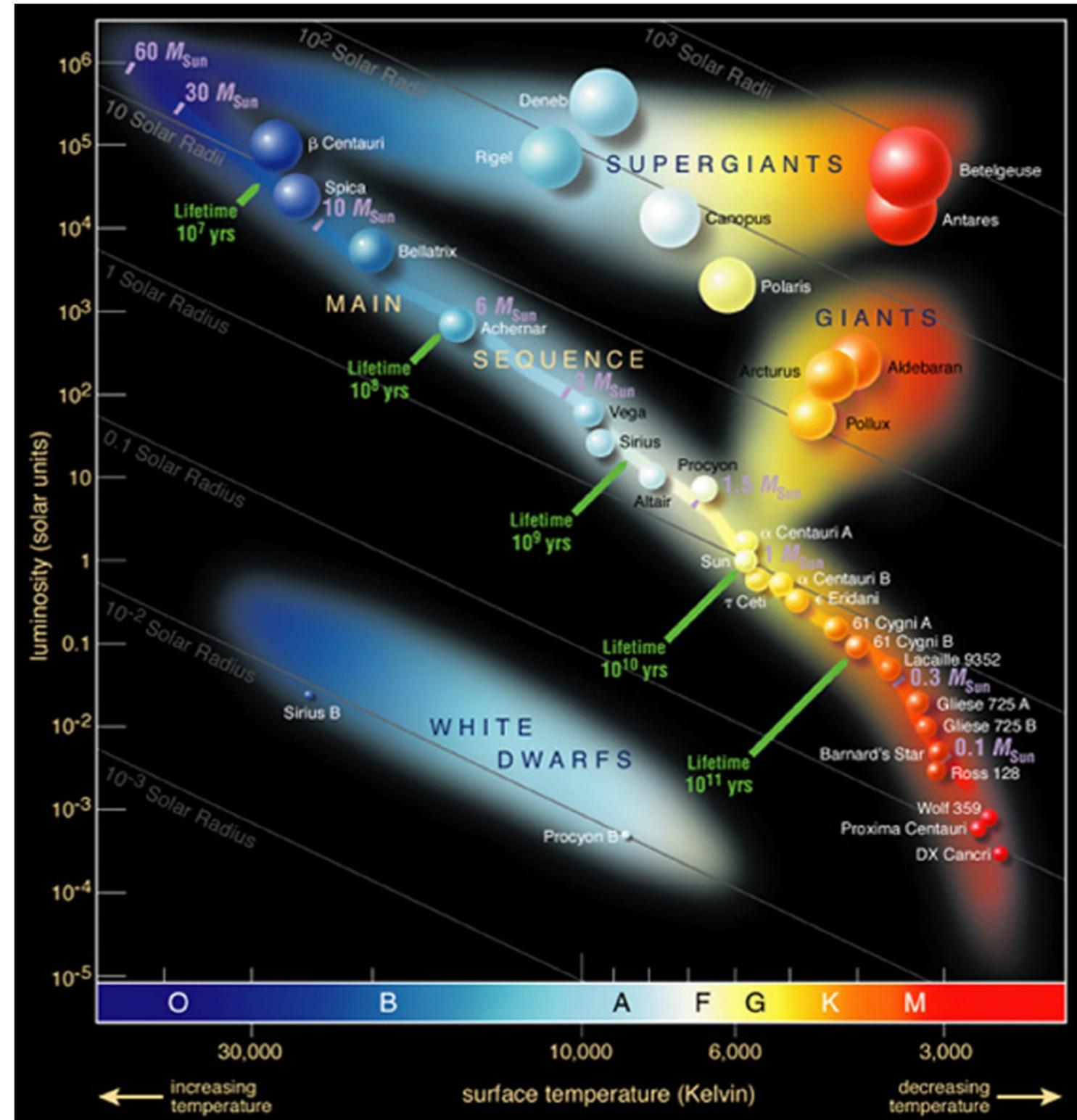
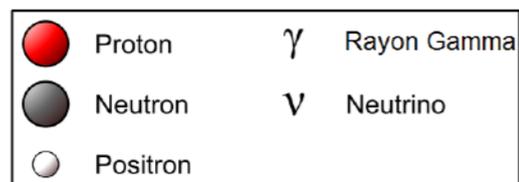
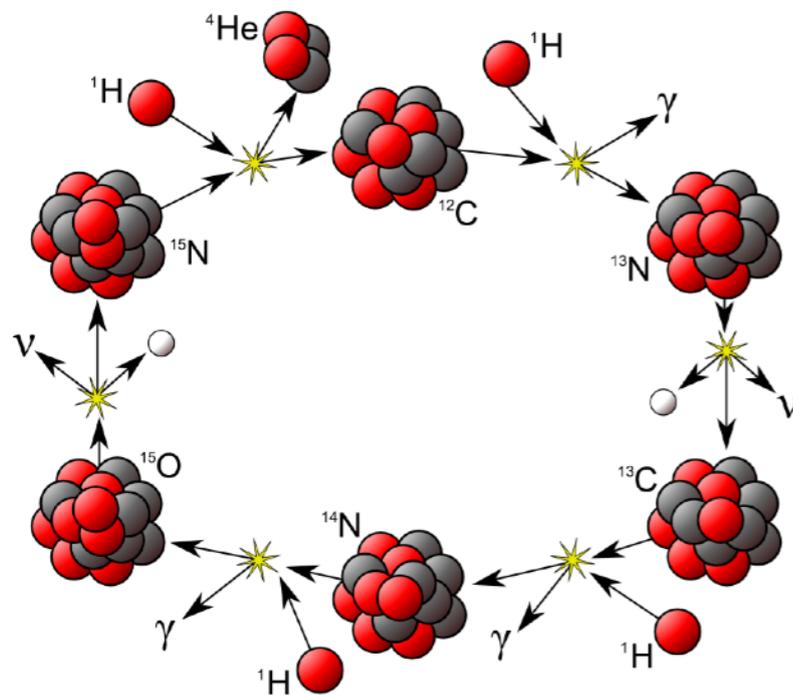
Chandra / rayons X



Fusion nucléaire et nucléosynthèse stellaire

- Qu'en est-il des étoiles plus massives ?

Cycle CNO (étoiles massives enrichies en carbone)

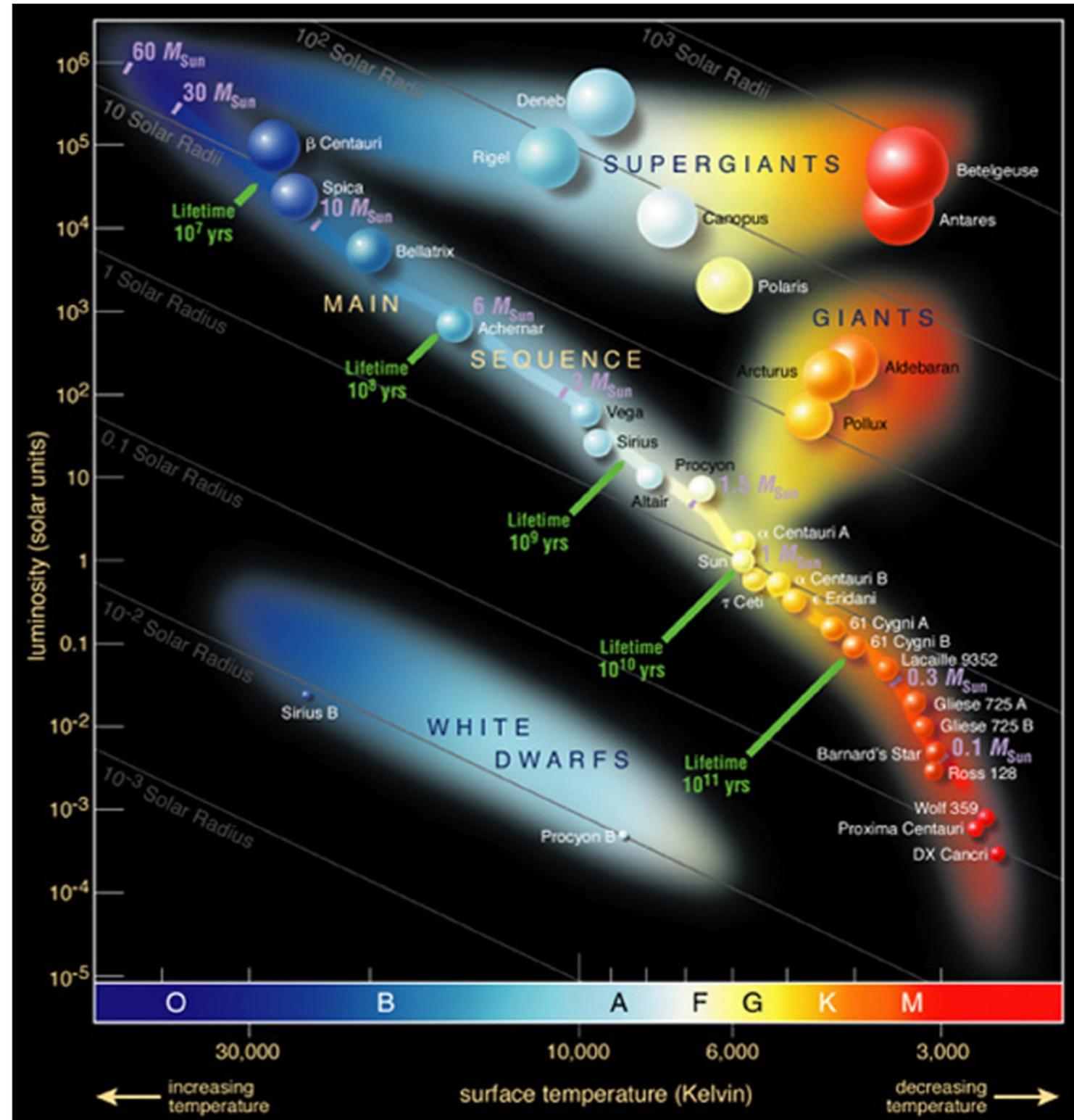


Fusion nucléaire et nucléosynthèse stellaire

- Qu'en est-il des étoiles plus massives ?

Etoiles massives: même début puis ensuite fusion de C et O

Combustible	Température	Élément formé
Hydrogène	$60 \cdot 10^6 \text{ K}$	$4\text{He}, 14\text{N}$
Hélium	$200 \cdot 10^6 \text{ K}$	$12\text{C}, 16\text{O}$
Carbone	$900 \cdot 10^6 \text{ K}$	$24\text{Mg}, 20\text{Ne}$
Oxygène	$2.3 \cdot 10^9 \text{ K}$	Isotopes de Si, S
Néon	$1.7 \cdot 10^9 \text{ K}$	$16\text{O}, 24\text{Mg}, 28\text{Si}$
Silicium	$4 \cdot 10^9 \text{ K}$	$56\text{Fe}, \dots$

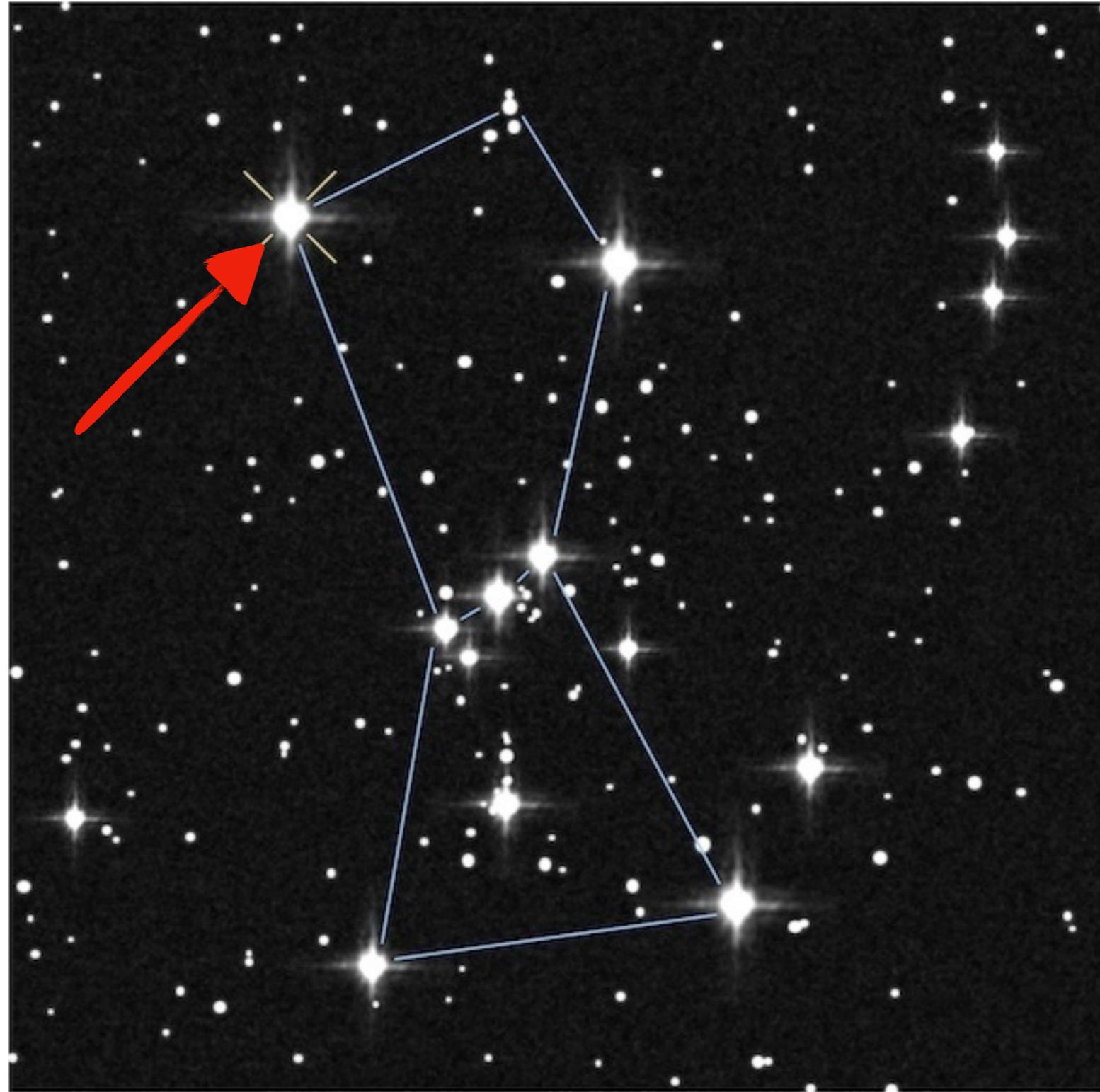


Fusion nucléaire et nucléosynthèse stellaire

- Qu'en est-il des étoiles plus massives ?

Etoiles massives: même début puis ensuite fusion de C et O

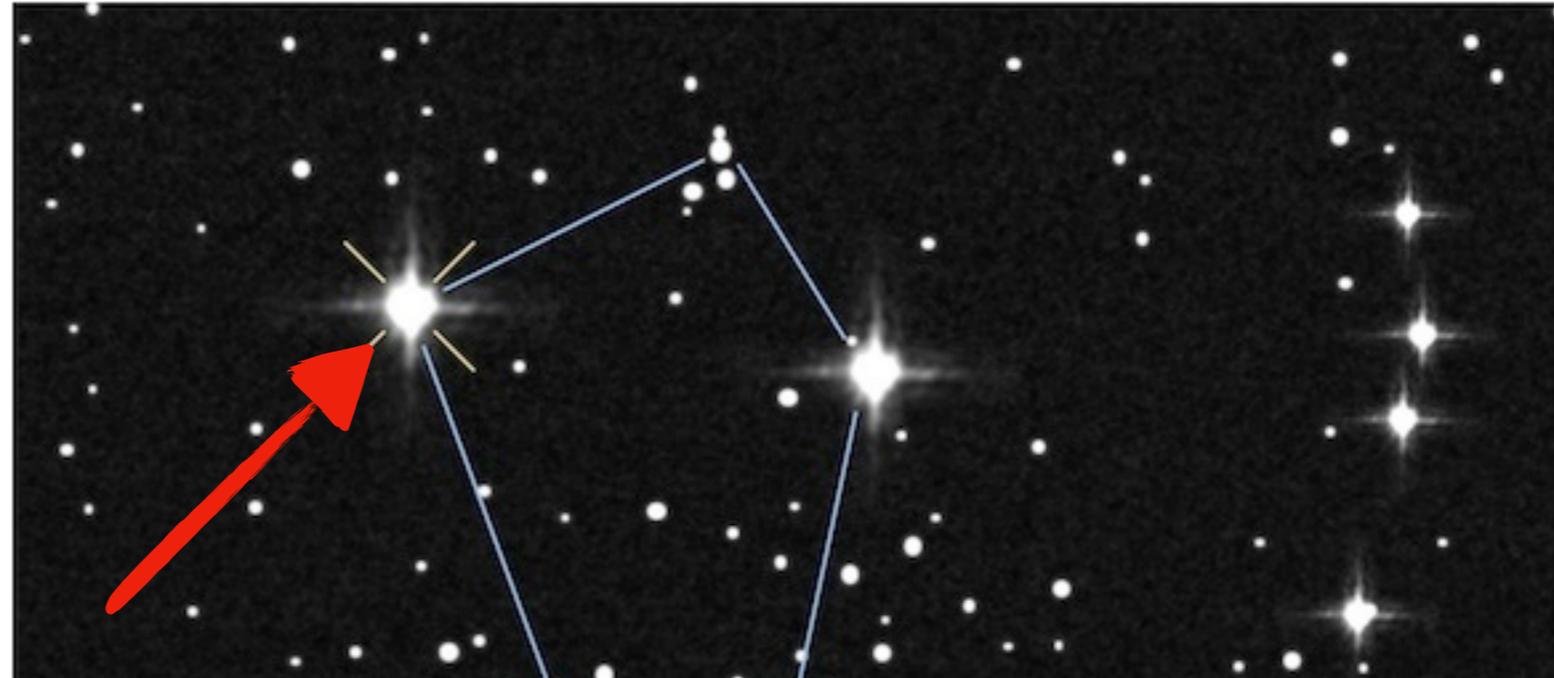
Combustible	Température	Élément formé
Hydrogène	$60 \cdot 10^6 \text{ K}$	$^4\text{He}, ^{14}\text{N}$
Hélium	$200 \cdot 10^6 \text{ K}$	$^{12}\text{C}, ^{16}\text{O}$
Carbone	$900 \cdot 10^6 \text{ K}$	$^{24}\text{Mg}, ^{20}\text{Ne}$
Oxygène	$2.3 \cdot 10^9 \text{ K}$	Isotopes de Si, S
Néon	$1.7 \cdot 10^9 \text{ K}$	$^{16}\text{O}, ^{24}\text{Mg}, ^{28}\text{Si}$
Silicium	$4 \cdot 10^9 \text{ K}$	$^{56}\text{Fe}, \dots$



Fusion nucléaire et nucléosynthèse stellaire

- Qu'en est-il des étoiles plus massives ?

Etoiles massives: même début puis ensuite fusion de C et O

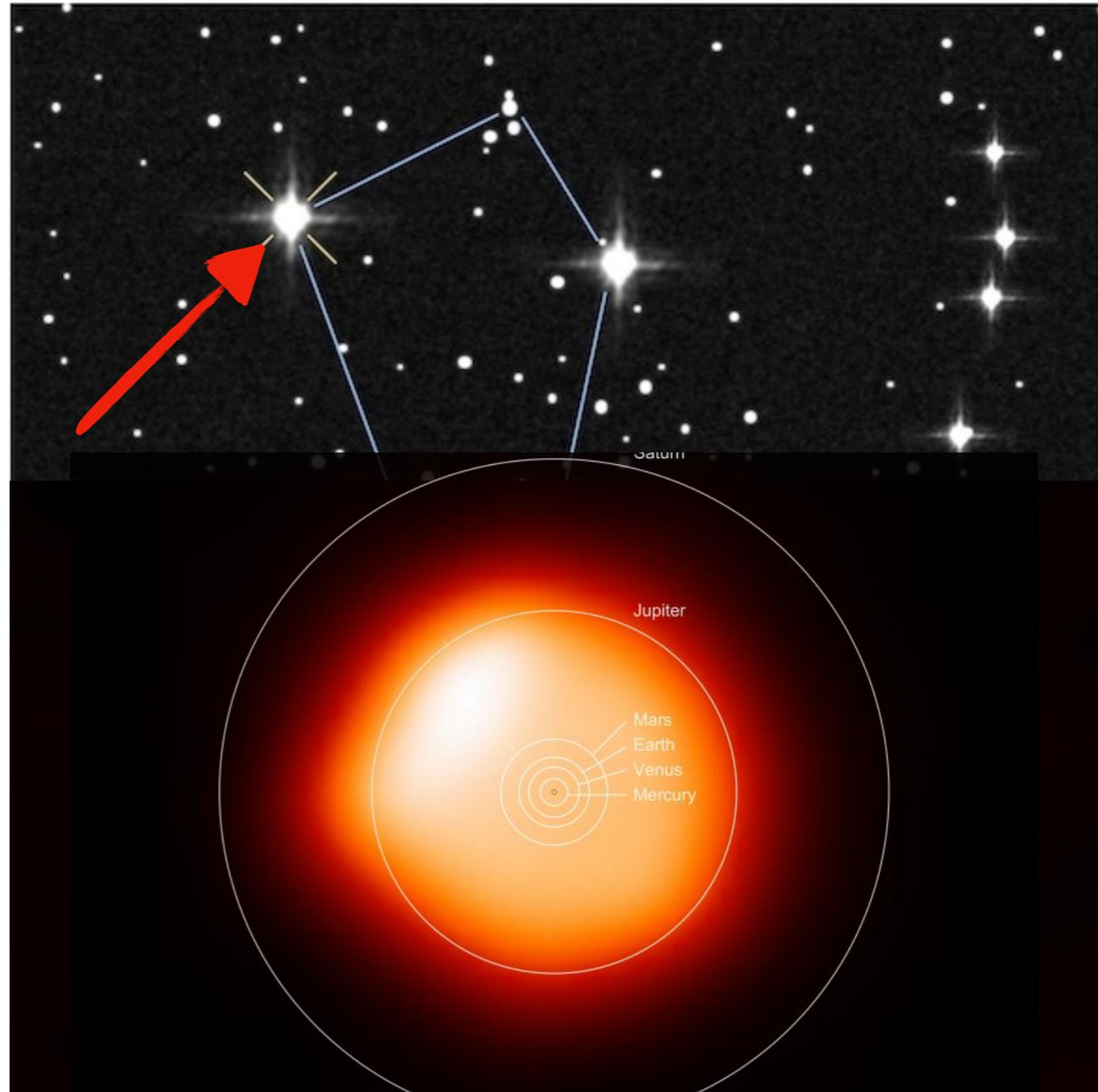


Combustible	Température	Élément formé
Hydrogène	$60 \cdot 10^6 \text{ K}$	$^4\text{He}, ^{14}\text{N}$
Hélium	$200 \cdot 10^6 \text{ K}$	$^{12}\text{C}, ^{16}\text{O}$
Carbone	$900 \cdot 10^6 \text{ K}$	$^{24}\text{Mg}, ^{20}\text{Ne}$
Oxygène	$2.3 \cdot 10^9 \text{ K}$	Isotopes de Si, S
Néon	$1.7 \cdot 10^9 \text{ K}$	$^{16}\text{O}, ^{24}\text{Mg}, ^{28}\text{Si}$
Silicium	$4 \cdot 10^9 \text{ K}$	$^{56}\text{Fe}, \dots$

Fusion nucléaire et nucléosynthèse stellaire

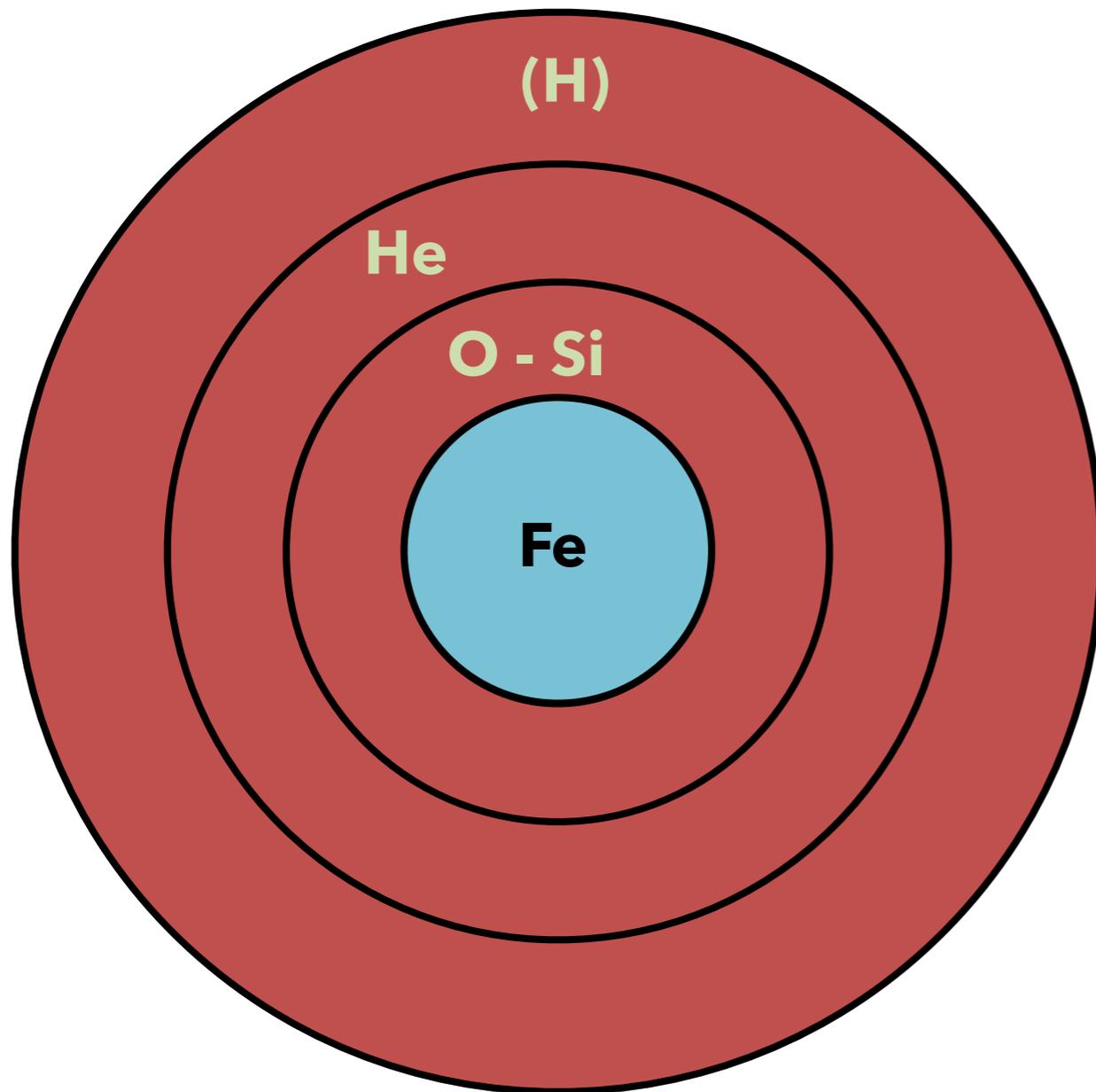
- Qu'en est-il des étoiles plus massives ?

Etoiles massives: même début puis ensuite fusion de C et O



Combustible	Température	Élément formé
Hydrogène	$60 \cdot 10^6 \text{ K}$	$^4\text{He}, ^{14}\text{N}$
Hélium	$200 \cdot 10^6 \text{ K}$	$^{12}\text{C}, ^{16}\text{O}$
Carbone	$900 \cdot 10^6 \text{ K}$	$^{24}\text{Mg}, ^{20}\text{Ne}$
Oxygène	$2.3 \cdot 10^9 \text{ K}$	Isotopes de Si, S
Néon	$1.7 \cdot 10^9 \text{ K}$	$^{16}\text{O}, ^{24}\text{Mg}, ^{28}\text{Si}$
Silicium	$4 \cdot 10^9 \text{ K}$	$^{56}\text{Fe}, \dots$

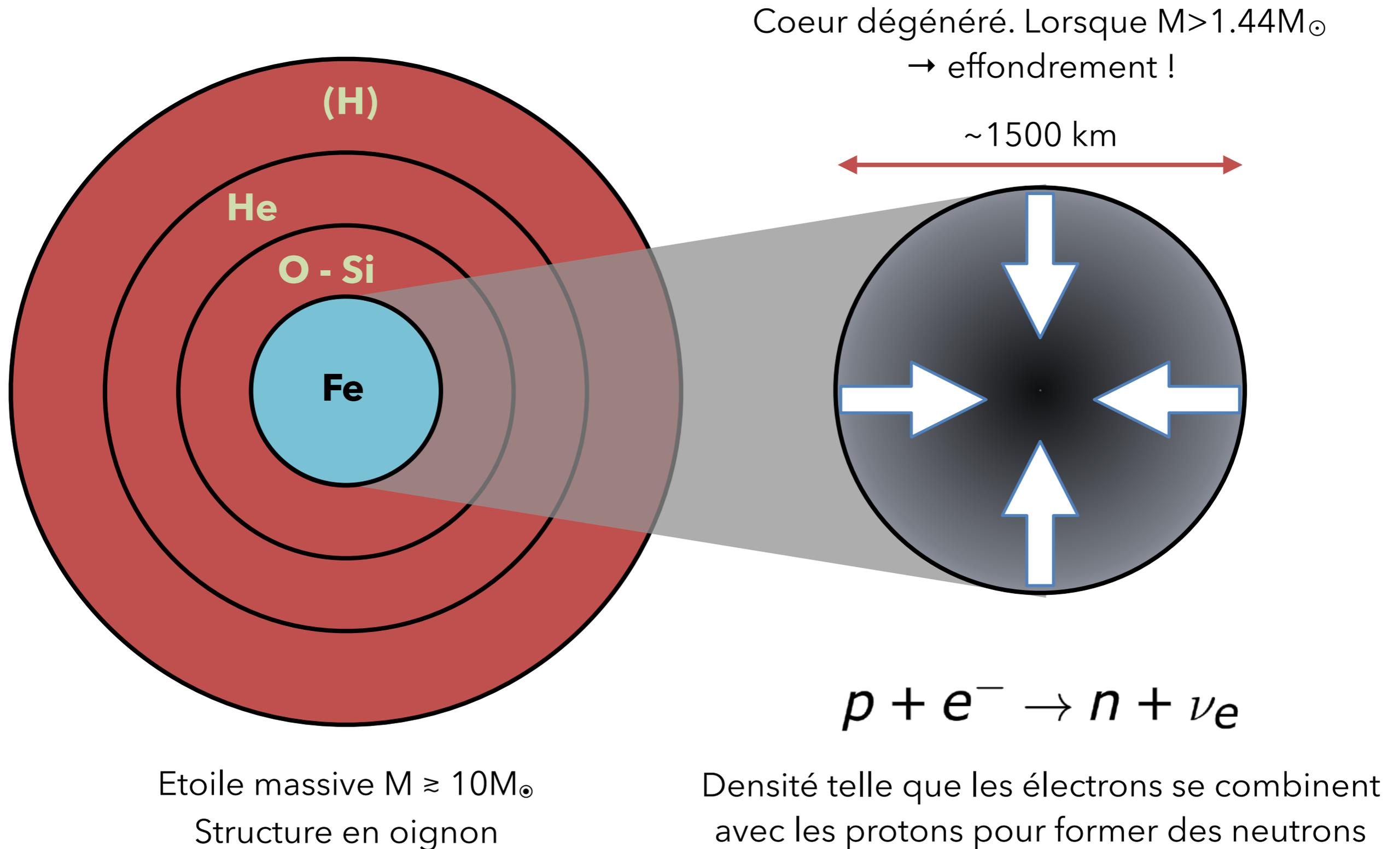
Supernova à effondrement de coeur



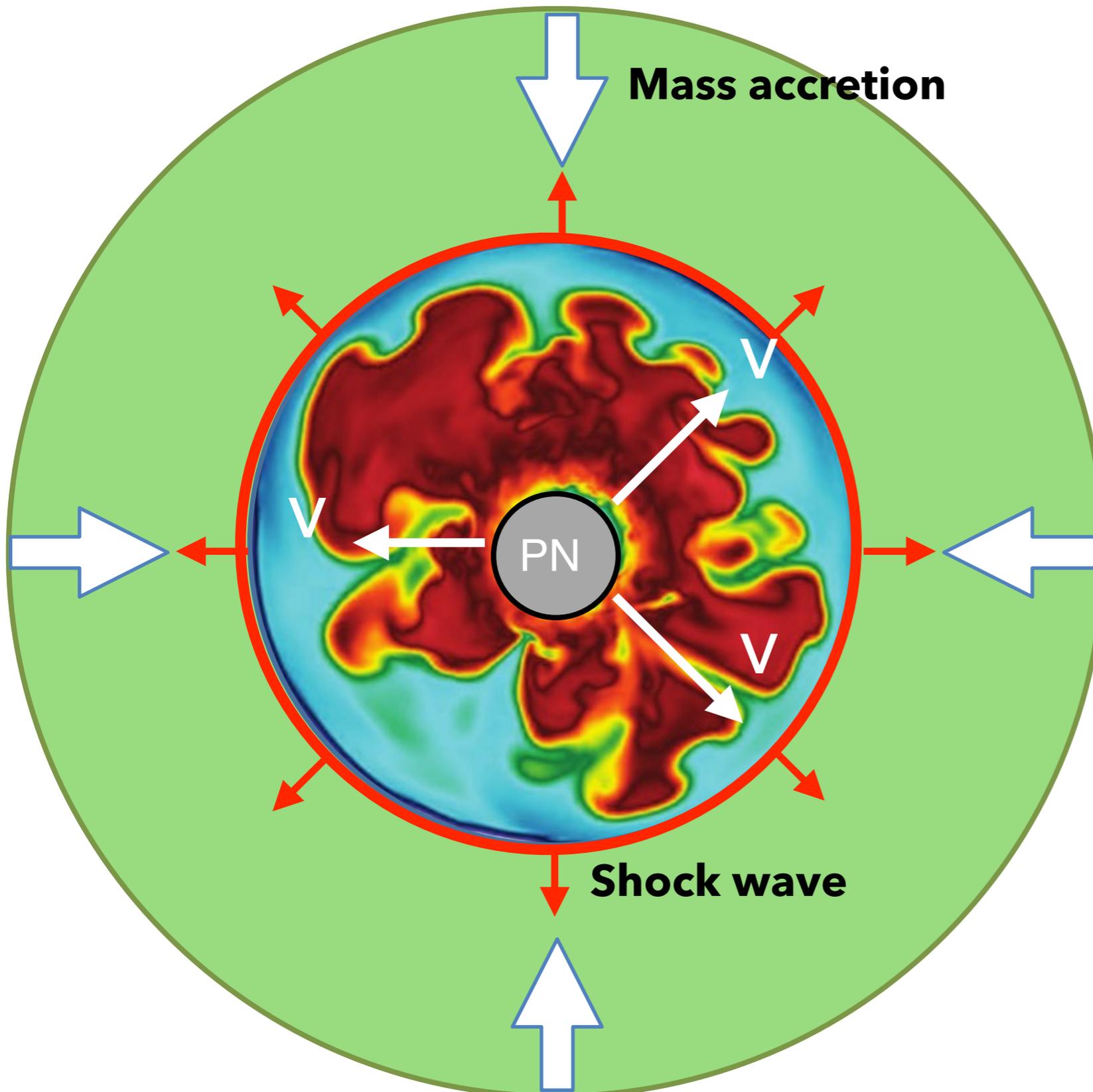
Etoile massive $M \gtrsim 10M_{\odot}$
Structure en oignon

La gravitation l'emporte !

Supernova à effondrement de coeur



Supernova à effondrement de coeur

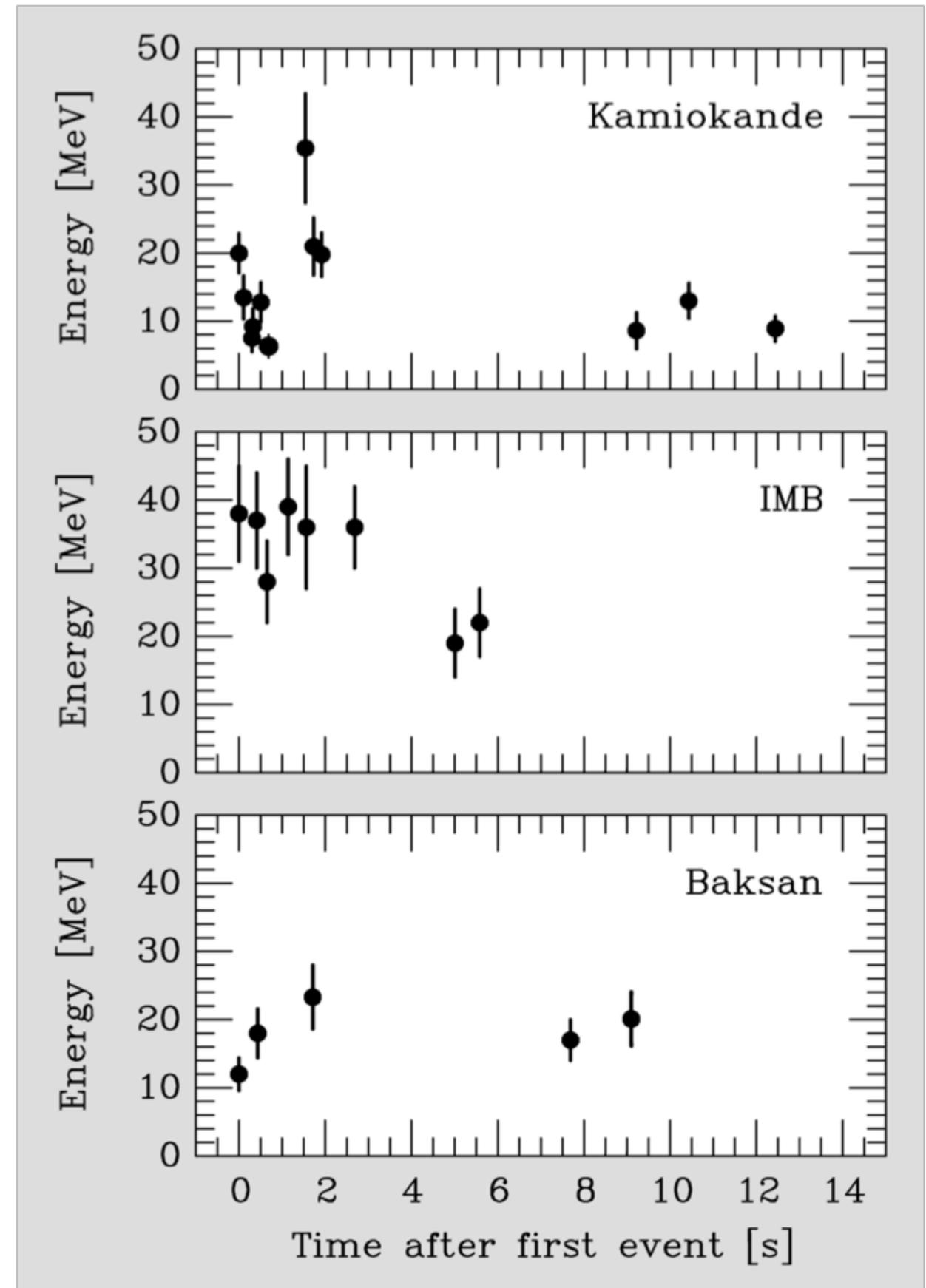
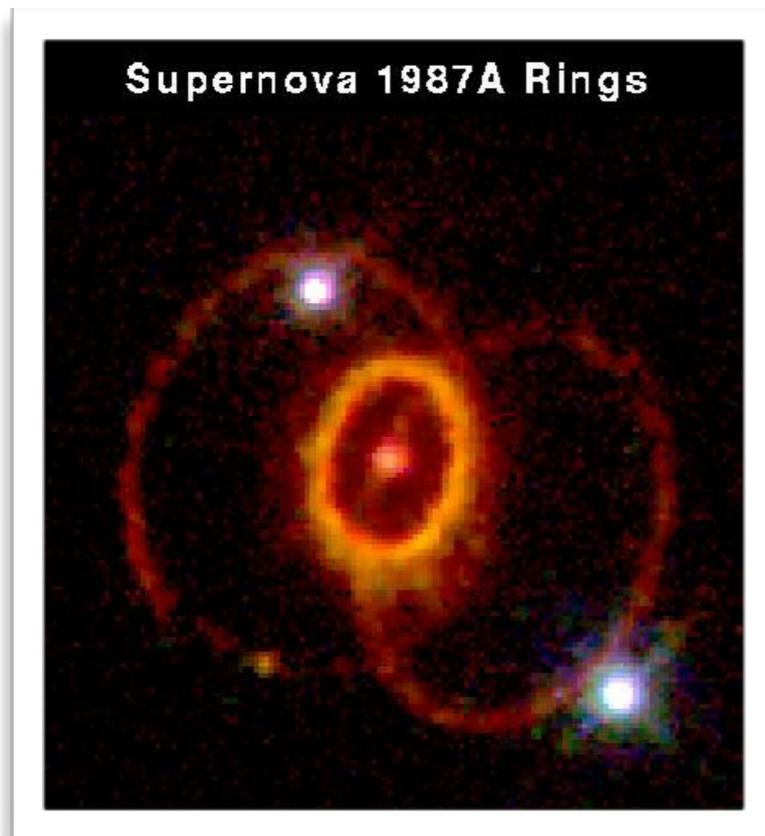


- Après quelques secondes: formation d'une proto-étoile à neutrons: gaz dégénéré de neutrons: nouvel équilibre.
- Les couches supérieures de l'enveloppe rebondissent sur le coeur
- Production d'une onde de choc
- L'onde de choc perd de l'énergie cinétique en se propageant (photodissociation du fer + capture des électrons)
- Elle regagne de l'énergie grâce au chauffage par les neutrinos (intensifié par la convection et les instabilités hydrodynamiques)
- Explosion: $\sim 10^{45}$ J libérées ! (Bombe A $\sim 10^{13}$ J)

Supernova à effondrement de coeur

SN1987A: 25 neutrinos observés
par 3 détecteurs indépendants
($>10\sigma$) en 13 sec.

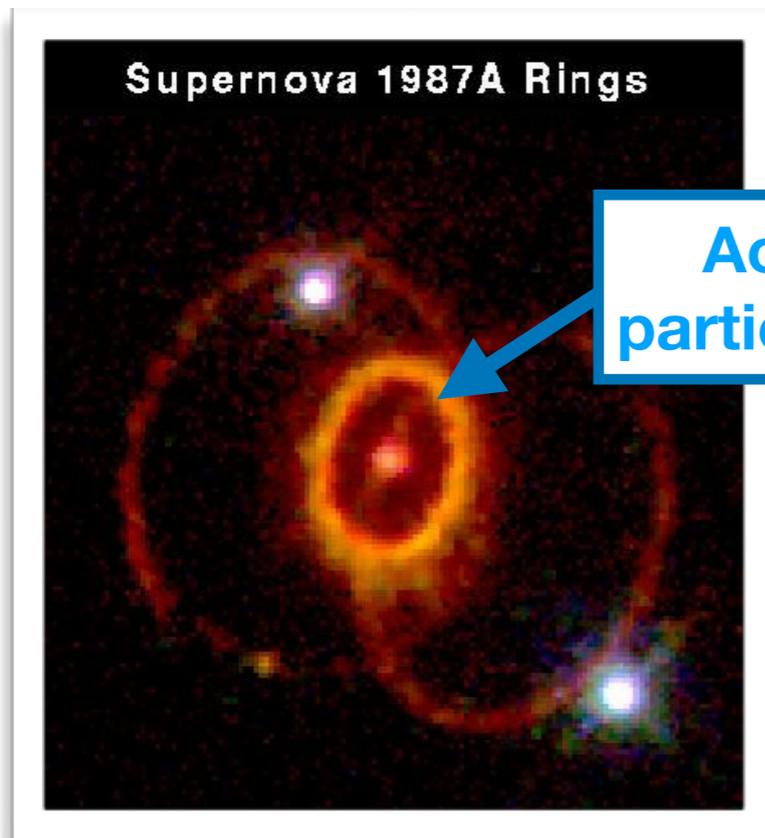
Confirme le modèle général
d'explosion des supernovae...



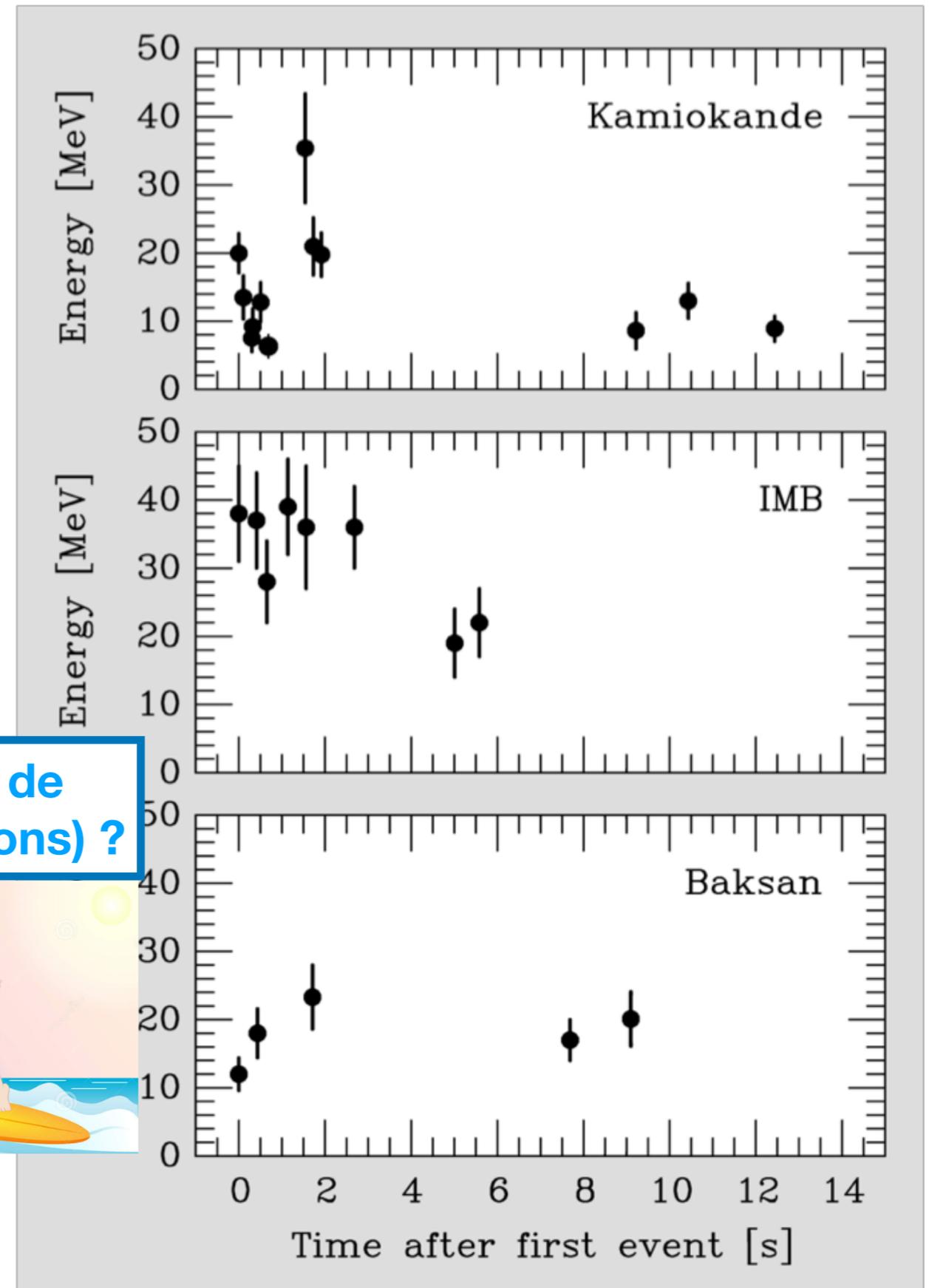
Supernova à effondrement de coeur

SN1987A: 25 neutrinos observés
par 3 détecteurs indépendants
($>10\sigma$) en 13 sec.

Confirme le modèle général
d'explosion des supernovae...



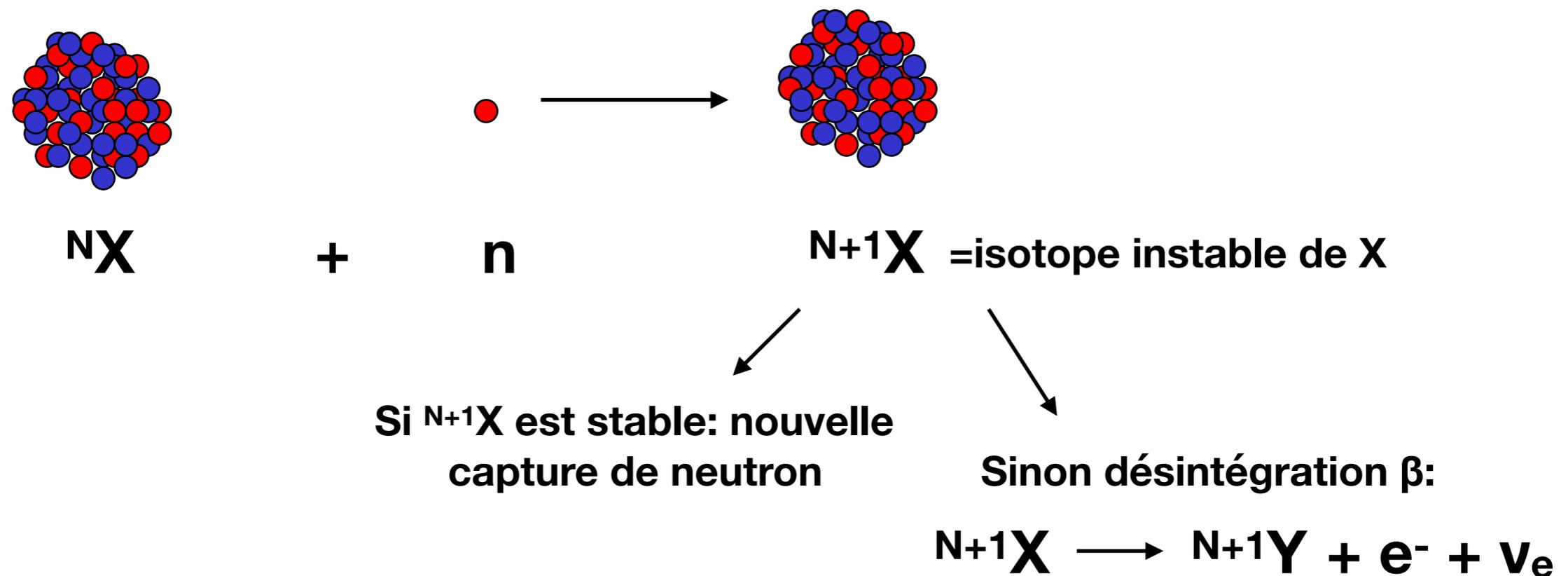
Accélération de
particules (protons) ?



Nucléosynthèse explosive dans les supernovae

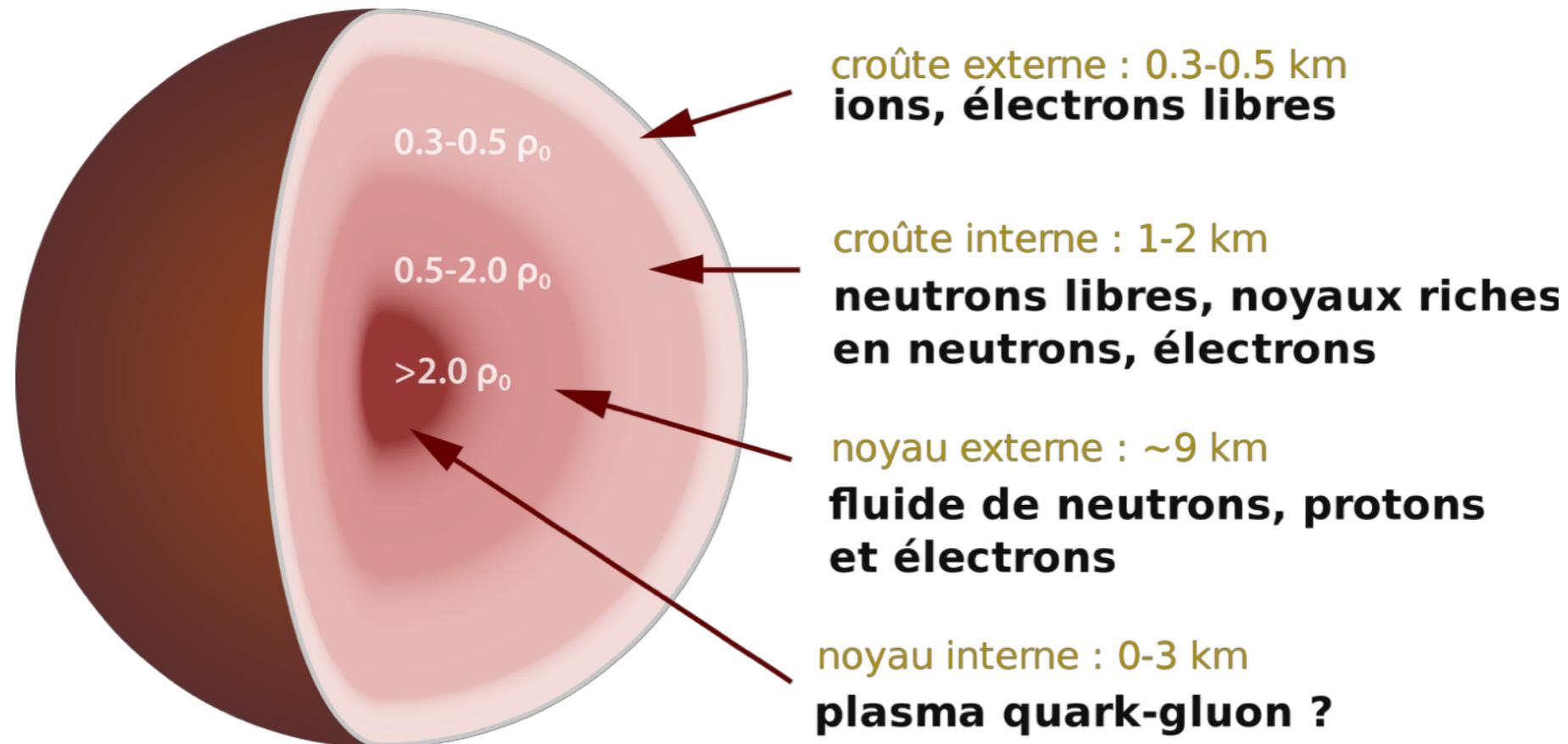
Au delà du Fer, la fusion est impossible parce qu'elle devient endothermique: l'énergie nécessaire pour passer la barrière coulombienne de noyaux très chargés est supérieure à l'énergie qu'une fusion pourrait libérer.

Seul processus capable de synthétiser des éléments plus lourds (plus riches en nucléons):
capture de neutrons « lente » (*processus s*):



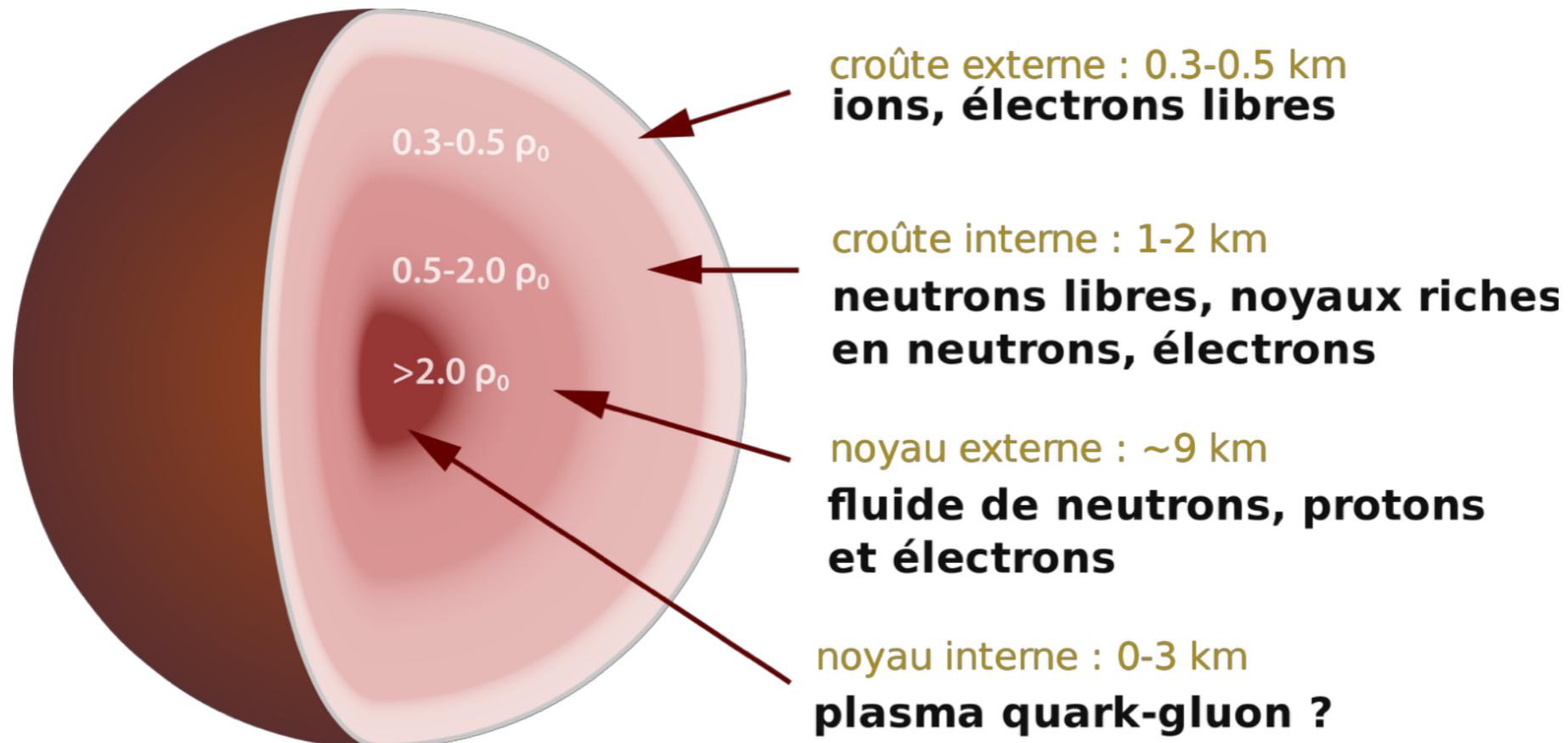
Permet de former jusqu'au plomb qui se désintègre pour former le ^{209}Bi (élément très stable).

Fin de vie des étoiles massives: étoiles à neutrons



- Mesure du rayon possible par observation de l'émission thermique (rayons X) ou par le redshift gravitationnel (donne accès à M/R) ou masse accessible par l'étude des systèmes doubles (prise en compte de la relativité générale) → **$M \sim 1-2M_\odot$ et $R \sim 10$ km** → **$1\text{mm}^3 \sim M_{\text{tour Eiffel}}$**
- Vitesse de rotation:

Fin de vie des étoiles massives: étoiles à neutrons

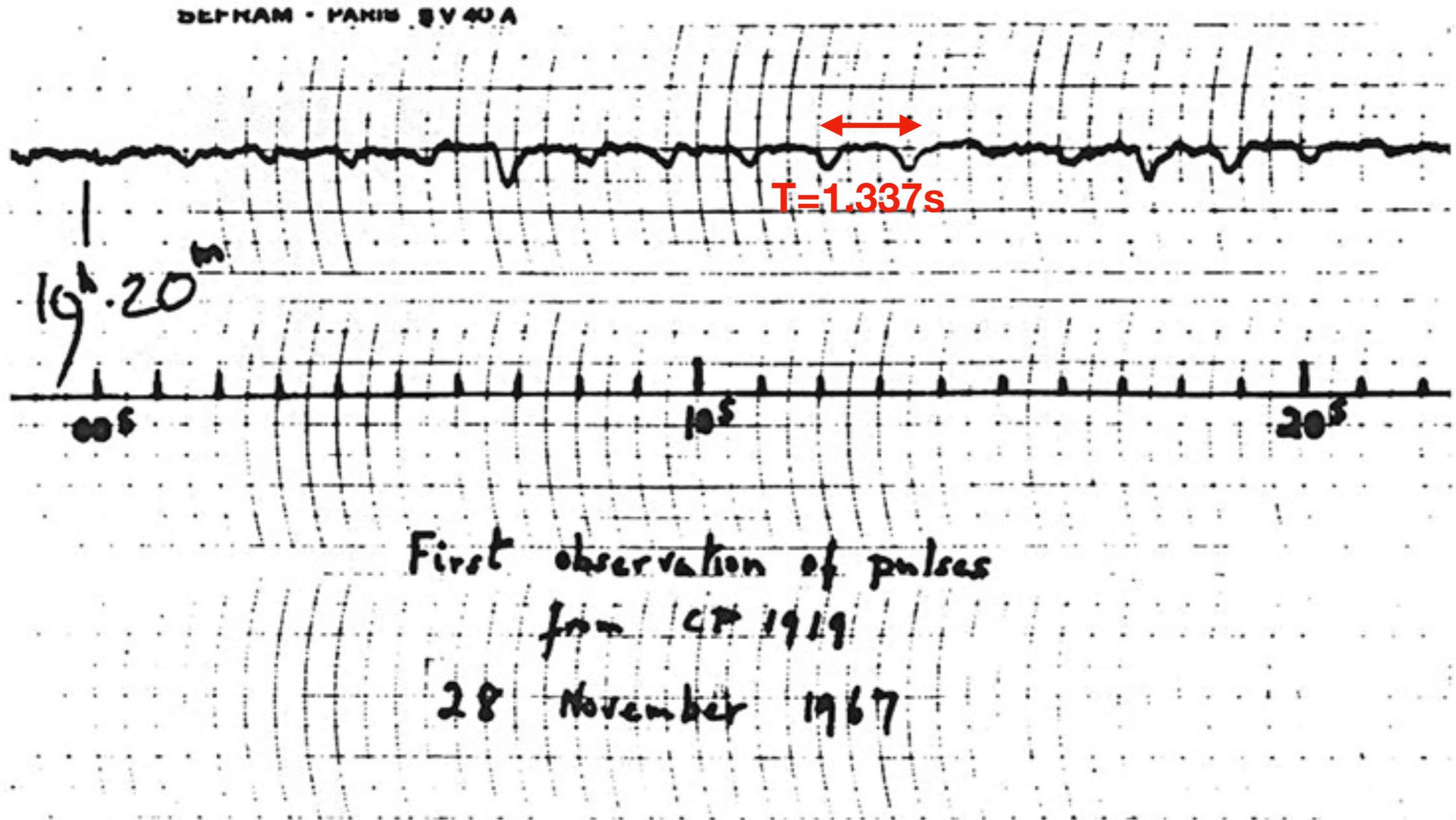


- Mesure du rayon possible par observation de l'émission thermique (rayons X) ou par le redshift gravitationnel (donne accès à M/R) ou masse accessible par l'étude des systèmes doubles (prise en compte de la relativité générale) → **$M \sim 1-2M_\odot$ et $R \sim 10$ km** → **$1\text{mm}^3 \sim M_{\text{tour Eiffel}}$**
- Vitesse de rotation:

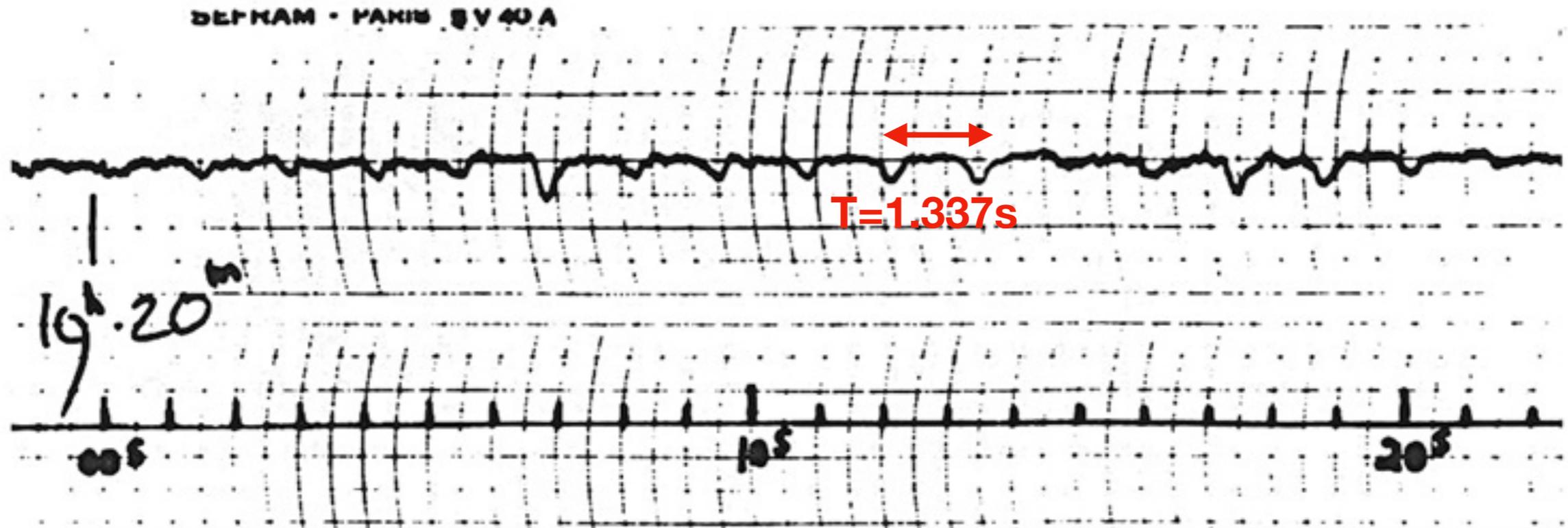
Conservation du moment cinétique $I\omega \propto M R^2 \omega$. R diminue → I diminue donc ω augmente.

Si $R_i \sim 700\,000$ km, $\omega_i = 1$ tour/1mois, $R_f = 10$ km → $\omega_f = 4.9 \cdot 10^9 \omega_i$ → **~ 2 tours/ms !**

Une manifestation observable: les pulsars



Une manifestation observable: les pulsars



Observation of a Rapidly Pulsating Radio Source

by

A. HEWISH
 S. J. BELL
 J. D. H. PILKINGTON
 P. F. SCOTT
 R. A. COLLINS

Mullard Radio Astronomy Observatory,
 Cavendish Laboratory,
 University of Cambridge

Unusual signals from pulsating radio sources have been recorded at the Mullard Radio Astronomy Observatory. The radiation seems to come from local objects within the galaxy, and may be associated with oscillations of white dwarf or neutron stars.

Prix Nobel 1974 pour A. Hewish

Une manifestation observable: les pulsars

Comment sait-on qu'il s'agit probablement d'une étoile à neutrons ?

Une manifestation observable: les pulsars

Comment sait-on qu'il s'agit probablement d'une étoile à neutrons ?

Si la force centrifuge est supérieure à la force de gravitation, la matière superficielle de l'étoile est arrachée. Pour éviter cela il faut:

$$\frac{GMm}{R^2} > m\omega^2 R$$

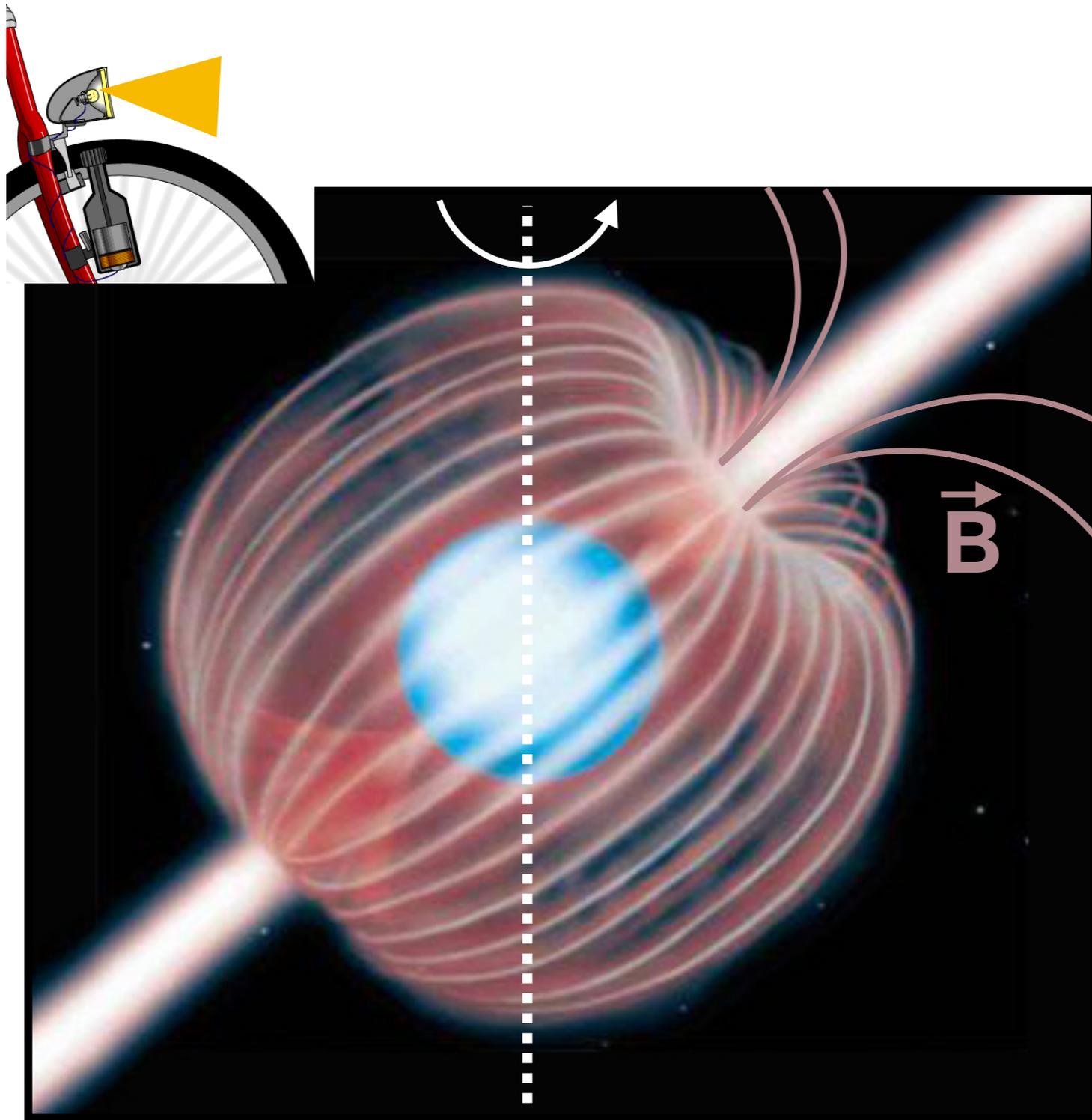
$$\Rightarrow \rho > \frac{3\pi}{GP^2}$$

Avec $P=1.337$ s, on obtient $\rho > 10^{11}$ kg/m³

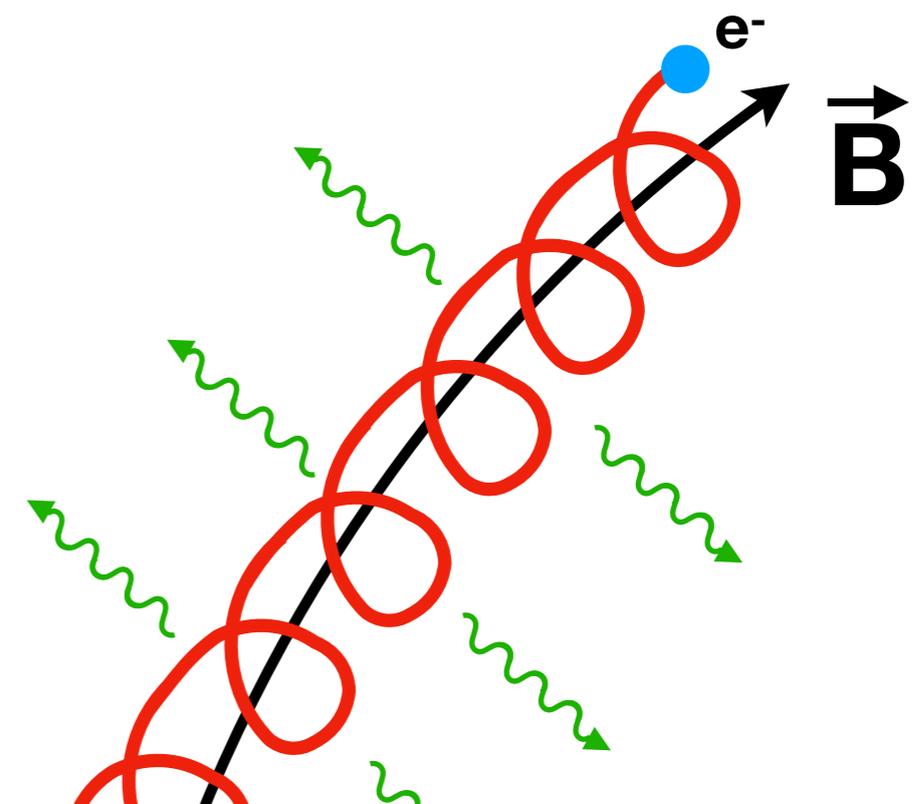
Or pour une naine blanche: $\rho \sim 10^9$ kg/m³

Il s'agit donc probablement d'une étoile à neutrons...ou d'un phénomène plus exotique encore...

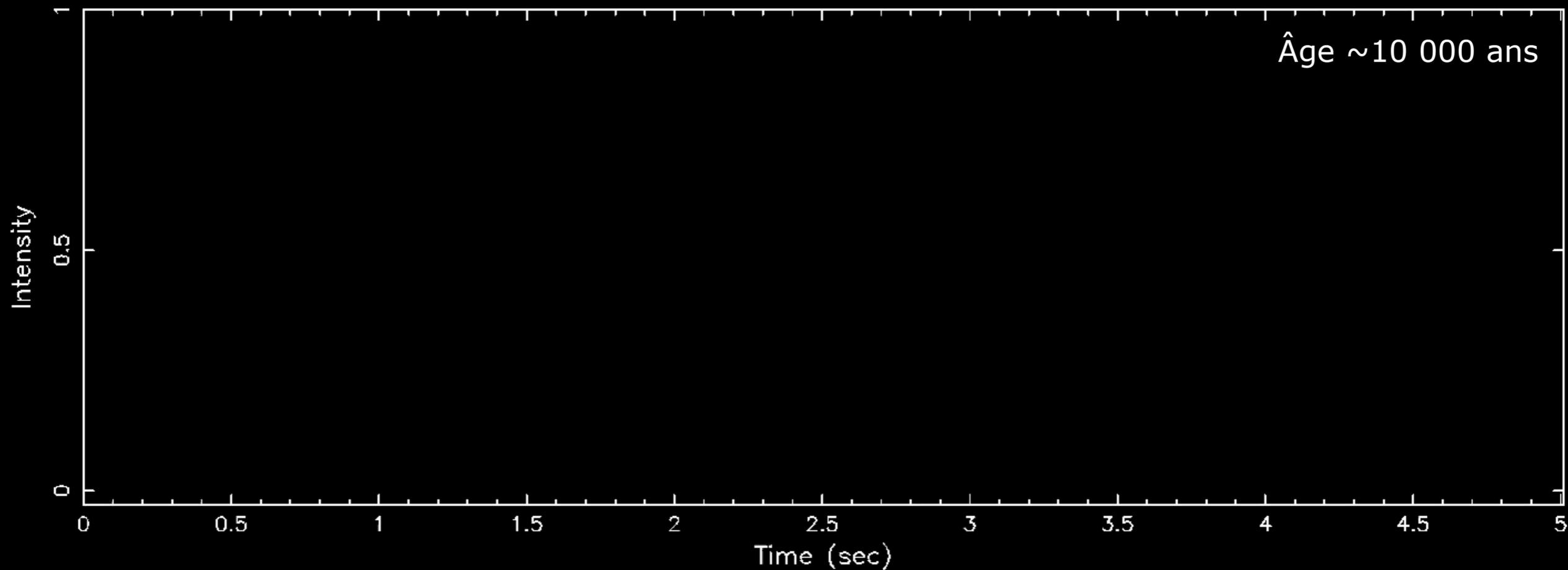
Une manifestation observable: les pulsars



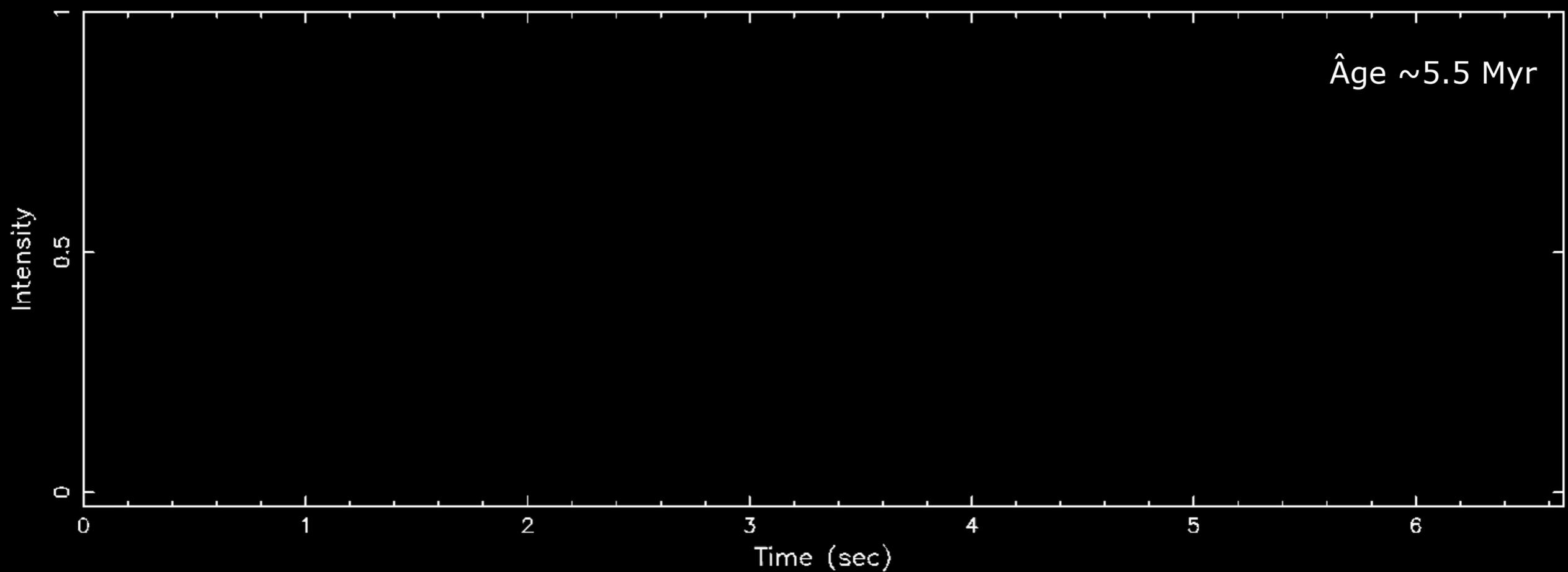
- Pulsar tourne très vite sur lui même
- Champ magnétique très intense car conservation du flux magnétique (10^8 T)
- Electrons relativistes qui s'échappent spiralent autour des lignes de champ et sont accélérés \rightarrow rayonnement synchrotron qui s'échappe par les pôles magnétiques de l'astre : faisceau lumineux à l'image d'un phare détecté en radio



Vela pulsar observed with the Parkes telescope in Australia



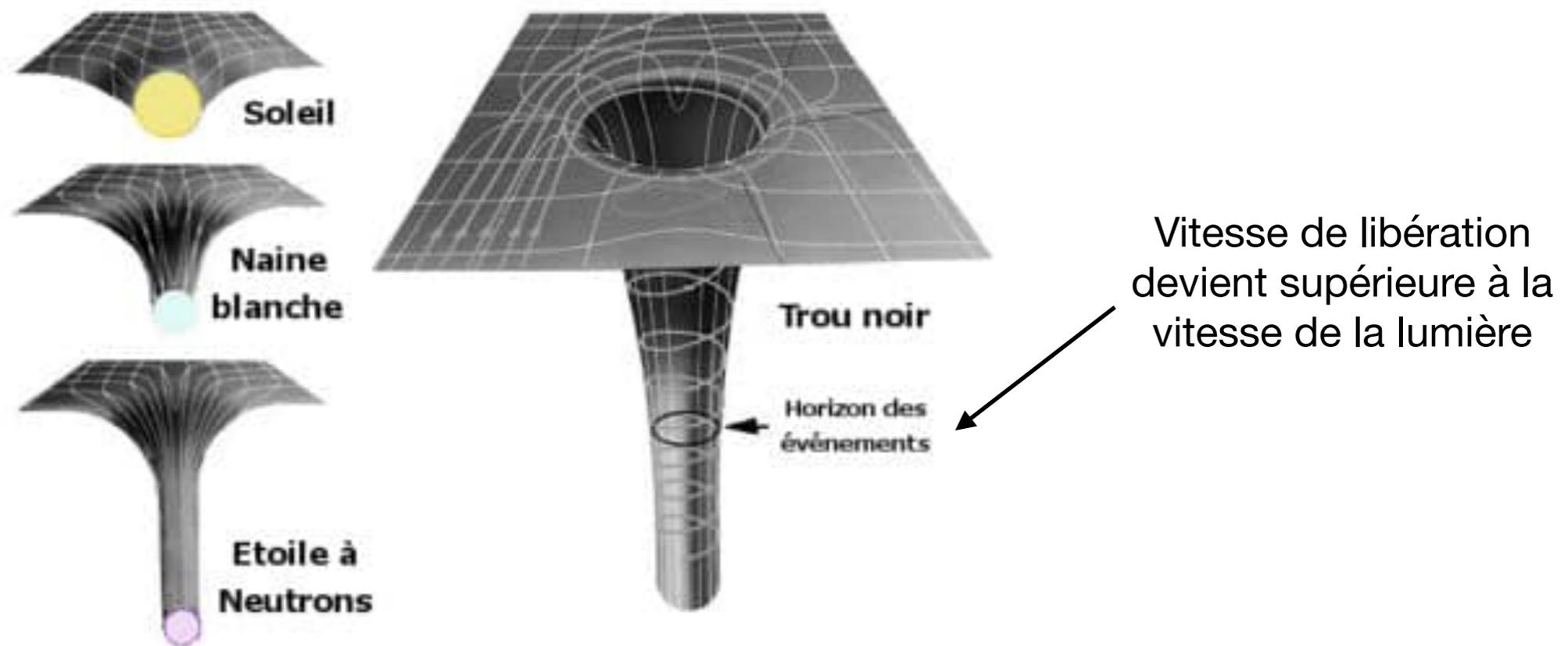
Pulsar B0329+54 observed with the Lovell telescope at Jodrell Bank



Fin de vie des étoiles massives: trous noirs

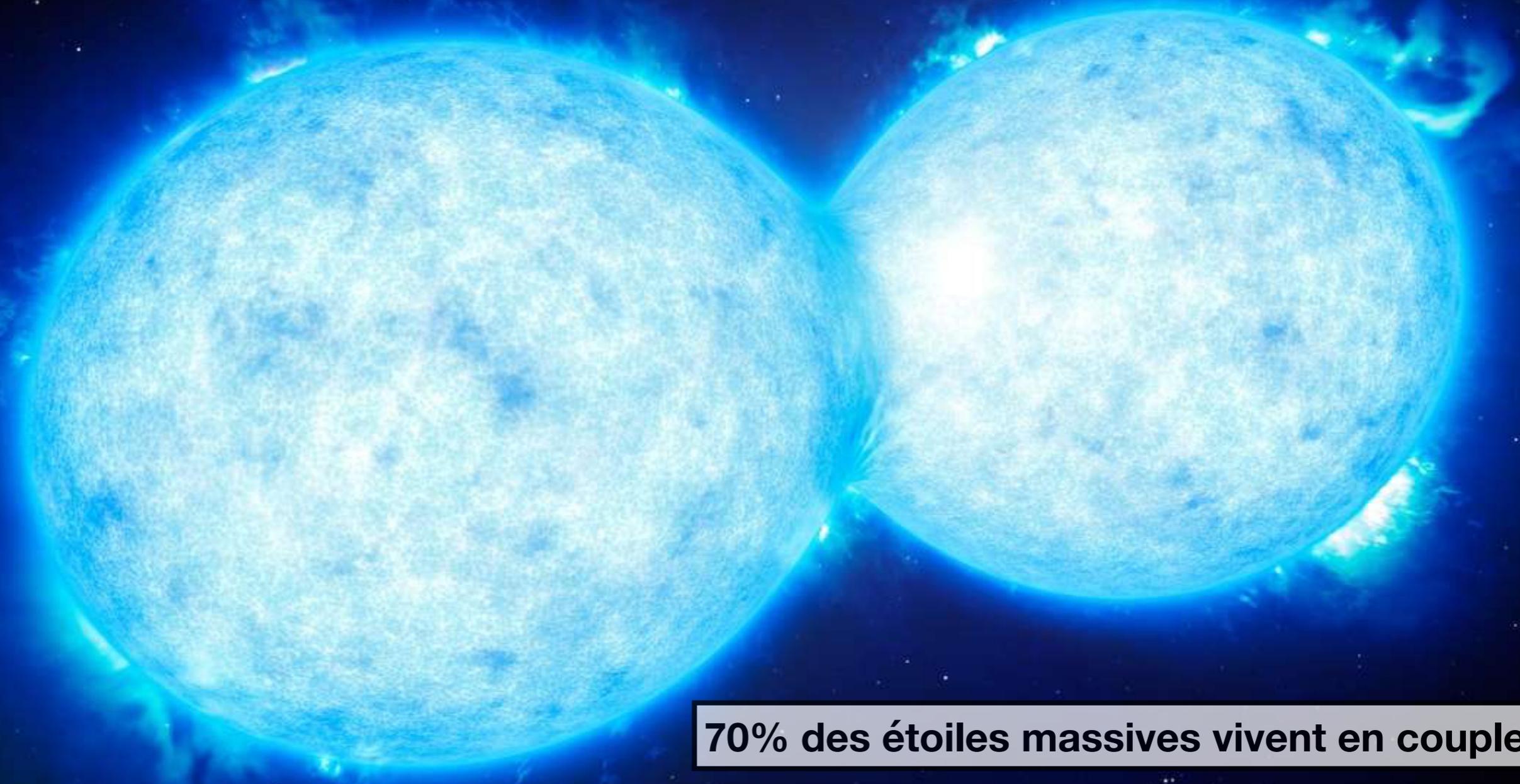
Lorsque l'étoile initiale est suffisamment massive, l'énergie libérée lors de la contraction peut vaincre la pression de dégénérescence des neutrons ! (se produit à des densités de dizaines de milliards de tonnes par cm^3).

Le puits de potentiel ainsi formé déforme l'espace-temps (relativité générale) de sorte que même les photons ne peuvent s'échapper: trou noir !



Comment détecter ces astres invisibles par nature (issus de la mort des étoiles les plus massives) ??

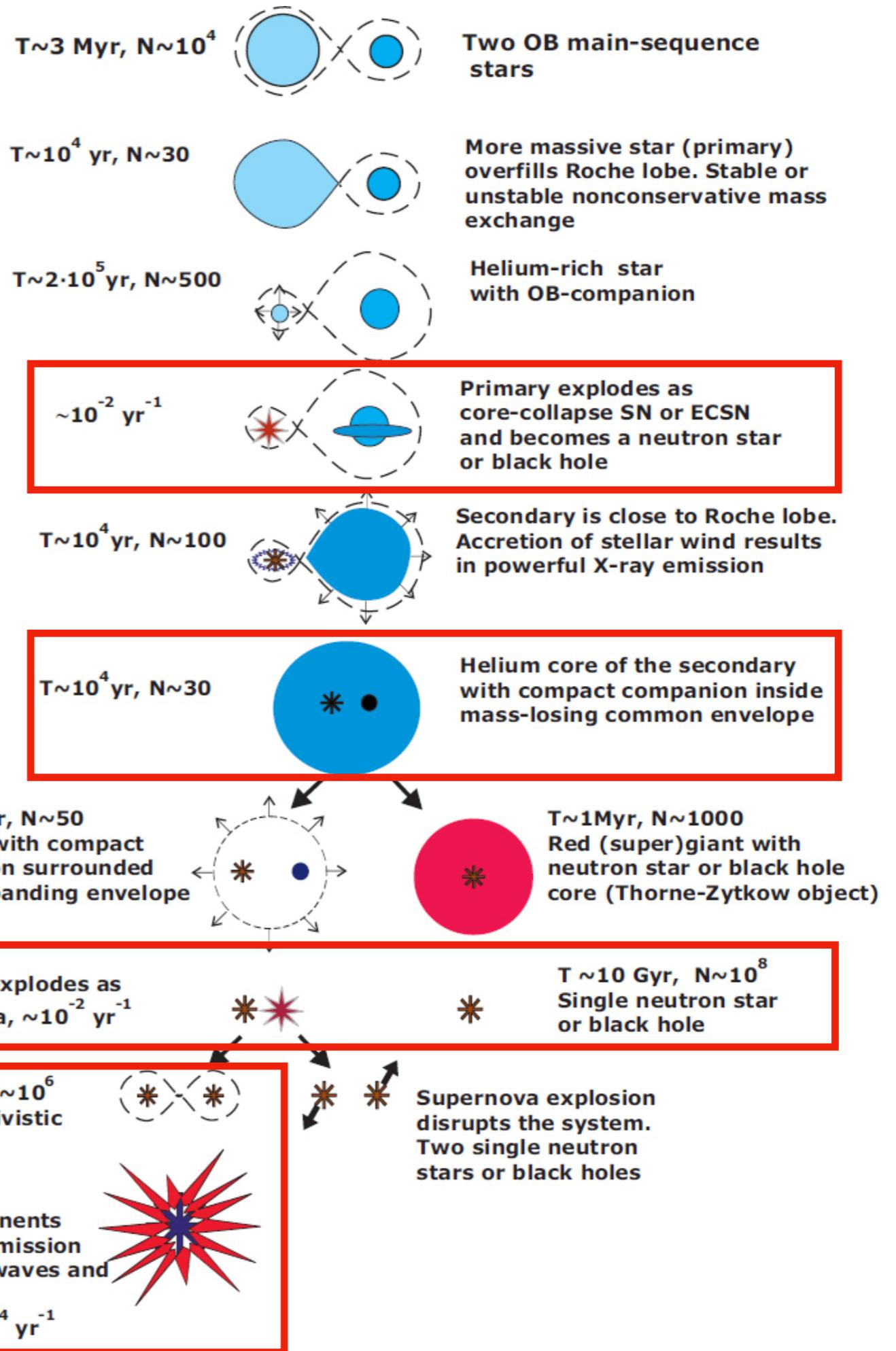
Evolution des systèmes stellaires binaires



70% des étoiles massives vivent en couple...

Systemes binaires

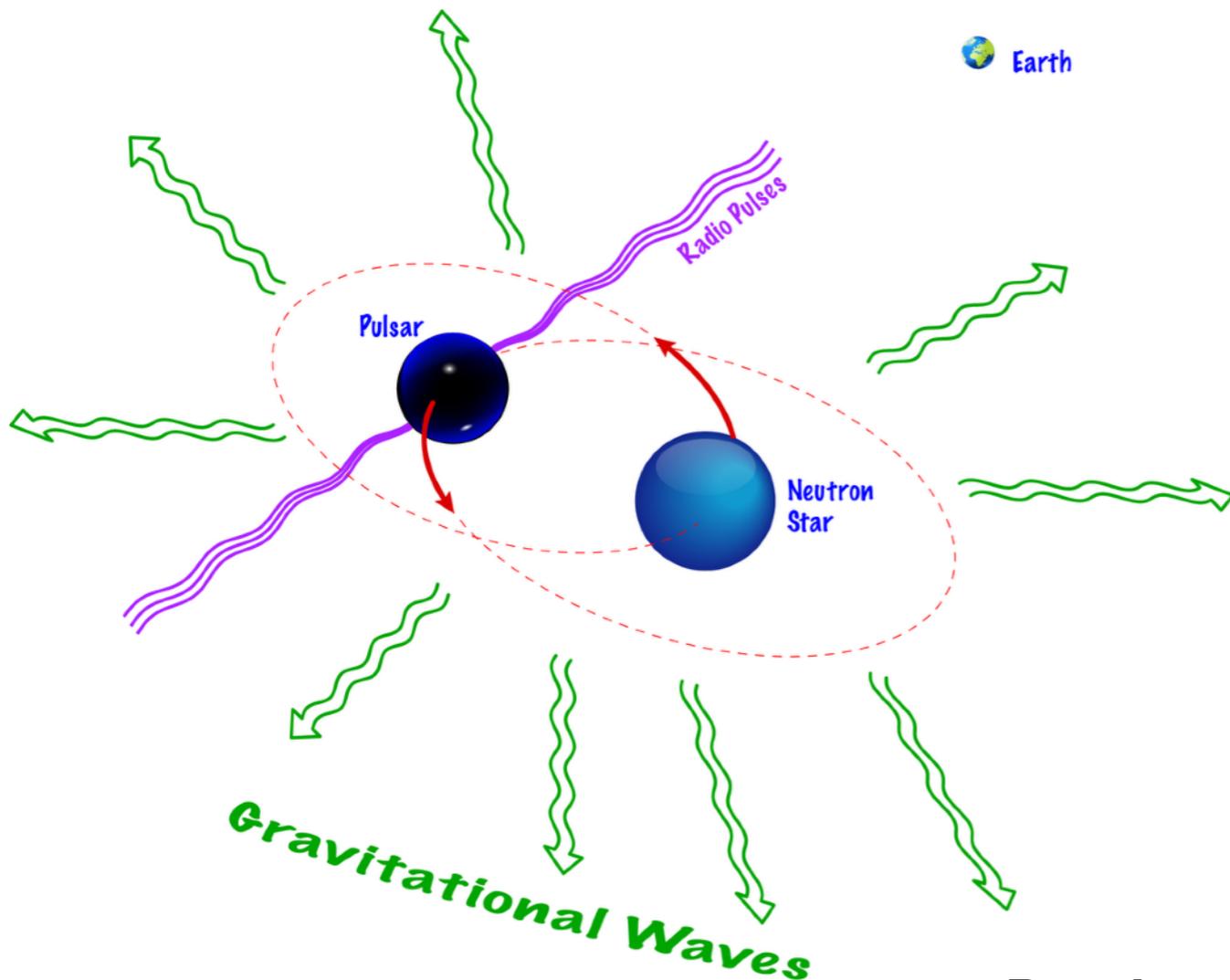
- Plusieurs obstacles à franchir :**
- Explosion des supernovae
 - Phase d'enveloppe commune
 - Faible période orbitale



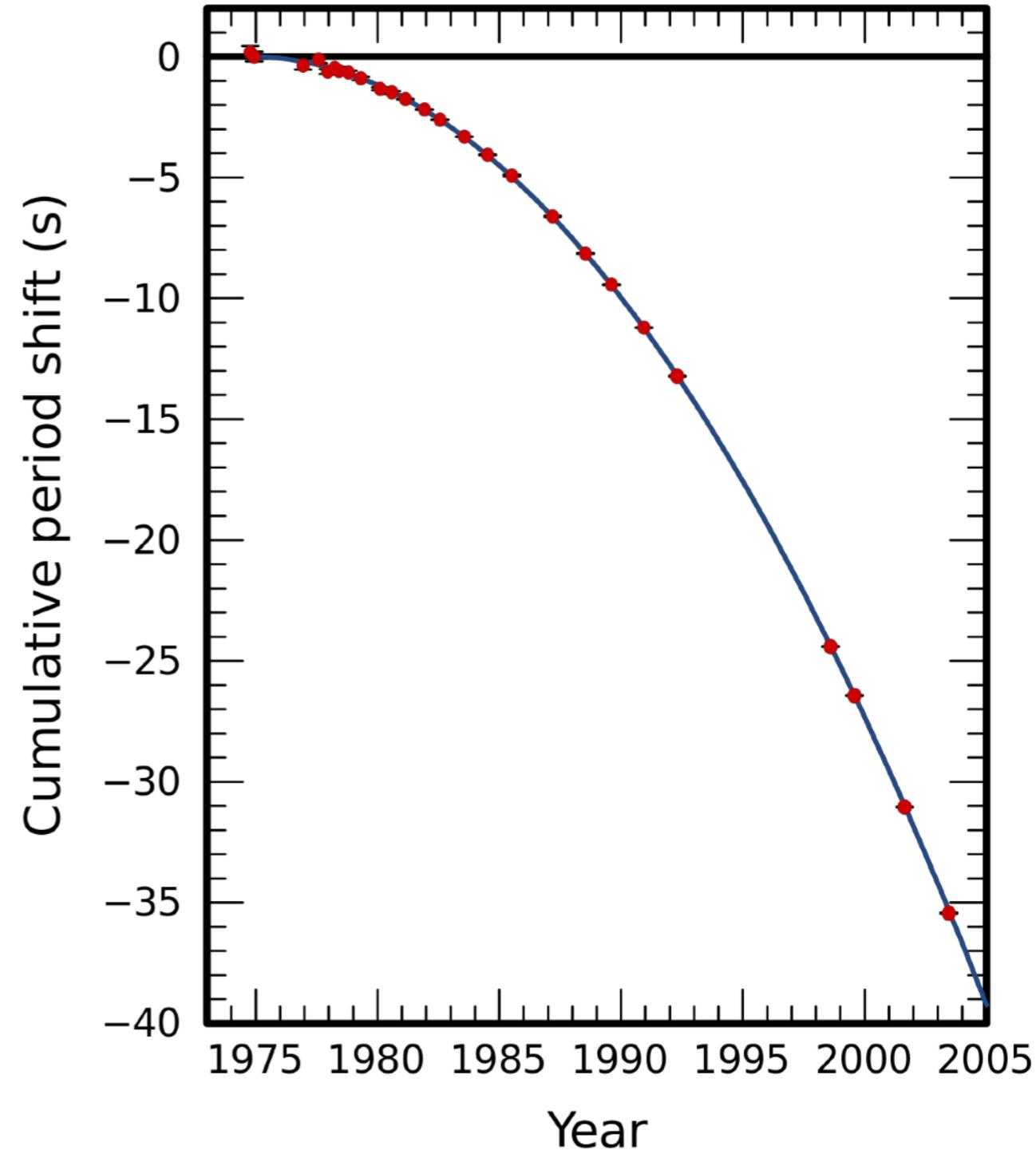
Première preuve :

Plusieurs obstacles à franchir :

- Explosion des supernovae
- Phase d'enveloppe commune
- Faible période orbitale



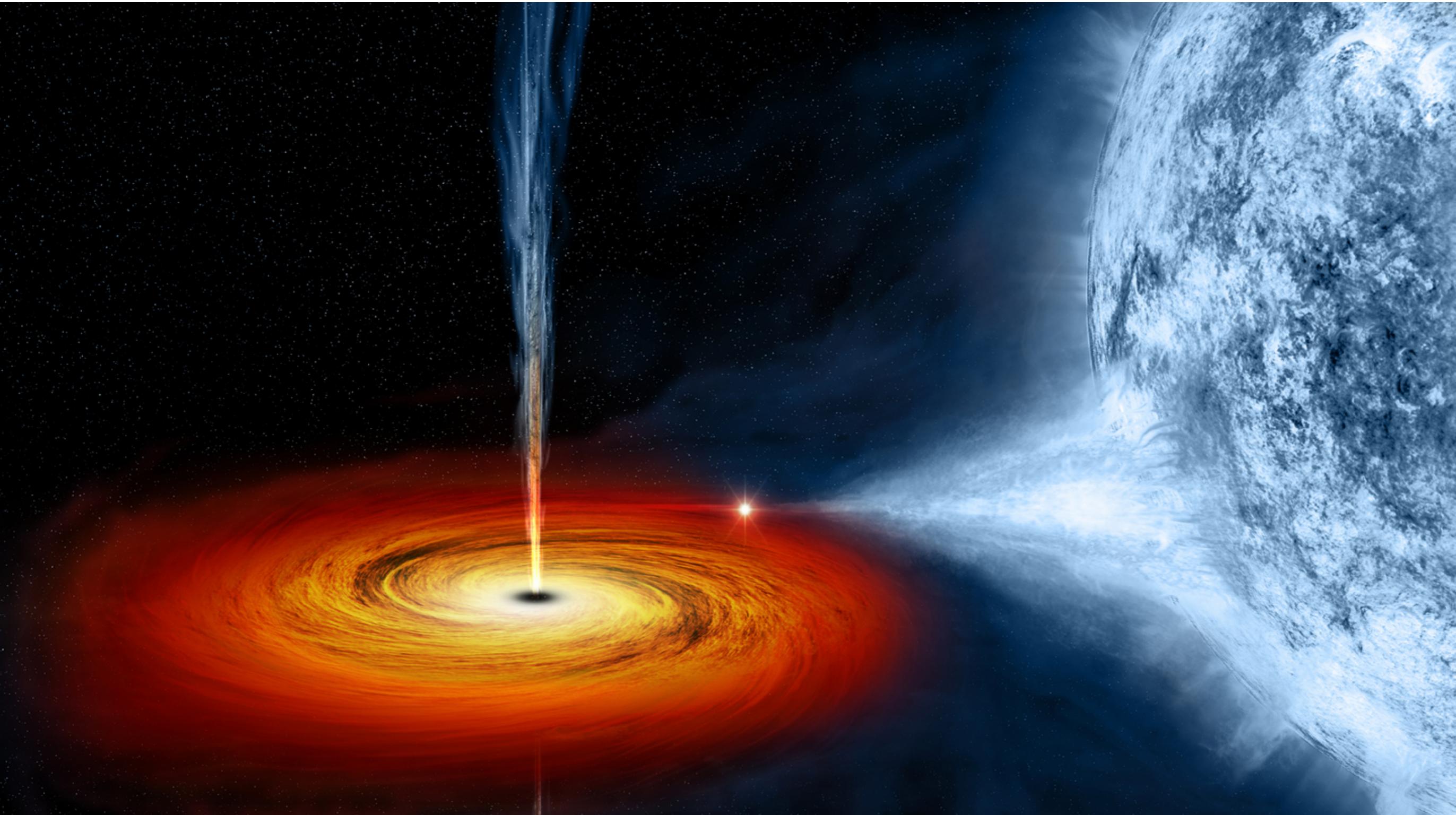
Prix Nobel de Physique (1993)
Hulse & Taylor (Princeton)



Demi-grand axe diminue de 3,5 m par an.

Binaires X

Lorsque l'étoile la plus massive atteint la fin de sa vie...



Binaires X

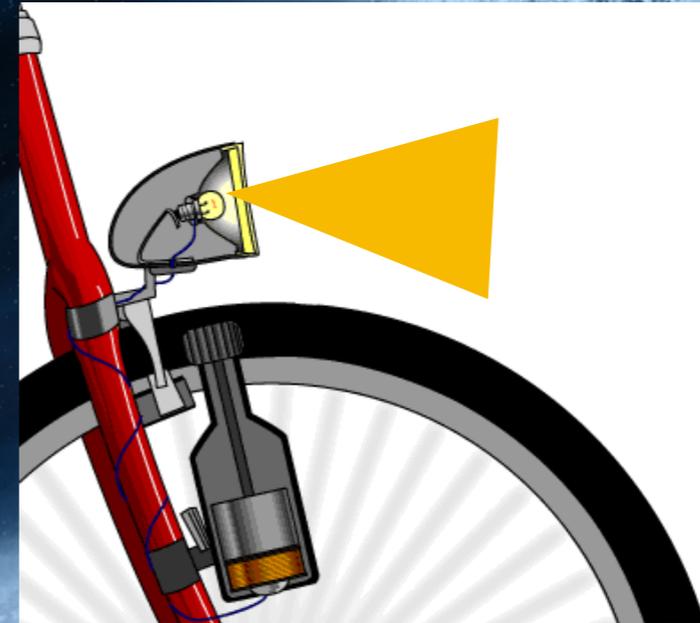
Lorsque l'étoile la plus massive atteint la fin de sa vie...



Ski descente: ~ 2 kW

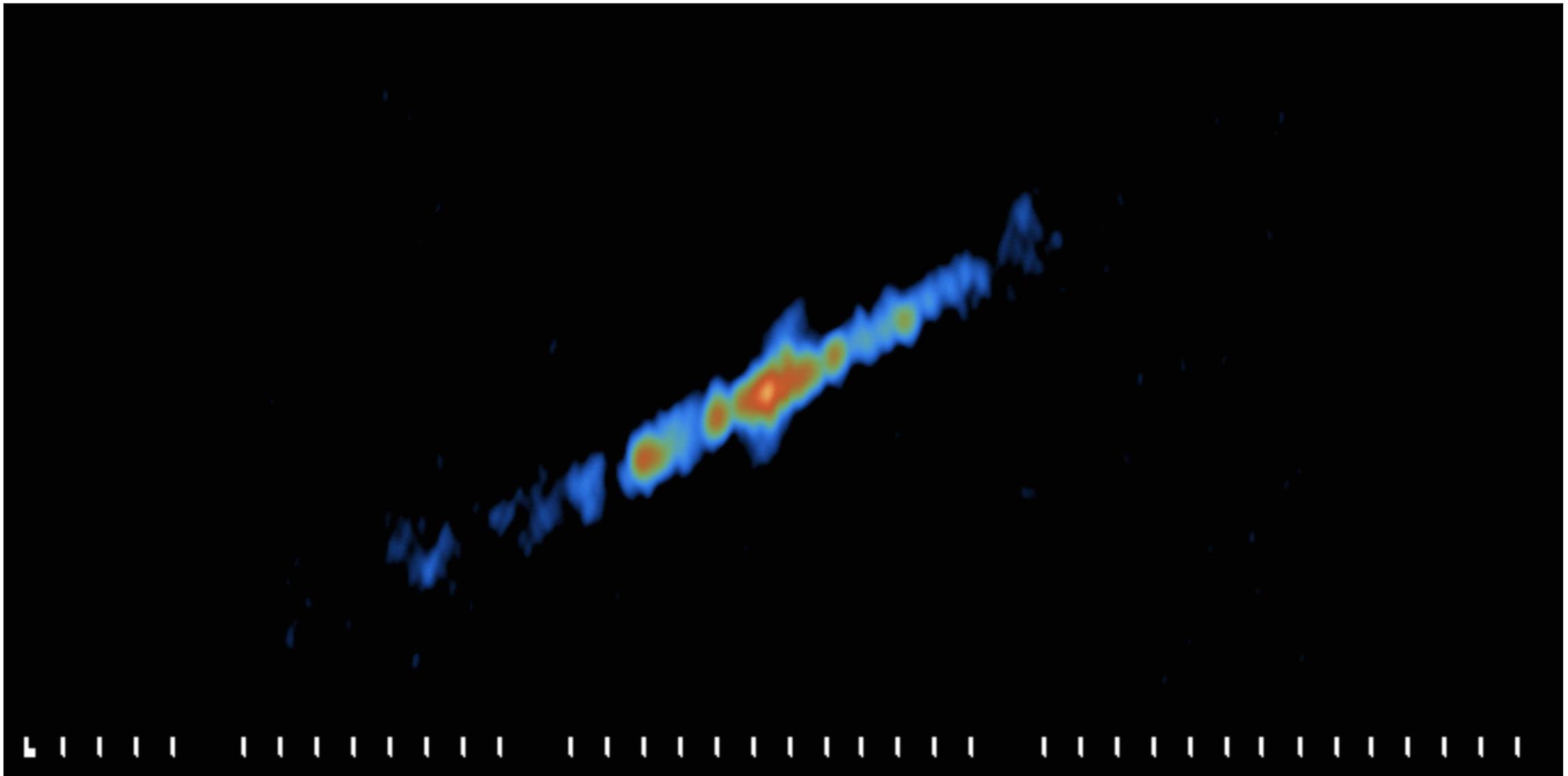
Chute sur trou noir: $\sim 10^{28}$ kW

$\sim 10\%$ de cette énergie éjectée



Binaires X

Lorsque l'étoile la plus massive atteint la fin de sa vie...

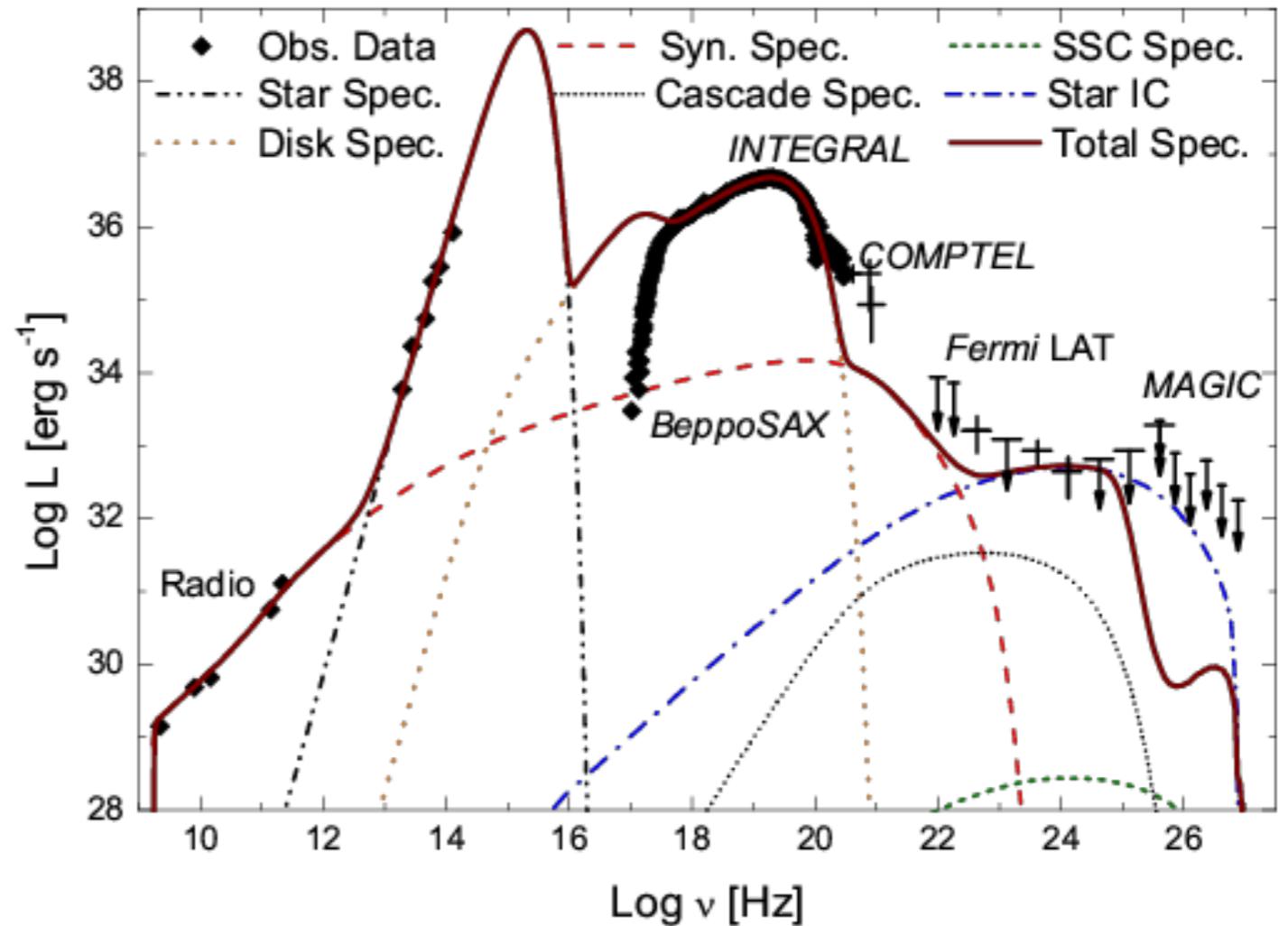


Binaires X

Lorsque l'étoile la plus massive atteint la fin de sa vie...

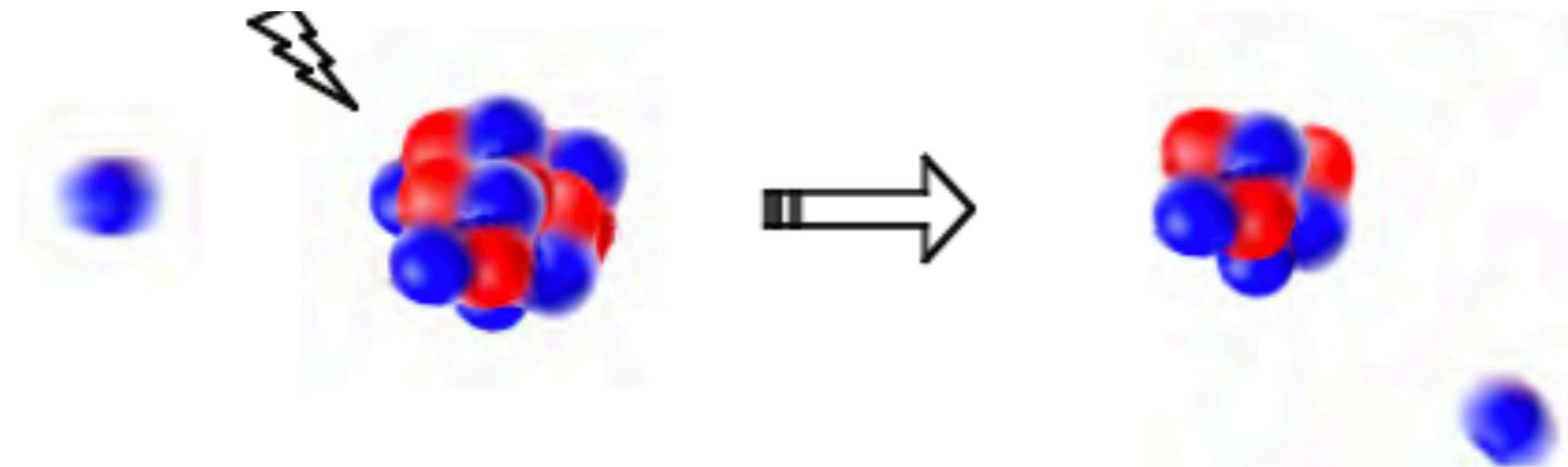
Analyse des observations multi-longueurs d'onde permet de:

- estimer la masse de l'objet compact (~4Msun)
- étudier le couplage accrétion/éjection
- variabilité temporelle de l'émission X et radio



Nucléosynthèse (suite)

- Nucléosynthèse primordiale: H, D, He
- Nucléosynthèse stellaire et explosives: éléments après 12 nucléons jusqu'au fer !
- Qu'en est-il du Li, Be, B ?? → Spallation par les rayons cosmiques



Qu'en est-il des éléments plus lourds que le Plomb ?