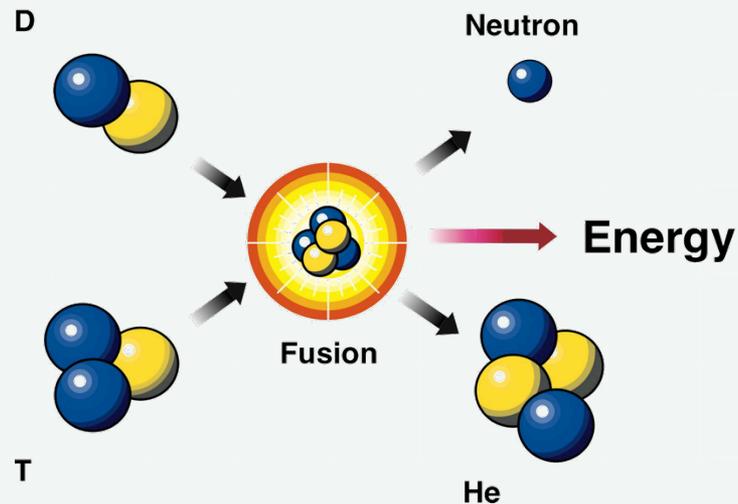


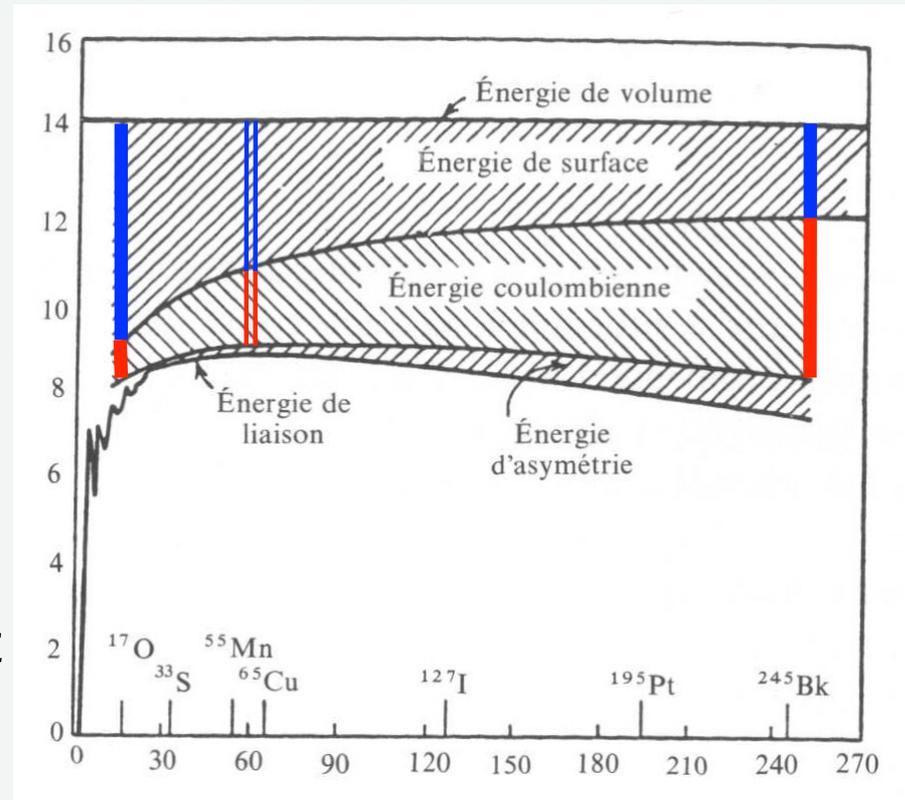
Chapitre 5

La fusion sur terre et dans les étoiles



Fusion

- 🌐 Origine : compétition des énergies coulombiennes et surfaciques
- 🌐 **La Fusion** se produit car les noyaux légers ont une trop grande énergie de surface par rapport à leur volume. L'énergie de surface décroît quand ils fusionnent. L'énergie coulombienne croît, mais l'effet est plus petit.



- Il est énergétiquement favorable pour les noyaux légers de fusionner pour libérer de l'énergie. Toutefois, les noyaux ont besoin d'énergie pour vaincre la barrière coulombienne

Le processus le plus basique est : $p + p \longrightarrow d + e^+ + \nu_e$ $E_f = 0.42 \text{ MeV}$

Dans ce cas, la hauteur de la barrière coulombienne est :

$$V = \frac{\alpha \hbar c}{r_0} = \frac{197}{137 \times 1.2} = 1.2 \text{ MeV}$$

- Ces énergies sont aisément atteintes avec un accélérateur. En revanche, atteindre une haute densité de particule pendant un temps assez long est difficile à obtenir. C'est une condition obligatoire pour obtenir un taux de réactions de fusion suffisant pour la génération d'énergie.
- Dans les étoiles, il y a une grande densité de protons (10^{32} m^{-3}), and ces protons ont une énergie cinétique due au mouvement thermique.

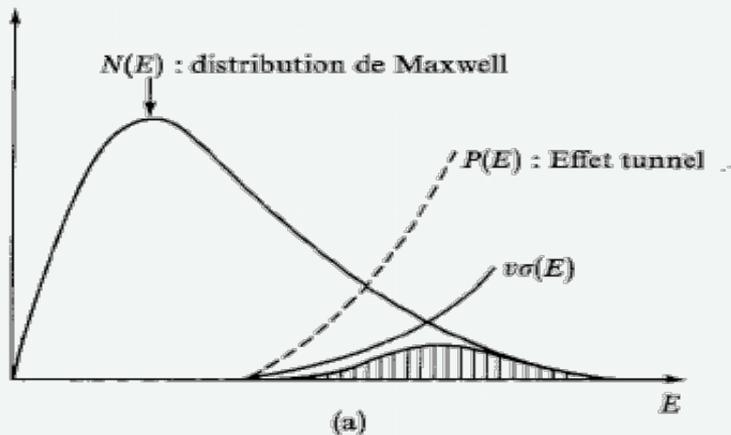
Obtenir $kT \approx 1 \text{ MeV}$ nécessite $T \approx 10^{10} \text{ K}$

A l'intérieur du soleil, $T \approx 10^7 \text{ K}$, i.e. $\langle kT \rangle \approx 1 \text{ keV}$

⇒ Effet tunnel requis

Fusion dans le soleil

- Les particules dans le soleil suivent la distributions des vitesses de Maxwell-Boltzman.
- La probabilité de franchissement de la barrière par effet tunnel est une fonction qui dépend exponentiellement de l'énergie (donc de la vitesse)
→ Les queues de la distribution de Maxwell-Boltzman sont importantes.



- Considérons la réaction

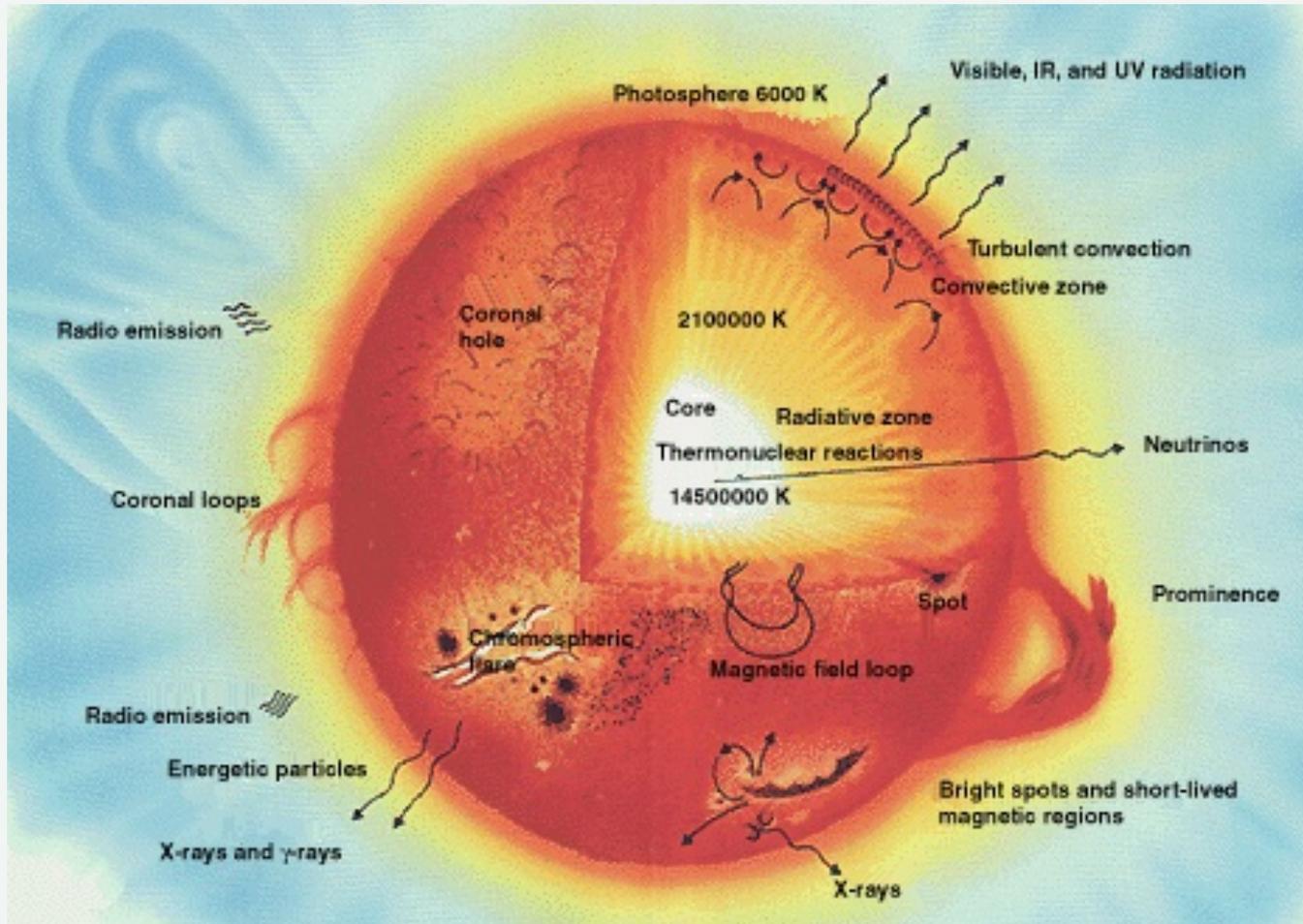


Taux de Réaction /proton/s $\approx 5 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$

Valeur très faible, mais compensée par le très grand nombre de protons dans le soleil.

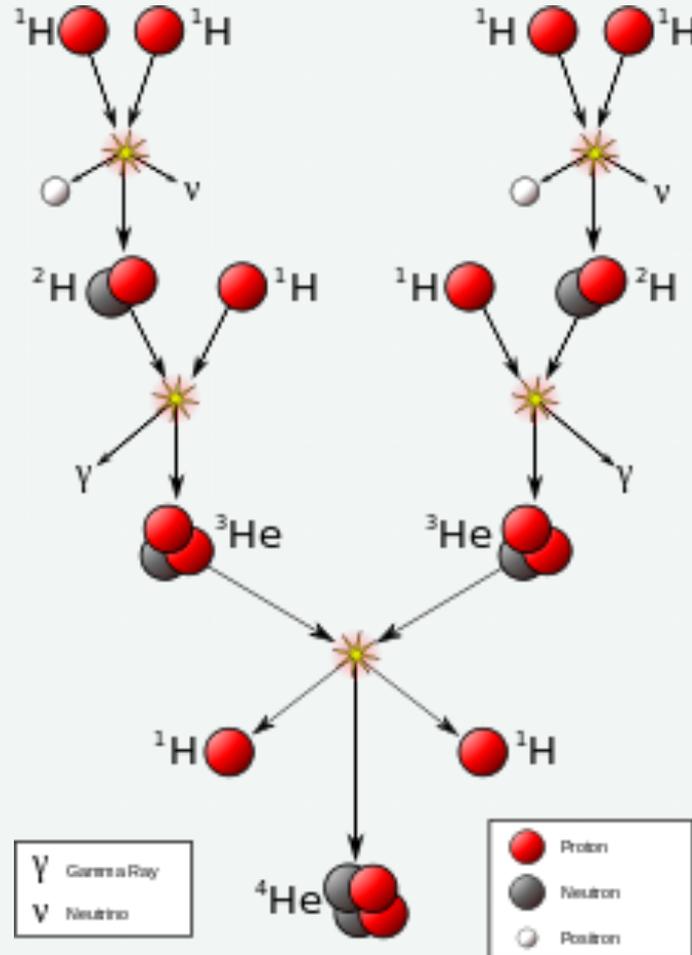
⇒ A cette vitesse, le temps de vie du soleil est 10^{10} années

Le soleil



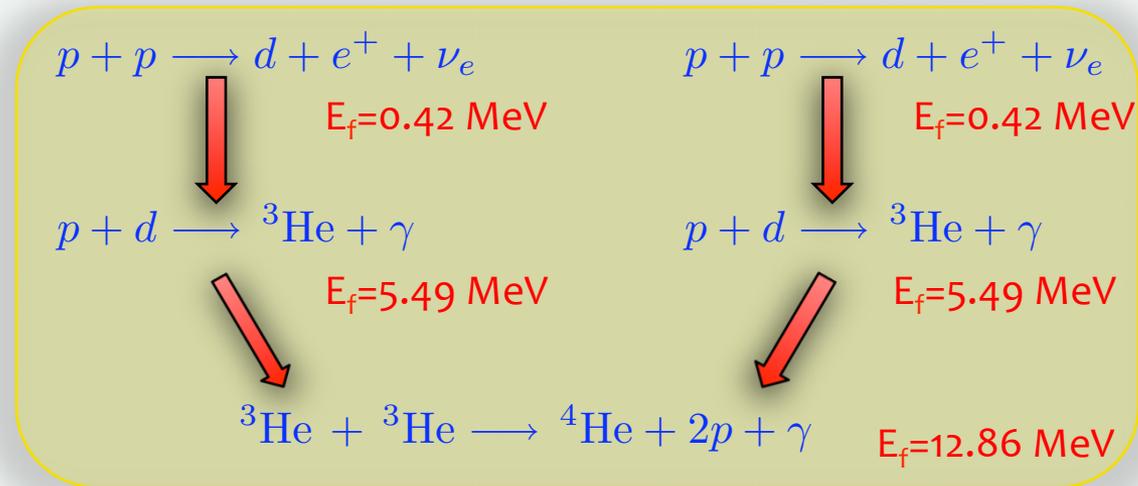
Equilibre
pression de radiation
et
gravitation

Cycle pp-I



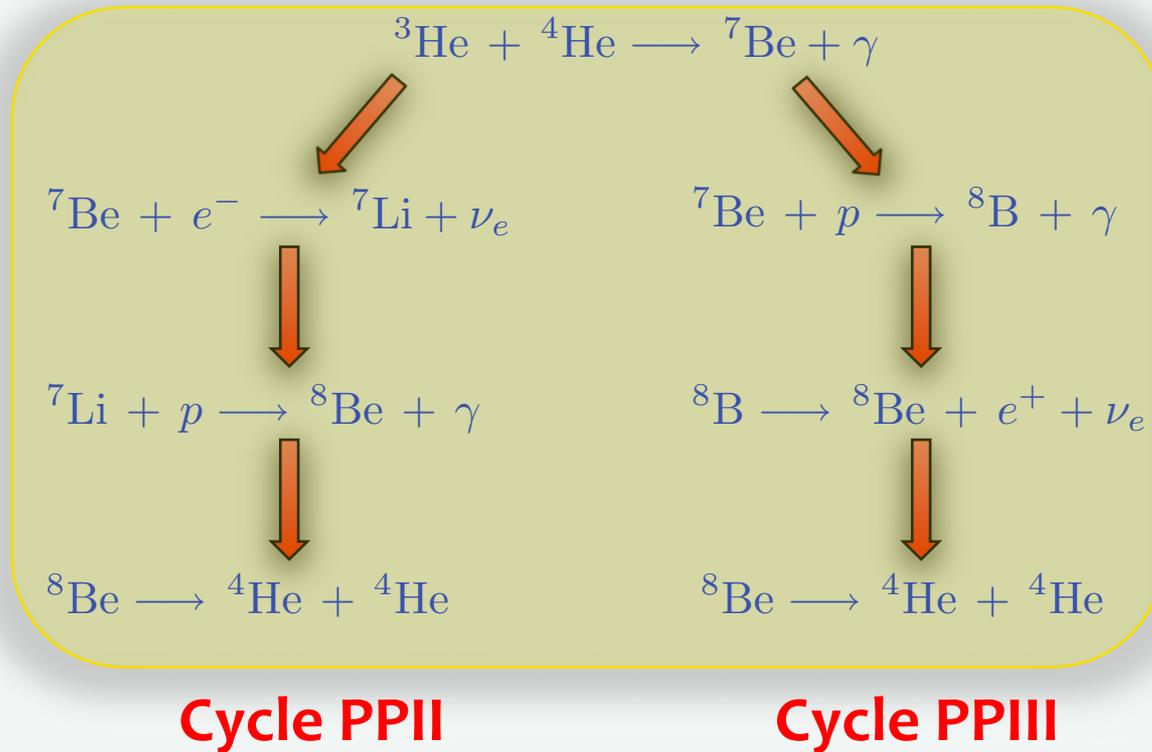
Processus de fusion dans le soleil

Cycle PPI



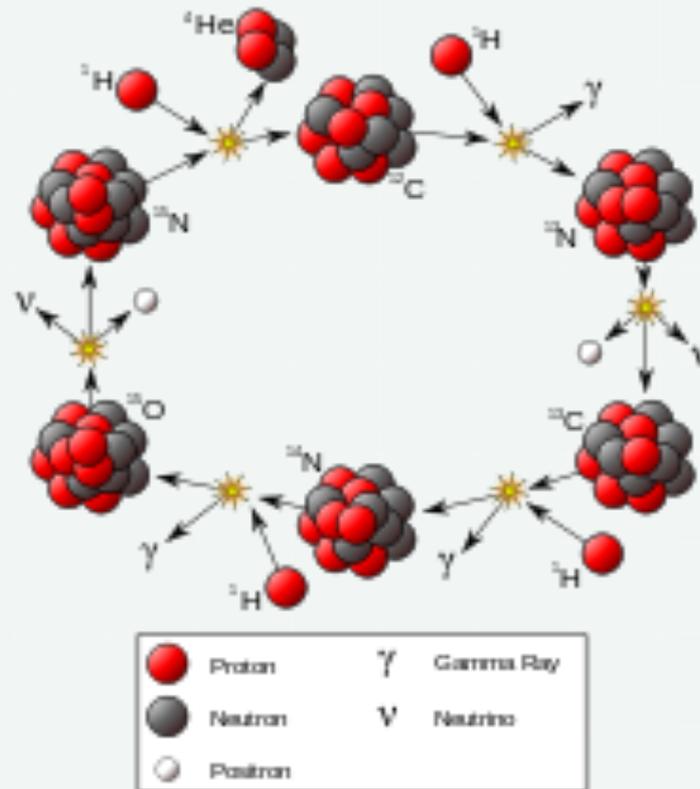
- Bilan de la réaction: $4p \longrightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$
 $2e^+$ s'annihilent avec $2e^- \rightarrow E_{e^+e^-} = 2.04 \text{ MeV}$
- Energie libérée dans le cycle PPI = **26.7 MeV**
(énergie libérée par proton = $26.7/4 = 6.7 \text{ MeV}$)
- Les neutrinos émergent sans interactions avec $\sim 2\%$ de l'énergie. Le reste chauffe le cœur du soleil est libéré sous forme d'énergie électromagnétique au niveau de la photosphère
- Luminosité observée : $4 \times 10^{26} \text{ J/s} \rightarrow 4 \times 10^{38}$ protons consommés chaque seconde

- Autres cycles de l'hélium (l'hélium agit comme catalyseur) :



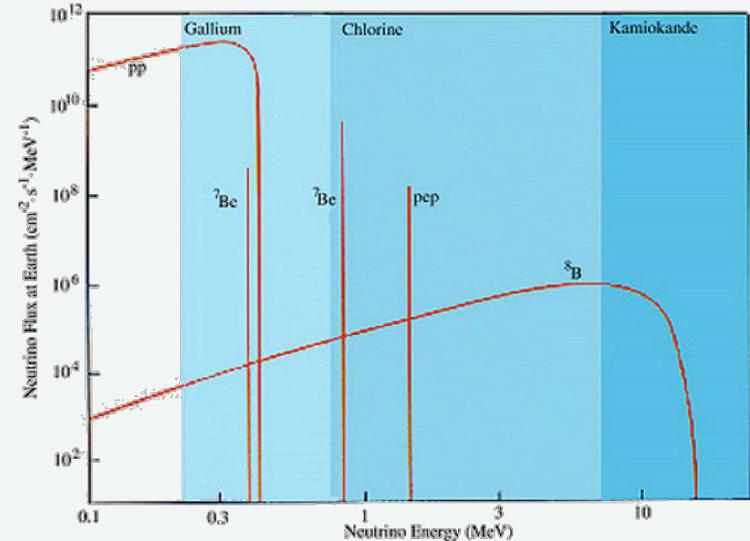
- Pour $T > 3 \times 10^7 \text{K}$, PPIII domine (les protons peuvent traverser la barrière coulombienne de ${}^7\text{Be}$ plus vite que le taux de CE dans ${}^7\text{Be}$)
- Il y a d'autres cycles comme CNO (où C, N and O agissent comme des catalyseurs).
- Actuellement dans le soleil : PPI=56%, PPII=40%, PPIII=0.05%, CNO=3.2%

Cycle CNO



Les neutrinos solaires

- L'observation de neutrinos solaires permet de sonder directement le cœur du soleil ou les réactions thermonucléaires se produisent
De nombreuses expériences mesurent le flux de neutrinos solaires
- Le flux attendu dépend de
 - Modèle standard du soleil (température, densité, ...)
 - Probabilité de réaction avec les noyaux
- Le problème des neutrinos solaires : **flux observé = 1/3 flux attendu**
- Ce problème est été récemment résolu en observant un composante non- ν_e dans le flux de neutrinos
⇒ **Oscillations de neutrinos**



Autres processus de fusion dans les étoiles

- Combustion de l'hydrogène : étoiles de la séquence principale, 10^{10} ans, $T \approx 2 \cdot 10^7$ K
- Quand l'hydrogène est épuisé \rightarrow effondrement gravitationnel \rightarrow La température augmente. Finalement, ^4He commence fusionner : étoiles géantes rouges, 10^5 ans, $T \approx 2 \cdot 10^8$ K

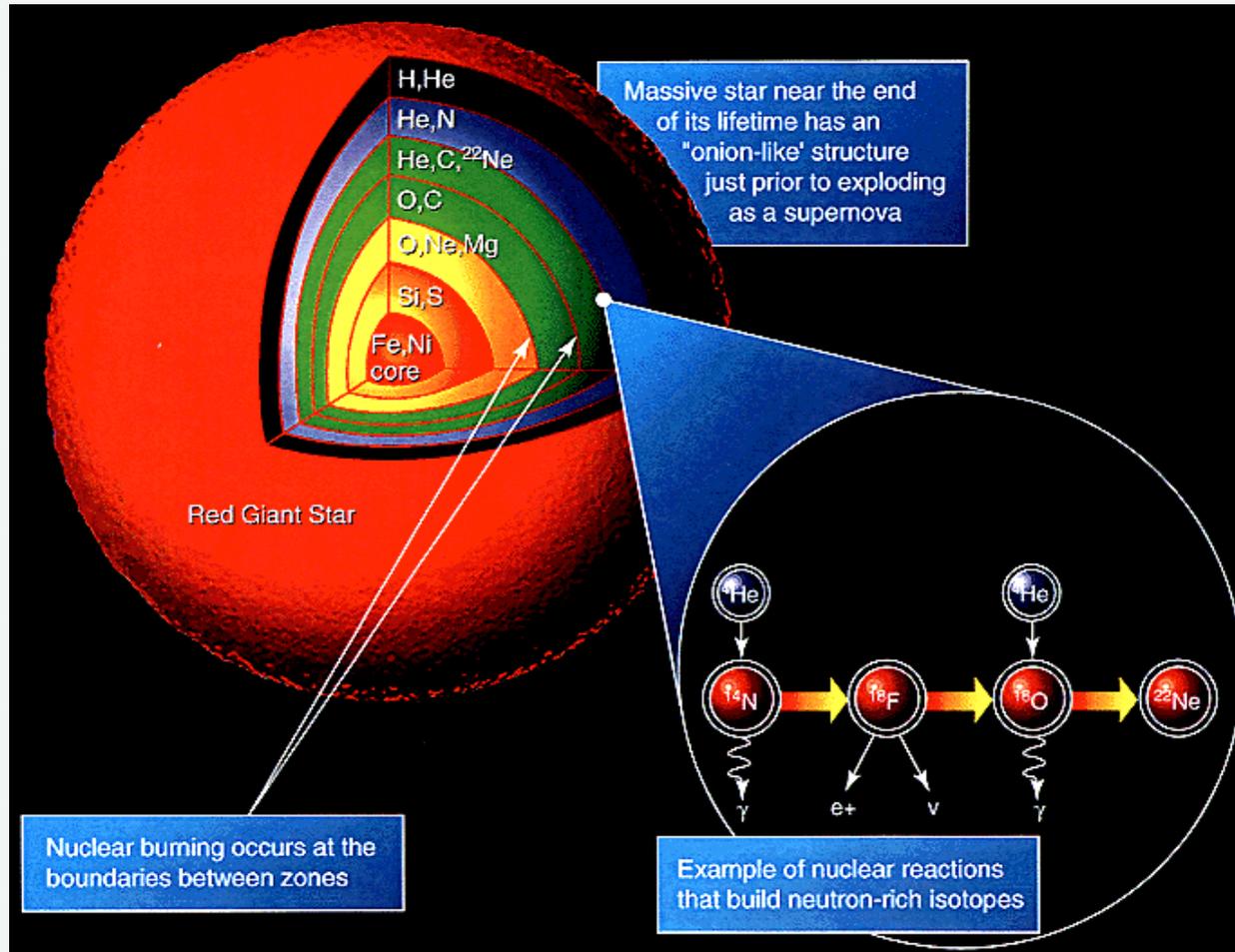


- Quand l' ^4He est épuisé, nouvel effondrement, hausse de la température, d'autres réactions de fusion s'allument : étoiles supergéantes, $T \approx 4 \cdot 10^9$ K

par exemple: $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \longrightarrow ^{24}\text{Mg} + \gamma$ $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} \longrightarrow ^{28}\text{Si} + \gamma$

\Rightarrow se termine proche des noyaux les plus liés avec ^{56}Ni . Ce noyau est β -instable et conduit au ^{56}Fe sur la ligne de stabilité.

Zones de fusion



Nébuleuse du crabe



- Située à 6000 années lumière
- Explosion observée en 1054
- La supernova a ainsi ensemencé en éléments relativement lourds le gaz interstellaire.
- C'est à partir de ce mélange, enrichi en éléments "lourds", que de nouvelles étoiles pourront se former. Ainsi le système solaire reflète la composition du gaz interstellaire il y a environ 4,6 milliards d'années.

Supernova

Explosion d'une supernova

© Anglo-Australian Observatory



1985

© Anglo-Australian Observatory



février 1987



Supernova 1987A • November 28, 2003
Hubble Space Telescope • ACS

NASA and R. Kirshner (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics) STS07-PRC04-00a

Nucléosynthèse des éléments lourds

- Les éléments plus lourds sont formés dans les étoiles et les explosions de supernovae, par des réactions comme :

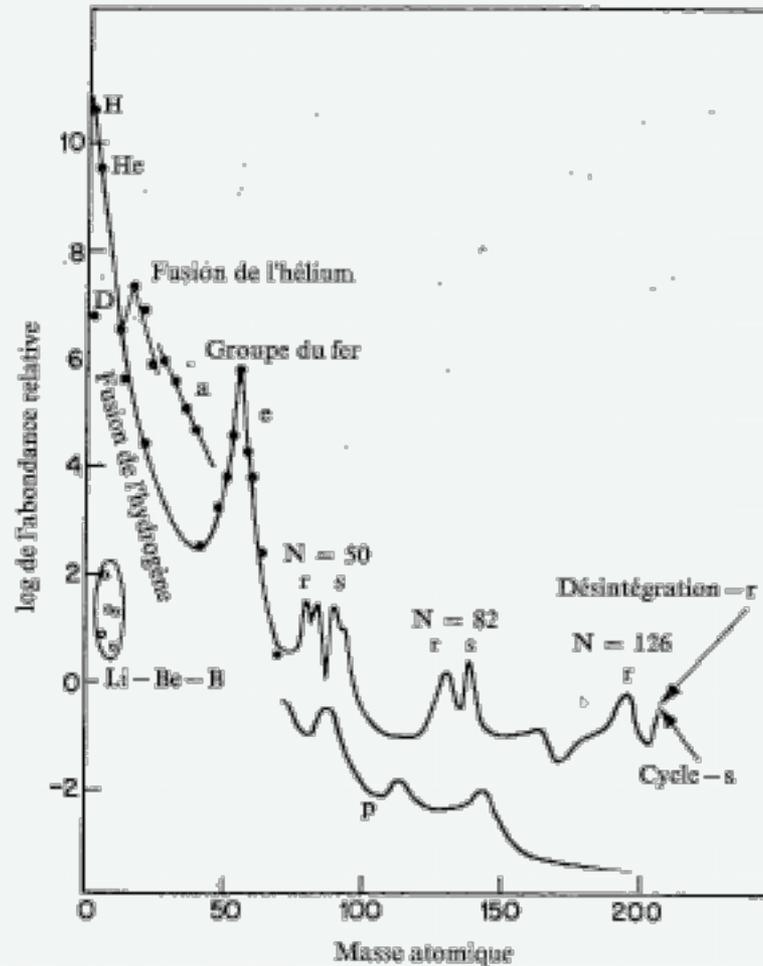


- Ces processus sont basés sur la capture radiative de neutrons (pas de barrière coulombienne):



- Si $(A+1,Z)$ est stable, il va subir une nouvelle capture de neutron, et ainsi de suite...
- Cette opération se produit x fois, tant que le temps de vie de l'isotope final $(A+x,Z)$ est grand comparé au taux de capture de neutrons. Ce taux dépend fortement du taux de capture de neutrons.
- Pour un faible flux de neutrons, la désintégration β domine et le noyau $(A+x,Z)$ va se désintégrer vers $(A+x,Z+1)$, et ensuite capturer un neutron. C'est le **processus s** (s pour slow). Ce processus se produit essentiellement dans les étoiles en équilibre, et suit la ligne de stabilité.
- Pour un grand flux de neutrons, le taux de captures de neutron est dominant jusqu'à ce qu'un isotope à très court temps de vie soit atteint. C'est le **processus r** (r pour rapide). De haut flux de neutrons sont produits pendant les phase explosives des étoiles (comme les supernovae). Ce processus explore le coté riche en neutrons de la vallée de stabilité.

Abondance des éléments dans l'univers



Origine des éléments

		<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; background-color: #f0f0f0;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center; width: 30px; height: 30px; background-color: #ccccff; border: 1px solid black;">B</td> <td style="padding: 5px;">Big Bang</td> <td style="text-align: center; width: 30px; height: 30px; background-color: #90ee90; border: 1px solid black;">L</td> <td style="padding: 5px;">Large stars</td> <td style="text-align: center; width: 30px; height: 30px; background-color: #ffcc99; border: 1px solid black;">s</td> <td style="padding: 5px;">Super-novae</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; width: 30px; height: 30px; background-color: #99ccff; border: 1px solid black;">C</td> <td style="padding: 5px;">Cosmic rays</td> <td style="text-align: center; width: 30px; height: 30px; background-color: #ffff99; border: 1px solid black;">s</td> <td style="padding: 5px;">Small stars</td> <td style="text-align: center; width: 30px; height: 30px; background-color: #ccccff; border: 1px solid black;">M</td> <td style="padding: 5px;">Man-made</td> </tr> </table> </div> </div>																B	Big Bang	L	Large stars	s	Super-novae	C	Cosmic rays	s	Small stars	M	Man-made	
B	Big Bang	L	Large stars	s	Super-novae																									
C	Cosmic rays	s	Small stars	M	Man-made																									
H B																	He B													
Li C	Be C											B C	C S L	N S L	O S L	F L	Ne S L													
Na L	Mg L											Al S L	Si S L	P L	S S L	Cl L	Ar L													
K L	Ca L	Sc L	Ti S L	V S L	Cr L	Mn L	Fe S L	Co S	Ni S	Cu L	Zn L	Ga S	Ge S	As L	Se S	Br S	Kr S													
Rb S	Sr L	Y L	Zr L	Nb L	Mo S L	Tc L	Ru S L	Rh S	Pd S L	Ag S L	Cd S L	In S L	Sn S L	Sb S	Te S	I S	Xe S													
Cs S	Ba L		Hf S L	Ta S L	W S L	Re S	Os S	Ir S	Pt S	Au S	Hg S L	Tl S L	Pb S	Bi S	Po S	At S	Rn S													
Fr S	Ra S		La L	Ce L	Pr S L	Nd S L	Pm S L	Sm S L	Eu S	Gd S	Tb S	Dy S	Ho S	Er S	Tm S	Yb S L	Lu S													
			Ac S	Th S	Pa S	U S	Np S	Pu S	Am M	Cm M	Bk M	Cf M	Es M	Fm M	Md M	No M	Lr M													

	Température	Étoile de 0,3 masse solaire	Étoile de 1 masse solaire	Étoile de 25 masses solaires
Fusion de l'hydrogène	4×10^6 K ; 15×10^6 K ; 40×10^6 K	~800 milliards d'années	10-12 milliards d'années	7 millions d'années
Fusion de l'hélium	1×10^8 K	S'arrête avant d'atteindre ce stade	~200 millions d'années	500 000 ans
Fusion du carbone	1×10^9 K		S'arrête avant d'atteindre ce stade	200 ans
Fusion du néon	$1,2 \times 10^9$ K			1 an
Fusion de l'oxygène	2×10^9 K			5 mois
Fusion du silicium	3×10^9 K			~1 jour

Fusion contrôlée

- Le challenge est d'atteindre des température suffisamment hautes pour permettre la fusion, dans des conditions contrôlées, avec un gain énergétique.

- Réactions possibles ($d=^2\text{H}=\text{deuton}$, $t=^3\text{H}=\text{tritium}$):



- La réaction $d+t$ est particulièrement attractive

- ✓ Plus grande énergie libérée (α est très stable)
- ✓ Barrière coulombienne la plus faible

- Le tritium est instable ($T_{1/2}=12$ ans). Peut être produit via : $n + ^6\text{Li} \longrightarrow \alpha + t$

- Nécessite $E \approx 10 \text{ keV}$ (i.e. $T \approx 10^8 \text{ K}$) pour obtenir un taux de réaction raisonnable
→ Besoin de contrôler un plasma

- Confinement magnétique : utilise un champ magnétique pour contrôler le plasma et le garder loin des murs
→ Tokamac: machine produisant un champ magnétique toroïdal pour confiner le plasma
- Chauffage du plasma : plusieurs méthodes.
P. ex.: confinement inertiel : boulette contenant $d+t$ bombardée avec des lasers ou un faisceau de particules pour la chauffer (→ laser Megajoule : 1.8 MJ laser)

ITER : premier plasma en 2020
Dur : 500MW pendant 1000s

