

ASTROPHYSIQUE

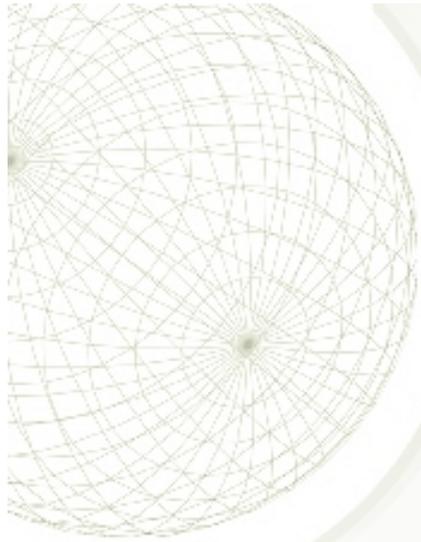
5 – ASTROPHYSIQUE NUCLÉAIRE



Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie
Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA





MÉCANIQUE QUANTIQUE

UN BRIN DE MÉCANIQUE QUANTIQUE

- Un électron – ou l'univers – est décrit par un *vecteur d'état* $|\psi\rangle$
ou « fonction d'onde »
espace vectoriel = espace de Hilbert

- sur lequel agissent des *opérateurs*

$$O |\psi\rangle = |\psi'\rangle$$

- Quand l'opérateur redonne le même vecteur, c'est un vecteur propre

$$O |\psi\rangle = a |\psi\rangle$$

↑ valeur propre



Erwin Schrödinger (1887-1961)

- Exemples

- Opérateur position $X |\psi\rangle = x |\psi\rangle$
- Opérateur impulsion $P |\psi\rangle = p |\psi\rangle$
- Opérateur **hamiltonien** $H |\psi\rangle = E |\psi\rangle$

↑ énergie

- L'opérateur hamiltonien joue un rôle essentiel : il est responsable de *l'évolution temporelle* des états

- C'est l'équation de Schrödinger

$$i \hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi\rangle = H |\psi\rangle$$

LE CHAT DE SCHRÖDINGER

- Et si un état $|\psi\rangle$ n'est pas vecteur propre d'un opérateur O ?
- On peut toujours le décomposer en une somme (superposition) d'états

$$|\psi\rangle = \alpha_1 |\psi_1\rangle + \alpha_2 |\psi_2\rangle + \dots$$

- Appliquer l'opérateur O donne
 - l'état $|\psi_1\rangle$ avec la probabilité $|\alpha_1|^2$
 - l'état $|\psi_2\rangle$ avec la probabilité $|\alpha_2|^2$
 - ...

(et bien sûr $|\alpha_1|^2 + |\alpha_2|^2 + \dots = 1$)

➔ « réduction du paquet d'onde »



Expérience de pensée de Schrödinger (1935)

- Un chat dans une boîte
- Un dispositif qui le tue ou le laisse vivre
- Qu'observe-t-on en ouvrant ?



HEISENBERG, PAULI ET LES AUTRES...

- Différents opérateurs peuvent avoir le même vecteur propre

$$O_1 |\psi\rangle = a |\psi\rangle$$

$$O_2 |\psi\rangle = b |\psi\rangle$$

- Dans ce cas, ils commutent

$$O_1 O_2 |\psi\rangle = O_2 O_1 |\psi\rangle = ab |\psi\rangle$$

- **MAIS CE N'EST PAS TOUJOURS LE CAS**

- Les opérateurs position X et impulsion P *ne commutent pas*

$$XP = PX + i\hbar I$$

Constante de Planck $\hbar/2\pi$

- → inégalité de Heisenberg

$$\Delta x \Delta p > \hbar/2$$

Werner Heisenberg
(1901-1976)



- Permutations et statistiques quantiques
 - Bose-Einstein $\psi(1,2) = \psi(2,1)$
 - Fermi-Dirac $\psi(1,2) = -\psi(2,1)$
(ce sont les seules possibilités)
- → Principe de Pauli : **2 fermions ne peuvent pas se trouver dans le même état quantique**
- Théorème spin-statistique
 - Spin entier [0, 1, 2...] → boson
 - Spin demi-entier [1/2 ...] → fermion

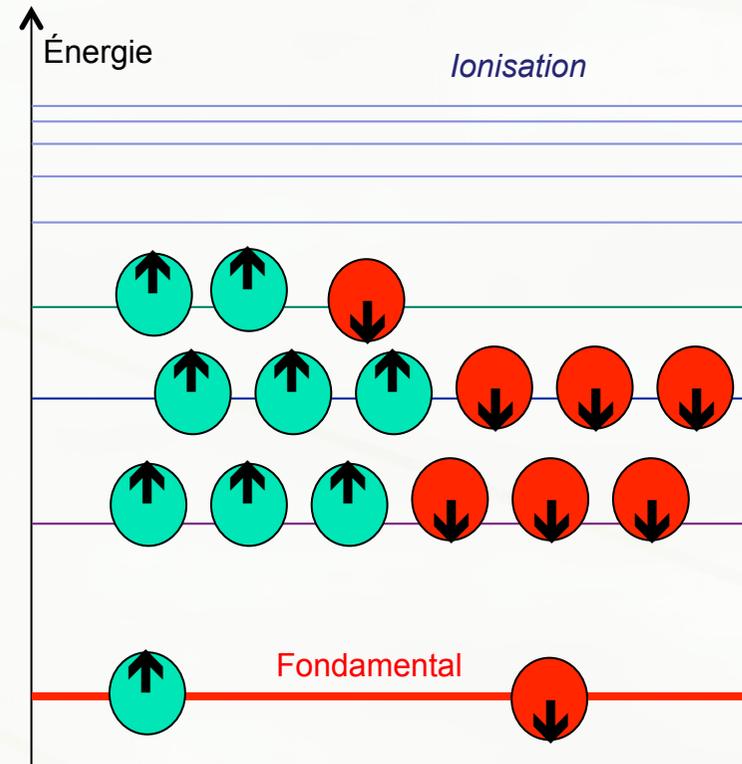
CONSÉQUENCES

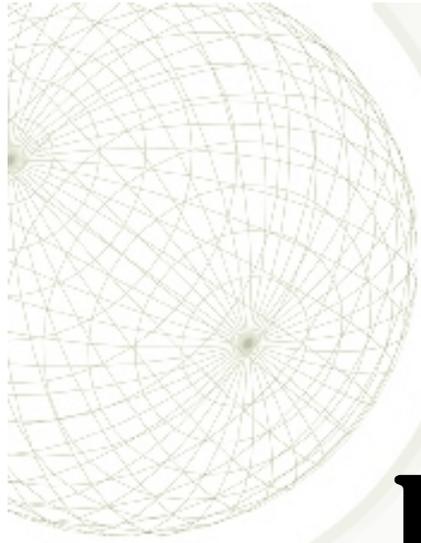
- → Explication de la structure atomique

- les électrons ne peuvent pas tous être dans l'état d'énergie minimale
- → ils occupent des états (« orbitales ») d'énergie de plus en plus haute
- le *dernier* niveau occupé détermine les propriétés chimiques

- → Explication du tableau périodique

- fluor, chlore, iode, brome ont tous 7 électrons sur la dernière couche qui peut en contenir 8
- → ils tendent tous à « emprunter » un électron à un atome voisin
- par exemple un atome de sodium ou de potassium qui ont un seul électron périphérique
- → NaCl, KCl, NaI, KI, NaBr, KBr...

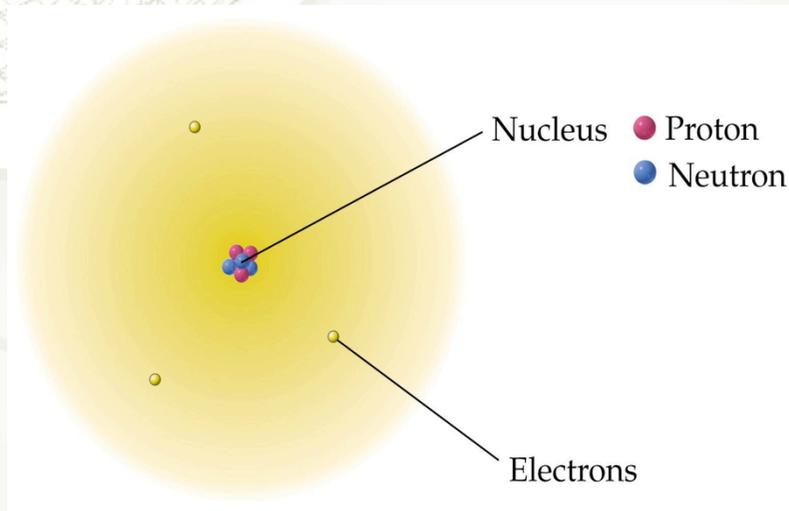




ÉLÉMENTS DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE

BASES DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE

- La matière est formée de molécules, elles-mêmes composées d'atomes



- Un atome est un nuage de Z électrons ($Z =$ numéro atomique) entourant un noyau très compact

- Les électrons sont responsables des propriétés chimiques de l'élément

- $Z = 1 \Leftrightarrow$ hydrogène H
- $Z = 2 \Leftrightarrow$ hélium He

- Le noyau est une assemblage de

- Z protons (\rightarrow neutralité)
- N neutrons

(\rightarrow nombre de masse $A = Z + N$)

- Fer 56 : 26 protons et 30 neutrons
- **Isotopes : même nombre Z de protons, nombre N de neutrons différent**

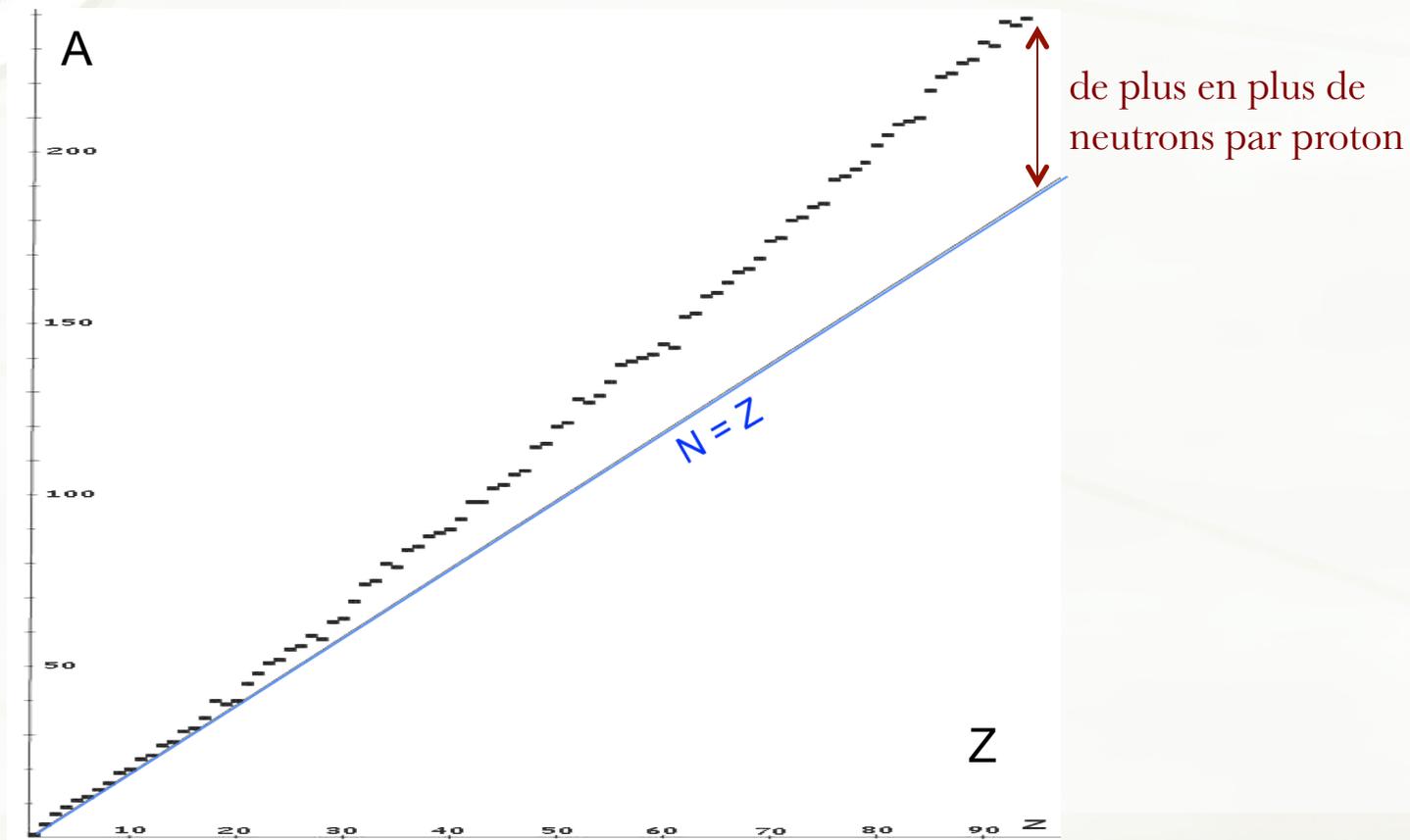
TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS (MENDELEIEV)

Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Period																			
1	1 H																		2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Ba	* 71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
7	87 Fr	88 Ra	** 103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo	
*Lanthanoids			* 57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb			
**Actinoids			** 89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No			

DIAGRAMME DE SEGRÈ

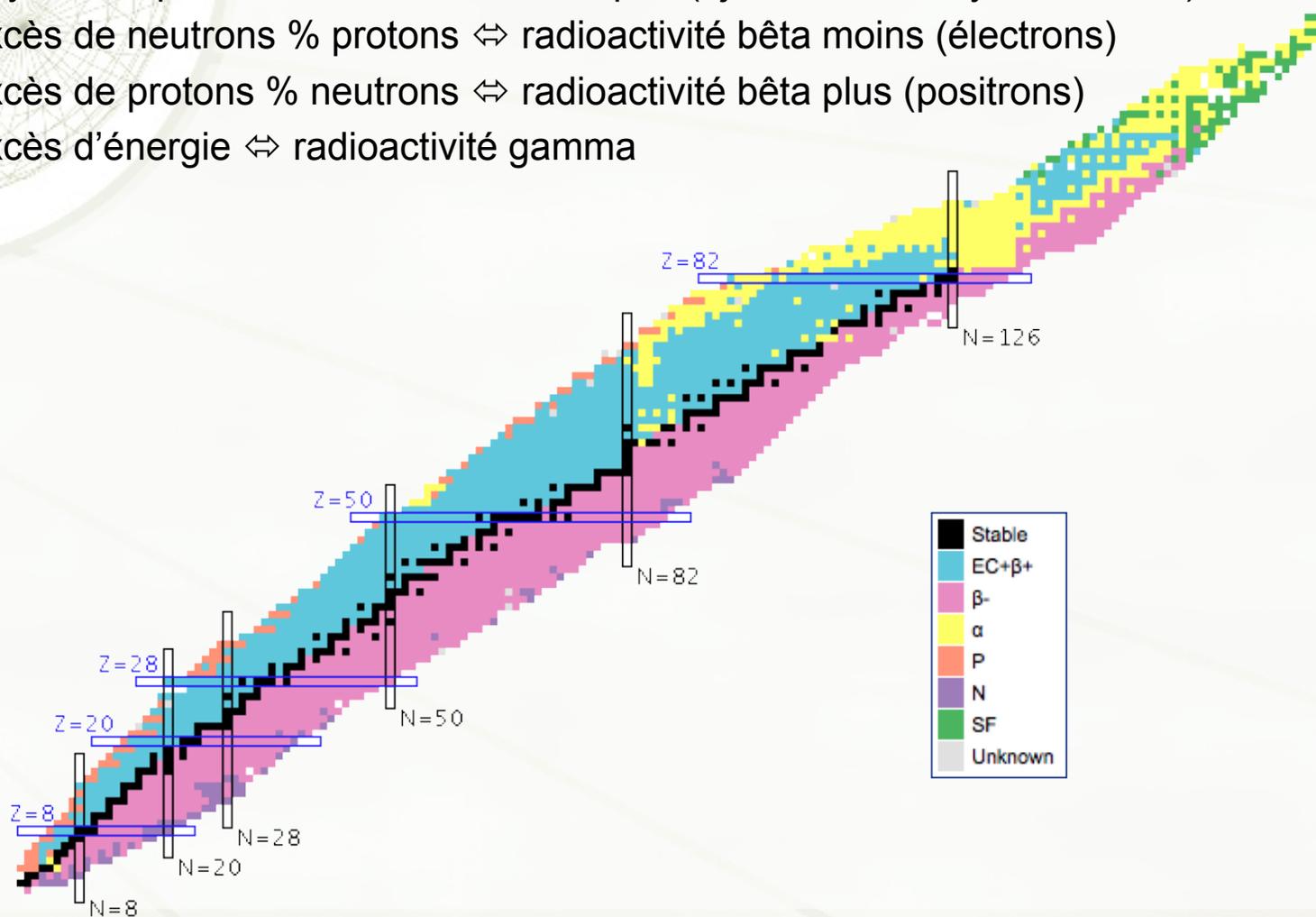
- Pour chaque élément chimique de Z donné, seules certaines valeurs de N sont possibles

- $Z=1 \Rightarrow N=1, 2 \text{ ou } 3$ H ${}^2_1\text{H} = \text{D}$ ${}^3_1\text{H} = \text{T}$
- $Z=2 \Rightarrow N=1 \text{ ou } 2$ ${}^3_2\text{He}$ ${}^4_2\text{He}$



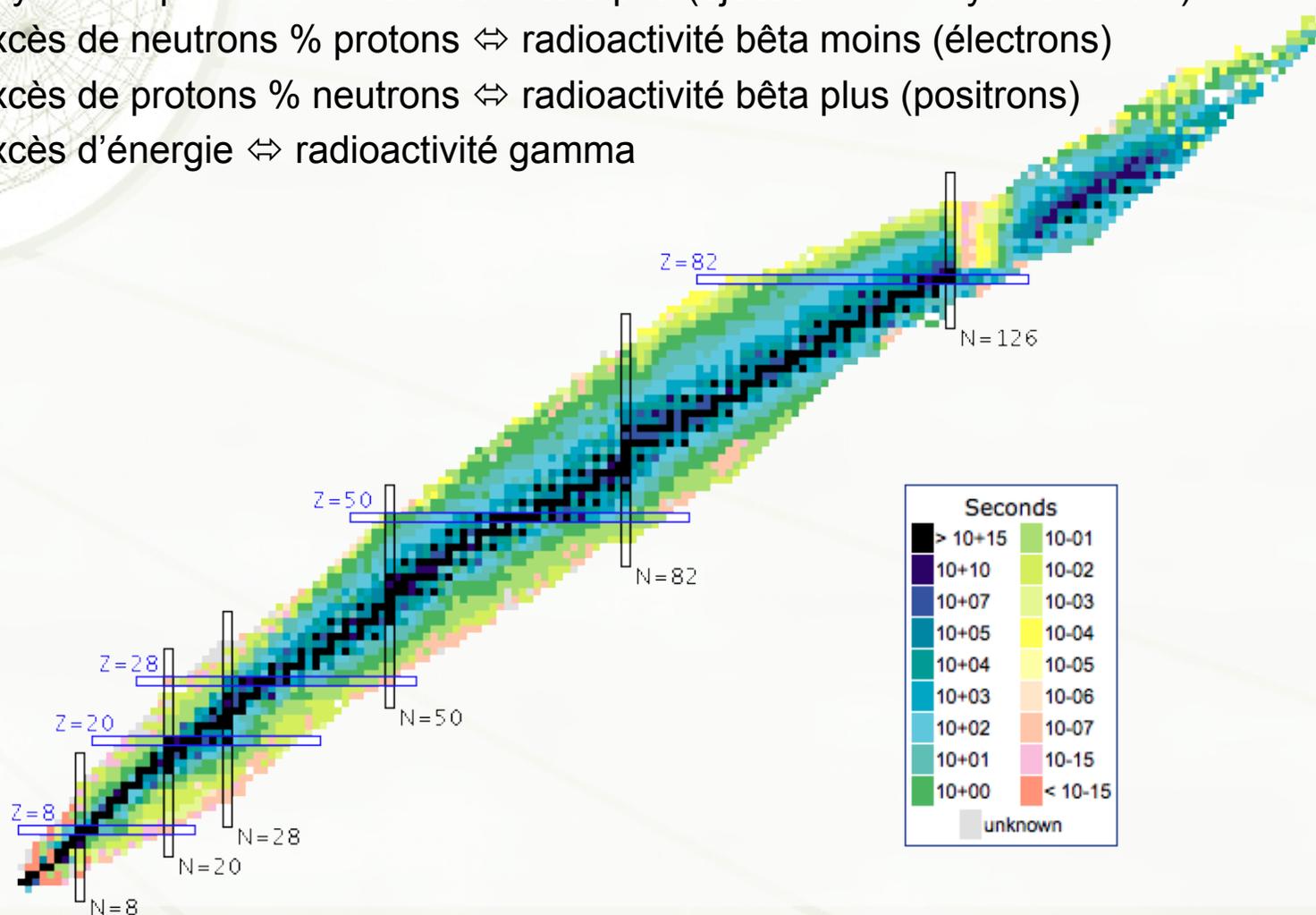
STABILITÉ DES NOYAUX : RADIOACTIVITÉ

- Noyau « trop » lourd \Leftrightarrow radioactivité alpha (éjection d'un noyau d'hélium)
- Excès de neutrons % protons \Leftrightarrow radioactivité bêta moins (électrons)
- Excès de protons % neutrons \Leftrightarrow radioactivité bêta plus (positrons)
- Excès d'énergie \Leftrightarrow radioactivité gamma



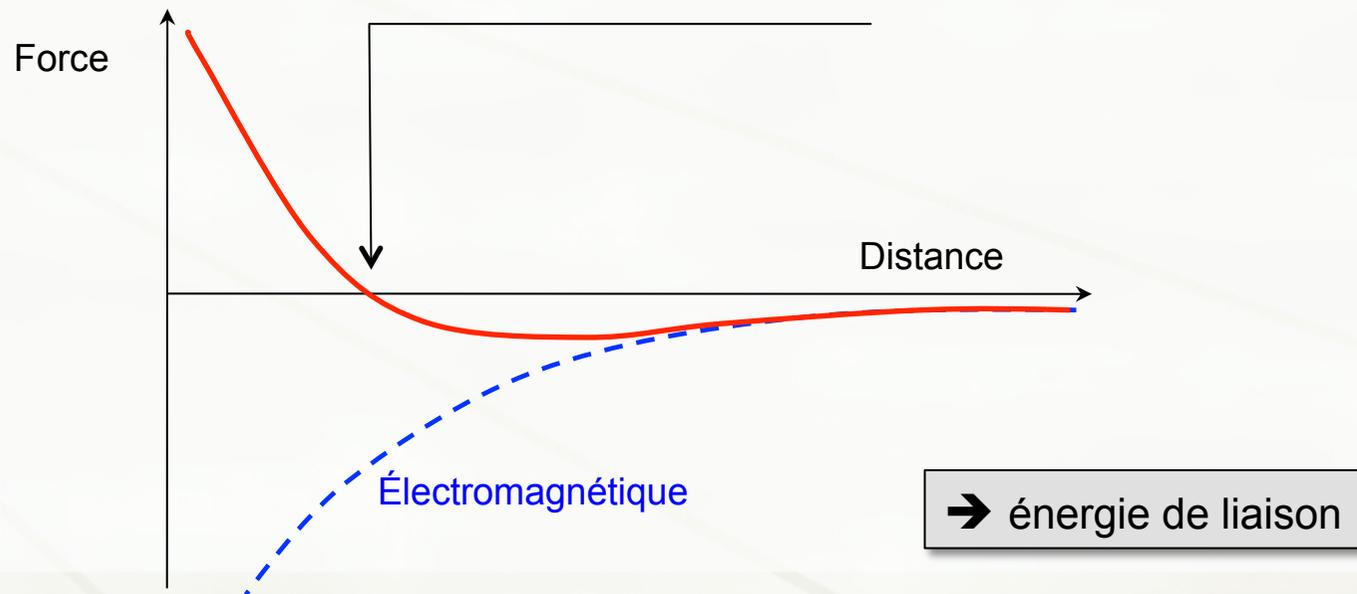
STABILITÉ DES NOYAUX : RADIOACTIVITÉ

- Noyau « trop » lourd \Leftrightarrow radioactivité alpha (éjection d'un noyau d'hélium)
- Excès de neutrons % protons \Leftrightarrow radioactivité bêta moins (électrons)
- Excès de protons % neutrons \Leftrightarrow radioactivité bêta plus (positrons)
- Excès d'énergie \Leftrightarrow radioactivité gamma



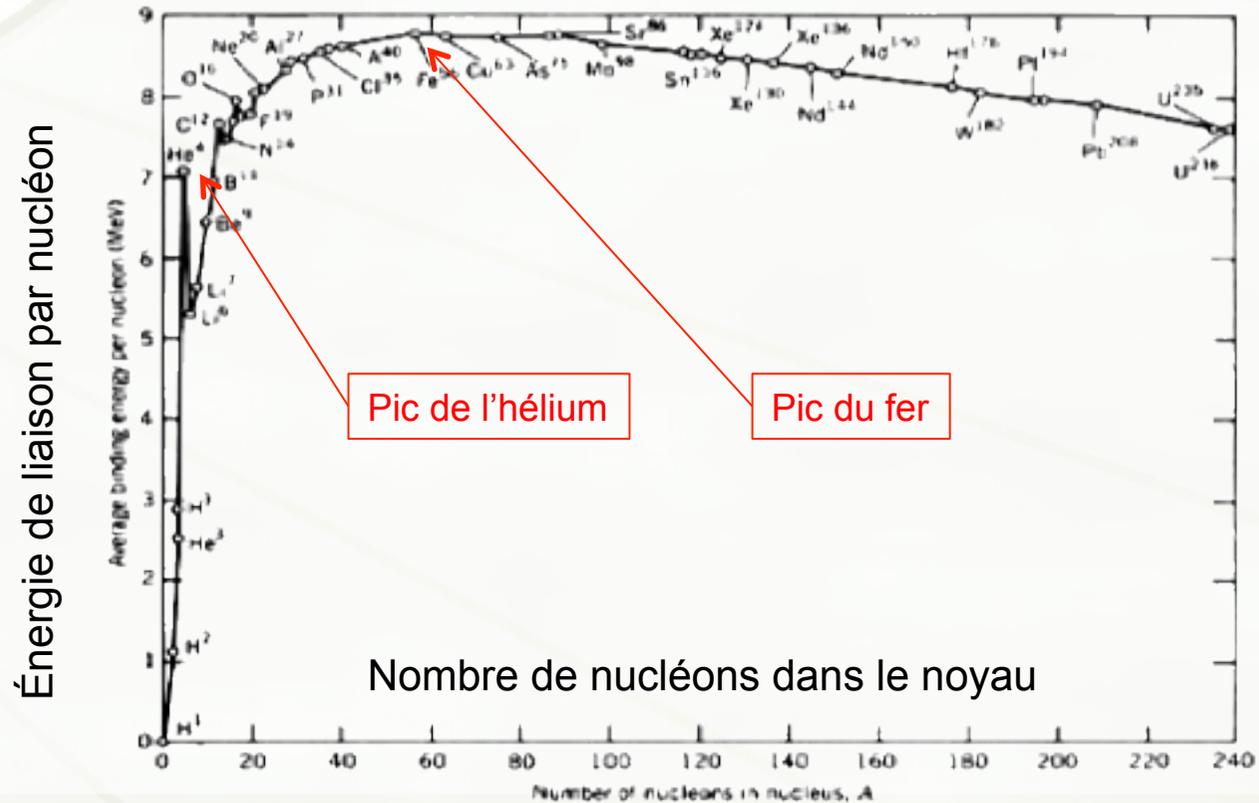
LES FORCES DANS LE NOYAU

- Les neutrons n'ont pas de charge électrique
- Tous les protons ont la même charge électrique positive $+e$ → forte **répulsion** électrostatique
 - loi de Coulomb $F = e^2/r^2$
- Cohésion du noyau → force **nucléaire attractive**
- Portée nécessairement très courte (→ fixe la taille du noyau \sim fermi = 10^{-15} m)

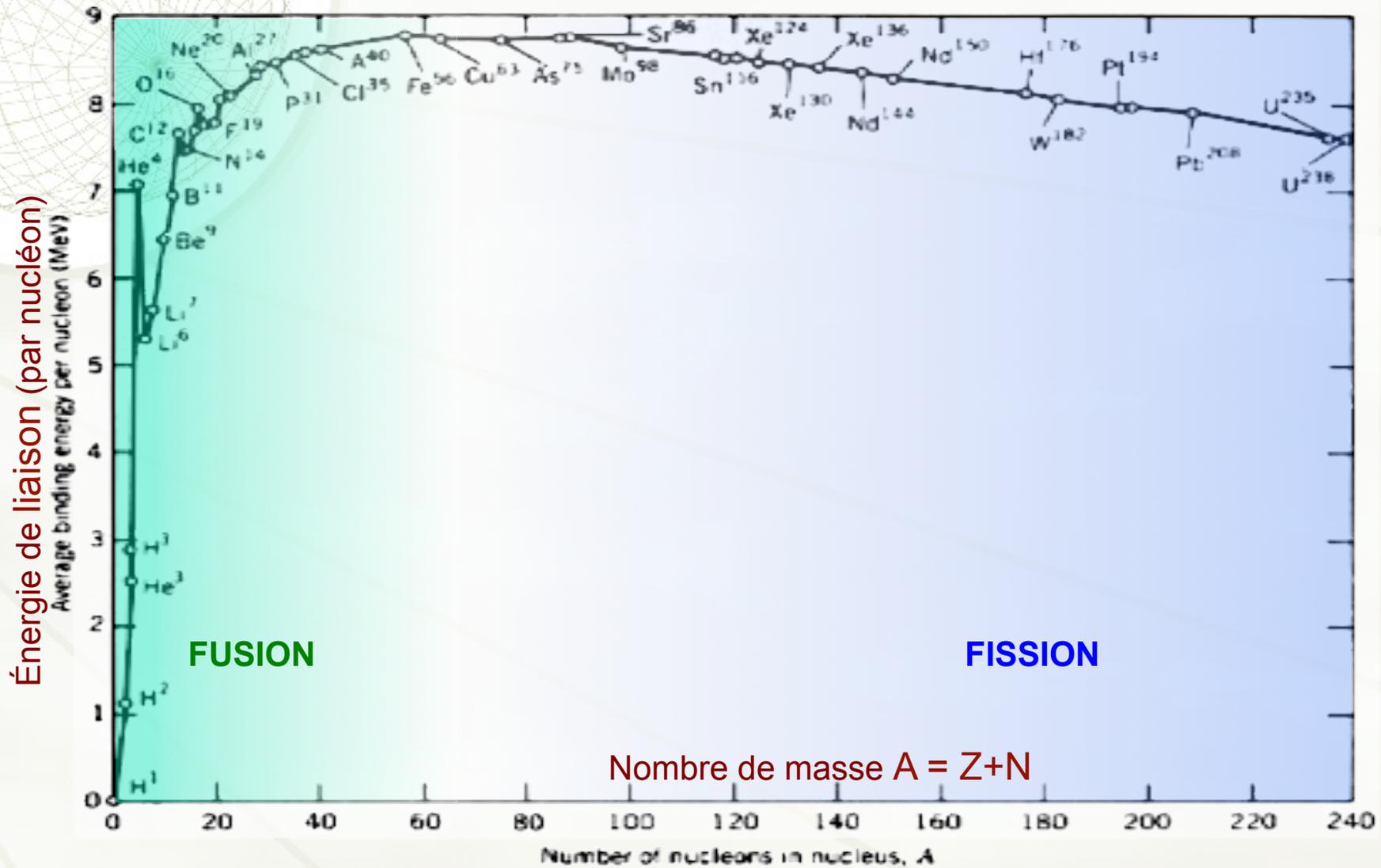


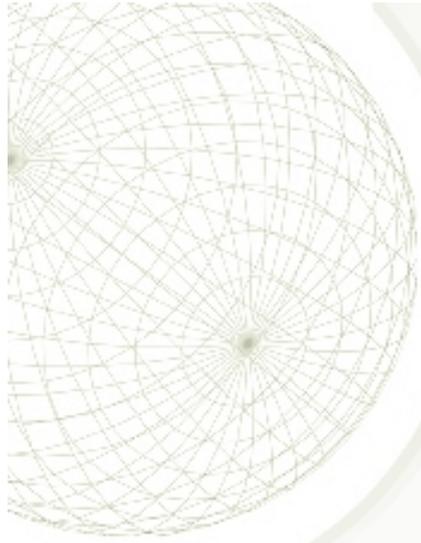
ÉNERGIE DE LIAISON

- La masse d'un noyau est inférieure à la masse de ses constituants (Francis Aston)
 - $M(Z,N) < Z.m_{\text{proton}} + N.m_{\text{neutron}}$
 - Défaut de masse \leftrightarrow énergie de liaison $E = \Delta M c^2$
 - Il faut apporter de l'énergie à un noyau pour le dissocier



FUSION OU FISSION ?

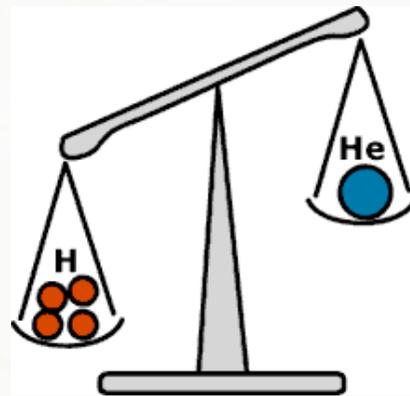




FUSIONS NUCLÉAIRES

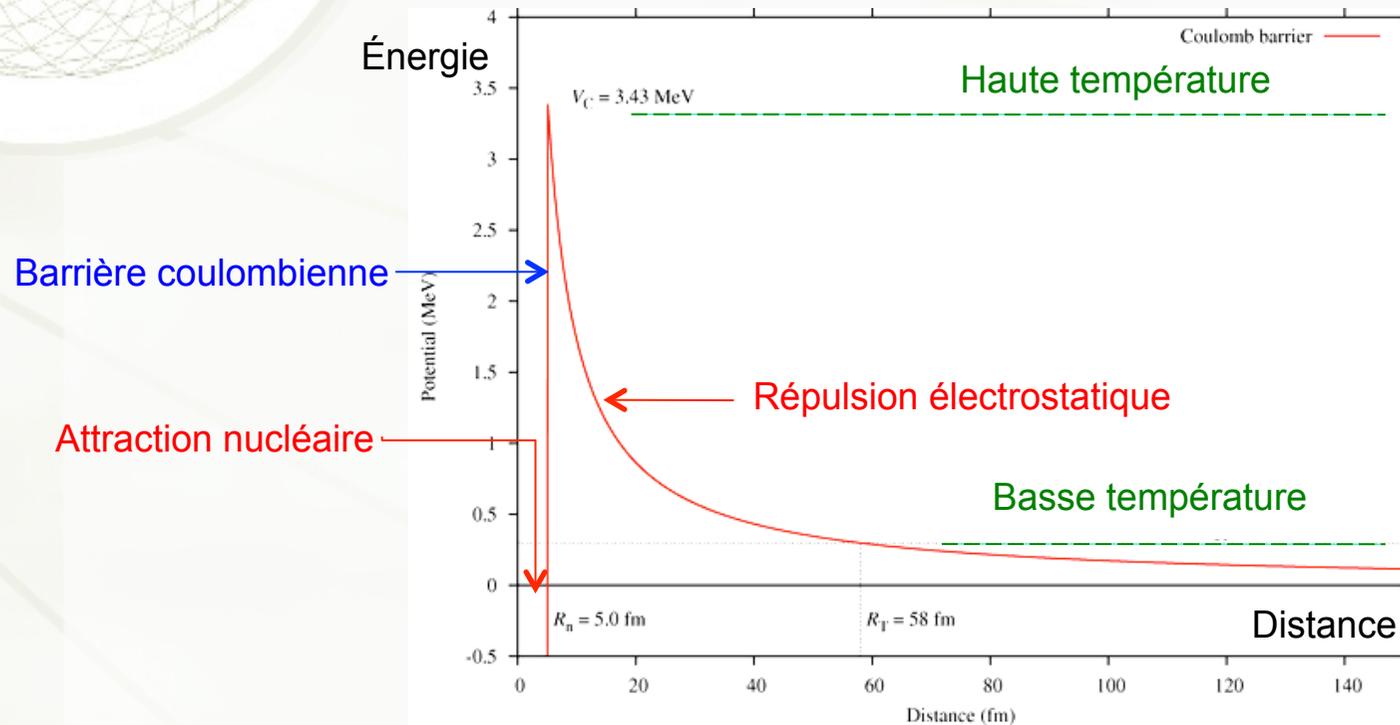
FUSION DE L'HYDROGÈNE

- La luminosité du Soleil a peu varié depuis plusieurs centaines de millions d'années (← paléontologie)
- En 1920, Francis Aston mesura avec précision la masse de l'atome d'hélium et le trouva plus léger que 4 fois la masse de l'hydrogène
- Arthur Eddington suggéra aussitôt que la fusion de 4 atomes d'hydrogène en hélium est la source d'énergie du Soleil
 - la différence de masse, convertie en énergie, est rayonnée
 - 600 millions de tonnes d'hydrogène disparaissent par seconde → des milliards d'années de réserves
- Mais la température centrale du Soleil paraissait insuffisante avant que la mécanique quantique (effet tunnel) montre que la fusion était possible
- Hans Bethe établit en 1939 les deux mécanismes nucléaires précis
 - chaînes pp
 - cycle CNO



FUSION THERMONUCLÉAIRE

- Les noyaux ont tous une charge électrique positive → répulsion électrostatique
- Il faut que les noyaux soient très proches (~ quelques fermis) pour que l'attraction nucléaire prenne le dessus → « barrière coulombienne »

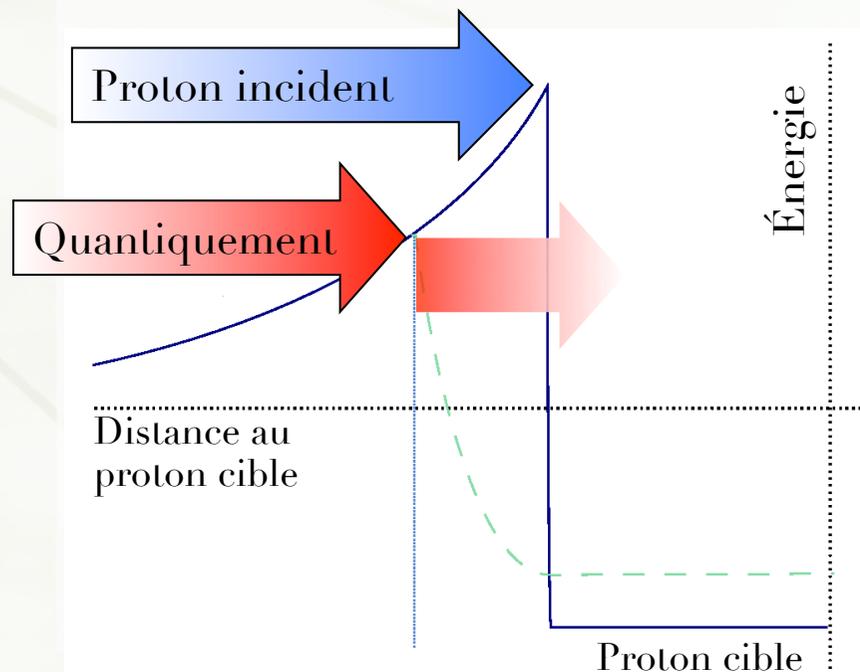


→ énergie cinétique requise $\frac{1}{2} mV^2 \sim kT \sim Z_1 Z_2 e^2 / r$ → $T \sim 10$ milliards de kelvins

La température centrale des étoiles est de l'ordre de 10 millions de kelvins

BARRIÈRE DE COULOMB ET EFFET TUNNEL

- La répulsion électrique doit être surmontée pour que l'interaction nucléaire attractive ait de l'effet
- **Classiquement** le proton doit avoir une énergie supérieure à la barrière



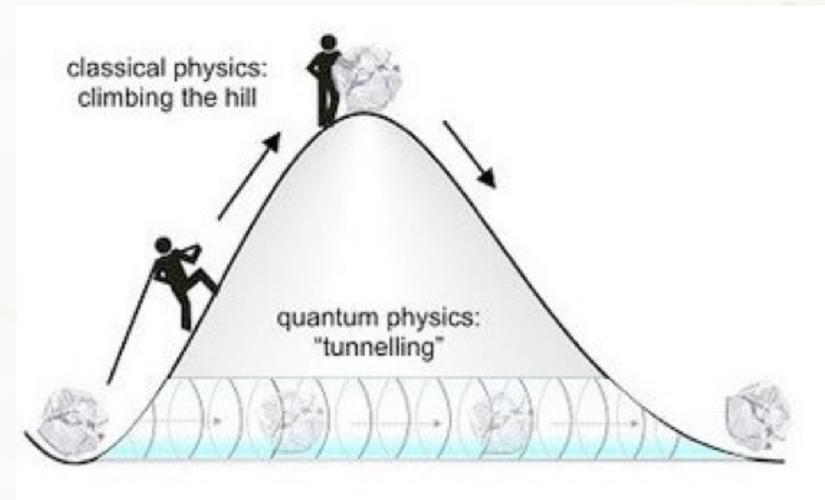
- Énergie cinétique \Leftrightarrow température
 - $\rightarrow T > 10^{10}$ K \rightarrow impossible
- Mais quantiquement, le proton a une **probabilité non-nulle** de franchir la barrière même s'il n'a pas l'énergie suffisante pour passer au-dessus
 - $\rightarrow T > 10^7$ K \rightarrow possible (mais rare) 😊
- Cette probabilité diminue exponentiellement avec la hauteur de la barrière
 - relativement facile de fusionner H en He
 - un peu moins de fusionner He en C
 - encore moins C, N, O jusqu'au fer

GAMOW ET L'EFFET TUNNEL



- Quantiquement, une particule (ou un noyau) n'est pas localisée
- Elle est décrite par une fonction d'onde **étendue**, dont une partie est de « l'autre » côté de la barrière
- L'amplitude de cette partie diminue **exponentiellement** avec la hauteur de la barrière

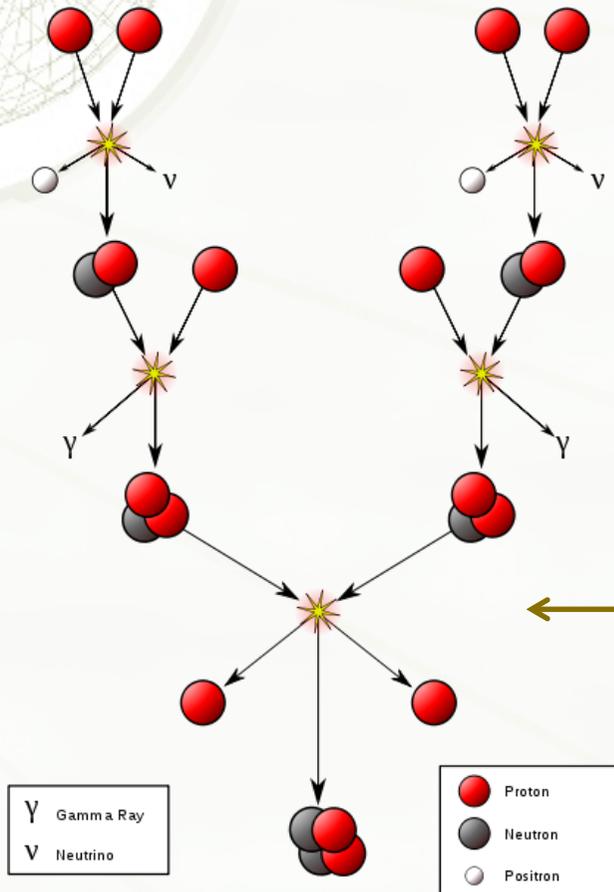
- → la probabilité de réaction varie exponentiellement avec la hauteur de la barrière
- → **TRÈS forte dépendance en température**



- « Barrière coulombienne » $Z_1 Z_2 e^2 / r$ plus haute pour noyaux plus lourds ($\Leftrightarrow Z$ grand)
- → plus les noyaux sont lourds, plus leur fusion est difficile et **plus la température requise est élevée**

FUSION DE L'HYDROGÈNE

- Succession de réactions à 2 corps (réactions à 3 ou 4 corps improbables)



- En fait d'autres chaînes pp sont possibles à partir de ce point-ci

et deviennent dominantes > 14 MK

- Bilan énergétique

- 0,7% de la masse des protons disparaît
- L'énergie libérée apparaît sous forme
 - d'énergie cinétique (chaleur) des noyaux formés
 - de rayons gammas vite absorbés
 - de neutrinos qui s'échappent en 2 s du Soleil en emportant 2% de l'énergie
- L'essentiel de l'énergie est bloquée dans le cœur et elle met beaucoup de temps à sortir du Soleil

Energy Production in Stars*

H. A. BETHE

Cornell University, Ithaca, New York

(Received September 7, 1938)

CHAÎNES PROTON-PROTON

- La première étape est la fusion de deux protons (noyaux d'hydrogène)



- suivie de la fusion de ce deutérium et d'un proton



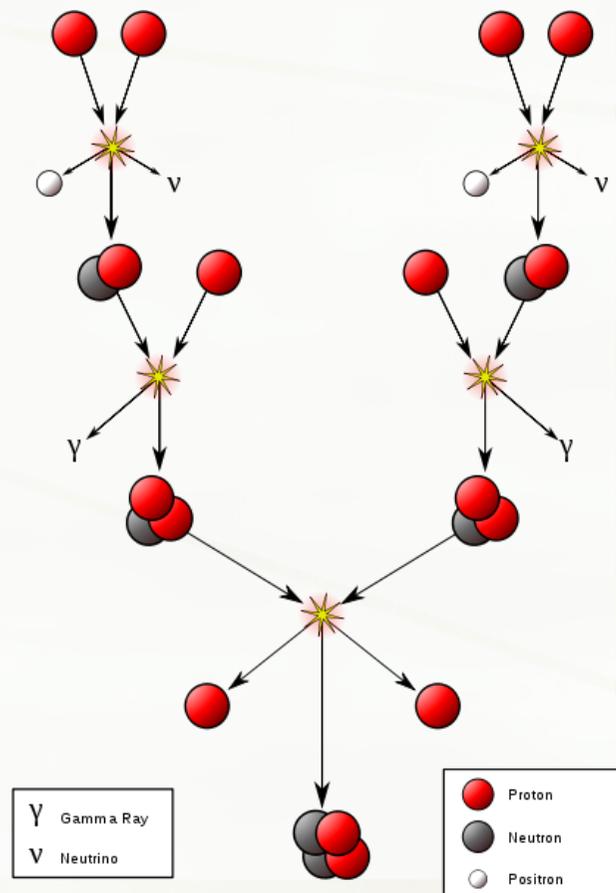
- Enfin 2 noyaux d'hélium 3 fusionnent en hélium 4

- D'autres réactions sont possibles

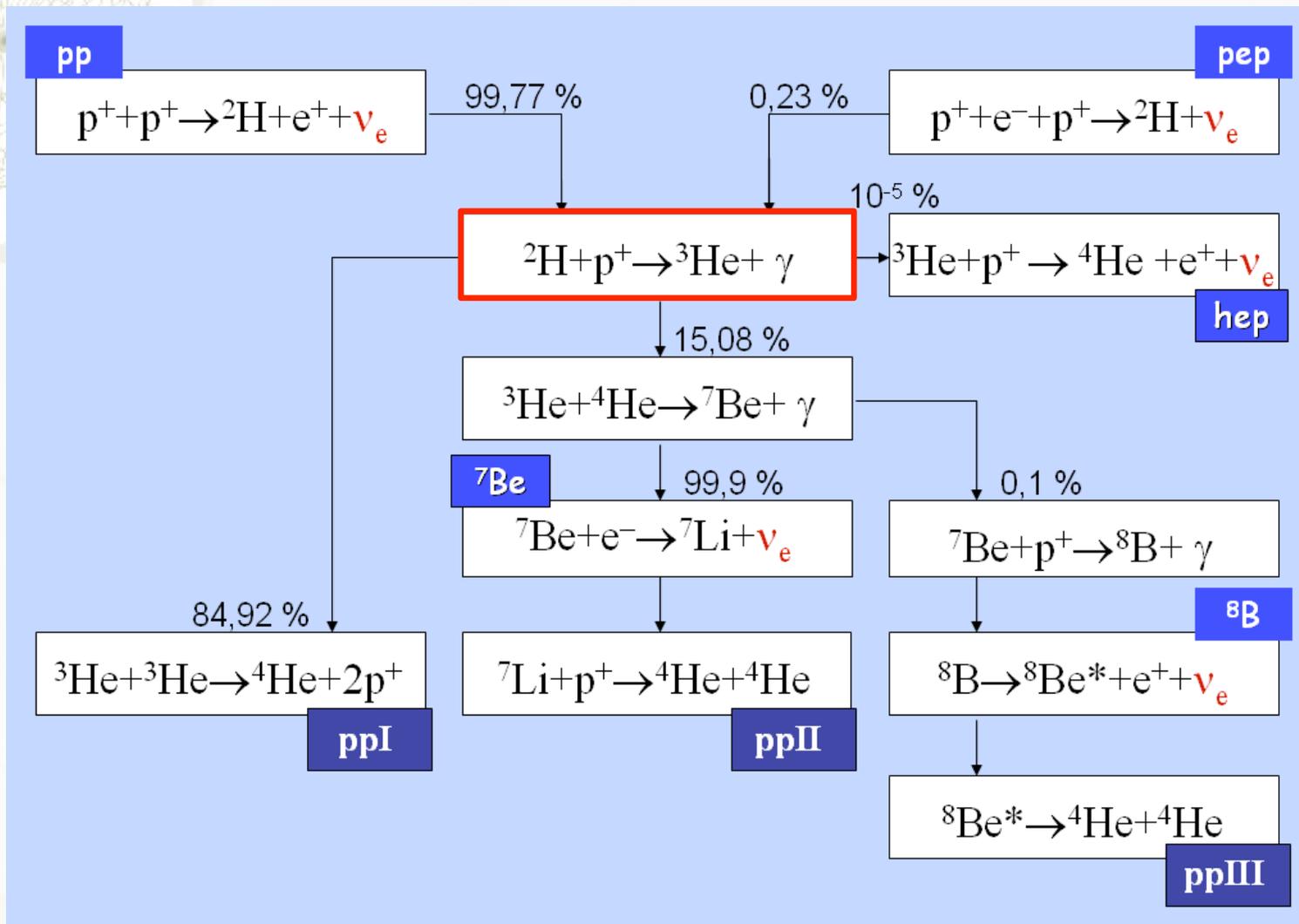
- dès qu'il y a de l'hélium 4, production de béryllium 7
- puis de lithium 7 (Z=3)
- ou de bore 8 (Z=4) instable
- ${}^7\text{Li} + p \rightarrow 2 {}^4\text{He}$
- ...

- Dépendance du taux de réaction

$$\epsilon \sim T^4$$

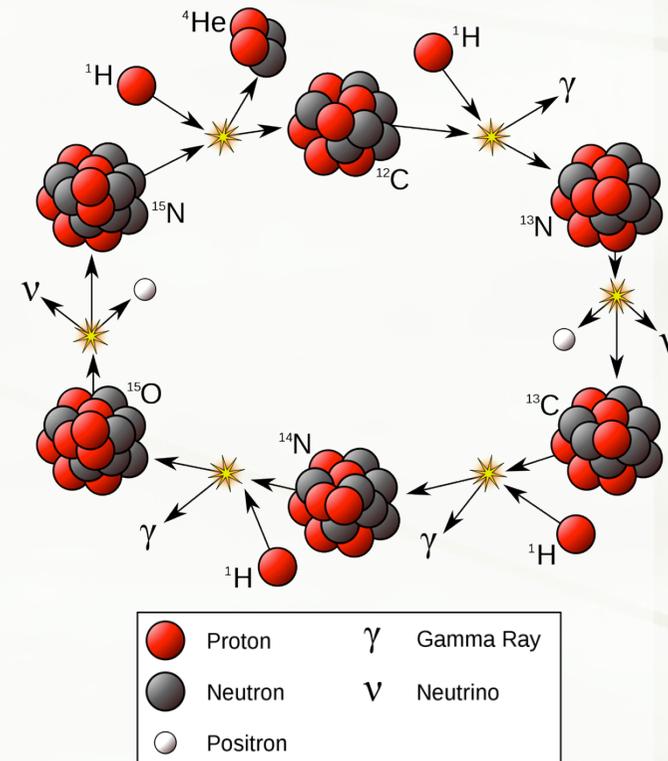
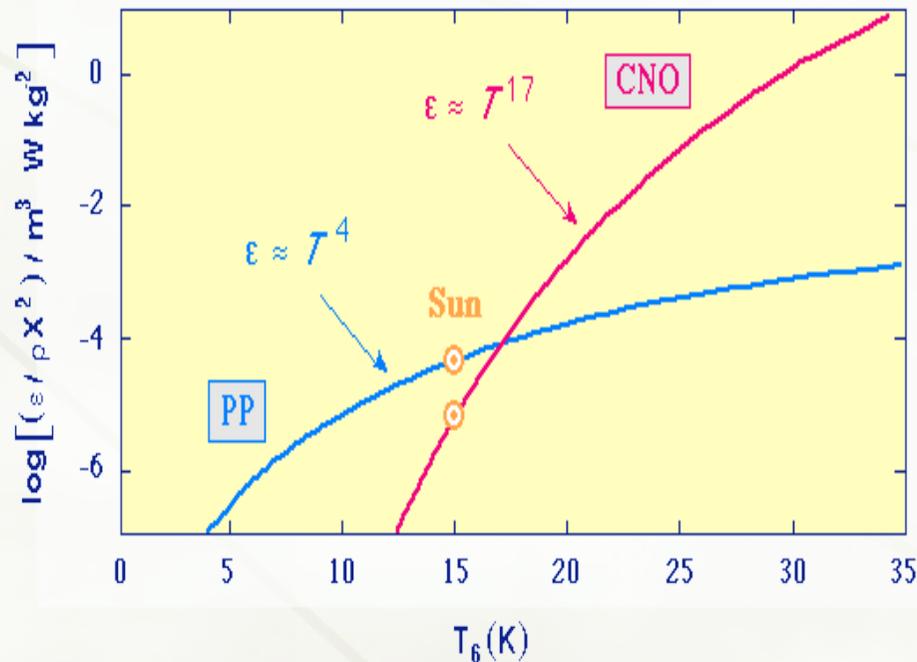


CHAÎNES PROTON - PROTON



CYCLE CNO

- Weizsäcker (1938), Bethe (1938) : si du **carbone** est présent, même en faible proportion, il sert de catalyseur
- Bilan net du cycle : $4 \text{ H} \rightarrow \text{}^4\text{He}$
- Barrière coulombienne du carbone plus haute
 - \rightarrow température requise plus élevée
 - \rightarrow dépendance du taux de réaction ϵ en T^{17}



POUR ALLER PLUS LOIN: RÉACTION TRIPLE ALPHA

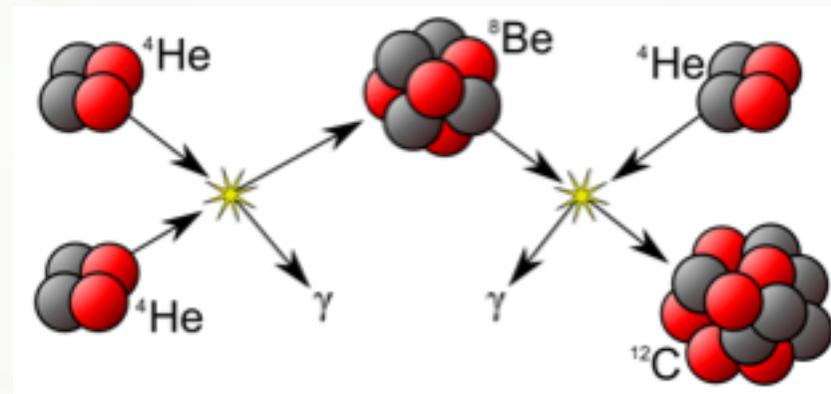
- Problème :
 - ${}^4\text{He} + p \rightarrow {}^5\text{Li}$ très instable, redonne immédiatement des noyaux plus légers
 - ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^8\text{Be}$ très instable, redonne immédiatement des noyaux plus légers
- ➔ « goulot d'étranglement »

- Hoyle : le carbone existe, *donc* il doit y avoir moyen de fusionner 3 noyaux ${}^4\text{He}$
- Le taux de la réaction ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^8\text{Be}$ augmente avec la température
➔ à T assez haute, la densité de ${}^8\text{Be}$ rend possible une fusion avec ${}^4\text{He}$ **avant** désintégration

- Sauf que ${}^4\text{He} + {}^8\text{Be} \rightarrow {}^{12}\text{C}$ est lent...
sauf s'il existe un ${}^{12}\text{C}$ bien placé
ce qui est le cas

- $\tau \sim T^{30}$ (pp: $\tau \sim T^4$, CNO: $\tau \sim T^{17}$)

- **Impossibilité tant qu'il reste de l'hydrogène** (température trop basse)

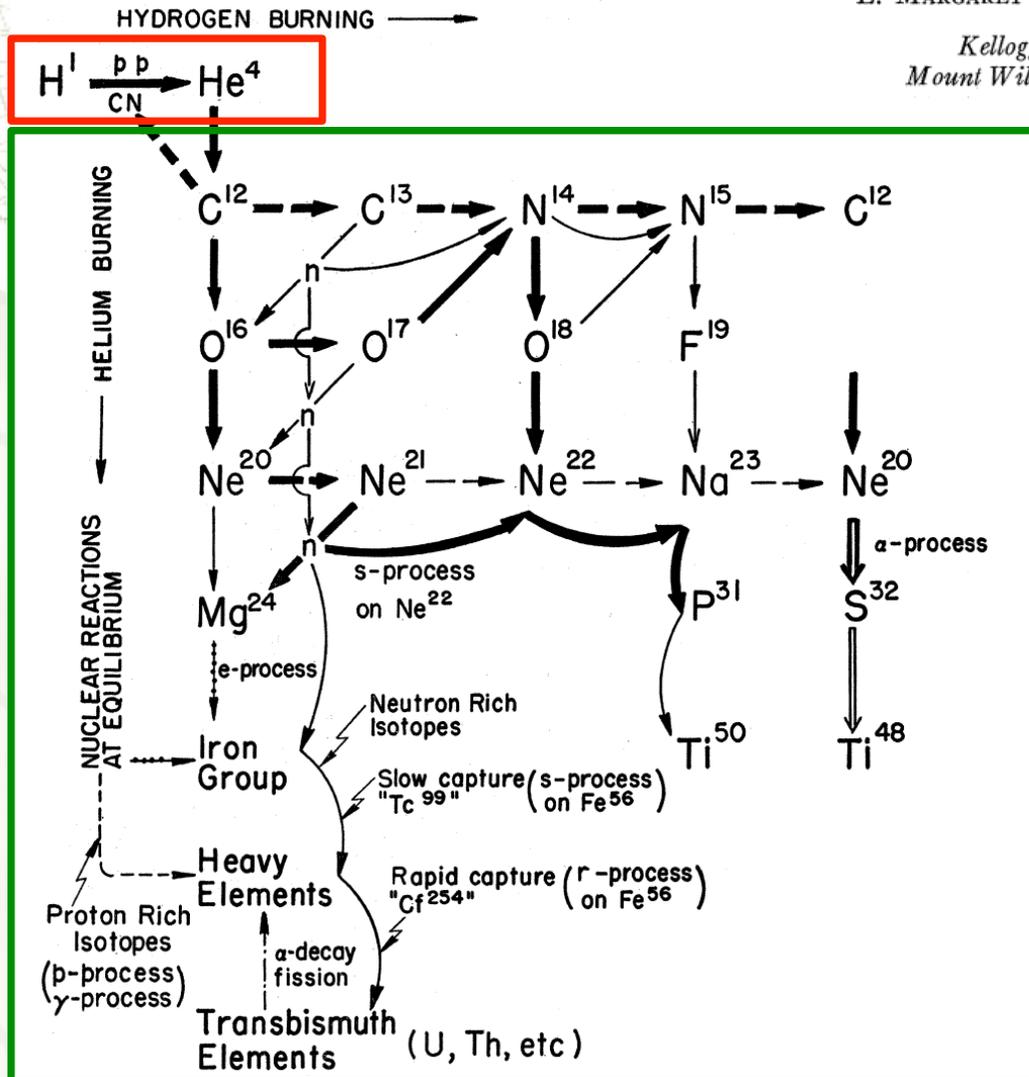


B²FH « NOUS SOMMES DE LA POUSSIÈRE D'ÉTOILES »

Synthesis of the Elements in Stars*

E. MARGARET BURBIDGE, G. R. BURBIDGE, WILLIAM A. FOWLER, AND F. HOYLE

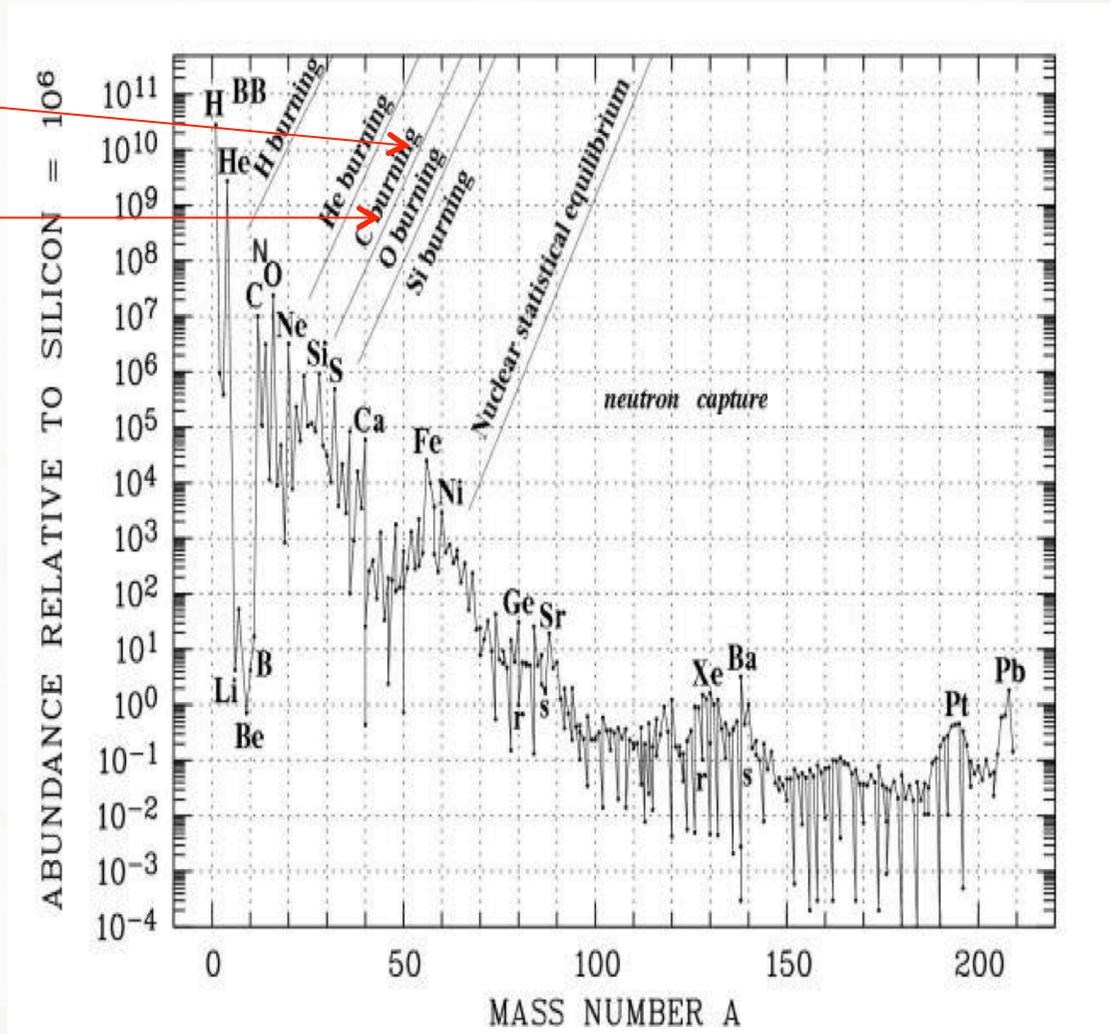
*Kellogg Radiation Laboratory, California Institute of Technology, and
Mount Wilson and Palomar Observatories, Carnegie Institution of Washington,
California Institute of Technology, Pasadena, California*



Sir Fred Hoyle (1915-2001)

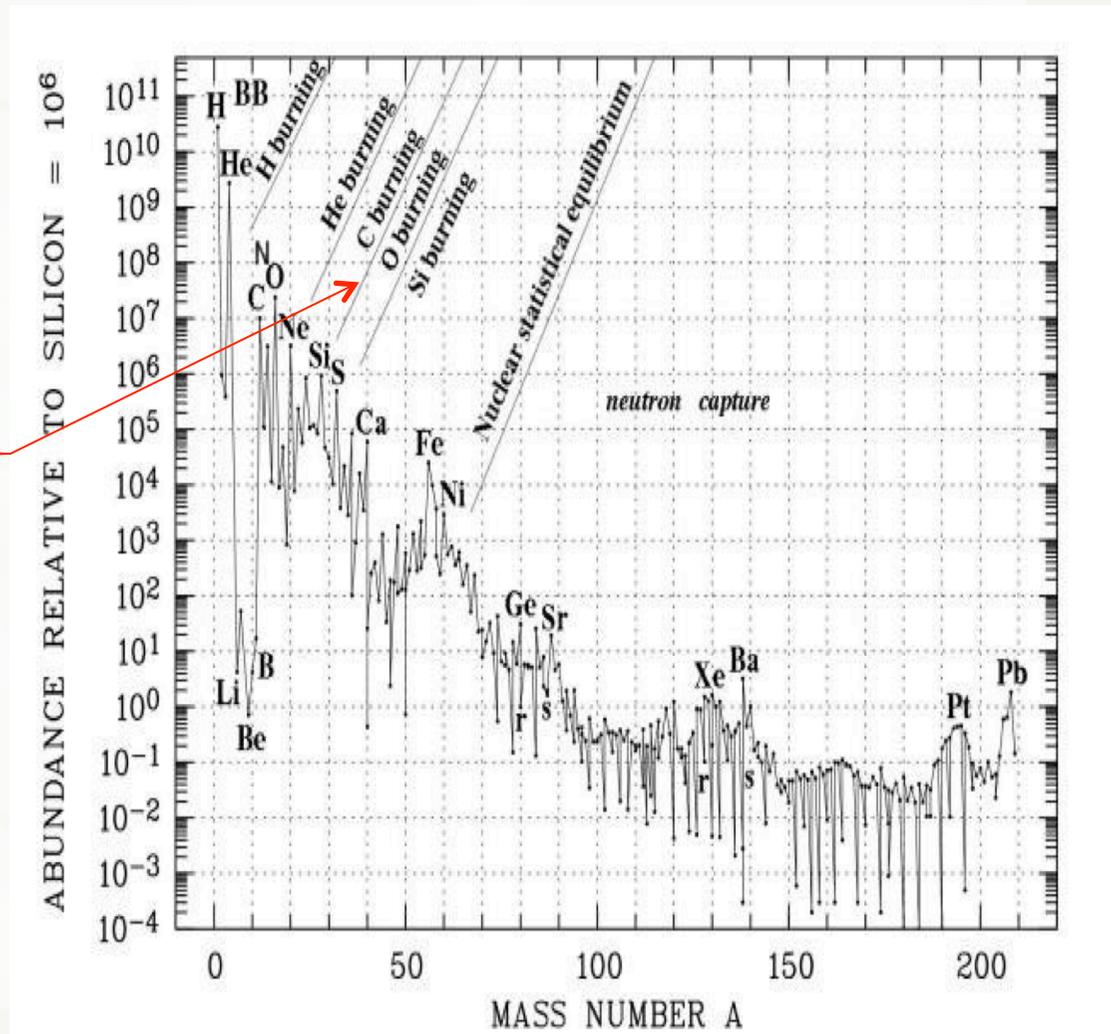
FUSIONS DU CARBONE AU FER

- $3 \alpha \rightarrow {}^{12}\text{C}$
- ${}^{12}_6\text{C} + \alpha \rightarrow {}^{16}_8\text{O}$
- ${}^{12}_6\text{C} + {}^{12}_6\text{C} \rightarrow {}^{20}_{10}\text{Ne} + \alpha$
(ou ${}^{23}_{11}\text{Na} + p$ ou ${}^{23}_{12}\text{Mg} + n$)



FUSIONS DU CARBONE AU FER

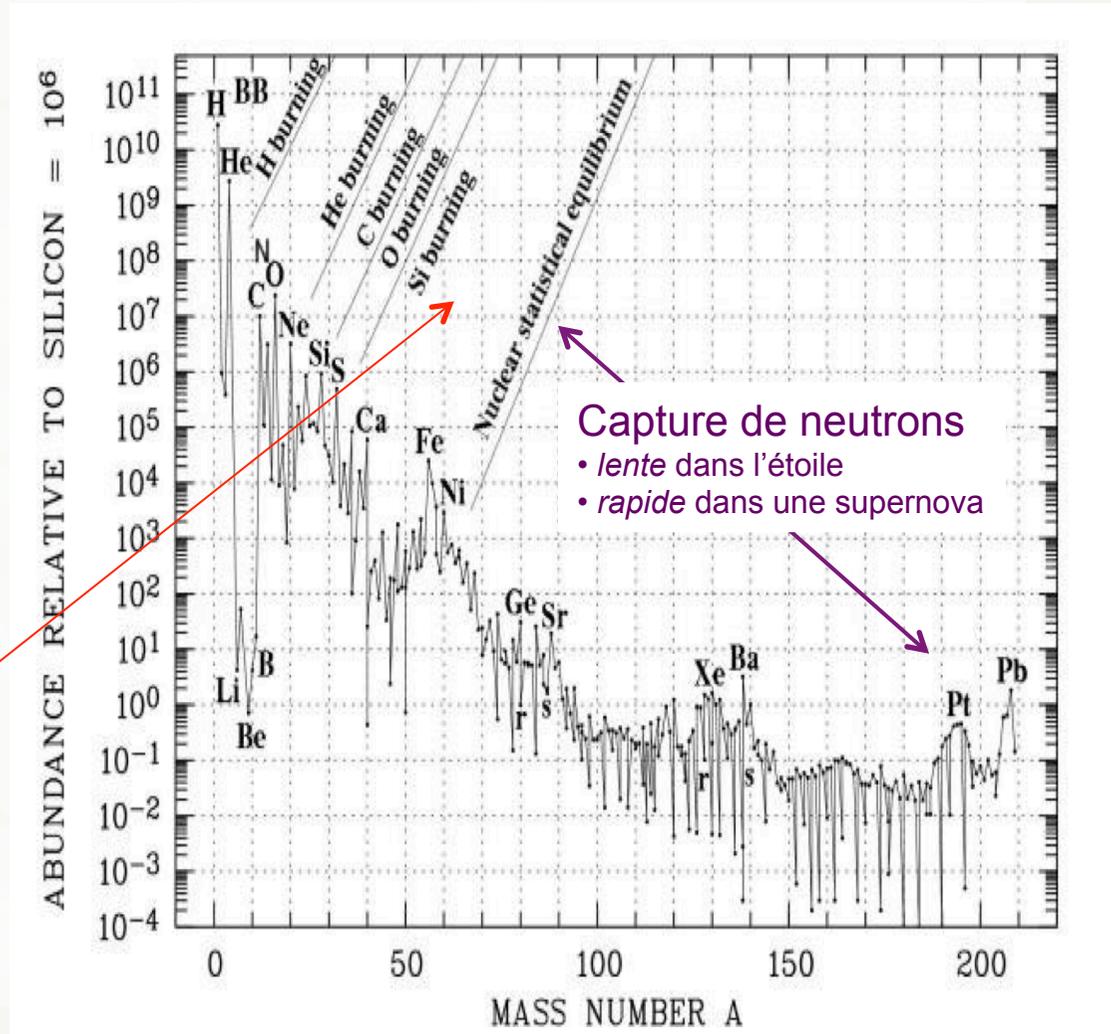
- $3 \alpha \rightarrow {}^{12}_6\text{C}$
- ${}^{12}_6\text{C} + \alpha \rightarrow {}^{16}_8\text{O}$
- ${}^{12}_6\text{C} + {}^{12}_6\text{C} \rightarrow {}^{20}_{10}\text{Ne} + \alpha$
(ou ${}^{23}_{11}\text{Na} + p$ ou ${}^{23}_{12}\text{Mg} + n$)
- ${}^{16}_8\text{O} + \alpha \rightarrow {}^{20}_{10}\text{Ne}$
- ${}^{16}_8\text{O} + {}^{16}_8\text{O} \rightarrow {}^{28}_{14}\text{Si} + \alpha$
(ou ${}^{31}_{15}\text{P} + p$ ou ${}^{31}_{16}\text{S} + n$)

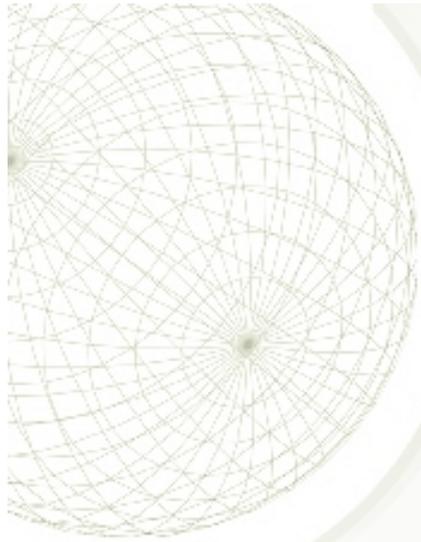


FUSIONS DU CARBONE AU FER

- $3 \alpha \rightarrow {}^{12}_6\text{C}$
- ${}^{12}_6\text{C} + \alpha \rightarrow {}^{16}_8\text{O}$
- ${}^{12}_6\text{C} + {}^{12}_6\text{C} \rightarrow {}^{20}_{10}\text{Ne} + \alpha$
(ou ${}^{23}_{11}\text{Na} + p$ ou ${}^{23}_{12}\text{Mg} + n$)
- ${}^{16}_8\text{O} + \alpha \rightarrow {}^{20}_{10}\text{Ne}$
- ${}^{16}_8\text{O} + {}^{16}_8\text{O} \rightarrow {}^{28}_{14}\text{Si} + \alpha$
(ou ${}^{31}_{15}\text{P} + p$ ou ${}^{31}_{16}\text{S} + n$)
- ${}^{20}_{10}\text{Ne} + \alpha \rightarrow {}^{24}_{12}\text{Mg}$
- ${}^{24}_{12}\text{Mg} + \alpha \rightarrow {}^{28}_{14}\text{Si}$
- ${}^{28}_{14}\text{Si} + \alpha \rightarrow {}^{32}_{16}\text{S}$
- ...
- ${}^{52}_{26}\text{Fe} + \alpha \rightarrow {}^{56}_{28}\text{Ni}$

Processus α





Merci de votre attention !

