

La nucléosynthèse

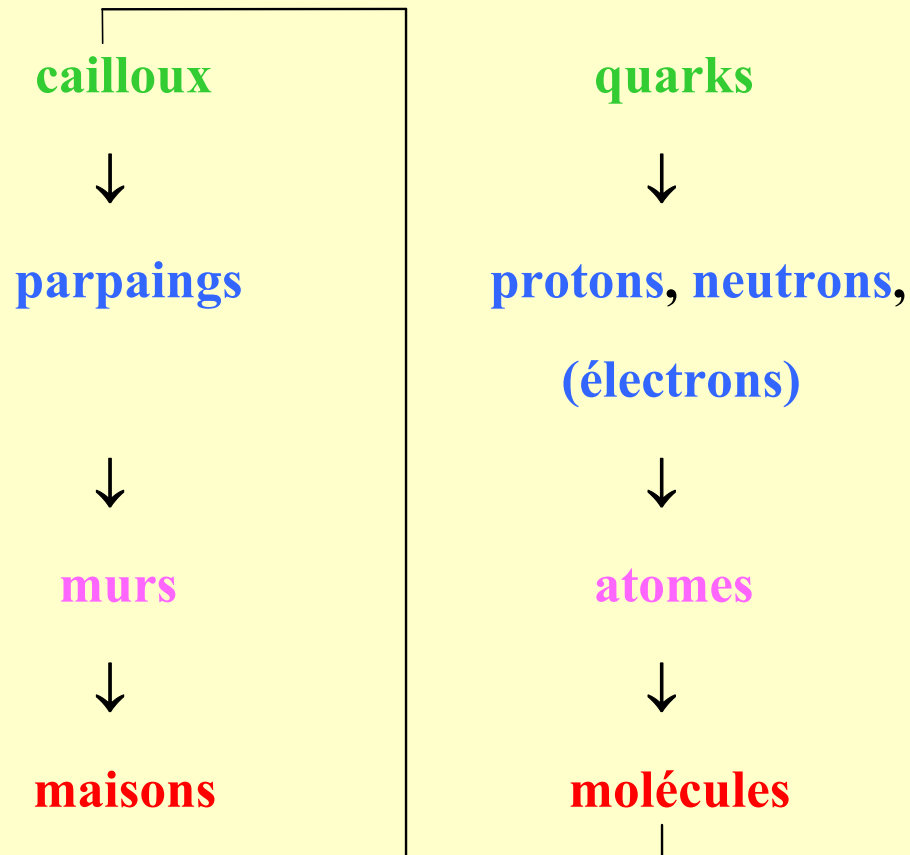
ou

*« Du Big Bang à l'uranium : la réaction
nucléaire à l'origine de la vie »*

Professeur Jacques FOOS



La matière est organisée comme un jeu de construction :



LES TROIS ACTEURS PRINCIPAUX



* le proton \oplus charge positive



* le neutron \circ charge nulle

constituent le noyau positif de l'atome



* l'électron \ominus charge négative

(1 800 fois plus léger qu'un neutron ou proton)

Il contribue à la neutralité de l'atome : il y a autant d'électrons \ominus que de protons \oplus dans un atome



LES TROIS ACTEURS PRINCIPAUX

Le nombre de protons caractérise un élément

Le nombre de neutrons dans un atome peut, en revanche, varier. Ils contribuent à la cohésion du noyau et à la masse de l'atome.



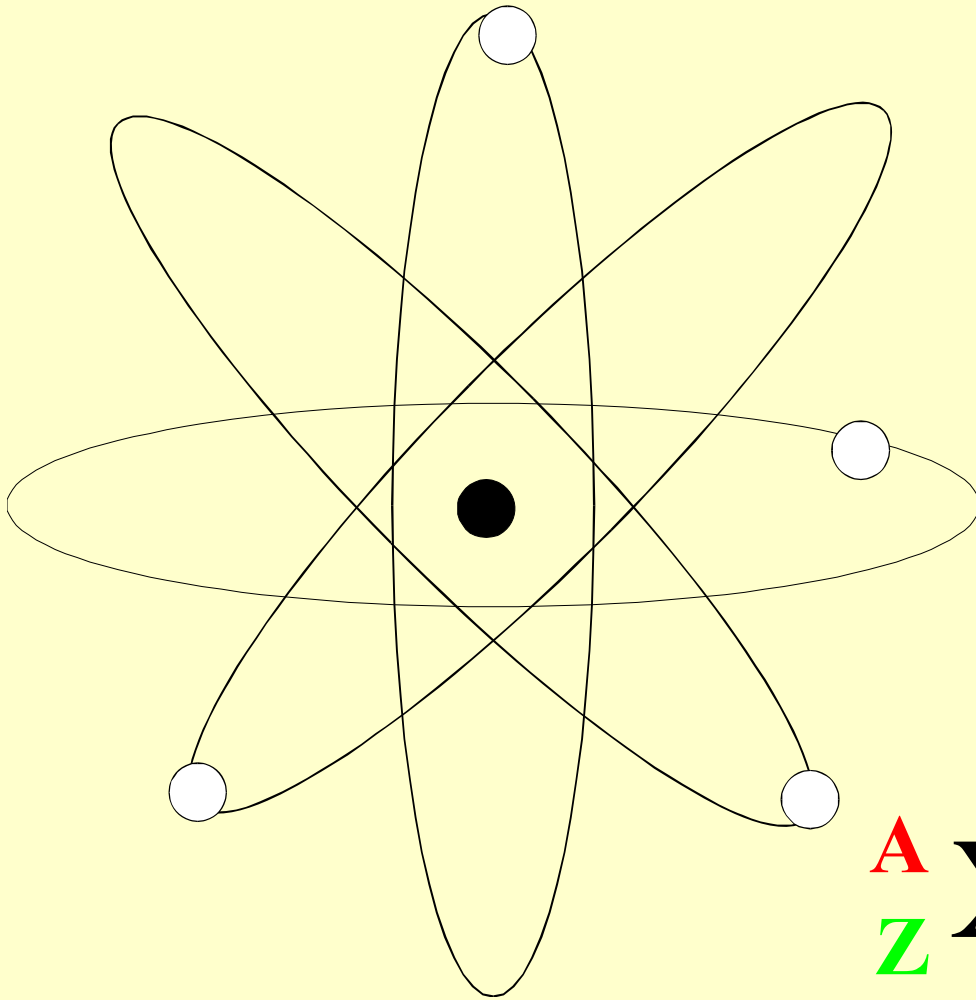
- **du fer ?** **26 protons et 30 neutrons**
- **du carbone ?** **6 protons et 6 neutrons**
- **1 proton de plus ? c'est de l'azote**
- **79 protons ?** **de l'or**

Dans la nature :

- **le plus abondant** : **l'hydrogène (1 proton)**
- **le plus lourd** : **l'uranium (92 protons)**



L'atome



A **X** **A = protons + neutrons**
Z **X** **Z = protons**



Classification périodique

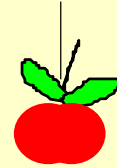
H 1		élément possédant des isotopes stable(s) et radioactif(s)																He 2	
Fr 87		élément ne possédant que des isotopes radioactifs																	
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10		
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18		
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn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



LES INTERACTIONS

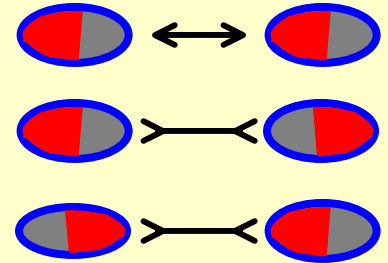
- **Gravitationnelle (Newton)**

- attraction entre masses
- portée infinie



- **Électromagnétique (Coulomb)**

- attraction entre charges de signe contraire
- répulsion entre charges de même signe
- portée infinie

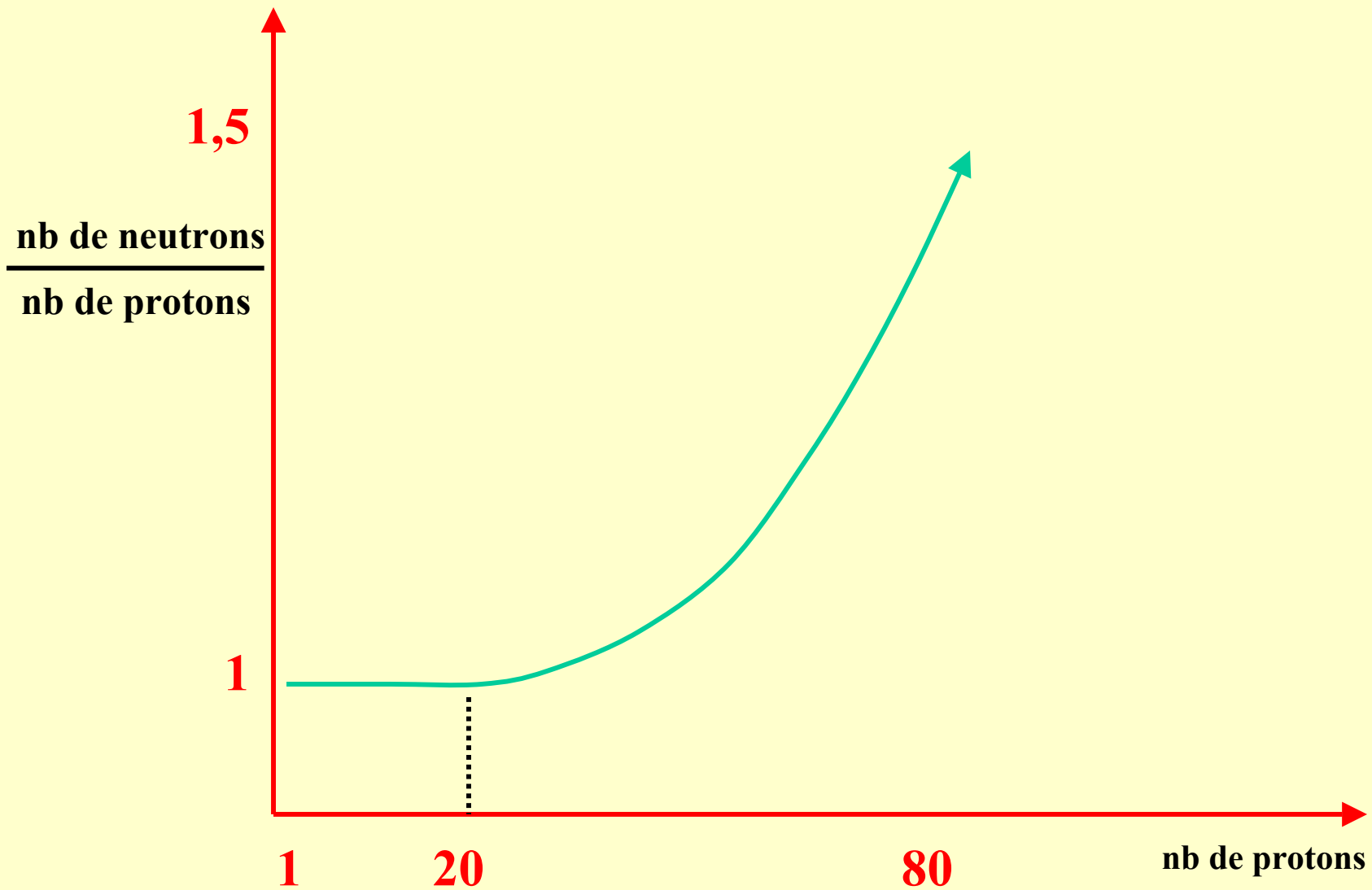


- **Nucléaire forte**

- lie les protons et les neutrons entre eux dans le noyau
- portée très faible.

- **(Nucléaire faible)**





Le neutrino ν

Compagnon de l'électron

Sans charge électrique

Sans masse (?)

Son inventeur : Pauli en 1931

Flux de neutrinos dans l'univers : 60 milliards / $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$



solide



liquide



gaz



plasma

quelques milliers de degrés

10^3 K

million de degrés

10^6 K

(noyaux + électrons)



neutrons et protons

milliard de degrés

10^9 K



quarks

milliers de milliards de degrés

10^{12} K



?

**La nucléosynthèse suit le chemin inverse, depuis le Big Bang
(-15 milliards d'années environ).**



Nucléosynthèse

H 1																		He 2	
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10		
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18		
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36		
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	<i>Tc</i> 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54		
Cs 55	Ba 56	⁵⁷ à 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	<i>Po</i> 84	<i>At</i> 85	<i>Rn</i> 86		
<i>Fr</i> 87	<i>Ra</i> 88	<i>Ac</i> 89	Th 90	<i>Pa</i> 91	U 92	<i>Np</i> 93	<i>Pu</i> 94												
		La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	<i>Pm</i> 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71			



10^{-43} s



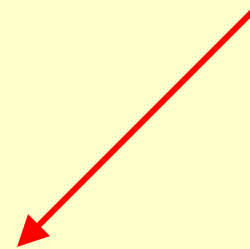
10^{-6} s

Big Bang



neutrons, protons

électrons



Big Bang

Temps de Planck : $5,4 \cdot 10^{-44}$ s

**Gamow (Alpher, Bethe, Gamow) 1948 :
rayonnement thermique originel estimé à 6 K**

Penzias et Wilson 1965 : 3 K

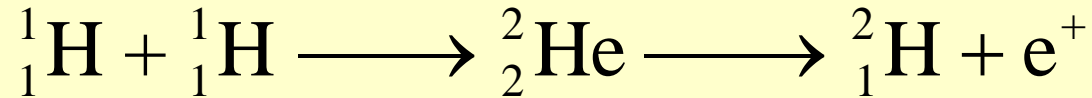
Satellites Cobé (1990) et WMAP* (2001) : 2,736 K

*** : Wilkinson Microwave Anisotropy Probe**



Au début de la nucléosynthèse : l'hydrogène

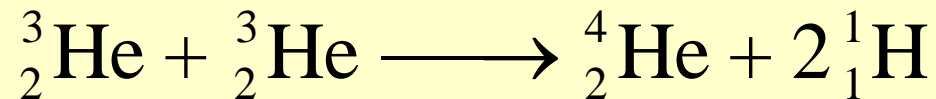
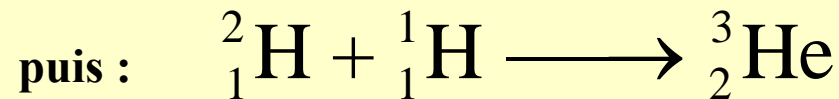
Les nucléons commencent à s'associer :



(hydrogène)

(hélium)

(deutérium)

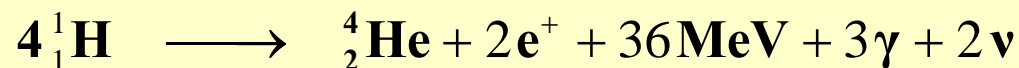
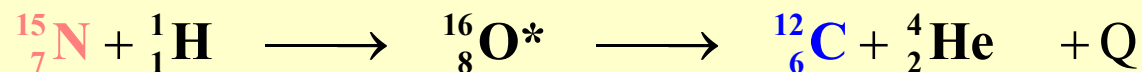
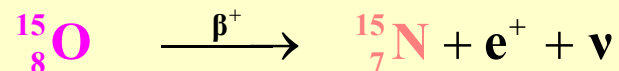
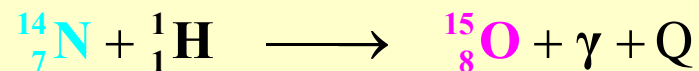
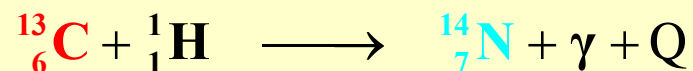
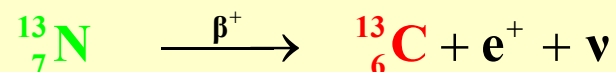
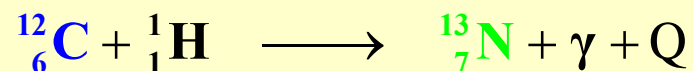


**Ceci en quelques minutes après le Big Bang
(T = 15 millions de degrés)**

**L'énergie dégagée lors de la formation de ces réactions
est considérable (énergie de fusion)**

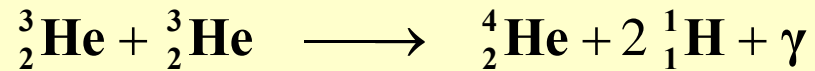
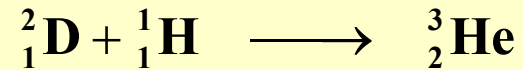
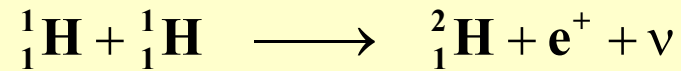


Cycle de Bethe (ou cycle CNO)



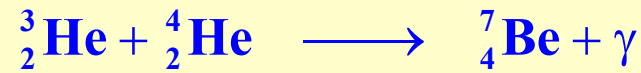
Autres cycles

Cycle ppI

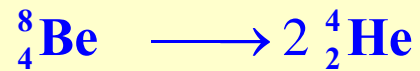
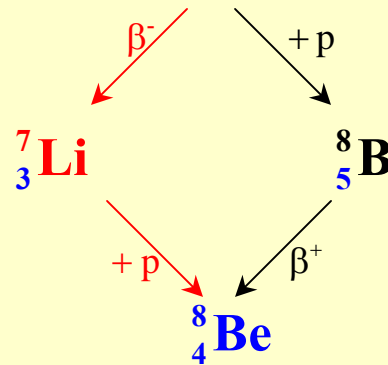


Autres cycles

Cycle pp II



Cycle pp III



Au bout de quelques minutes, les éléments suivants :

H, D, ${}^4_2\text{He}$ sont présents dans l'univers

Puis RIEN → 1 million d'années !

La gravité va entrer en lice → nouvelle condensation.

→ formation d'étoiles, qui brillent.



briller : perte d'énergie qui menace l'équilibre de l'étoile

perte compensée * en brûlant le combustible nucléaire
* en se contractant.

Soleil 1ère phase : 15 millions d'années

2ème phase : actuelle depuis 4,6 milliards d'années

(encore autant)



Notre étoile

Nom : SOLEIL

**Âge : Un peu moins de 5 Ga
(milliards d'années)**

Espérance de vie : Entre 12 et 13 Ga

**Taille : $d = 1\,400\,000\text{ km}$ (109 T)
 $V = 1,4 \times 10^{18}\text{ km}^3$ (1 300 000 T)**

Masse : 2×10^{27} tonnes

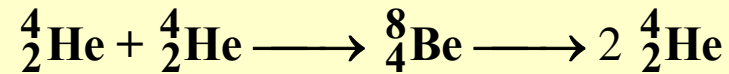
Puissance : 4×10^{27} kW

**Signe particulier : Consomme, pour cela, 460 millions
de tonnes d'hydrogène par seconde**

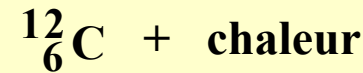
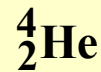


La température augmente

→ 100 millions de degrés



raté ?
NON car



Le carbone va être la brique sur laquelle va s'appuyer toute la synthèse future !

On a sauté le gouffre constitué par :

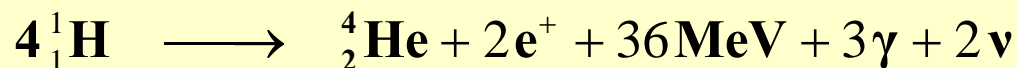
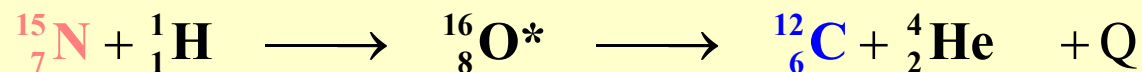
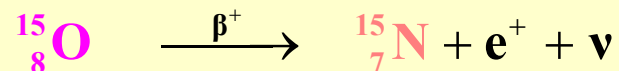
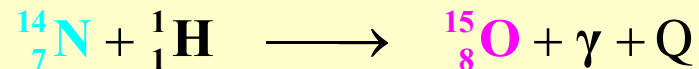
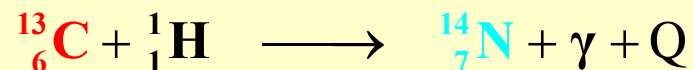
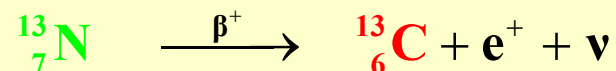
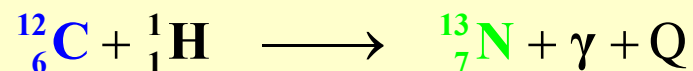
${}^3\text{Li}$
(lithium)

${}^4\text{Be}$
béryllium

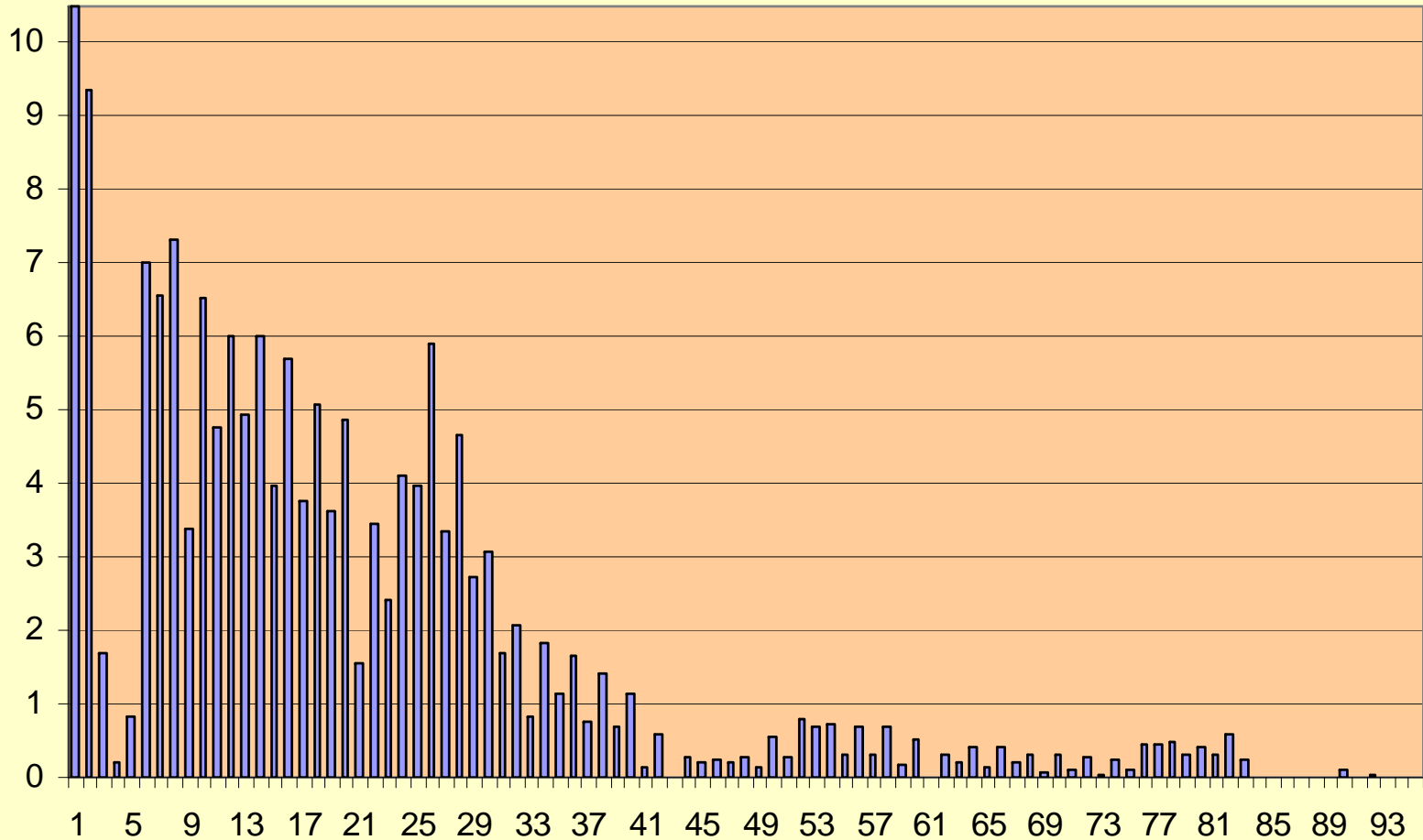
${}^5\text{B}$
bore)



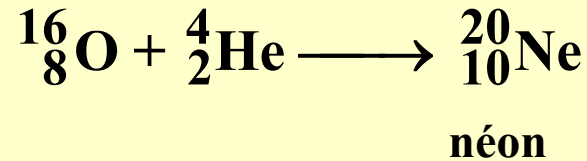
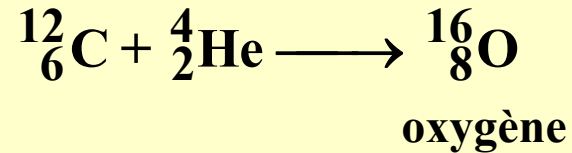
Cycle de Bethe (ou cycle CNO)



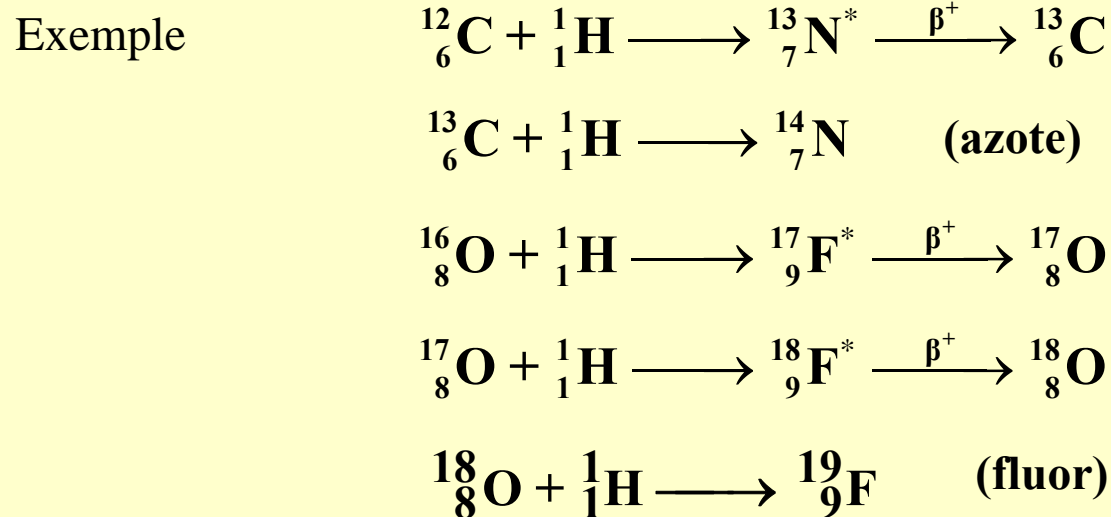
Abondance des éléments



La synthèse continue



Les éléments de Z impair sont fabriqués par des réactions secondaires :



Voilà pour tous les éléments jusqu'au dixième (néon)

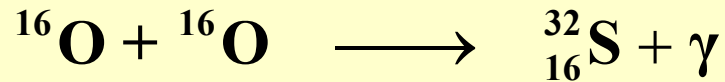
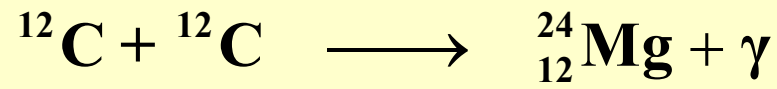


Nucléosynthèse



**La température augmente et atteint
le milliard de degrés**

La masse volumique augmente aussi : 1 tonne par cm³



**Les réactions (p, γ), (γ , p), (γ , n) et (α , γ) produisent
les noyaux intermédiaires**



Problème : Comment dépasser le soufre S ?

Par équilibrage entre des réactions (α, γ) et (γ, α)

La synthèse continue : $^{32}\text{S} (\alpha, \gamma) ^{36}\text{Ar}$

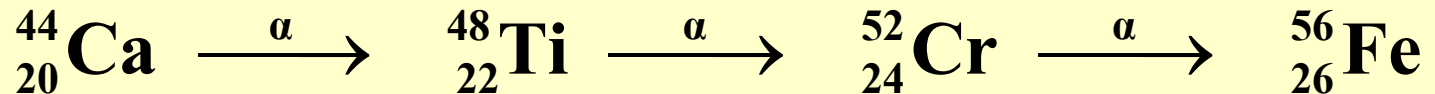
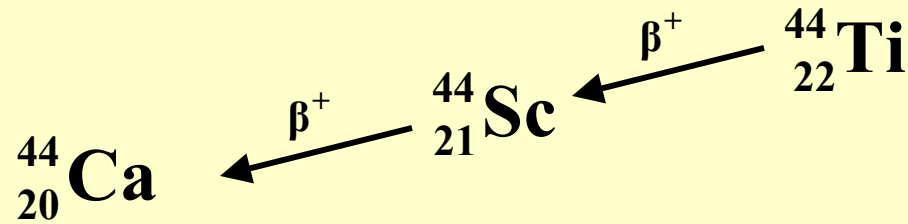
$^{36}\text{Ar} (\alpha, \gamma) ^{40}\text{Ca}$

$^{40}\text{Ca} (\alpha, \gamma) ^{44}\text{Ti}$



Nouveau problème

Le nombre de neutrons dans le noyau doit augmenter pour assurer la cohésion de celui-ci.



Les réactions (p, γ), (γ , p) et (γ , n) produisent les noyaux intermédiaires



La fabrication des éléments continue donc ainsi

jusqu'au fer ${}_{26}^{56}\text{Fe}$

Mais l'hélium s'épuise !

1 seul projectile va subsister :

le neutron

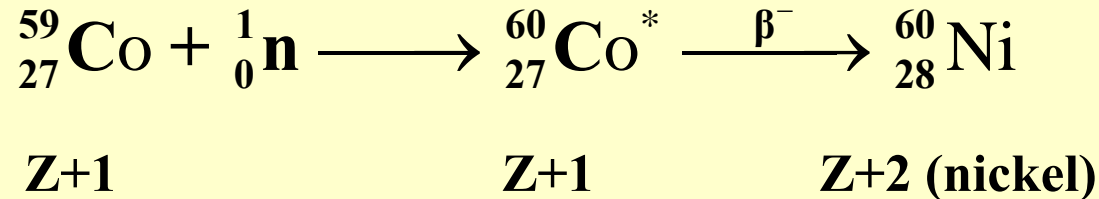
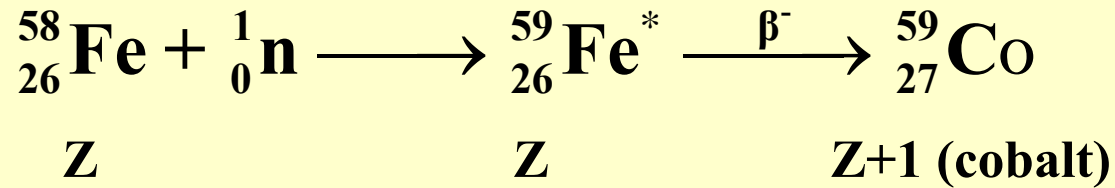
insensible à la charge électrique

grâce à lui, tout peut continuer !



Production des éléments du fer au plomb et au bismuth (57 éléments !)

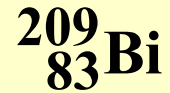
Le processus est simple



On accumule de la cible (Z+1) et, après absorption d'un neutron, par transformations radioactives, on obtient l'élément suivant (Z+2), etc.



Problème : Le dernier élément stable de la nature est le bismuth



Tous les éléments suivants ont des durées de vie trop courtes pour former une cible

(ex : francium ${}_{87}\text{Fr}$: 20 minutes)

Comment expliquer alors la formation du thorium (90 protons) et de l'uranium (92 protons), présents en grande quantité dans la croûte terrestre ?



Leur synthèse a lieu lors de la formation des supernovae

Il faut sauter du $_{83}\text{Bi}$ \rightarrow $_{90}\text{Th}$ et $_{92}\text{U}$

Bi Po At Rn Fr Ra Ac **Th** Pa **U**



Comment ??



La contraction gravitationnelle conduit à des étoiles très chaudes (10 milliards de degrés !) et leur masse volumique atteint 100 tonnes/cm³ !

Au centre : les noyaux les plus solides nickel et fer

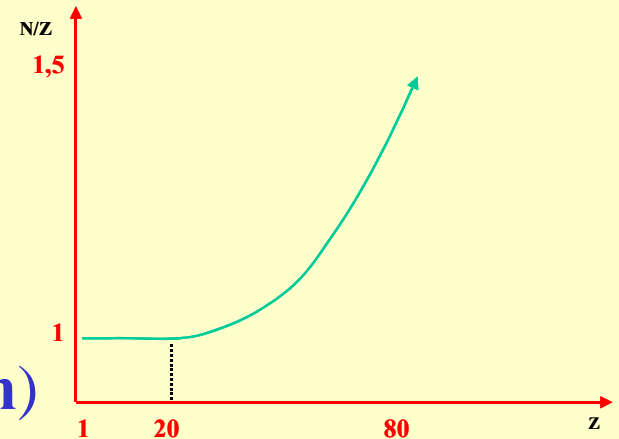
Autour : une couronne de neutrons

Puis les éléments de la classification déjà formés

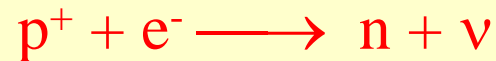


Sources de neutrons

* Réactions de photodésintégrations
(inverse des réactions de fusion)



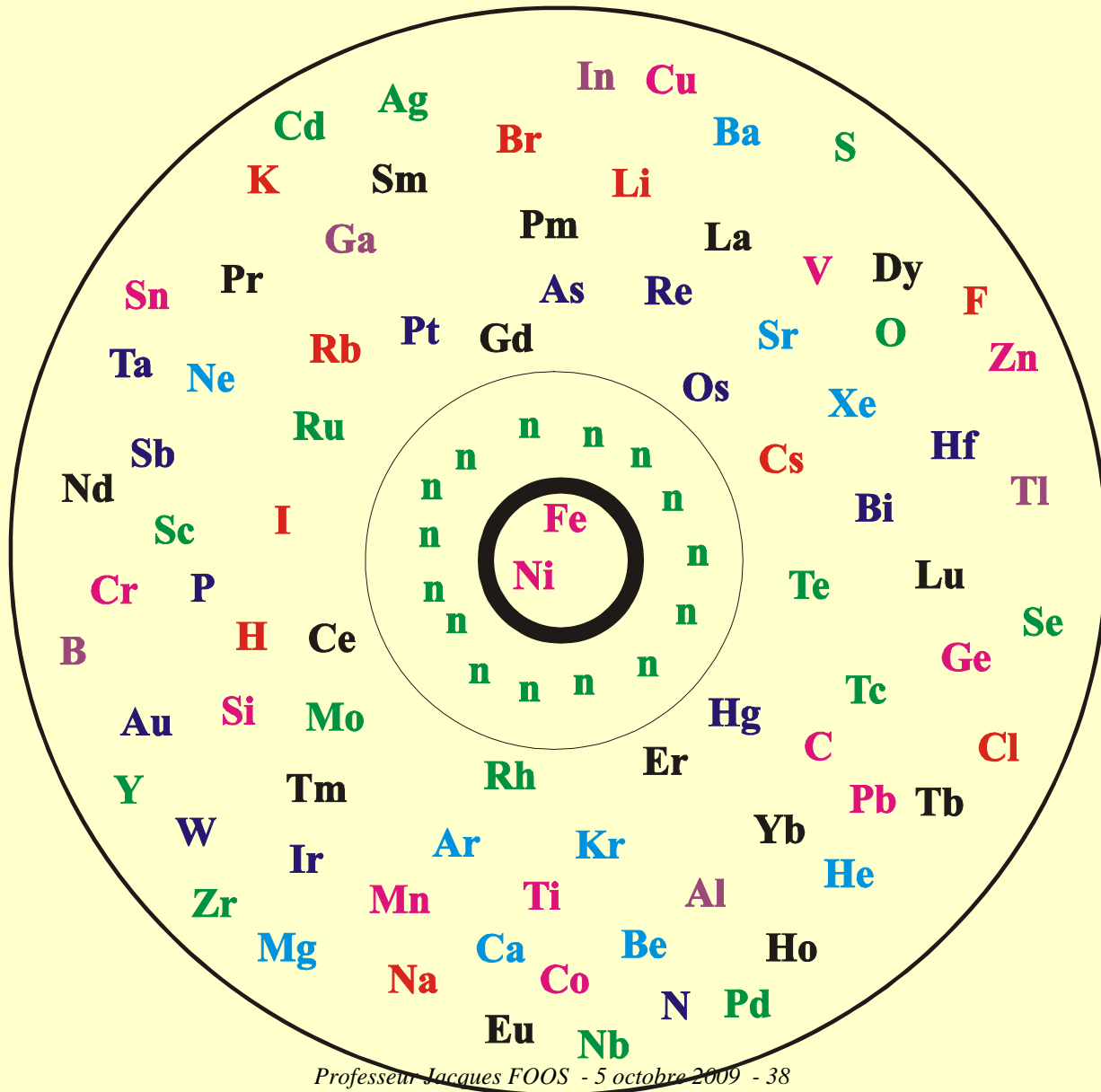
* Réactions de transformations de protons en neutrons



→ source de neutrinos



SUPERNOVA



SUPERNOVA

Masse volumique du cœur :

1 milliard de tonnes par centimètre cube

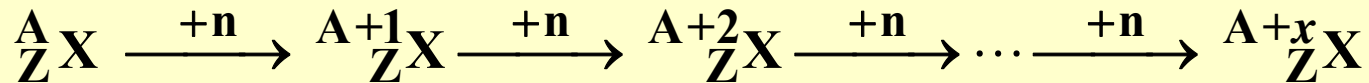
(Terre : diamètre 220 mètres)

**L'étoile s'effondre : une fantastique onde de choc remonte
toutes les couches de l'étoile jusqu'à la surface (24 h)**

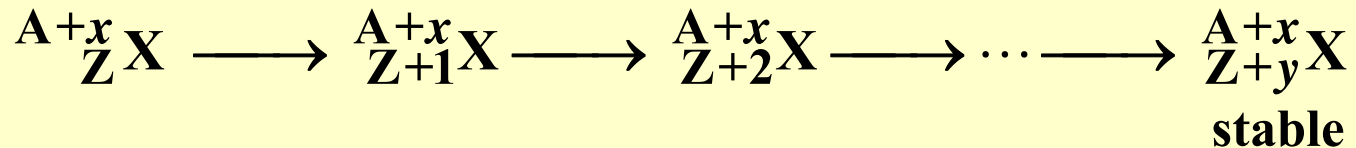


A la suite de l'effondrement gravitationnel de l'étoile, la couronne est projetée vers l'extérieur **et reçoit l'énorme flux de neutrons venus du centre :**

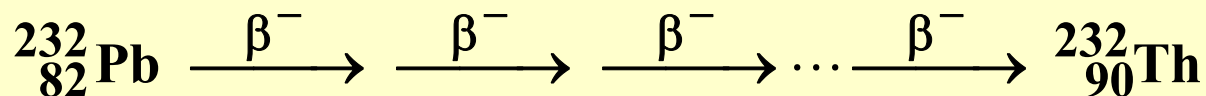
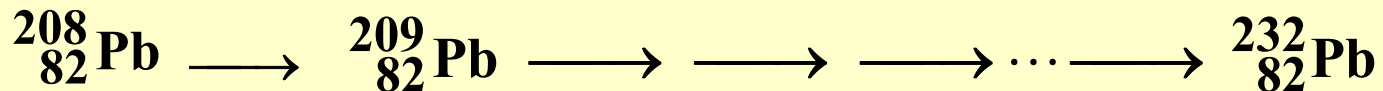
(10^{32} n/cm².s !)



puis désintégrations β^- successives :



Exemple :



Nucléosynthèse

H 1																		He 2	
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10		
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18		
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36		
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	<i>Tc</i> 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54		
Cs 55	Ba 56	⁵⁷ à 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	<i>Po</i> 84	<i>At</i> 85	<i>Rn</i> 86		
<i>Fr</i> 87	<i>Ra</i> 88	<i>Ac</i> 89	Th 90	<i>Pa</i> 91	U 92	<i>Np</i> 93	<i>Pu</i> 94												
		La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	<i>Pm</i> 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71			



Supernova ou « étoile – hôte »

5 apparitions notées en 9 siècles

1006 la plus longue (3 ans, 7 200 AL)

1054 (4 juillet) → nébuleuse du crabe : la plus brillante
(653 jours, 6 300 AL)

1181 la moins brillante (168 jours, distance inconnue)

1572 décrite par Tycho Brahe (\approx 2 ans, 7 500 AL)

1604 (9 octobre) décrite par Johannes Kepler
→ Nova Stella (18 mois, 20 000 AL)

Avant la découverte de la lunette astronomique (1608)

Puis 24 février 1987 Sk69°202 → SN 1987 A

Sk(Sanduleak) 69°202 : 168 000 AL, 20 masses solaires



Après ?

atomes → molécules perdues dans l'espace

(entre 10^{-30} et 10^{-31} g/cm³)

⇒ se réfugient pour former des planètes

2 dernières questions :

- * expansion infinie ou Big Crunch?
- * jusqu'à quand ? → le Kalpa

ou la mort du proton

