





*Un peu de cosmologie*

Hubble Deep Field (detail)  $1.5 \times 1.125$  arc-minutes =  $0.00044 \times 0.00053$  radians =  $1.44 \times 10^{-7}$  square radians =  $1/87,300,000$  of the sky  
Looking at one such area per second, it would take 2.77 years to see the whole sky: <http://hubblesite.org/newscenter/archive/1996/01/>

# Fuite des galaxies

## NEBULÆ.

BY V. M. SLIPHER, PH.D.

(Read April 13, 1917.)



V. Slipher

TABLE I.  
RADIAL VELOCITIES OF TWENTY-FIVE SPIRAL NEBULÆ.

Nebula.	Vel.	Nebula.	Vel.
N.G.C. 221	- 300 km.	N.G.C. 4526	+ 580 km.
224	- 300	4565	+ 1100
598	- 260	4594	+ 1100
1023	+ 300	4649	+ 1090
1068	+ 1100	4736	+ 290
2683	+ 400	4826	+ 150
3031	- 30	5005	+ 900
3115	+ 600	5055	+ 450
3379	+ 780	5194	+ 270
3521	+ 730	5236	+ 500
3623	+ 800	5866	+ 650
3627	+ 650	7331	+ 500
4258	+ 500		

Les galaxies s'éloignent de nous

# Fuite des galaxies

## NEBULÆ.

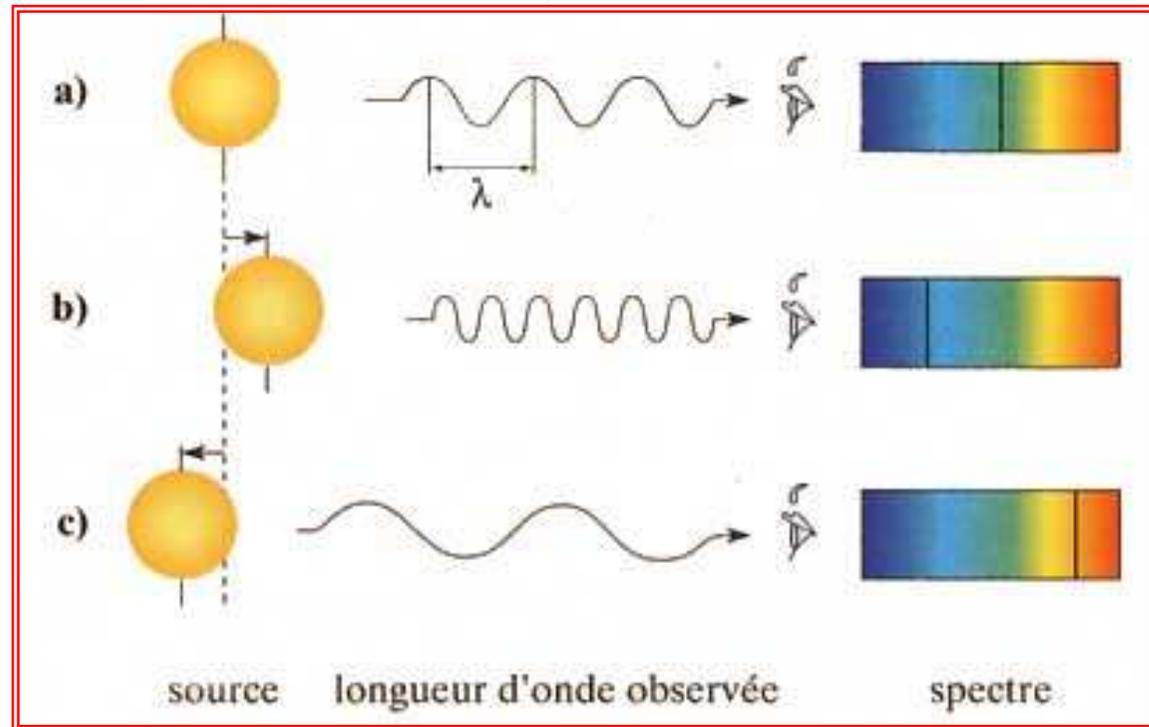
BY V. M. SLIPHER, PH.D.

(Read April 13, 1917.)



V. Slipher

TABLE I.



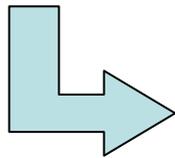
Il observe le phénomène mais ne le comprend pas car  
Il ne connaissait pas la distance



E. Hubble

Hubble connait la distance des galaxie  
(thanks miss Leavitt)

Il déduit donc :  $V = H \times D$



**Univers en expansion !**

1929

Vitesse

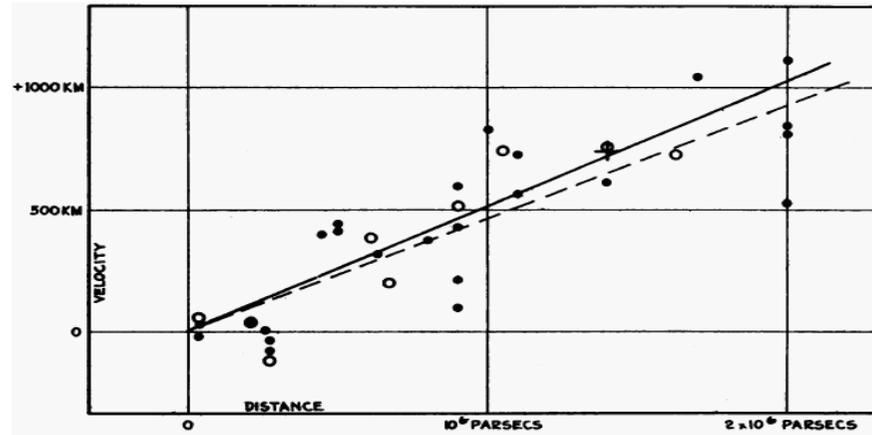
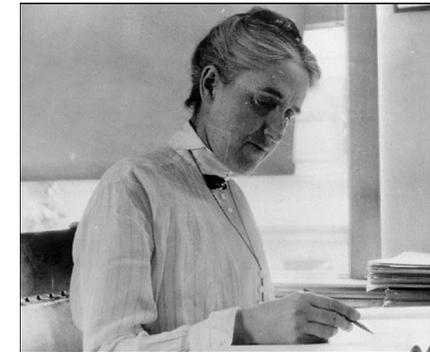


FIGURE 1  
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Distance

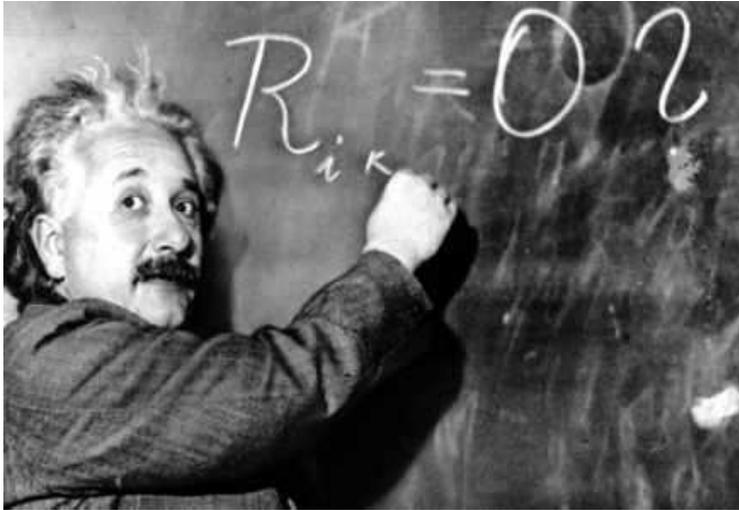


Leavitt



Céphéides

Il aurait pu le savoir déjà en 1917 mais il n'a pas voulu croire ses à équations



Ce qu'il obtient :

$$R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2}g_{\alpha\beta}R = 8\pi GT_{\alpha\beta}$$

Ce qu'il impose pour que l'Univers soit statique :

$$R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2}g_{\alpha\beta}R = 8\pi GT_{\alpha\beta} + \Lambda g_{\alpha\beta}$$

Constante  
cosmologique

Il manquait de données expérimentales !



En 1922 il reprend les équations de Einstein sans constante cosmologique

$$R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2}g_{\alpha\beta}R = 8\pi GT_{\alpha\beta} + \Lambda g_{\alpha\beta}$$



Friedmann

$a$  : facteur d'échelle

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{\kappa}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

Equation de Friedmann

=> Evolution de l'Univers

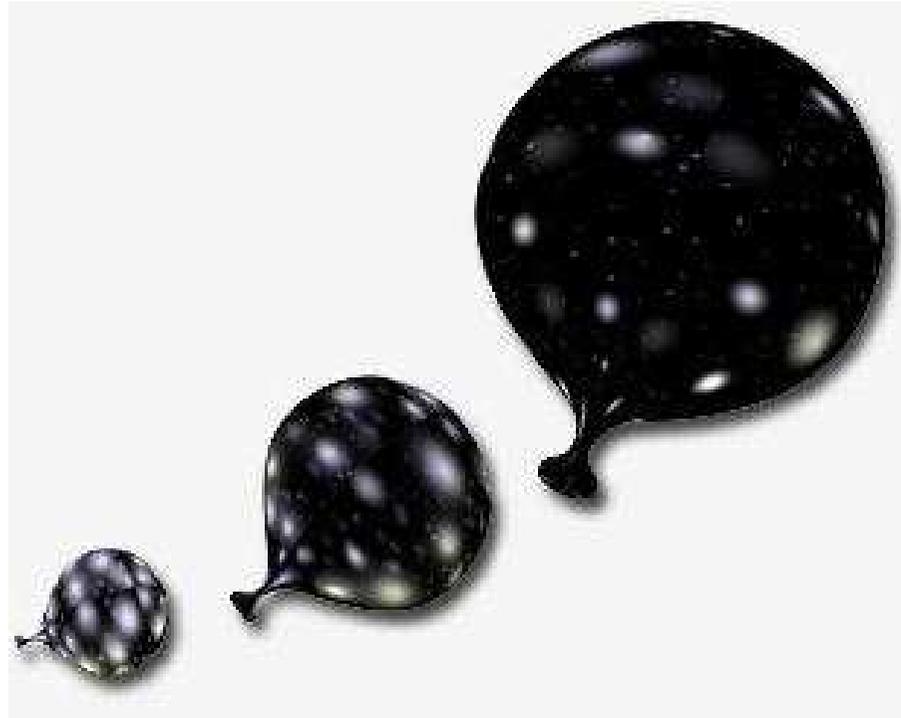
=> Expansion

*Si l'univers est en expansion, avant il était plus petit*

**=> Point initial**



G. Lemaitre



**« Atome Primitif » (1931)**

**1949 G. Gamow propose la création des éléments  
à partir du « Ylem » initial**

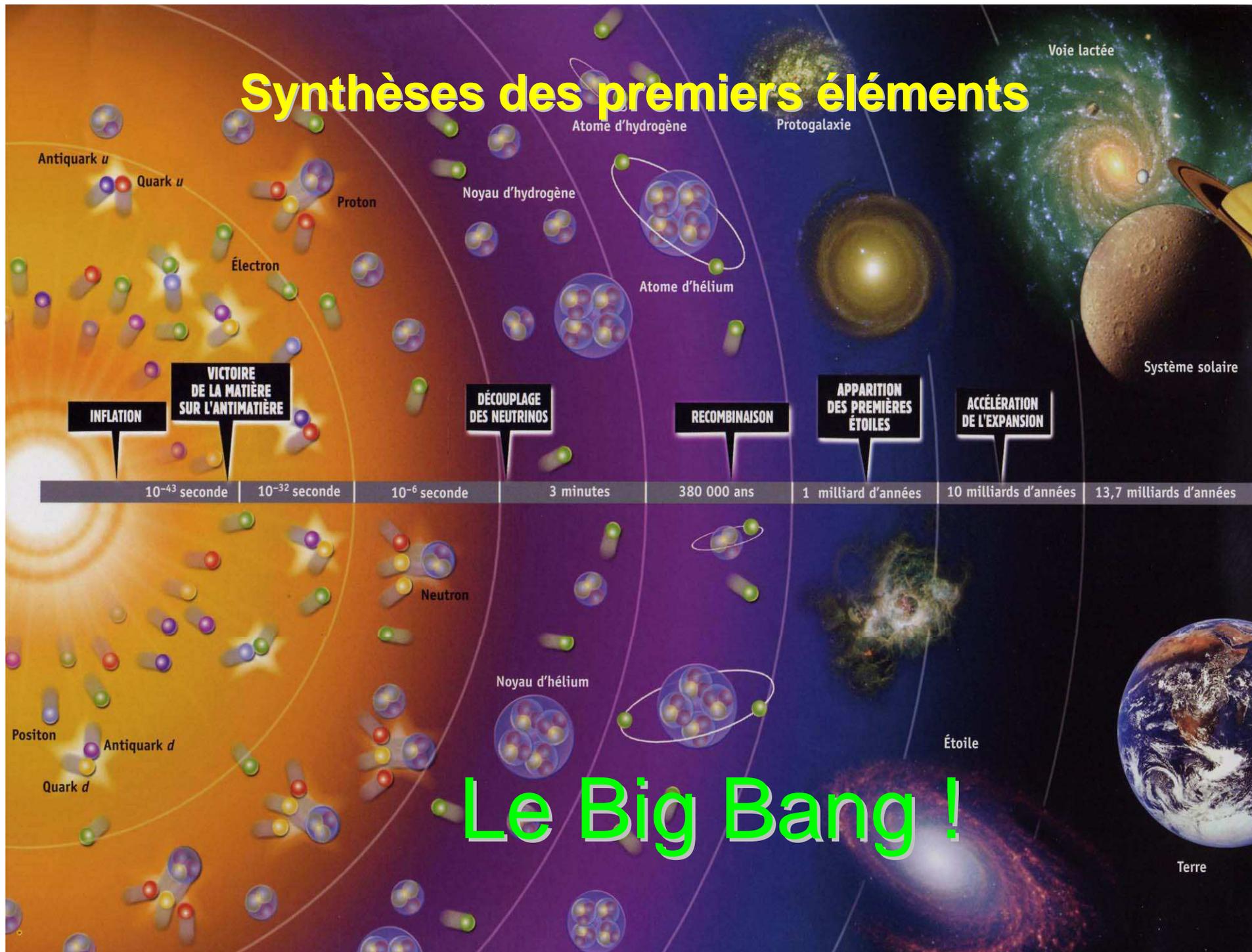
**Gamow**

**Herman**

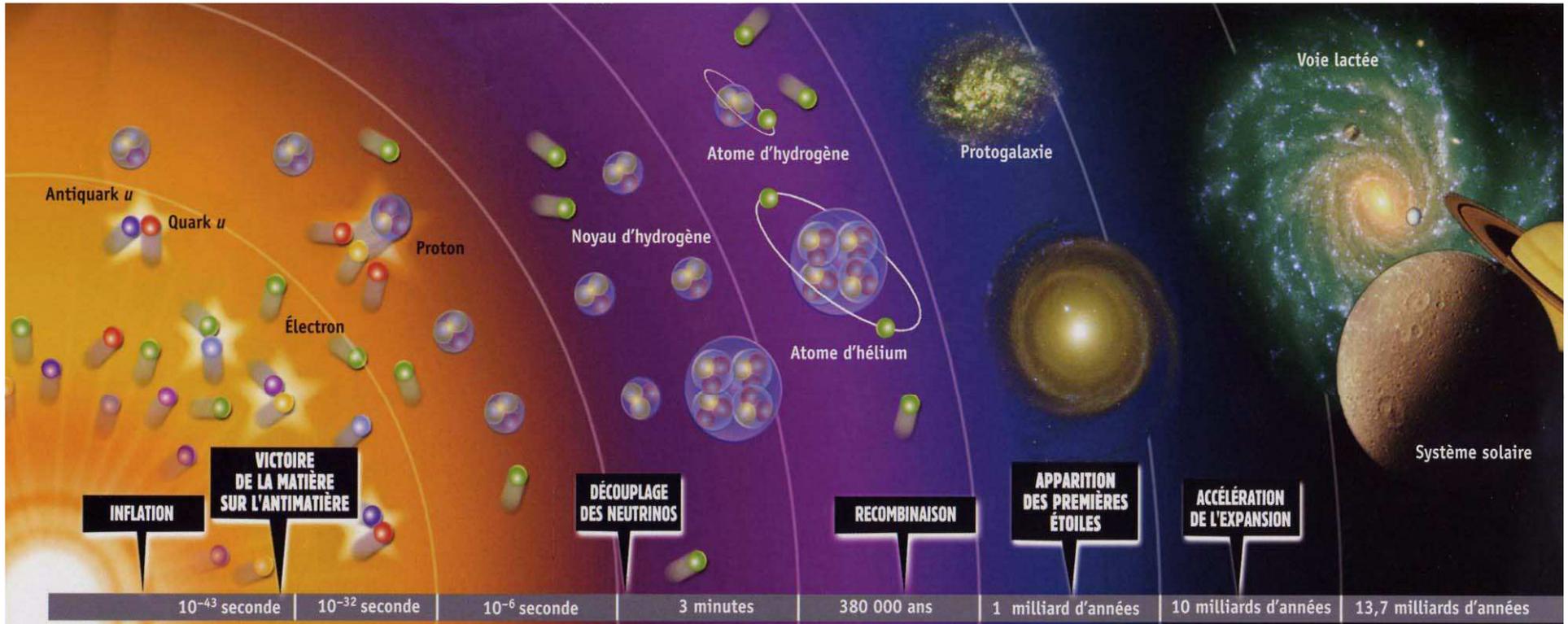


**Alpher**

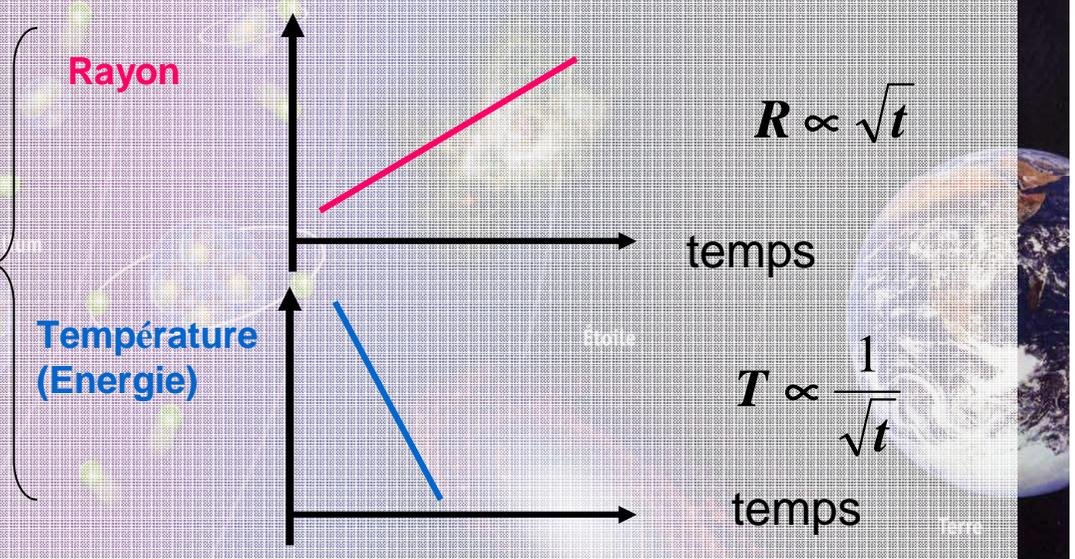
# Synthèses des premiers éléments

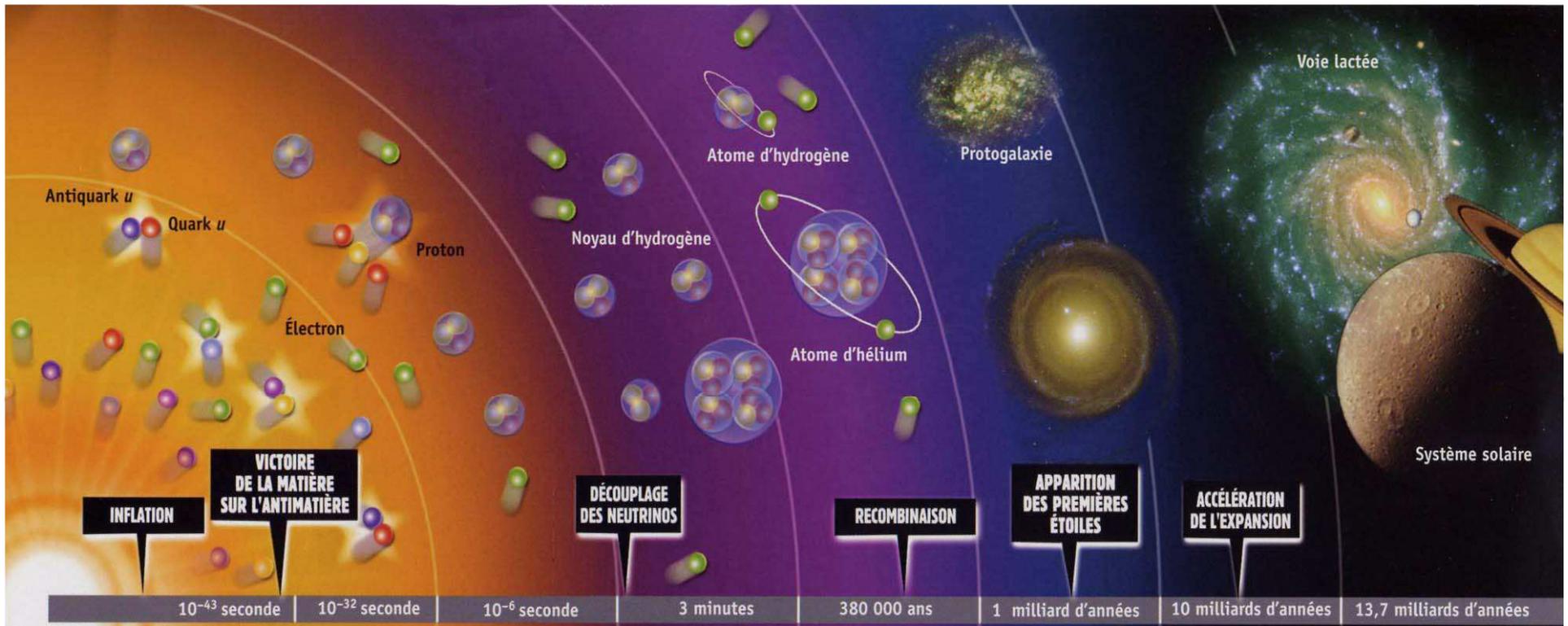


# Le Big Bang !



# Univers en expansion =>





$$T \approx 10 \text{ MeV}, t = 20 \text{ ms}$$

**Equilibre thermique entre  
nucleons, photons et leptons**

$p, n, e^-, \gamma, \nu$

Étoile

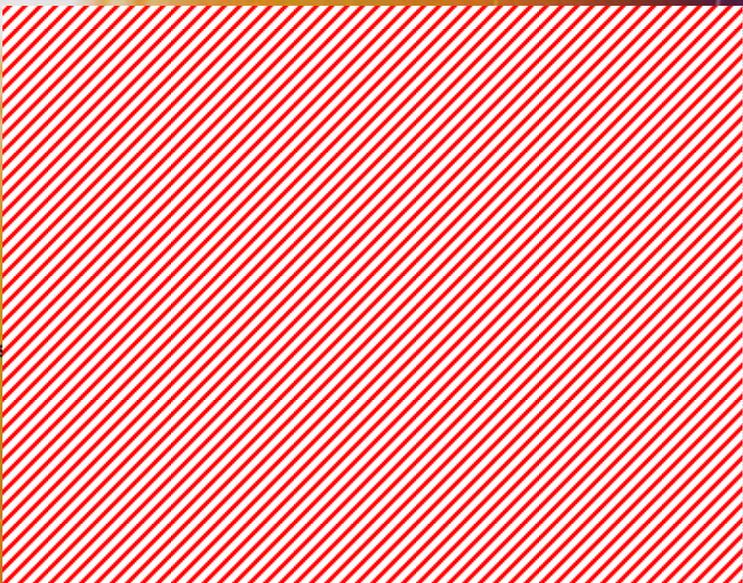
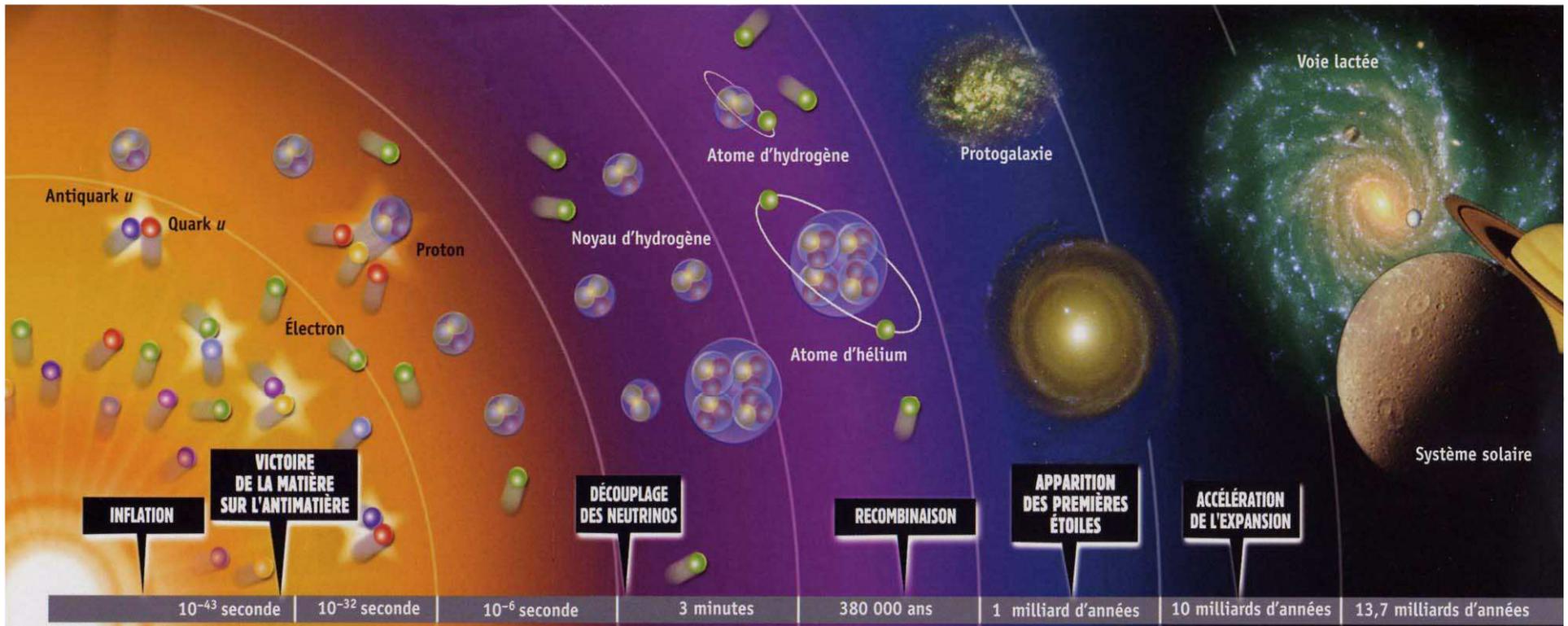
Terre

## L'équilibre entre particules

$$p + e^{-} \rightleftharpoons n + \nu_e$$

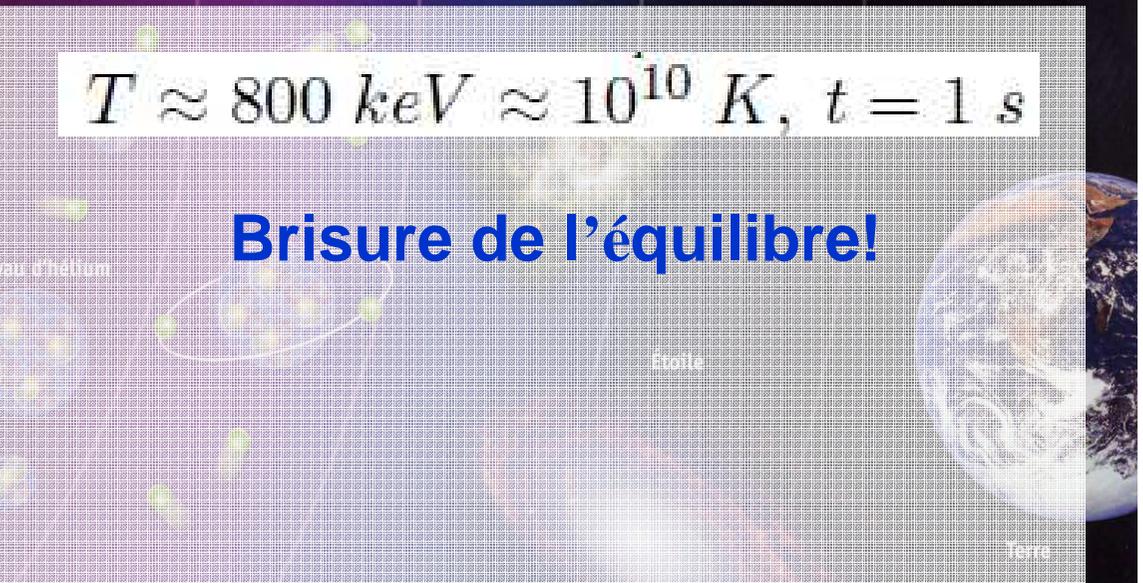
$$n + e^{+} \rightleftharpoons p + \bar{\nu}_e$$

$$n \rightleftharpoons p + e^{-} + \bar{\nu}_e$$



$$T \approx 800 \text{ keV} \approx 10^{10} \text{ K}, t = 1 \text{ s}$$

**Brisure de l'équilibre!**



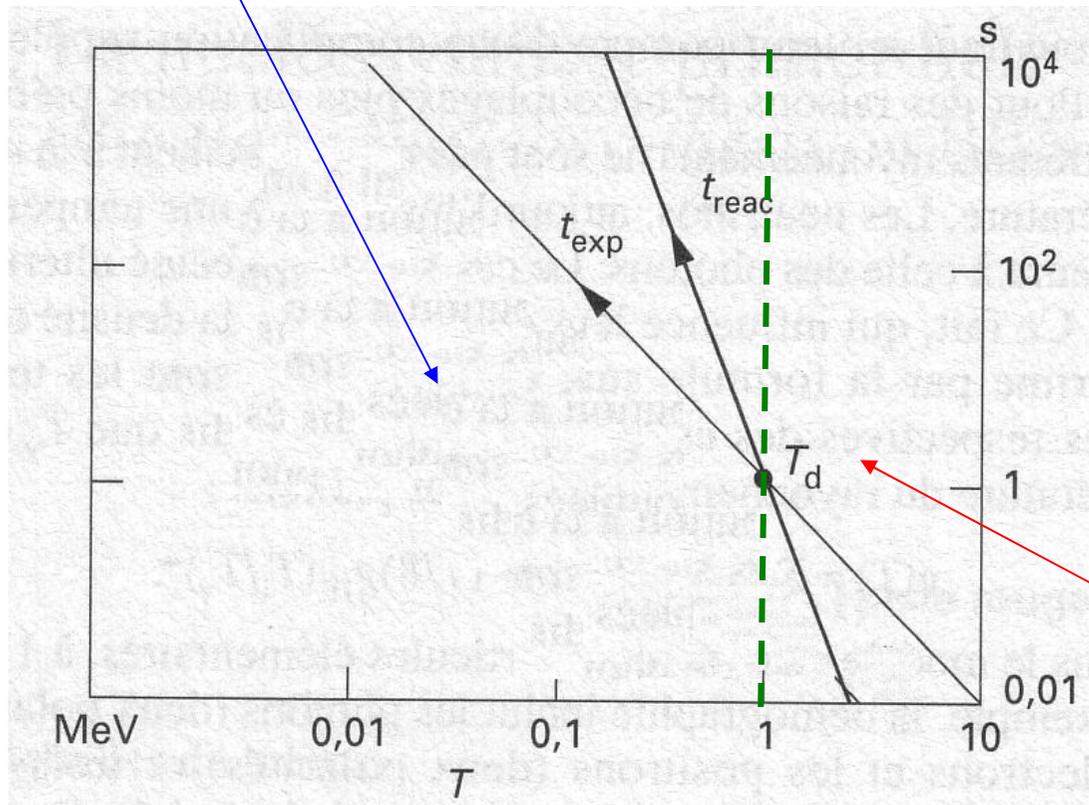
La probabilité d'une réaction dépend de l'énergie

$$t_{\text{reac}} (n + \nu_e \rightarrow p + e^-) \propto T^{-5}$$

$$t_{\text{exp}} \propto T^{-2}$$

Equation de Friedmann

Pas d'équilibre

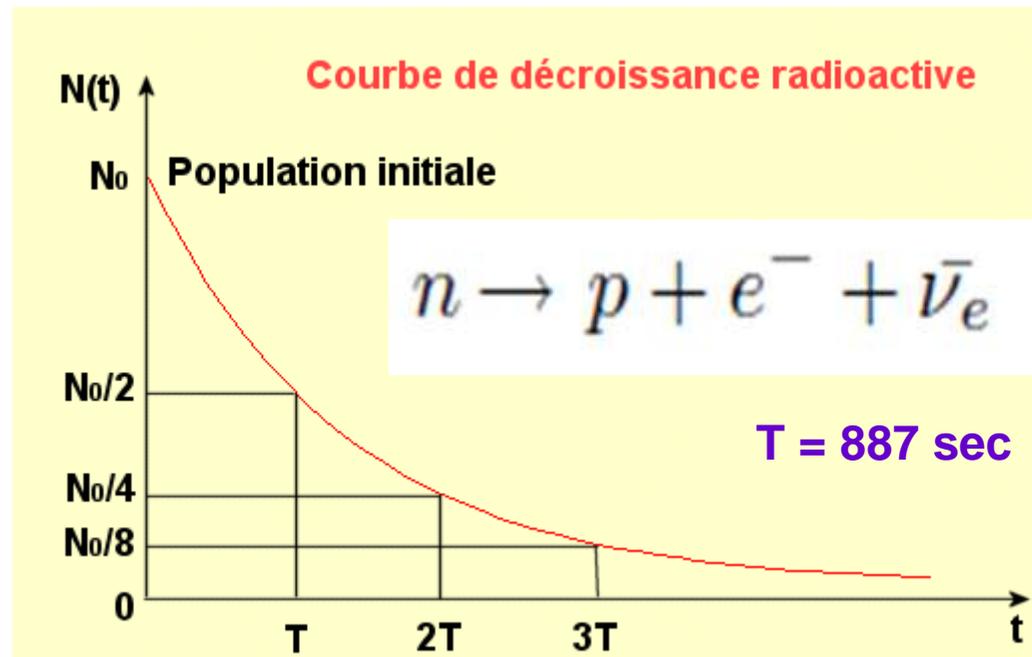
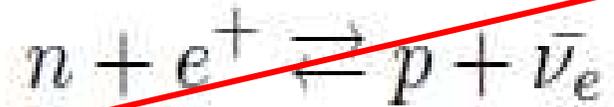


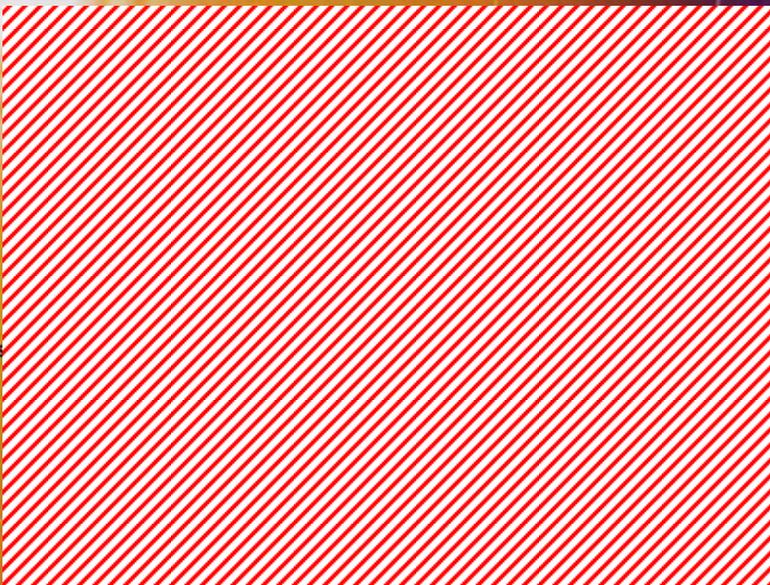
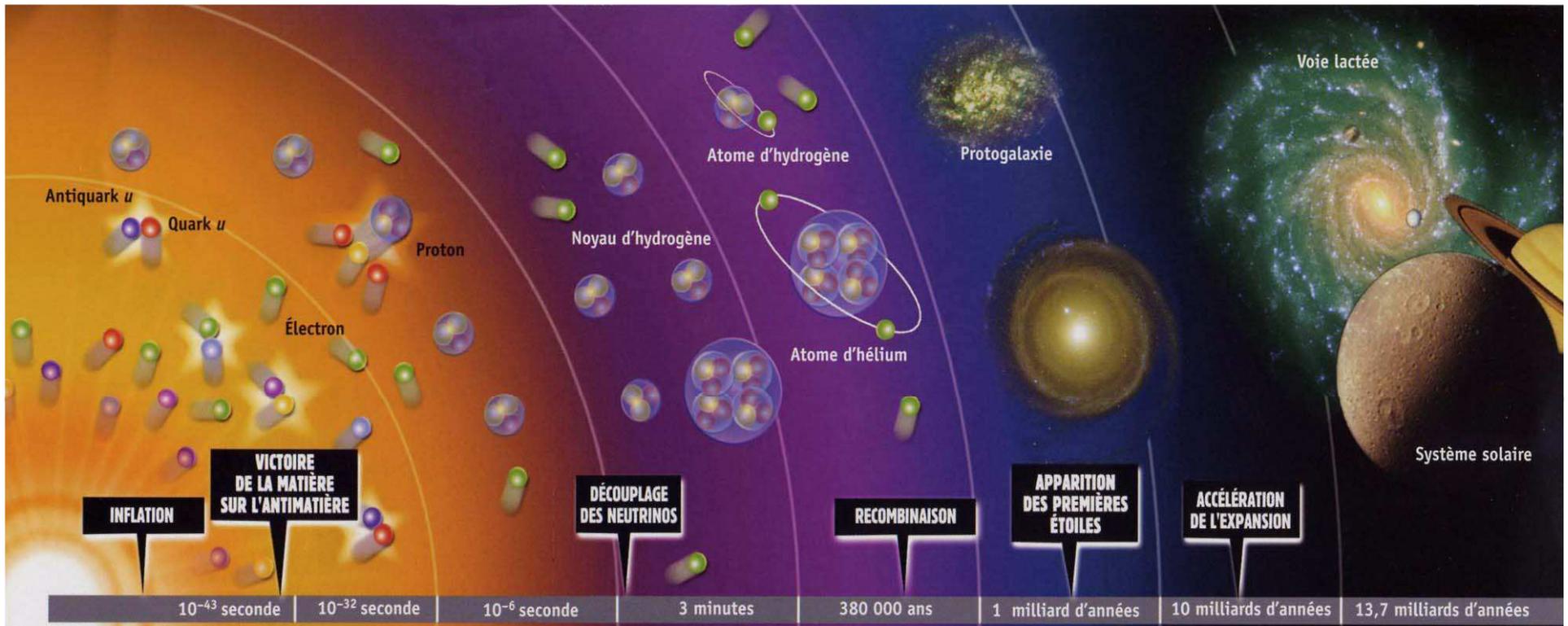
$t_{\text{reac}} < t_{\text{exp}} \Rightarrow$  Réaction

$t_{\text{reac}} > t_{\text{exp}} \Rightarrow$  Pas de réaction

Equilibre

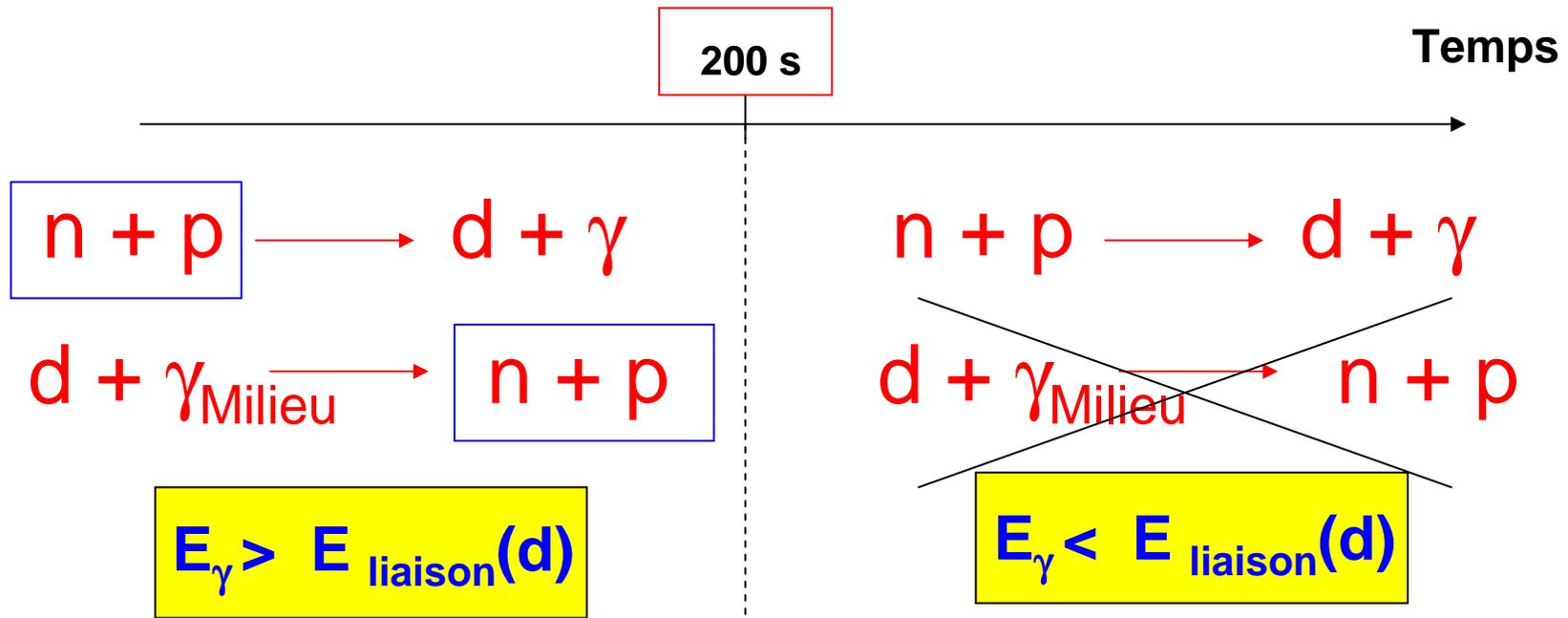
## Les neutrons ne peuvent que se désintégrer



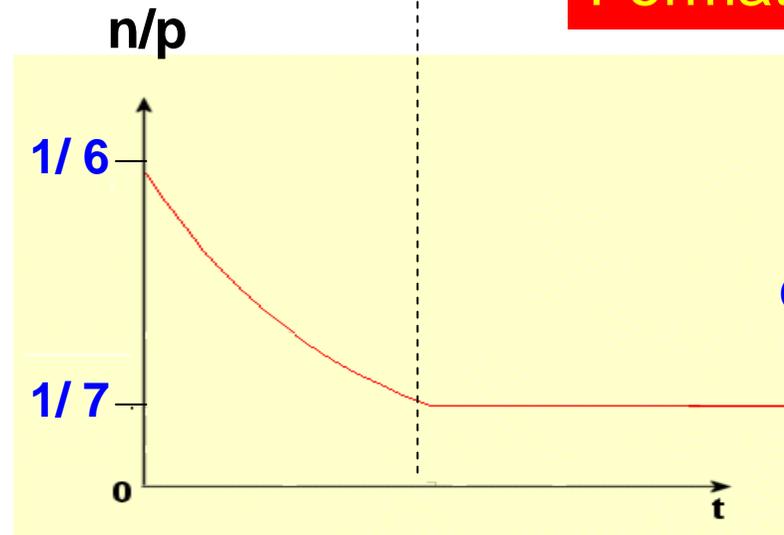


$$T \approx 80 \text{ keV} \approx 10^9 \text{ K}; t = 200 \text{ s}$$

**Les photons n'ont pas assez d'énergie pour casser le deutérium**



Formation du deutérium !



Ces neutrons sont « bloqués » dans les noyaux

## Remarque :

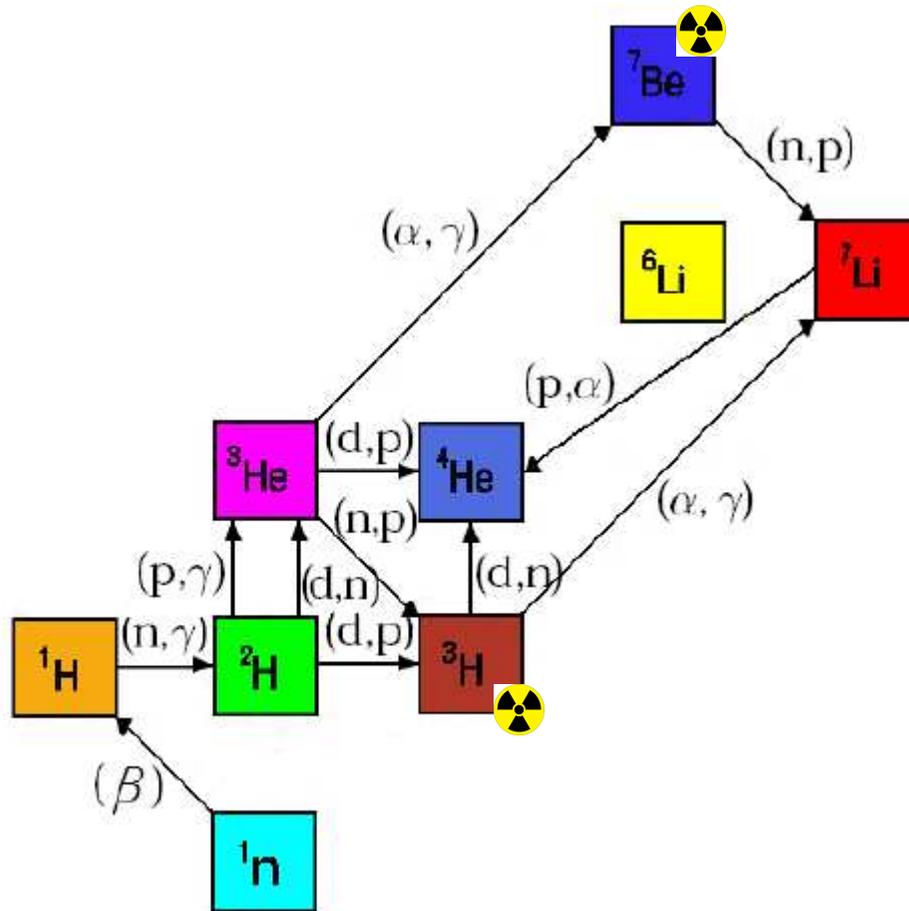
**L'énergie de liaison du deutérium est seulement de 2.2 MeV ( 28 MeV pour le  $^4\text{He}$ ).**

**=> Le  $^2\text{H}$  est détruit dans les étoiles.**

**=> Le  $^2\text{H}$  doit se former dans un milieu « froid » et peu dense.**

**=> Nucléosynthèse primordiale**

# et après ca continue



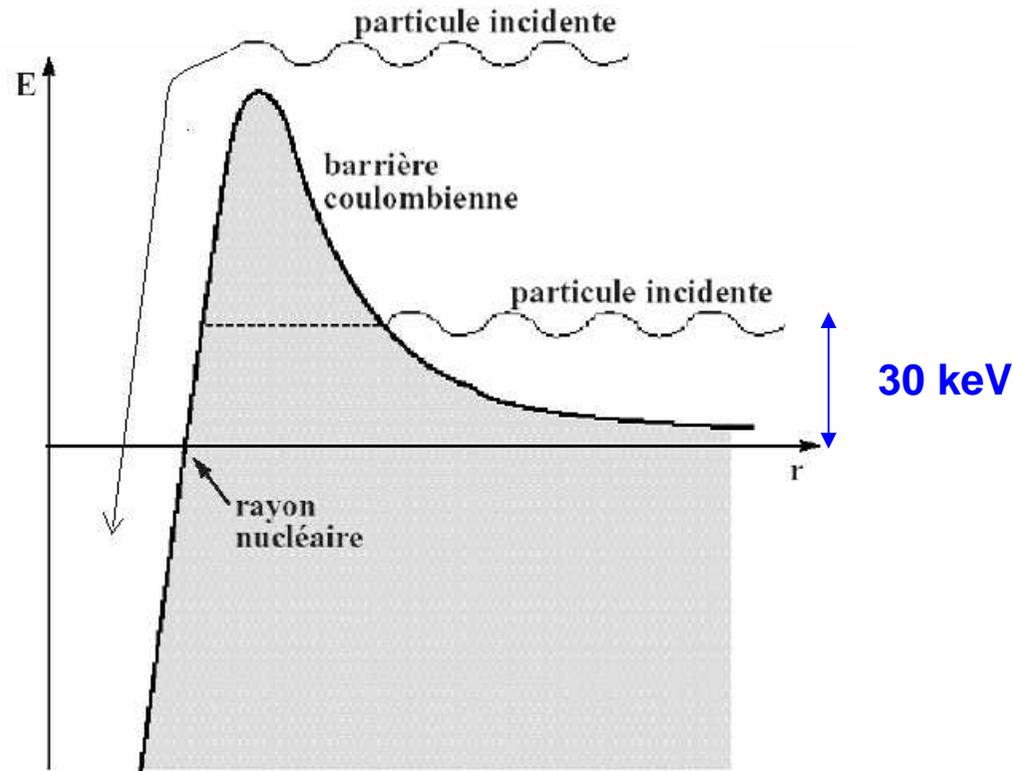
$p + n$	$\rightarrow$	$D + \gamma$
$D + n$	$\rightarrow$	${}^3\text{H} + \gamma$
$D + p$	$\rightarrow$	${}^3\text{He} + \gamma$
$D + D$	$\rightarrow$	${}^3\text{H} + p$
$D + D$	$\rightarrow$	${}^3\text{He} + n$
$D + D$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + \gamma$
${}^3\text{H} + p$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + \gamma$
${}^3\text{He} + n$	$\rightarrow$	${}^3\text{H} + p$
${}^3\text{He} + n$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + \gamma$
${}^3\text{H} + D$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + n$
${}^3\text{He} + D$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + p$
${}^3\text{He} + {}^3\text{He}$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + 2p$
${}^4\text{He} + D$	$\rightarrow$	${}^6\text{Li} + \gamma$
${}^4\text{He} + {}^3\text{H}$	$\rightarrow$	${}^7\text{Li} + \gamma$
${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$	$\rightarrow$	${}^7\text{Be} + \gamma$
${}^6\text{Li} + n$	$\rightarrow$	${}^7\text{Li} + \gamma$
${}^6\text{Li} + p$	$\rightarrow$	${}^7\text{Be} + \gamma$
${}^7\text{Li} + p$	$\rightarrow$	$2\,{}^4\text{He} + \gamma$
${}^7\text{Be} + n$	$\rightarrow$	${}^7\text{Li} + p$
${}^7\text{Be} + e^-$	$\rightarrow$	${}^7\text{Li} + \gamma$



$$T \approx 30 \text{ keV}, \approx 3 \cdot 10^8 \text{ K}, t = 25 \text{ min}$$

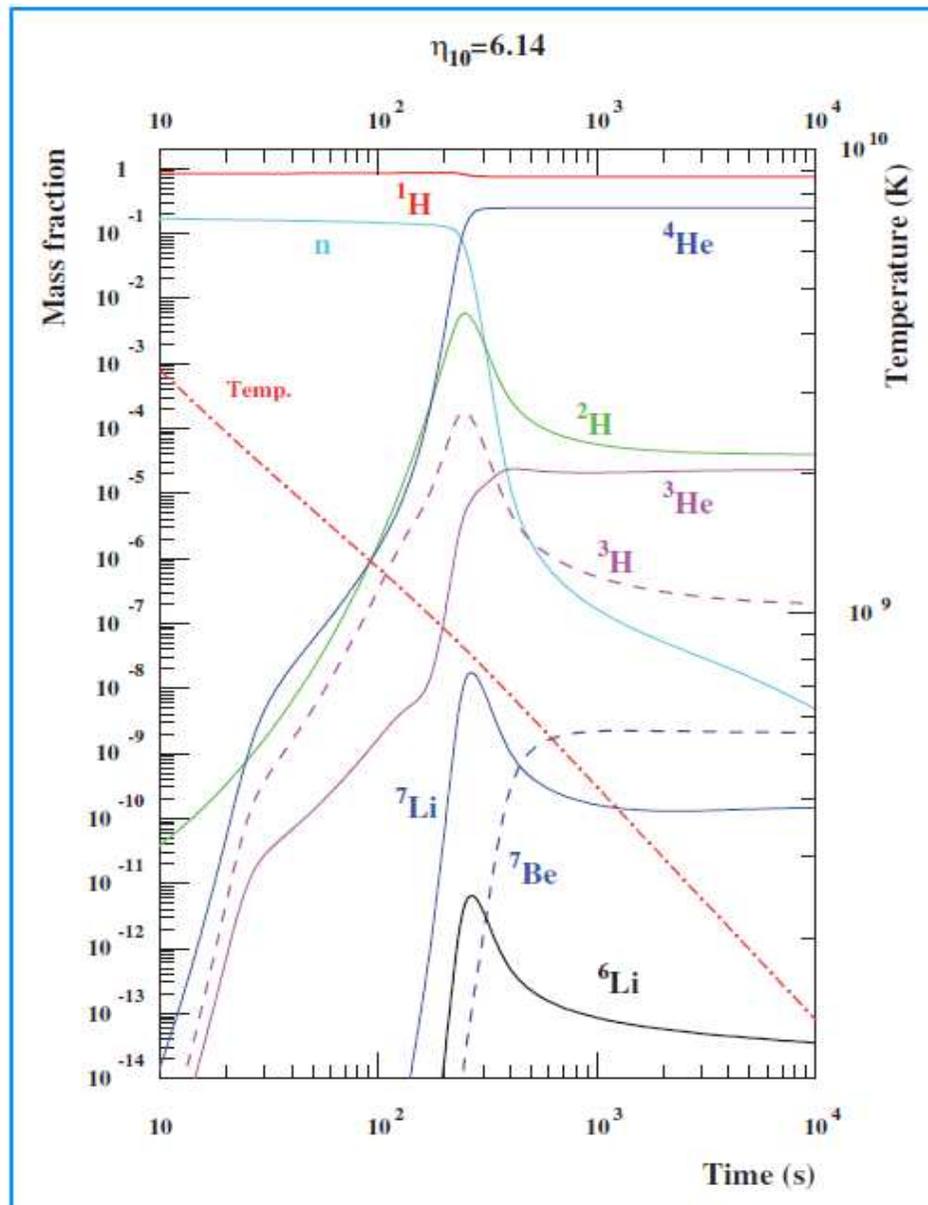
**La « soupe » est trop froide et tout s'arrête**

Avec une température moyenne de 30 keV les particules n'ont pas assez d'énergie pour vaincre la barrière coulombienne.



**Il faudra attendre ~ 1 milliards d'années pour synthétiser d'autres noyaux plus lourds**

# Evolution des premiers noyaux



<sup>4</sup>He est le plus stable ( $E_L = 28$  MeV)  
=> élément le plus abondant

24 % des noyaux dans l'univers sont de l'He

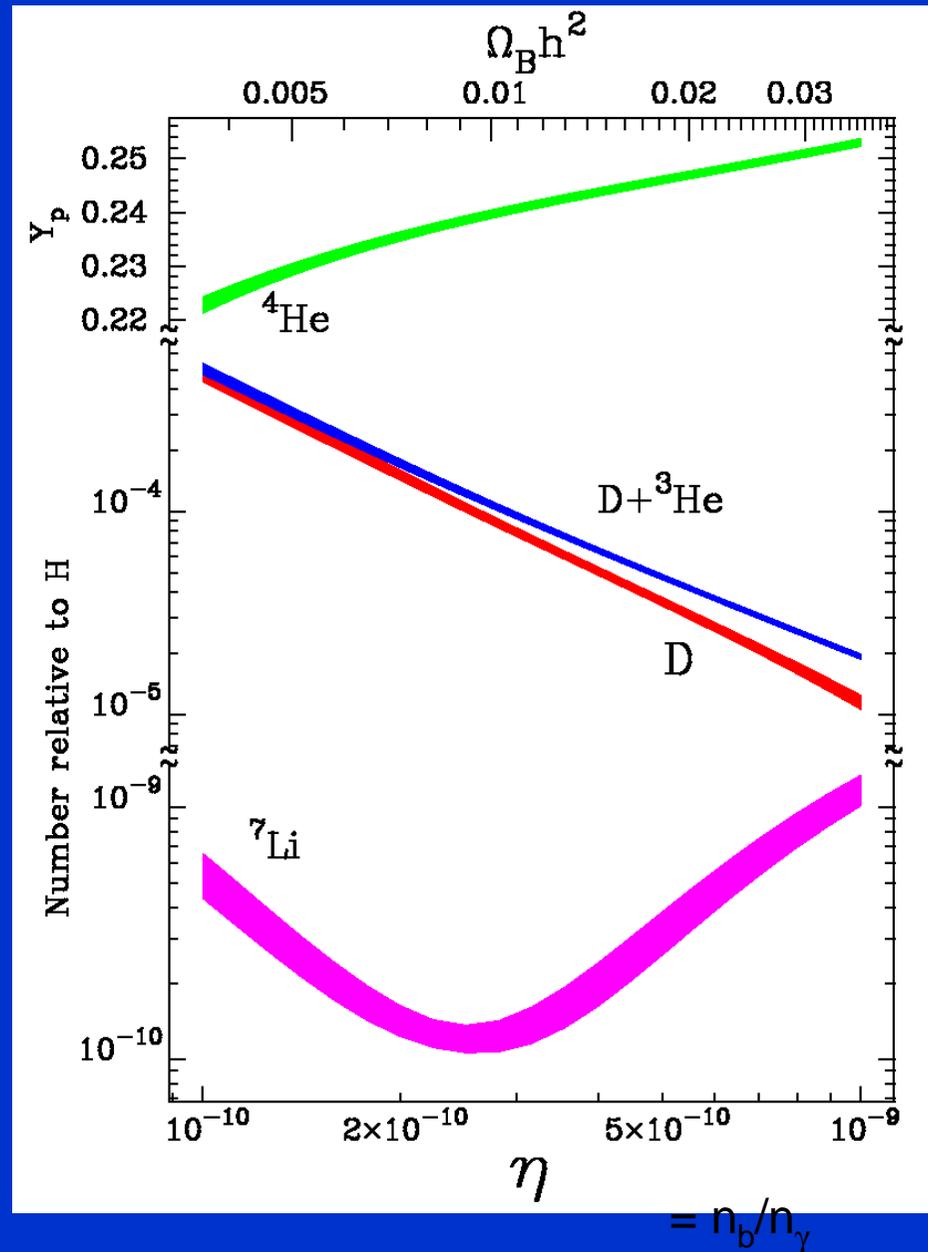
99.99 % des neutrons sont « stockés » dans l'He.

1000 s après le Big Bang la matière primordiale de l'Univers est figée

# Prédictions du BBN

$$\eta = n_b / n_\gamma$$

Baryons      Photons



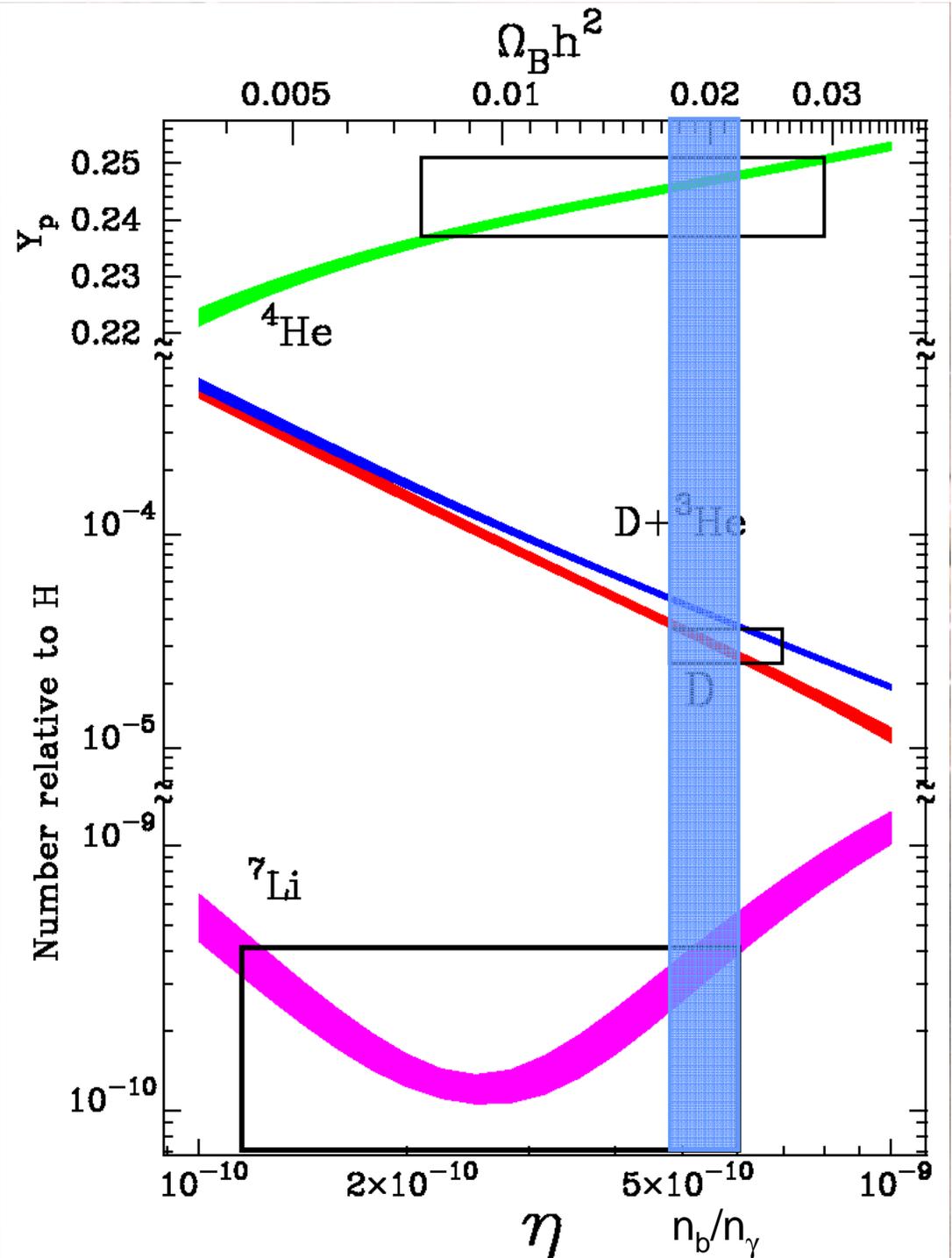
# Confrontations aux observations

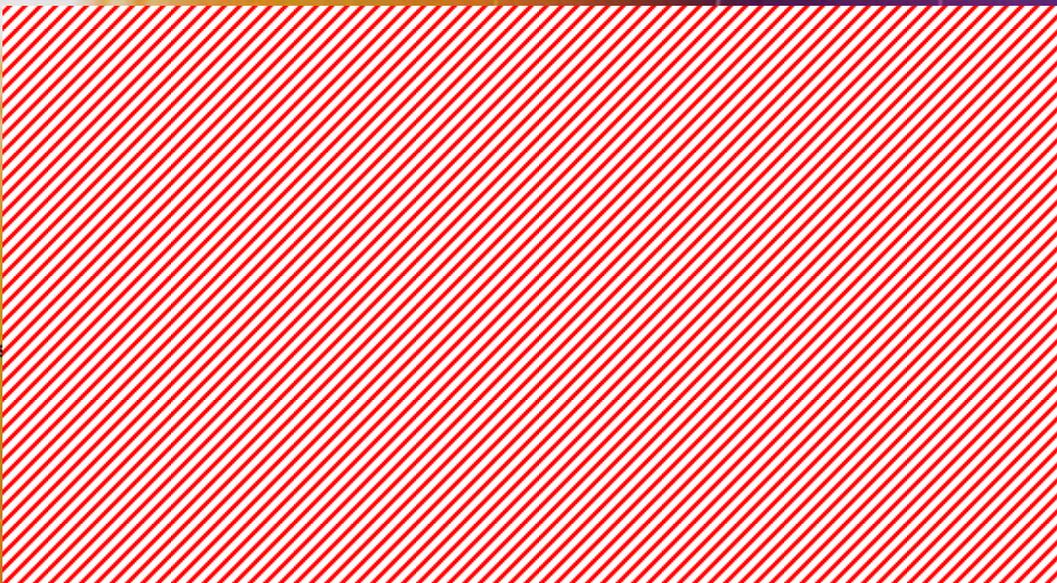
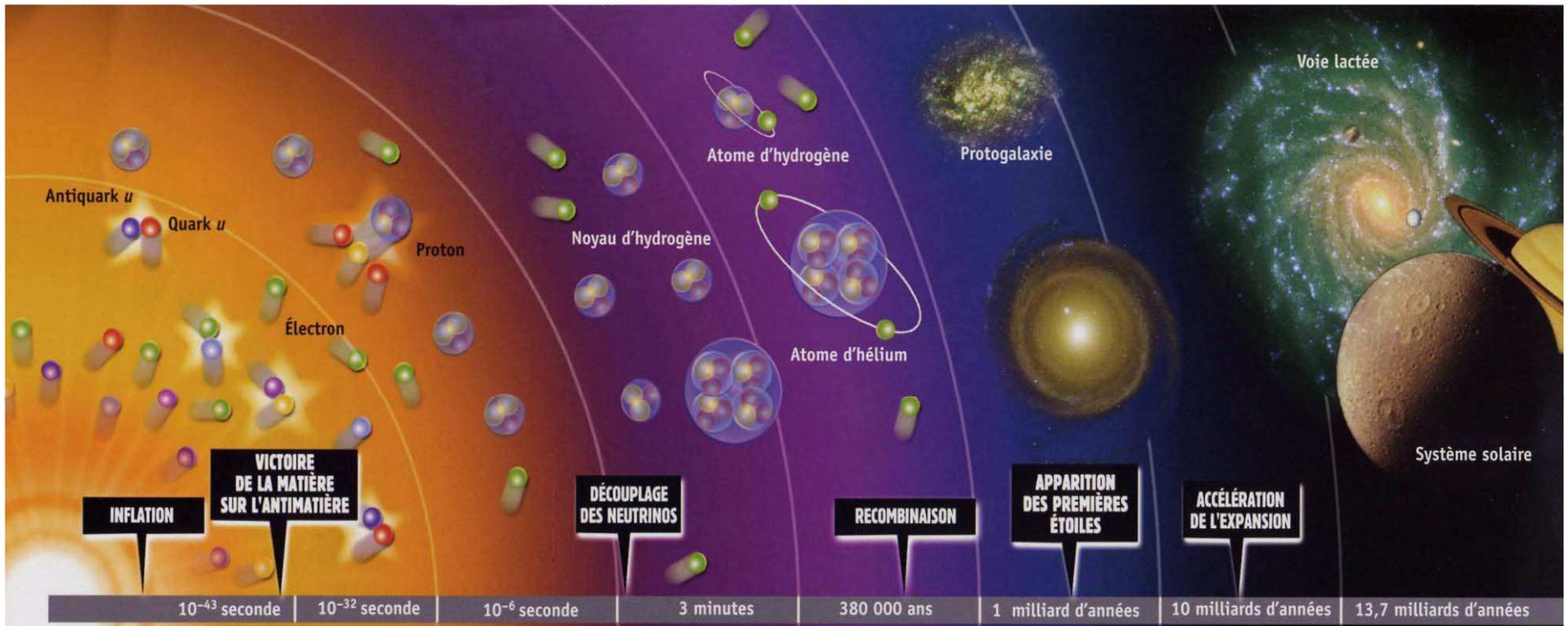
Nucléosynthèse primordiale:

$$\frac{n_b}{n_\gamma} \sim 5 - 6 \cdot 10^{-10}$$

valeurs confirmées par  
d'autres indicateurs  
indépendants !

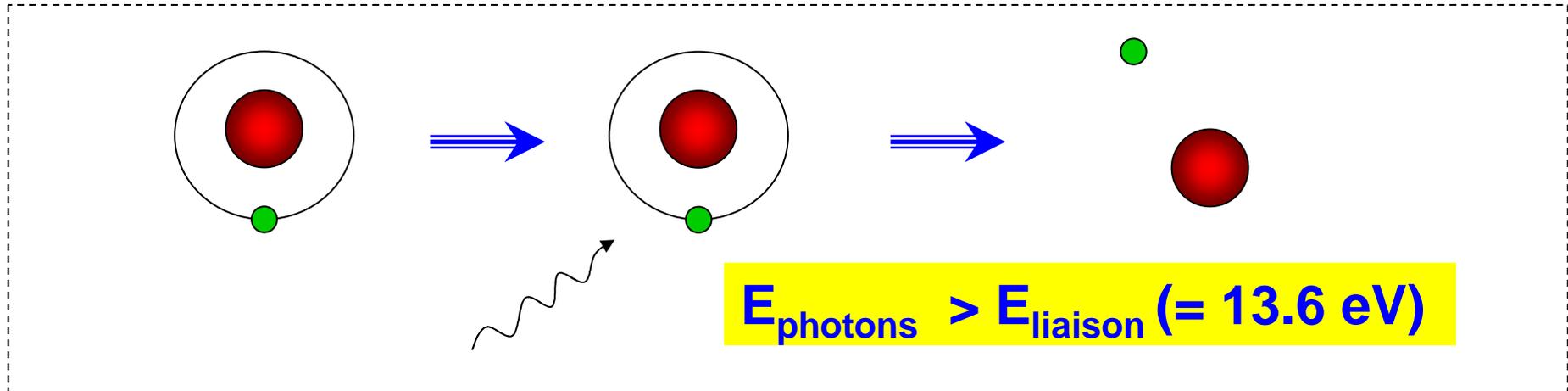
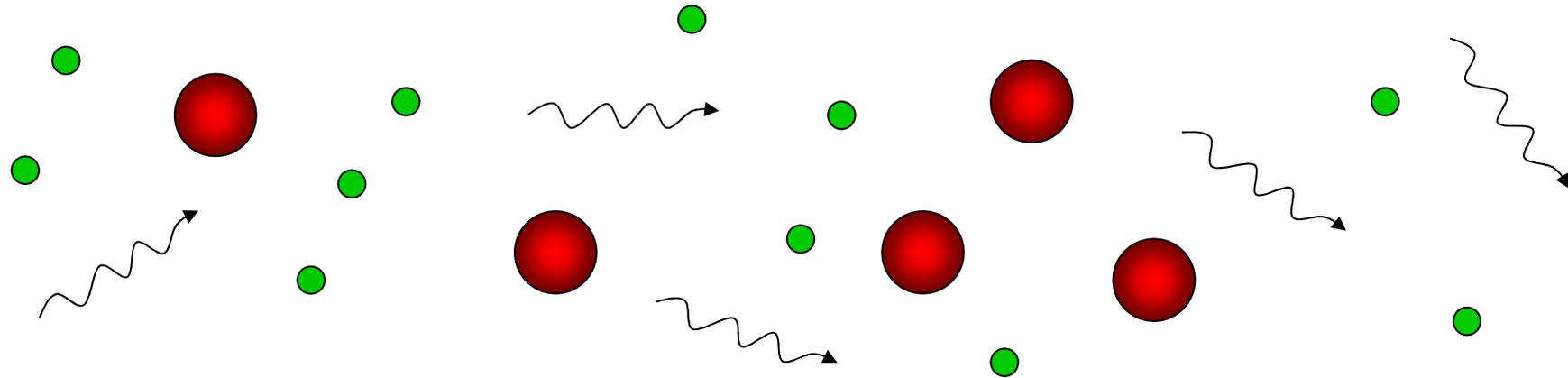
Très gros succès de la  
nucléosynthèse !



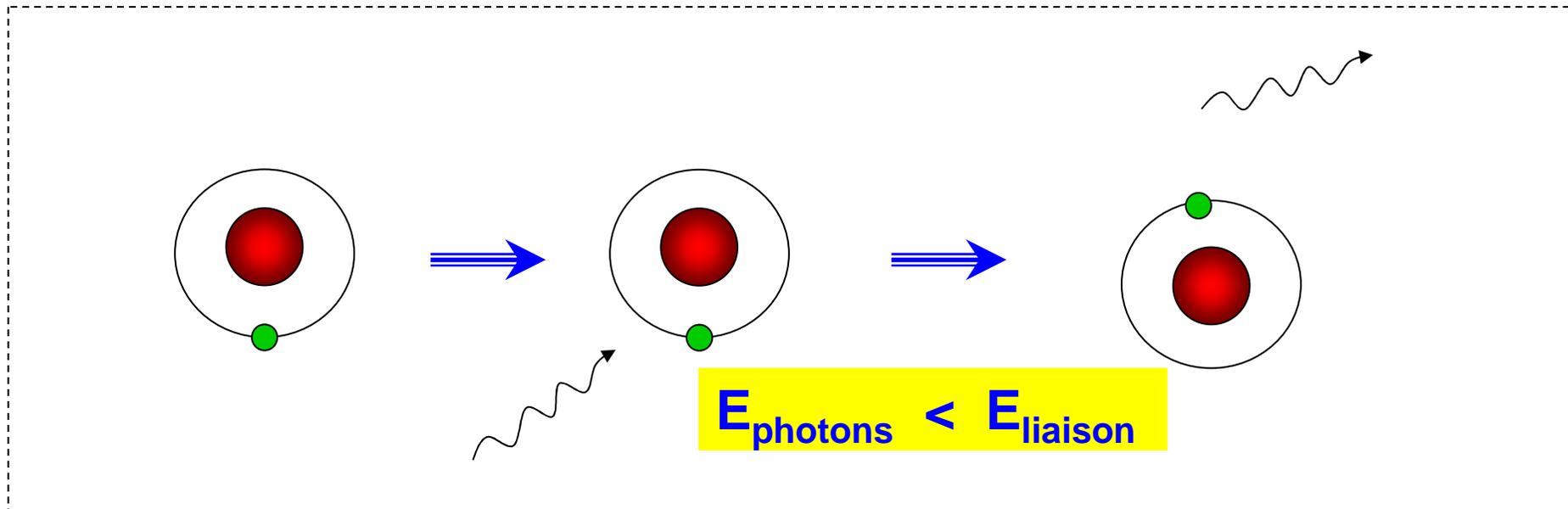
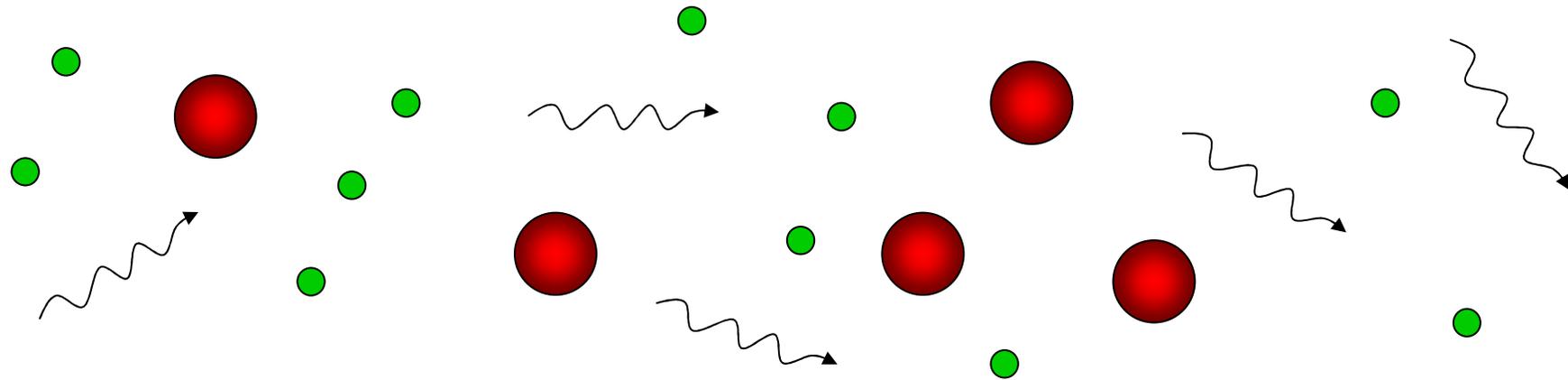


$T \approx 3000^{\circ}K, t \approx 380000$

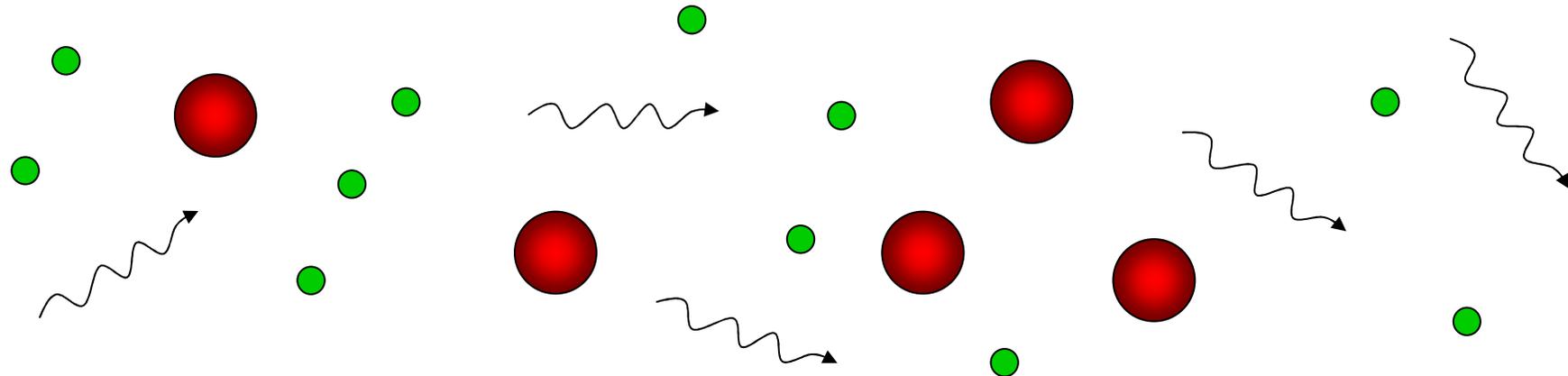
**Le premiers atomes peuvent se former !**



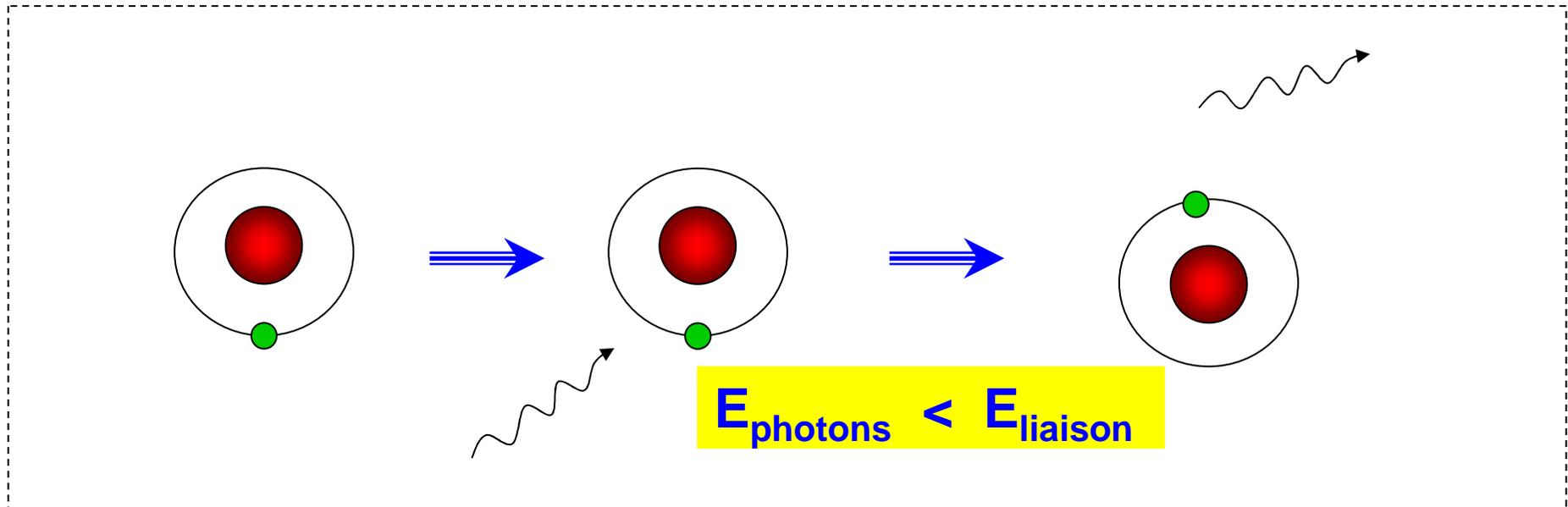
**t < 380000**



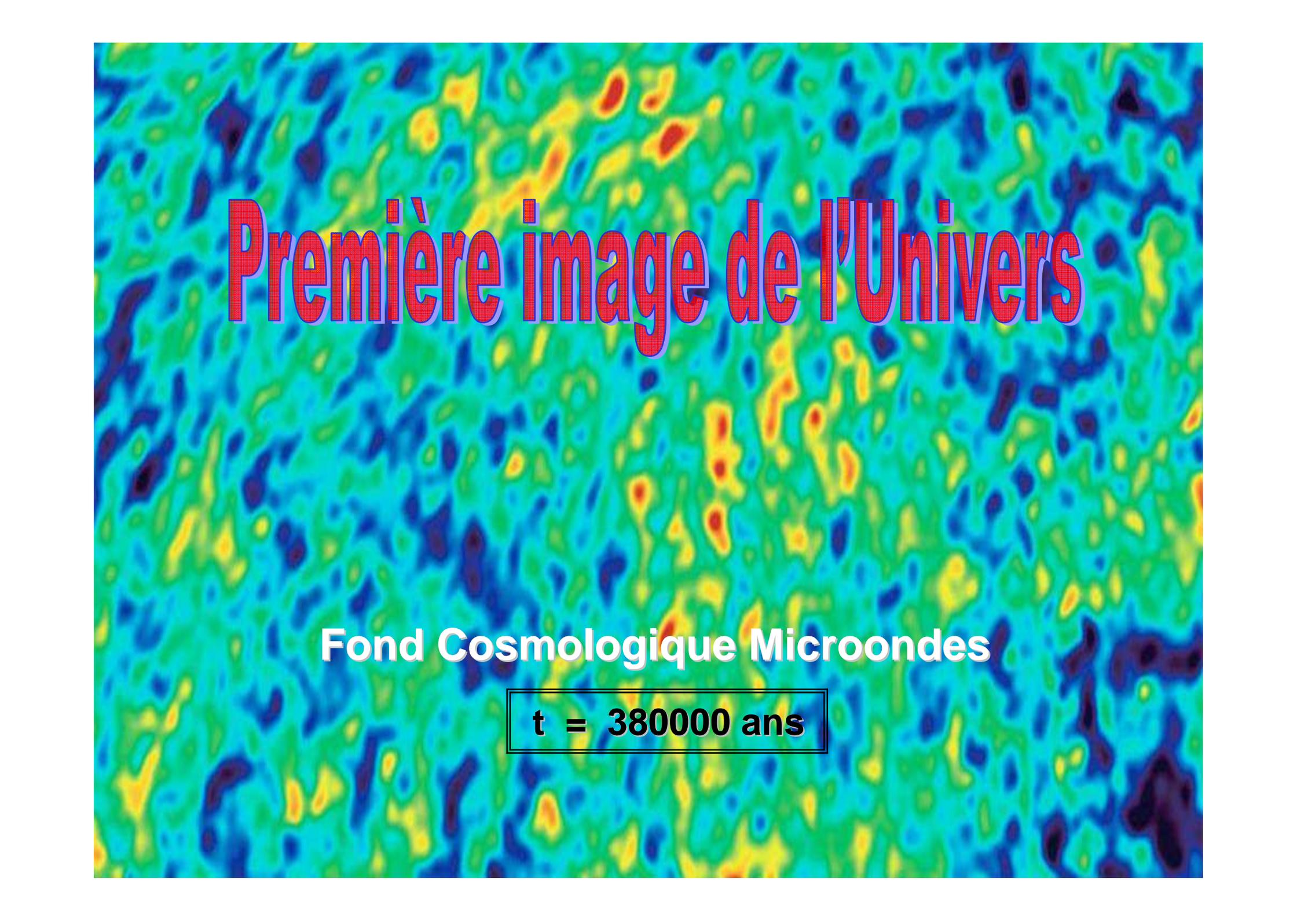
**t > 380000**



# La lumière se libère de la matière



$t > 380000$

The background of the slide is a Cosmic Microwave Background (CMB) fluctuation map, showing a complex pattern of temperature variations across the sky. The colors range from dark blue (cooler) to red and yellow (warmer), with a prominent diagonal band of higher temperature. The text is overlaid on this map.

# Première image de l'Univers

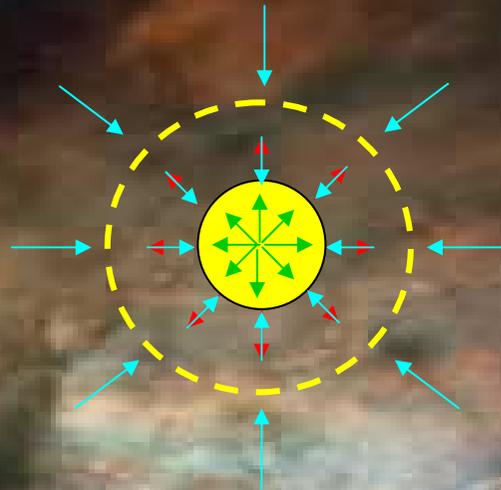
Fond Cosmologique Microondes

**t = 380000 ans**

Quelques milliards d'années plus tard

Nuage d'hydrogène froid





**Gravitation**

**Radiation**

Fusion nucléaire

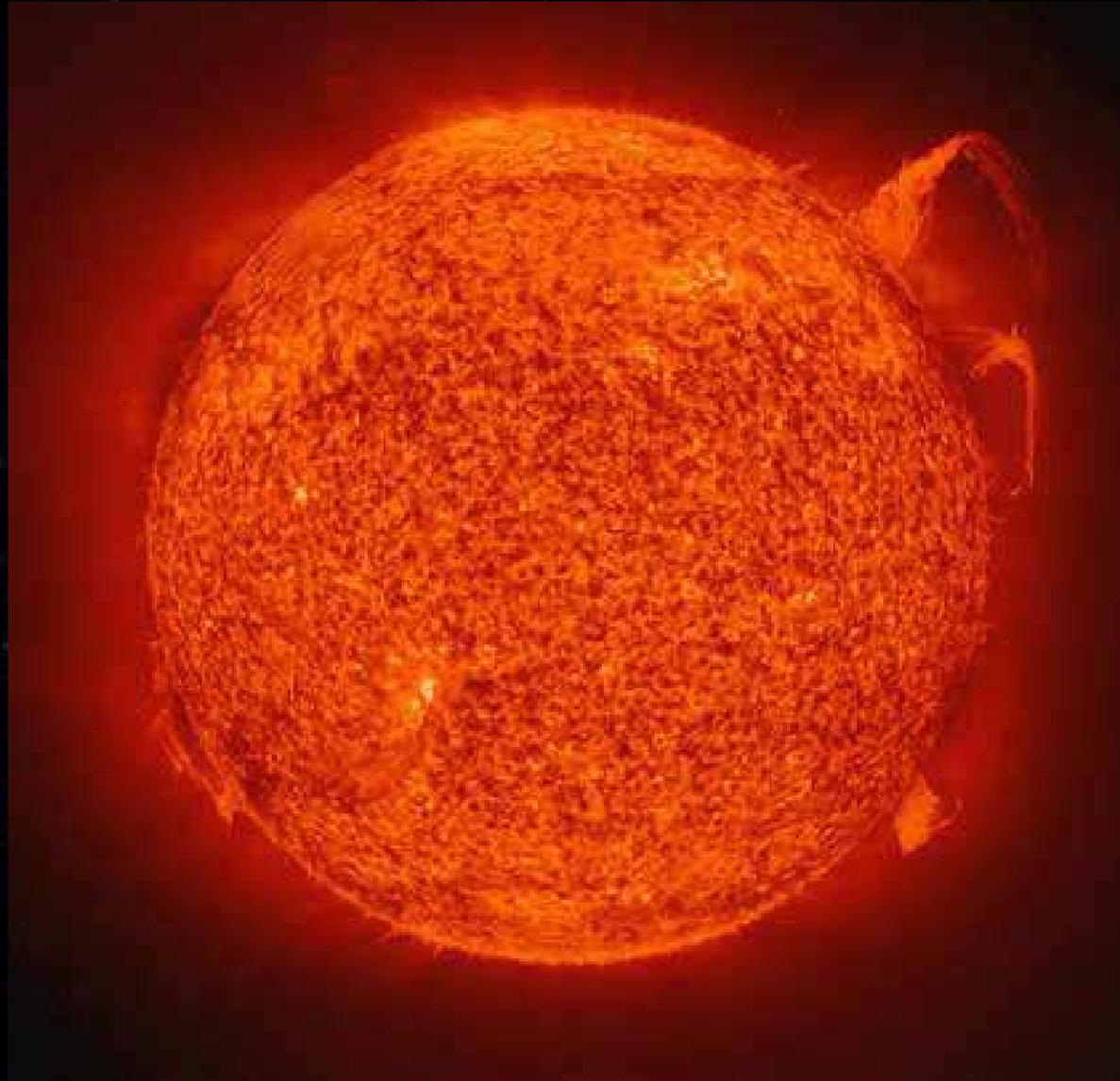
**Gravitation**

Equilibre dynamique  
T ~ 14 Millions de °K

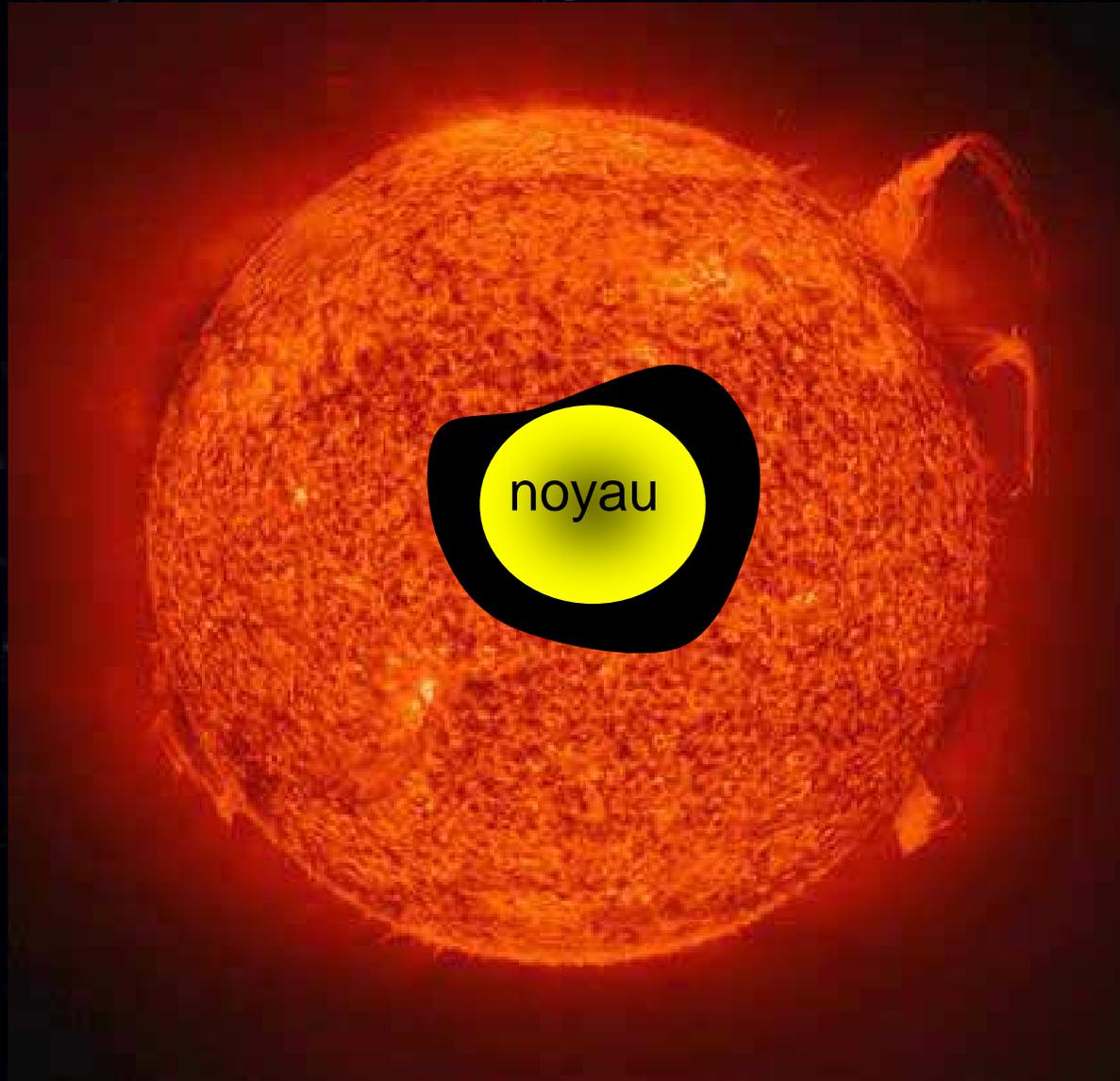
A vibrant nebula with a complex structure of filaments and clouds. The central region is bright and multi-colored, featuring shades of blue, green, and yellow. A prominent, bright red star is visible in the upper-middle part of the image. Other smaller stars in various colors (purple, pink, orange) are scattered throughout the nebula. The background is dark, making the colorful gas clouds stand out.

**Une nouvelle étoile est née**

## **Un exemple proche : Le Soleil**

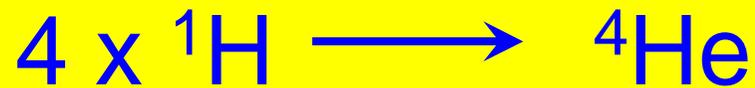


## Un exemple proche : Le Soleil



## Le cœur du Soleil

- ${}^1\text{H} + {}^1\text{H} \longrightarrow {}^2\text{H} + \text{e}^+ + \nu_e$
- ${}^1\text{H} + {}^2\text{H} \longrightarrow {}^3\text{He} + \gamma$
- ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \longrightarrow {}^4\text{He} + {}^1\text{H} + {}^1\text{H}$



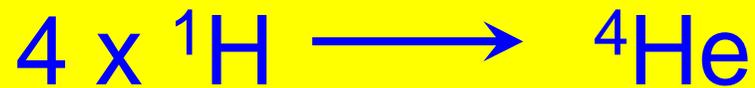
*Fusion de l'H*

## Le cœur du Soleil

•  ${}^1\text{H} + {}^1\text{H} \longrightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$   
Réaction très rare

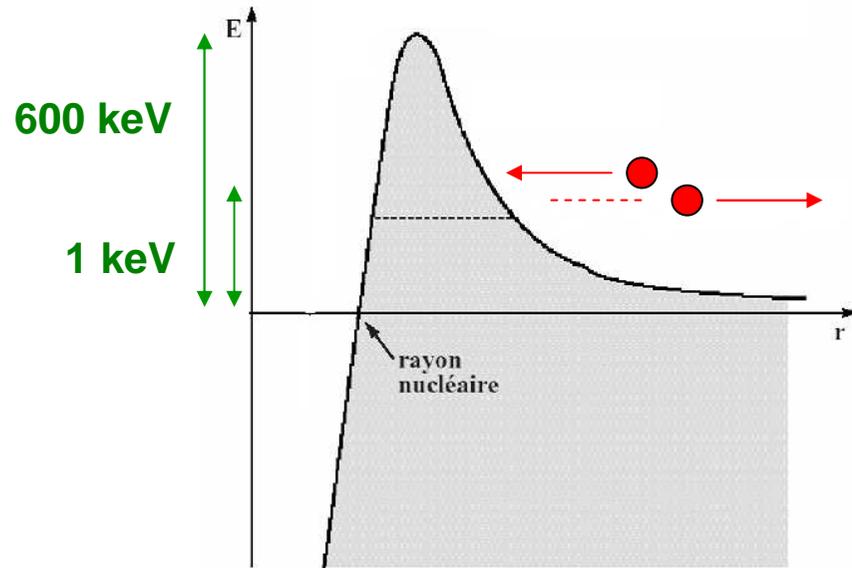
•  ${}^1\text{H} + {}^2\text{H} \longrightarrow {}^3\text{He} + \gamma$

1 milliard d'années pour une réaction !



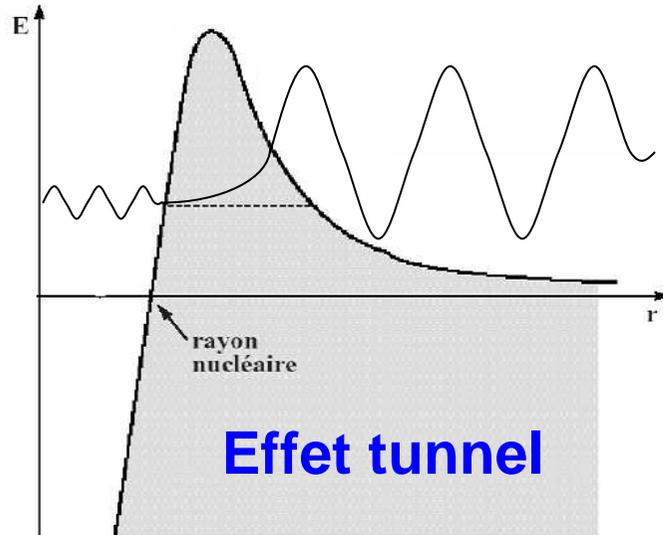
*Fusion de l'H*

# Barrière coulombienne



**Classique**

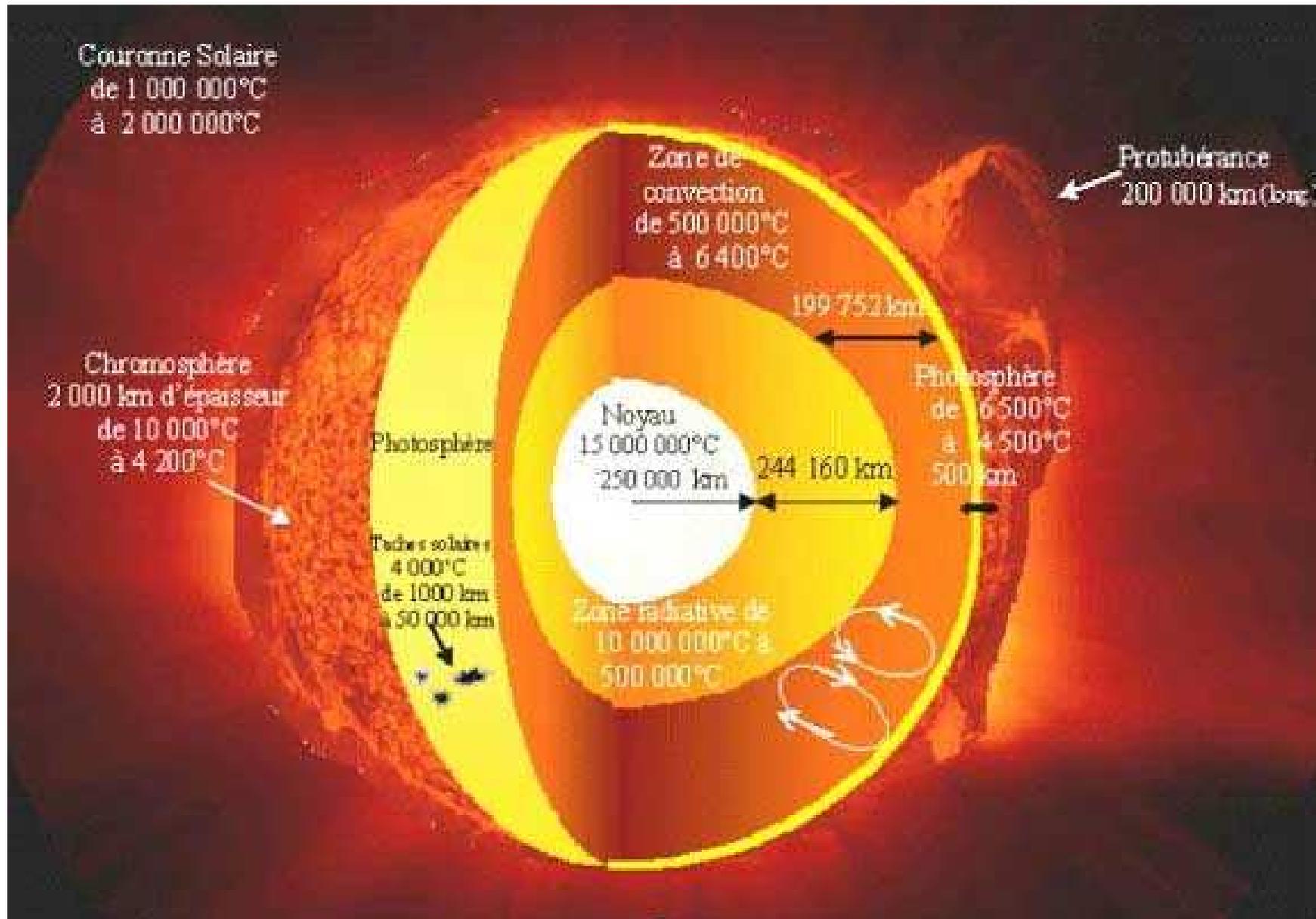
*Traversée impossible*



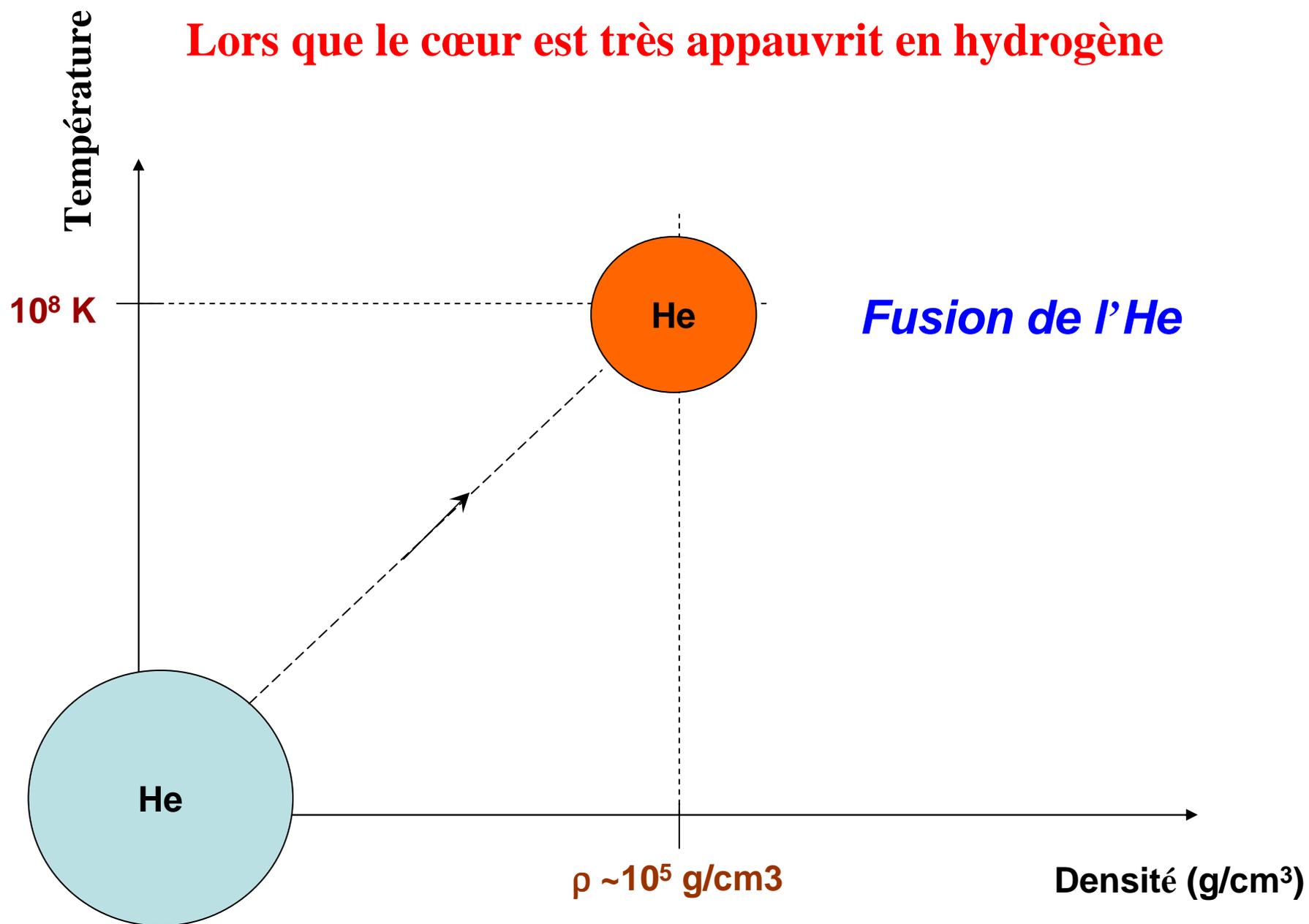
**Quantique**

*Traversée difficile mais possible*

# Structure du Soleil



**Lors que le cœur est très appauvri en hydrogène**



# Fusion de l'He

## Réaction en deux temps

1



$$\frac{{}^8\text{Be}}{{}^4\text{He}} = 10^{-9}$$

*Malgré tout*

2



$$\text{Prob}(1) = 3 \cdot 10^{-4} \times \text{Prob}(2)$$



$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \sim 10^5 - 10^6 \text{ g/cm}^3, \\ T \sim 10^8 \text{ K} \end{array} \right.$$

# Au delà du Carbone

$$M > 8 M_{\text{Sol}}$$

## Evolution générale

**Fin combustible => Contraction => Réchauffement => Fusion**



$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \sim 10^5 - 10^6 \text{ g/cm}^3, \\ T \sim 500 - 800 \cdot 10^6 \text{ K} \end{array} \right.$$



$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \sim 10^6 \text{ g/cm}^3, \\ T \sim 1.3 - 1.7 \cdot 10^9 \text{ K} \end{array} \right.$$



$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \sim 10^7 \text{ g/cm}^3, \\ T \sim 2.0 \cdot 10^9 \text{ K} \end{array} \right.$$

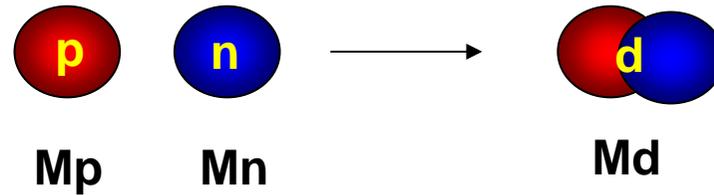


$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \sim 10^9 \text{ g/cm}^3, \\ T \sim 4.0 \cdot 10^9 \text{ K} \end{array} \right.$$

**Et tout s'arrête au Fer !**

**Pourquoi ??**

REMARQUE :



$$M_p + M_n > M_d$$

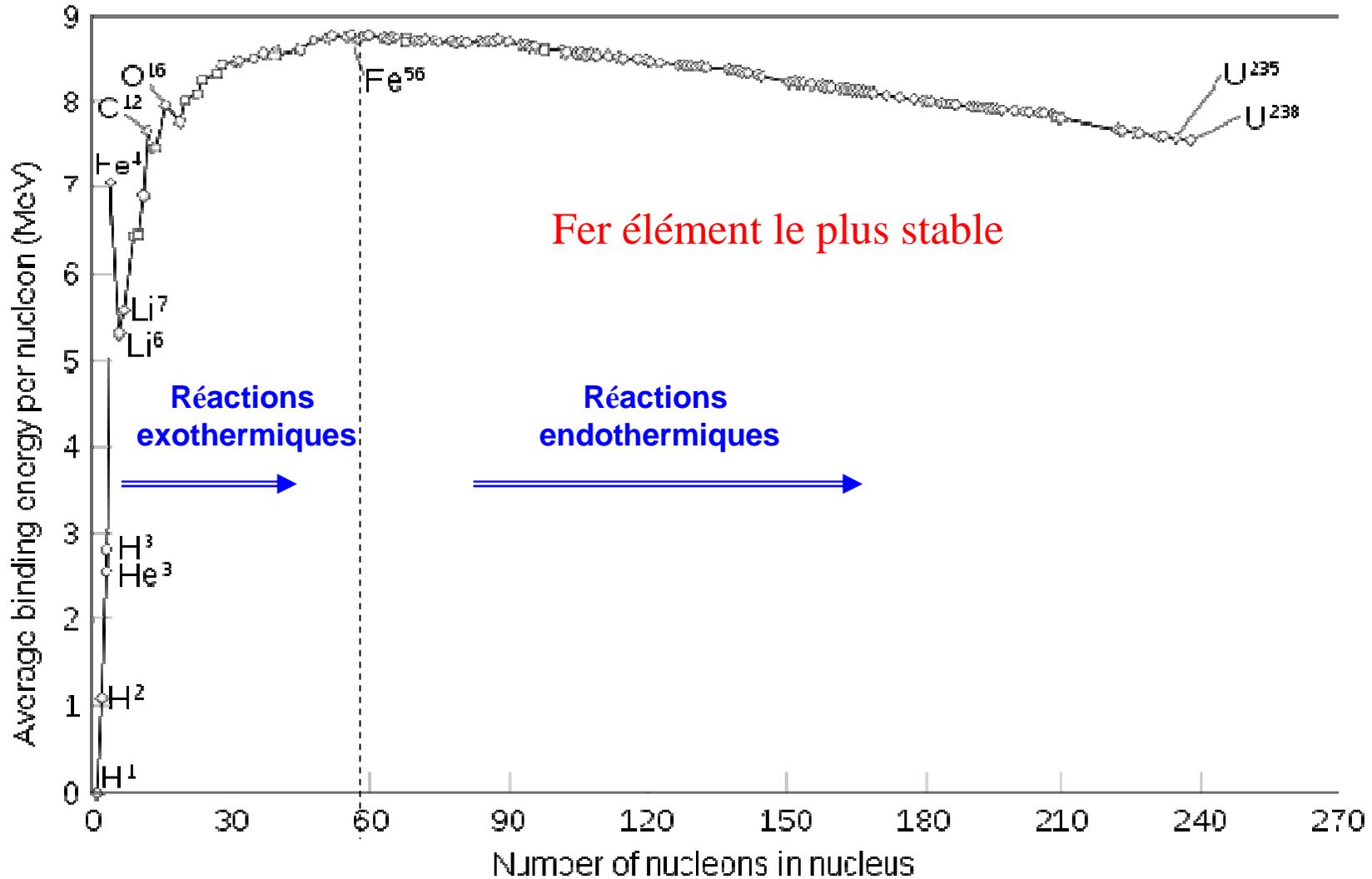
$$(M_p + M_n) - M_d = \epsilon_d : \text{Energie de liaison}$$

Réaction possible sans apport d'énergie si :

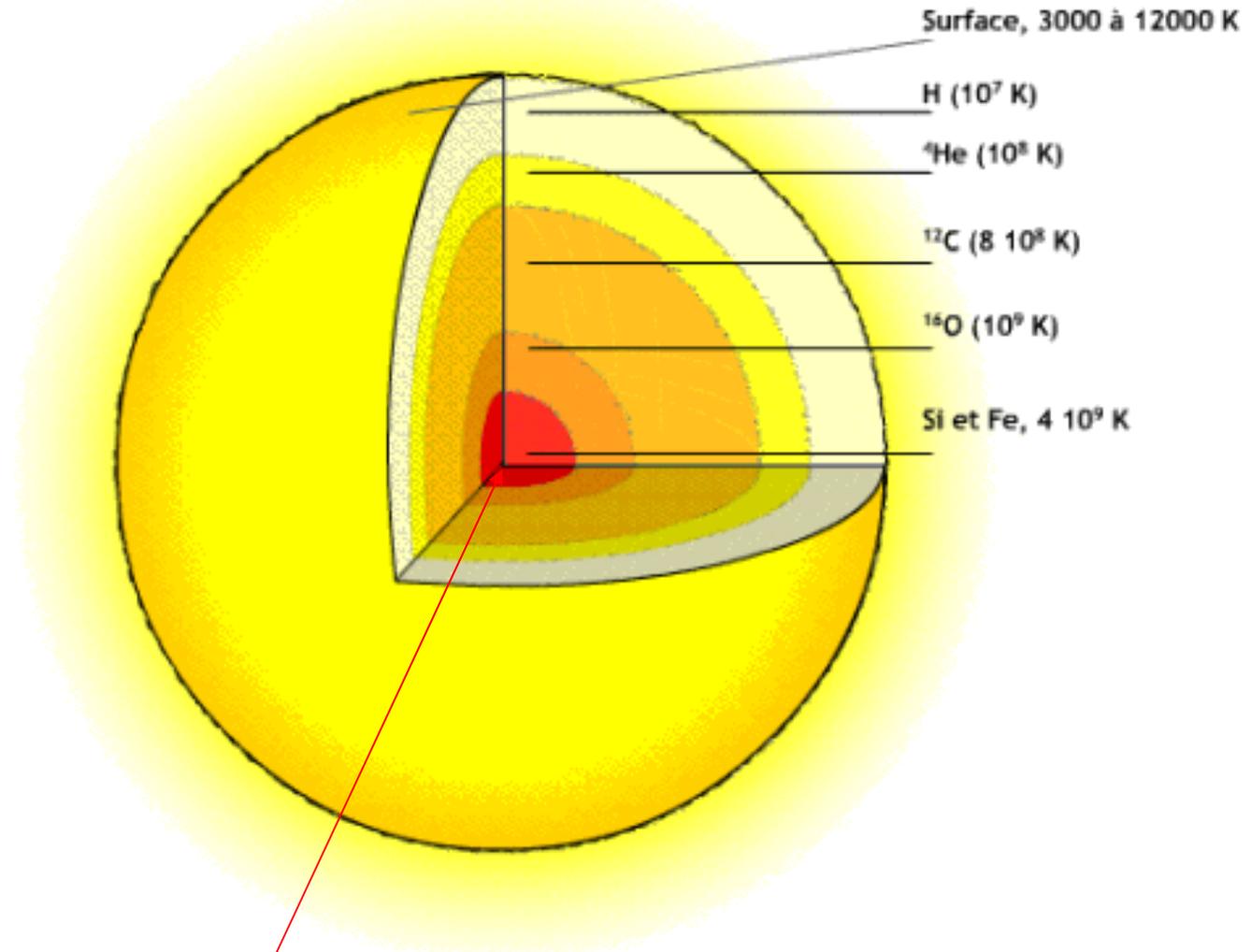
**M avant réaction > M après réaction**

**$\epsilon$  après réaction >  $\epsilon$  avant réaction**

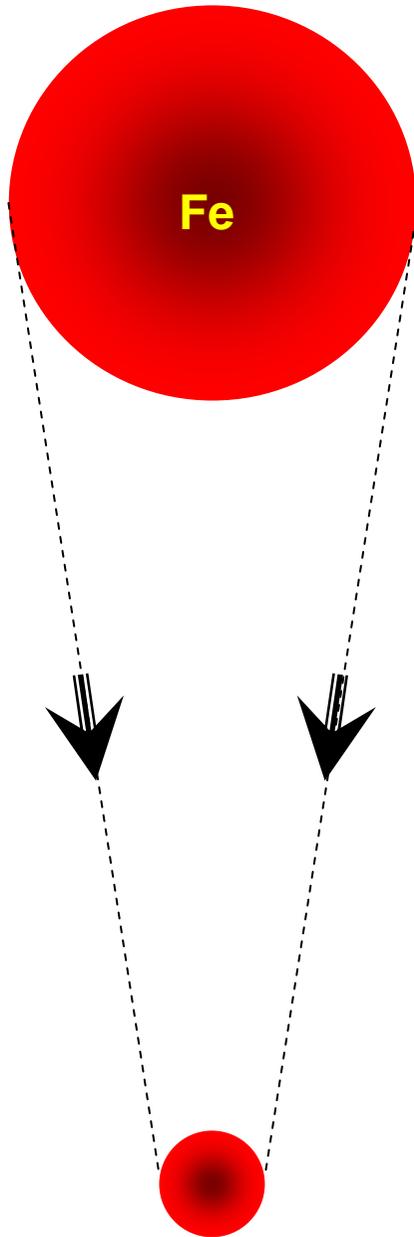
# Energie de liaison par nucleon



# Structure de l'étoile



Plus aucune réaction thermonucléaire => effondrement du noyau

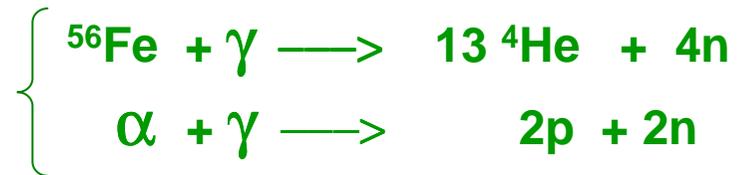


**L'effondrement augmente la densité et la température**

**Des réactions de neutronisation**



**et de photodésintégration**



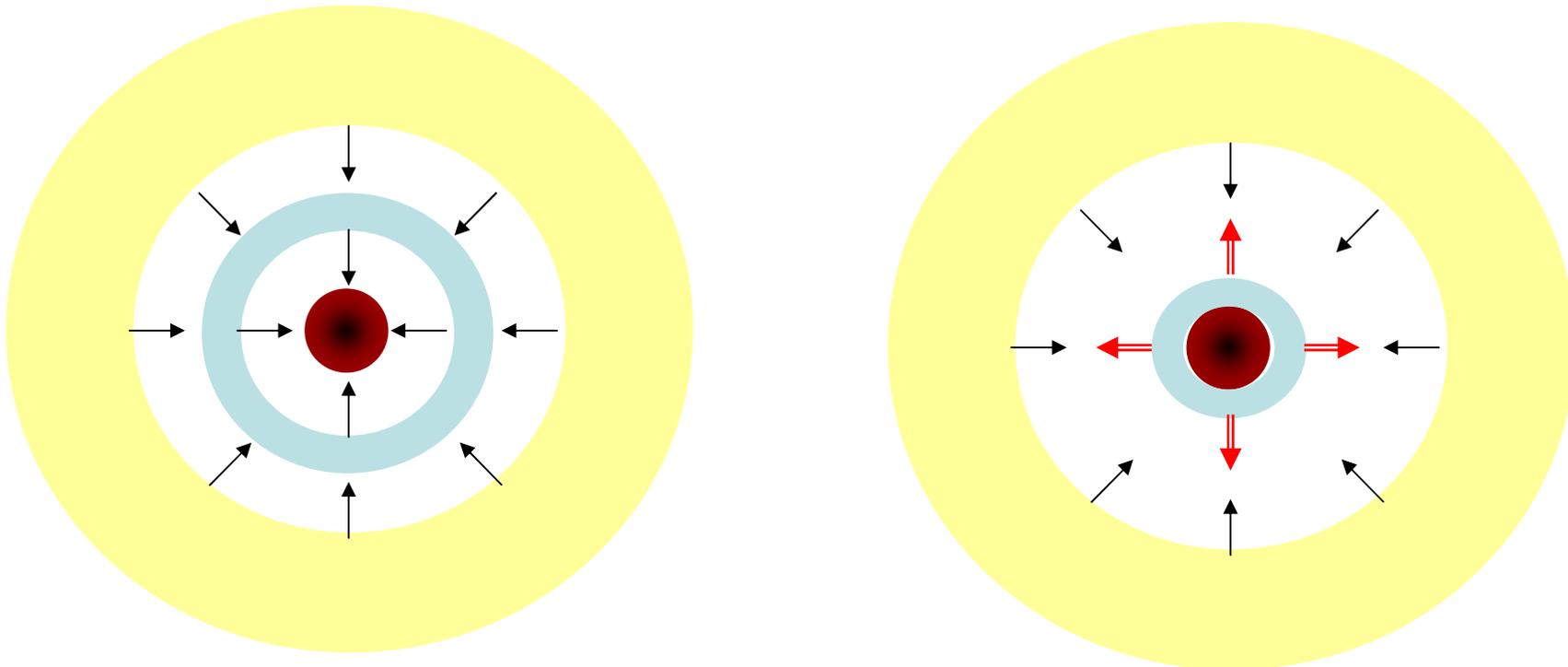
**deviennent possibles**

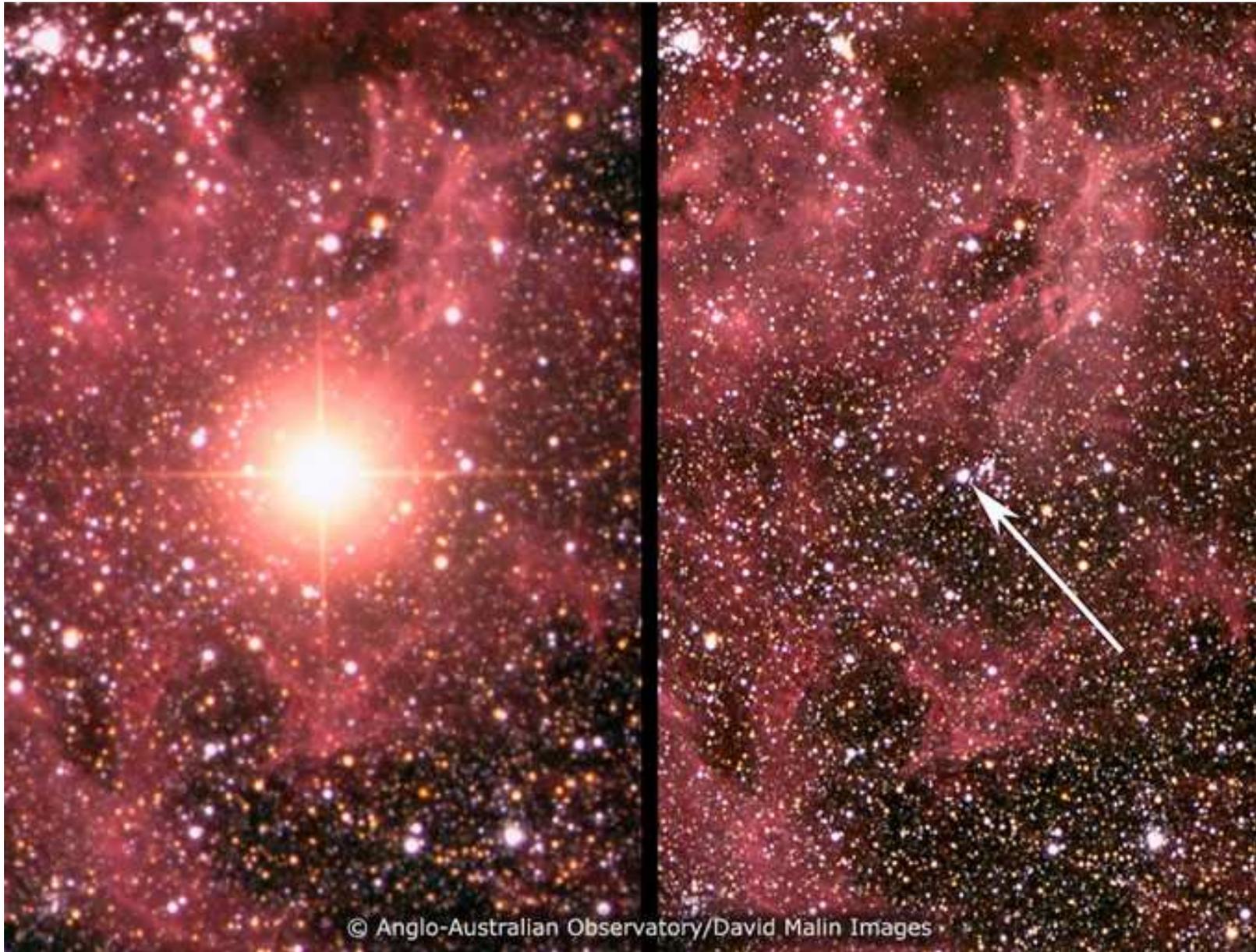
Lorsque la densité atteint  $10^{14}$  g/cm<sup>3</sup> ( densité nucléaire )

l'effondrement s'arrête brusquement

les couches extérieures qui tombent sur le noyau, rebondissent

=> l'étoile explose



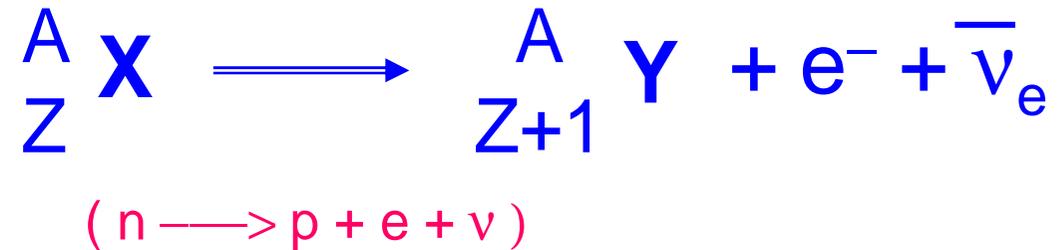


# Supernovae

**Mais en attendant  
d'où vient le plomb ?**

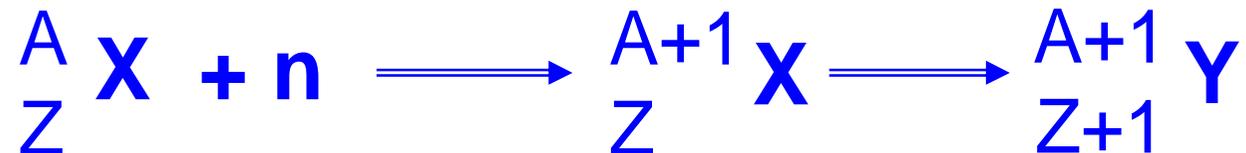
## D'où vient le plomb ?

Remarque :

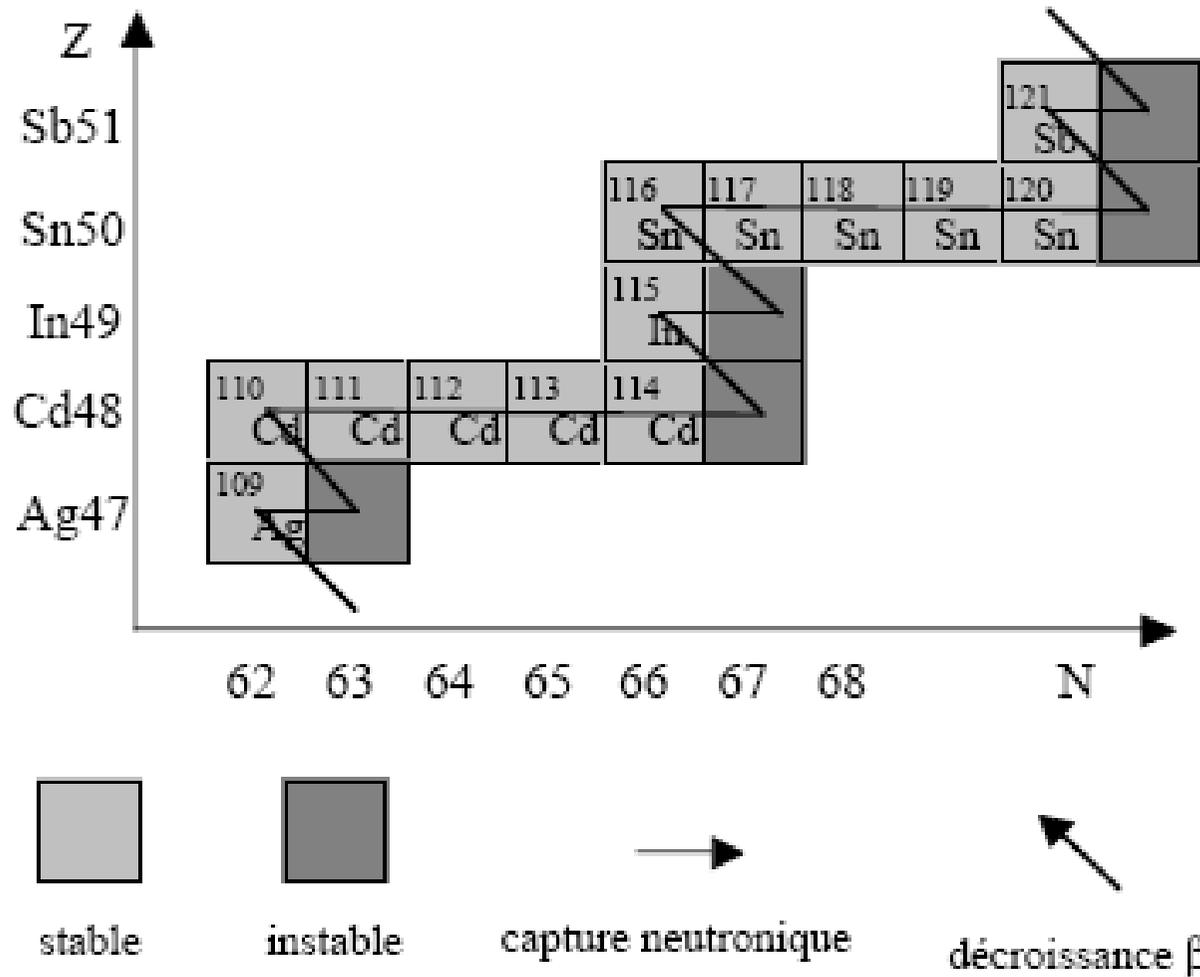


La désintégration bêta augmente le nombre atomique

Capture neutronique +  $\beta^{-}$  : ( pas de barrière coulombienne )



# *zig zag stellaire*



## D'une manière générale

**Processus S – capture lente de neutron.**

**Les noyaux ont le temps de se désintégrer avant nouvelle capture**

**Production des éléments jusqu'au Bi**

⇒ Tout au long de la vie de l'étoile  $\left( \begin{array}{l} {}^{16}\text{O} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{21}\text{Ne} + n \\ {}^{26}\text{Mg} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{29}\text{Si} + n \end{array} \right)$

**Processus R – capture rapide de neutron.**

**Capture de plusieurs neutrons avant la désintégration**

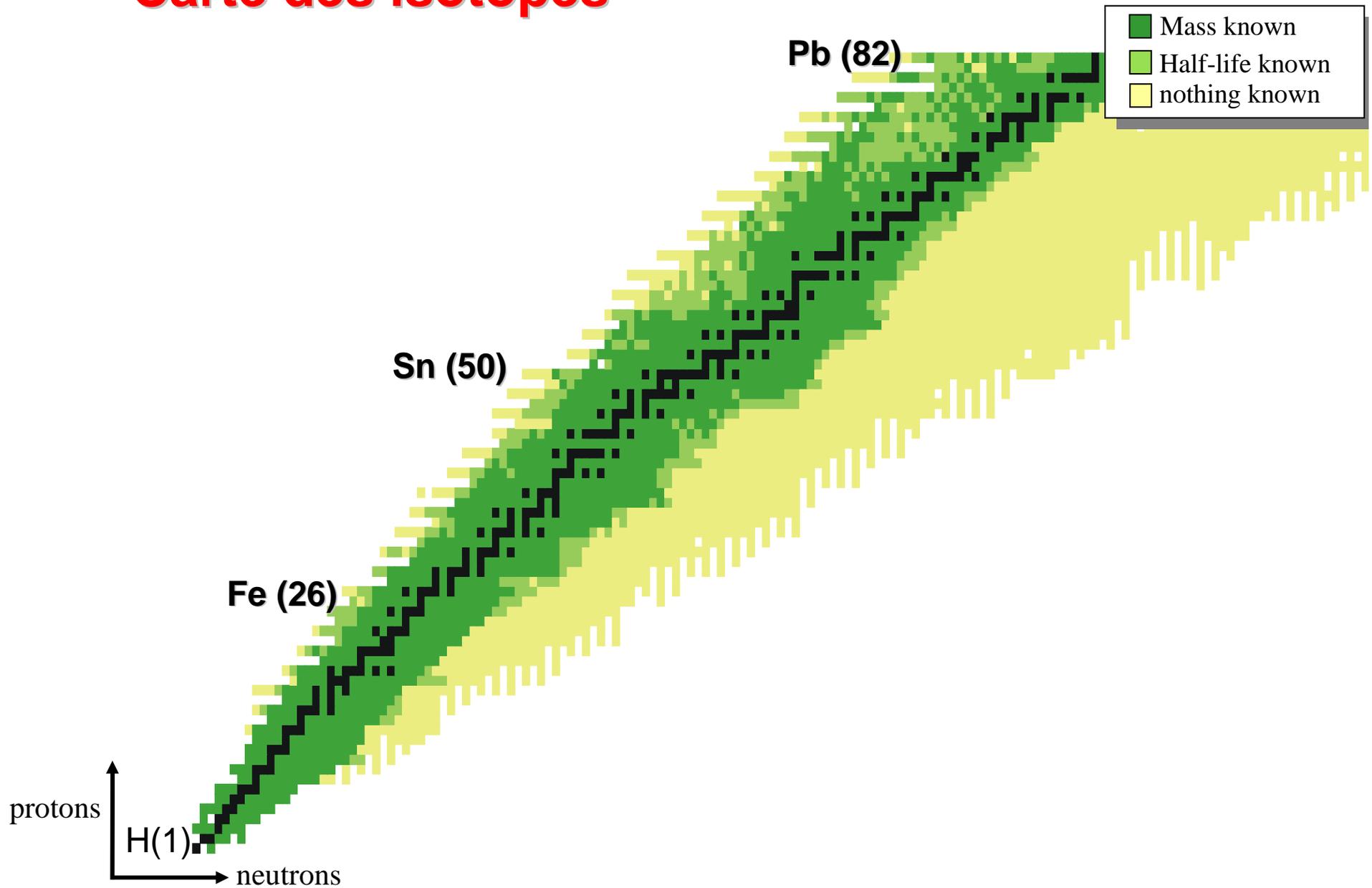
**Production des éléments lourds – à U.**

⇒ Dernière phase de la vie de l'étoile

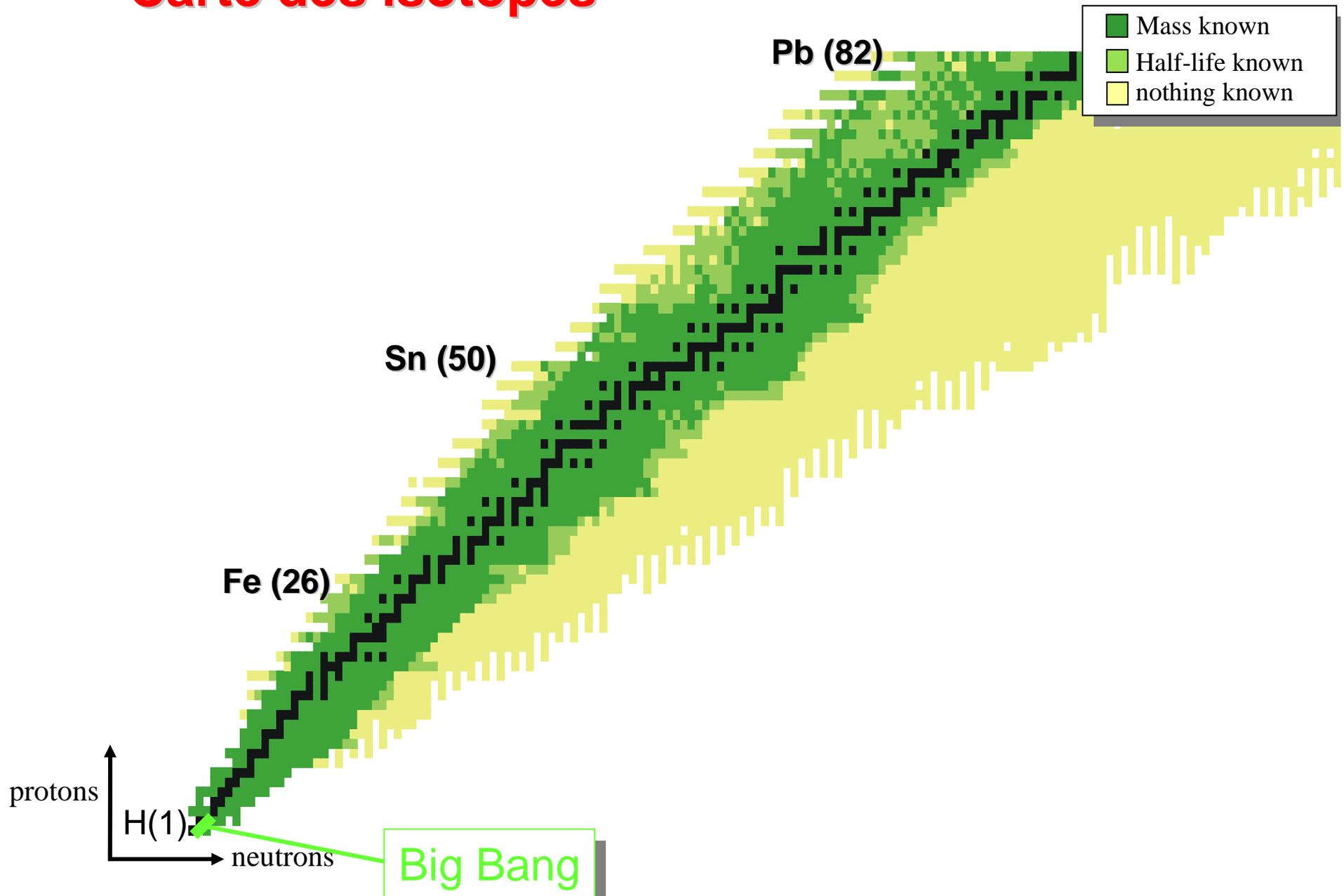
**Processus P – capture de proton ( ${}^1\text{H}$ )**

**Production des nucléides pauvres en neutrons**

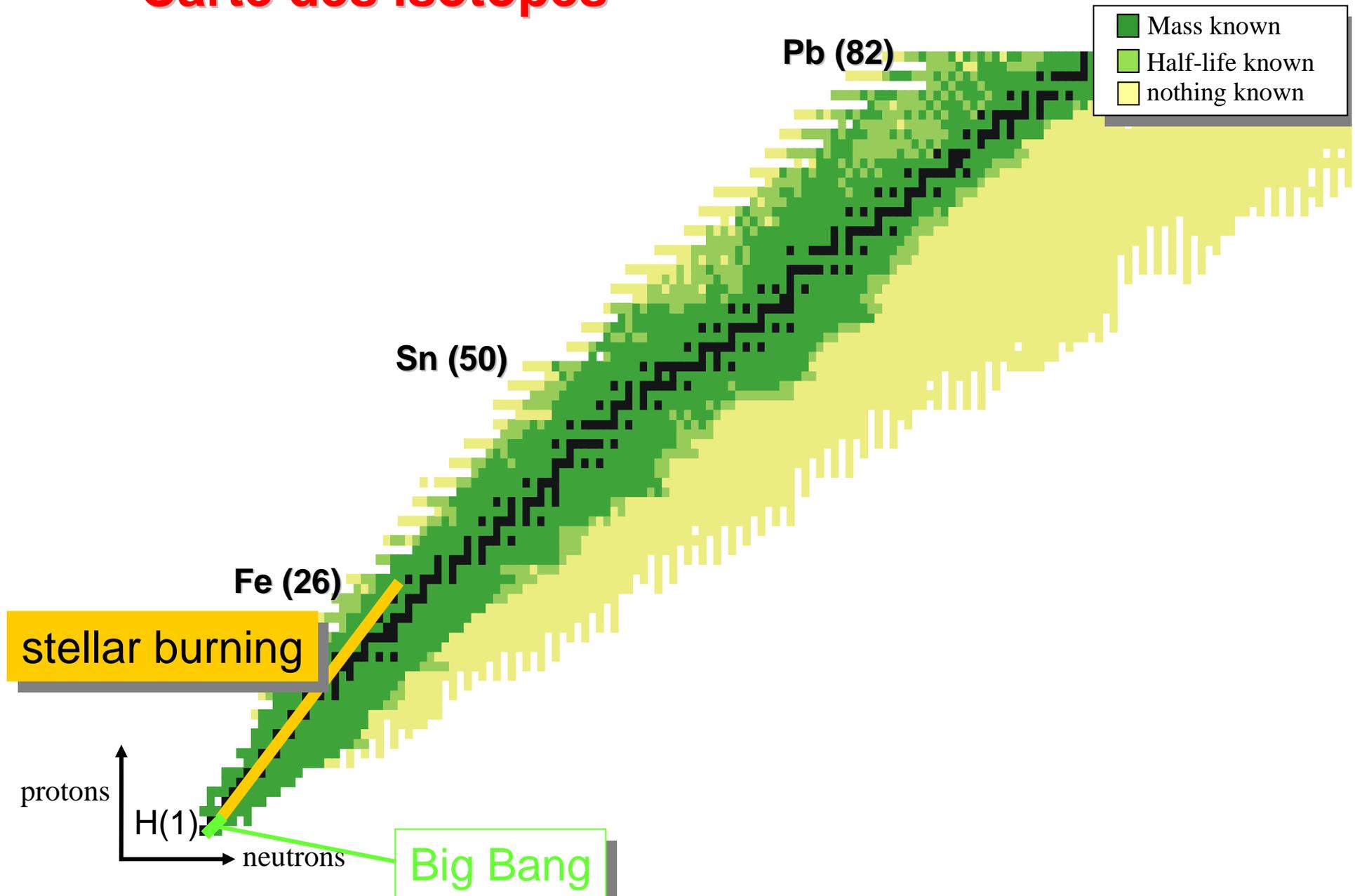
# Carte des isotopes



# Carte des isotopes



# Carte des isotopes



# Carte des isotopes

s process

- Mass known
- Half-life known
- nothing known

Pb (82)

Sn (50)

Fe (26)

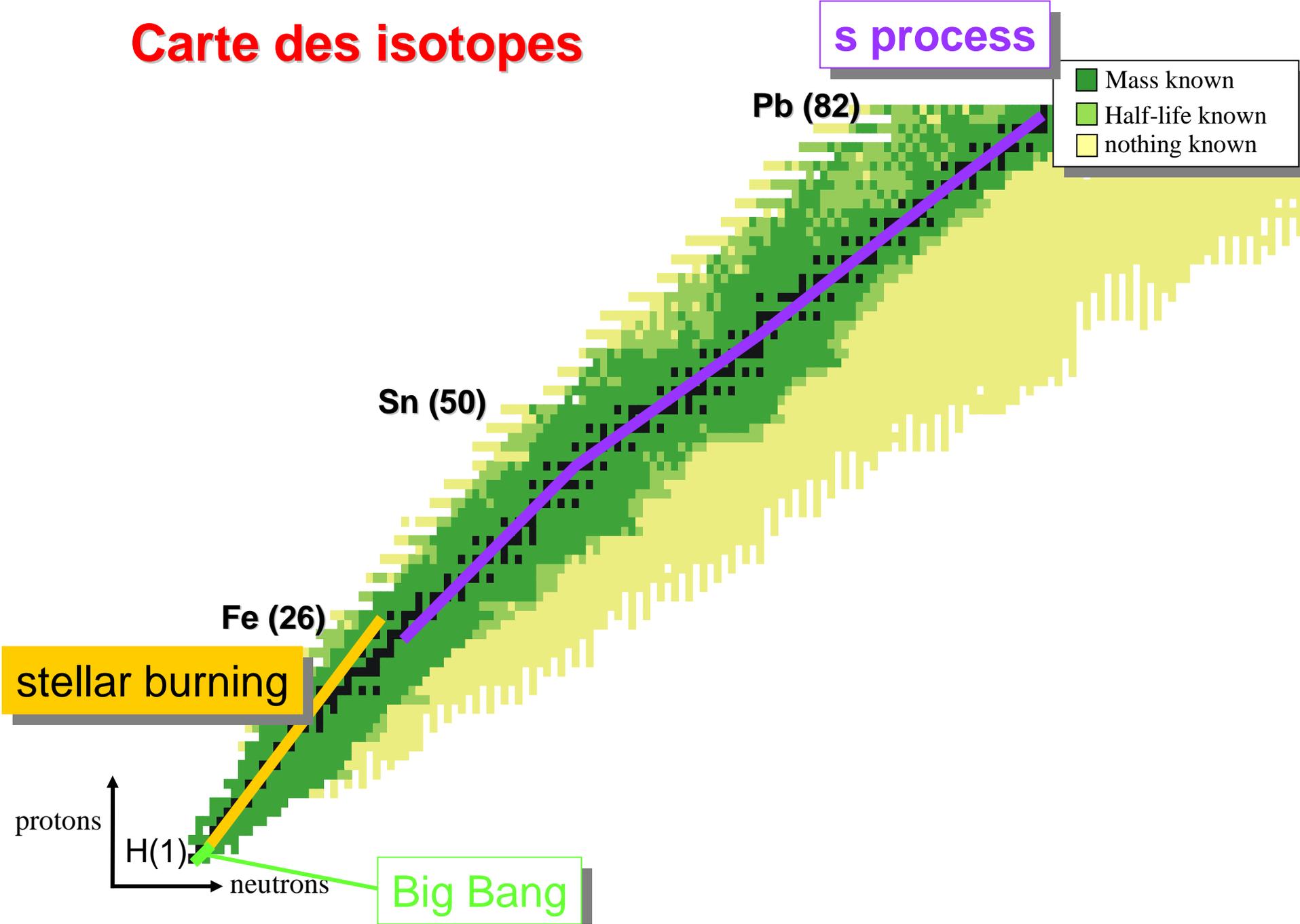
stellar burning

protons

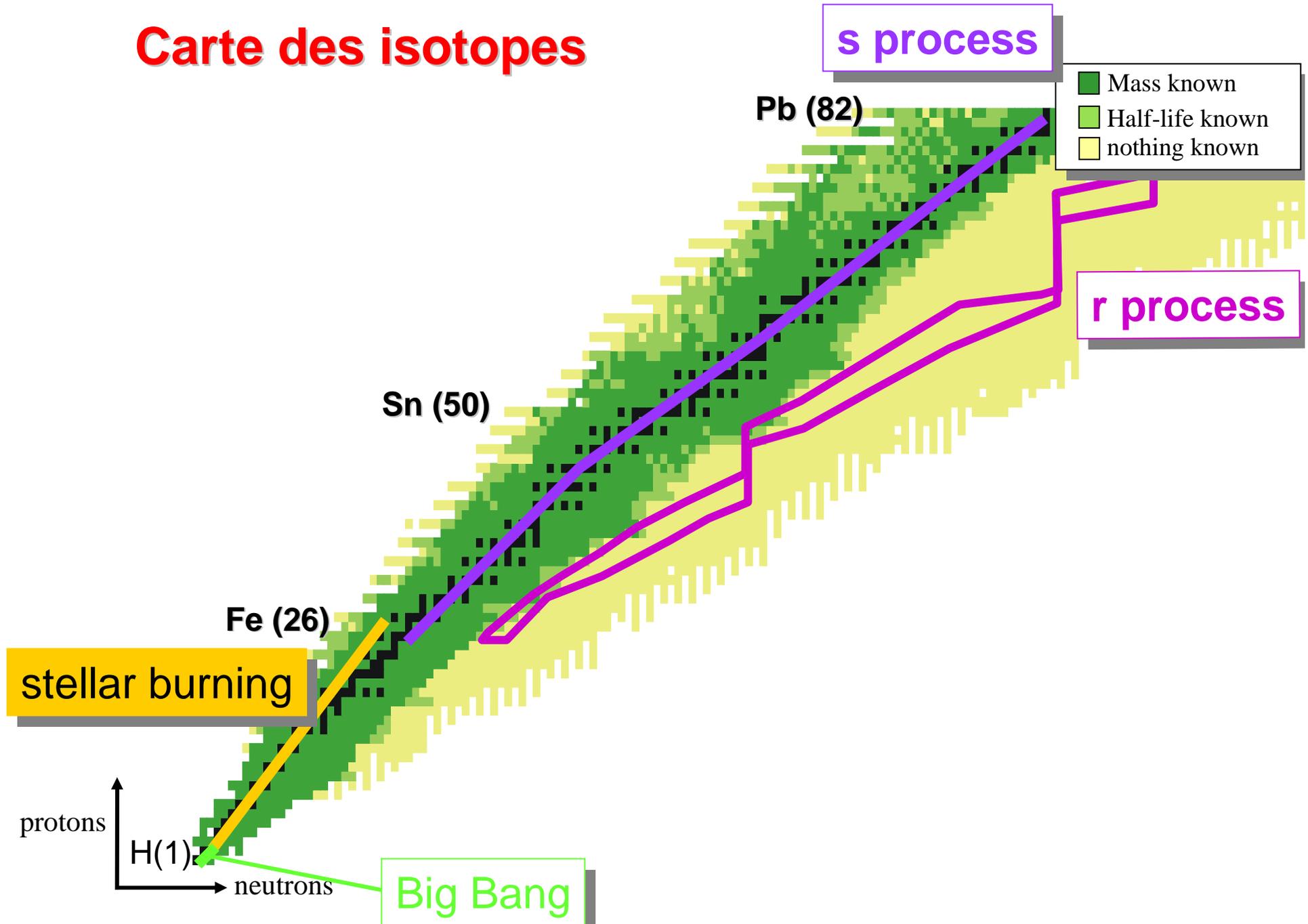
H(1)

neutrons

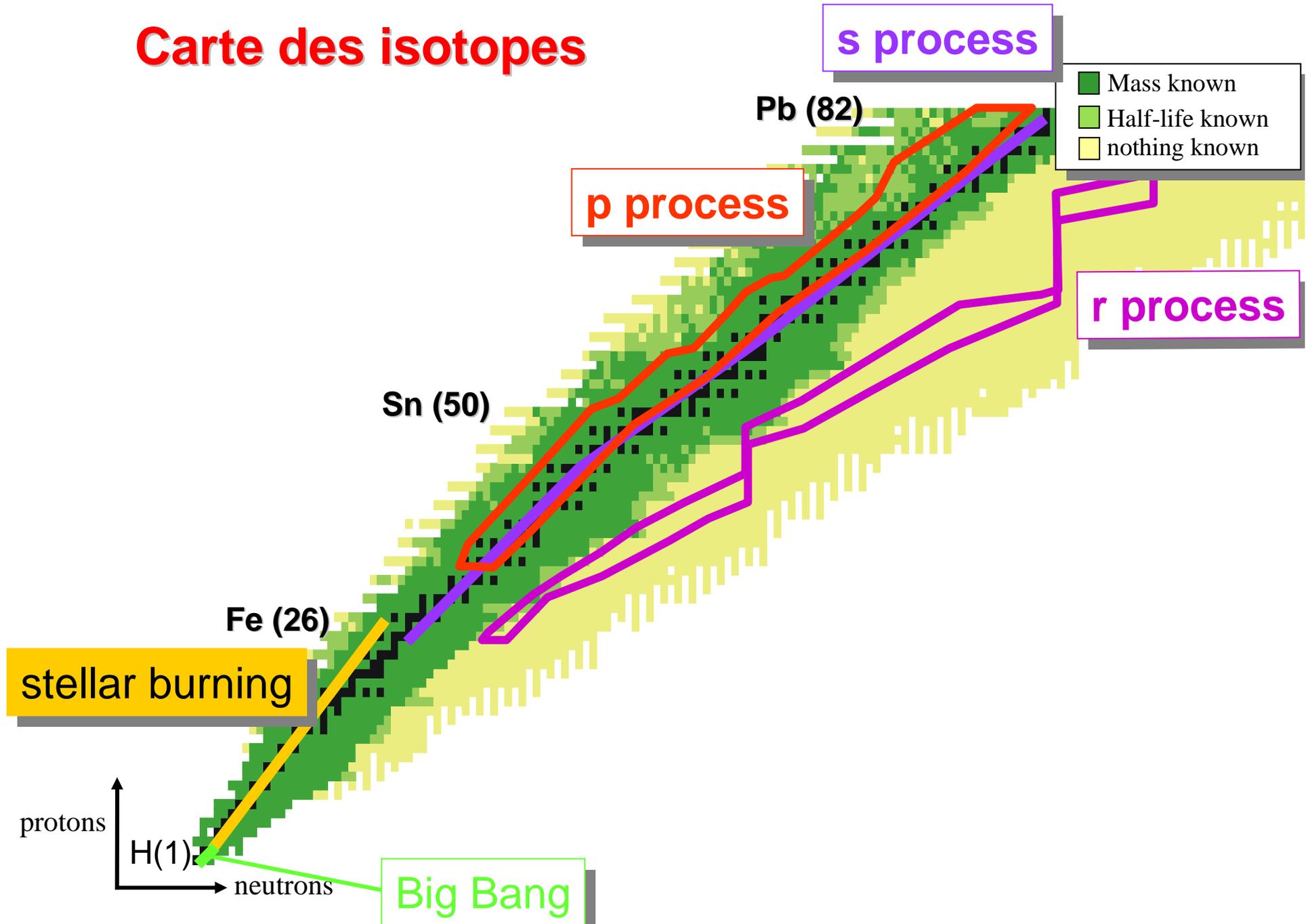
Big Bang



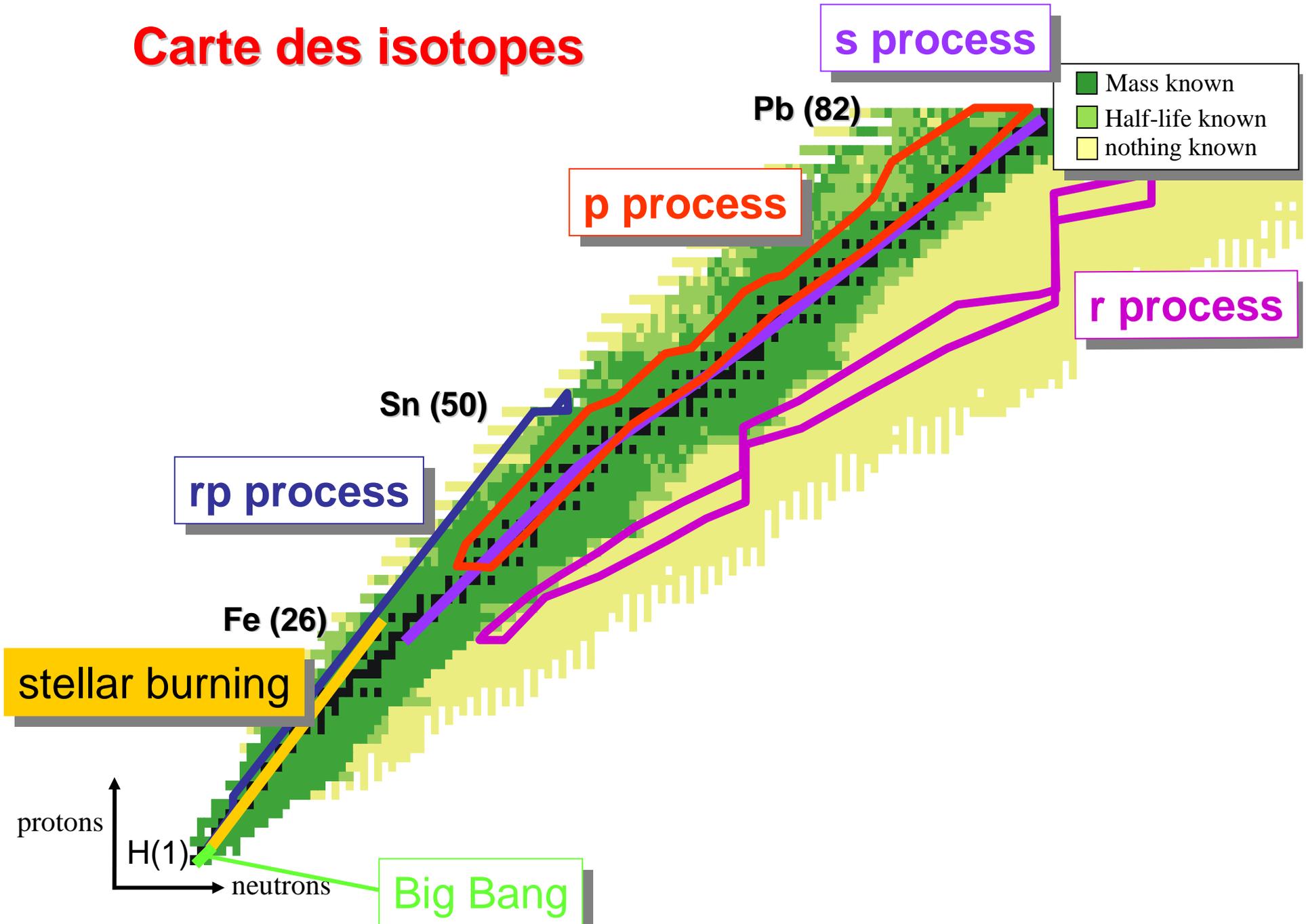
# Carte des isotopes

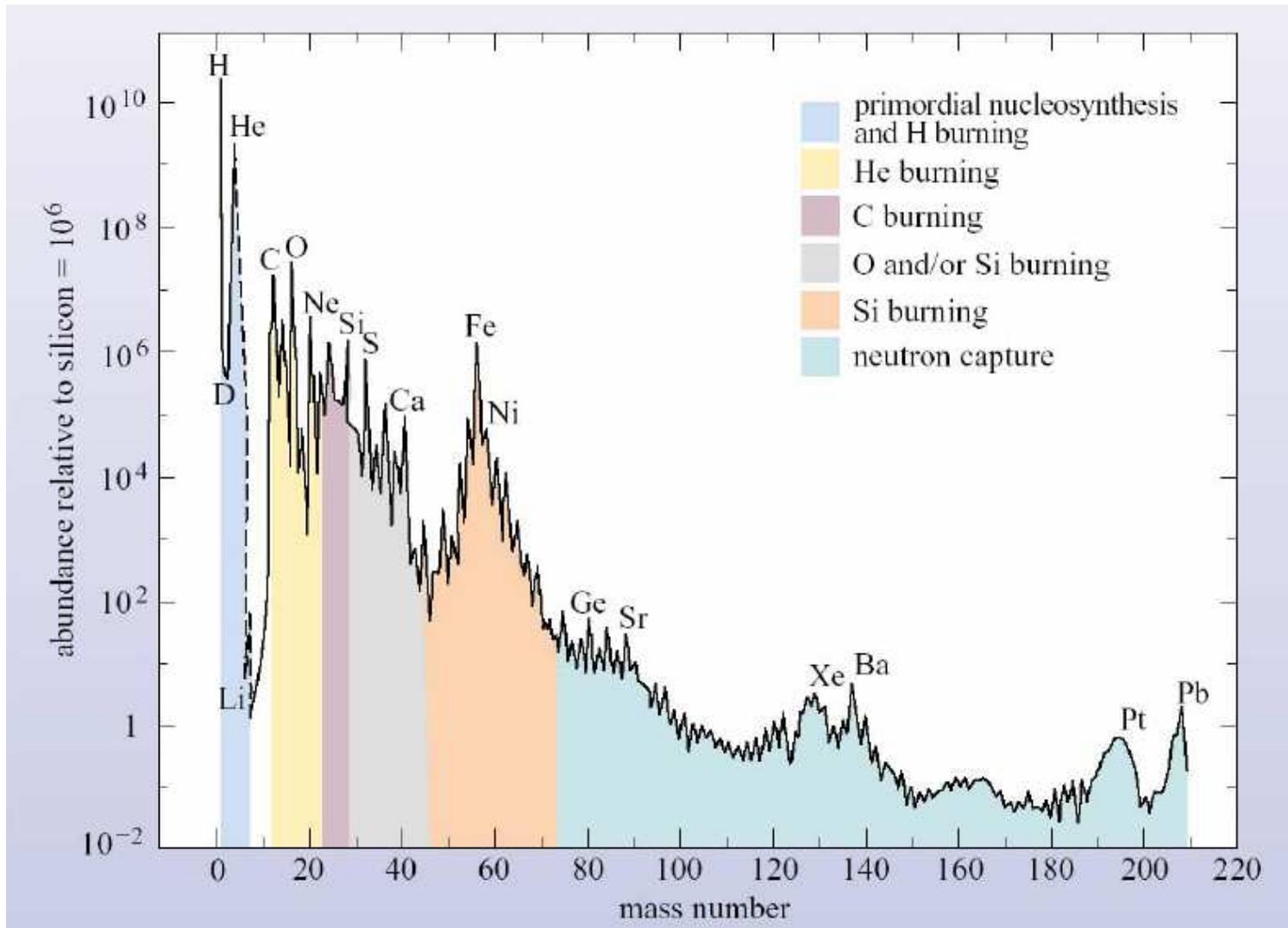


# Carte des isotopes

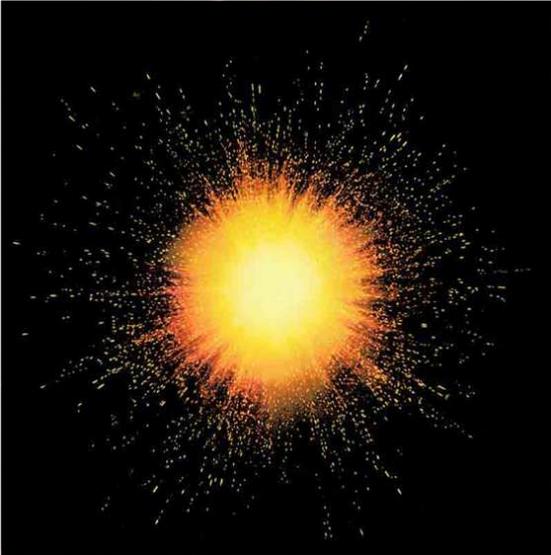


# Carte des isotopes





# La longue et explosive



**Bang**

**Boum**

histoire des éléments

Tableau périodique des éléments  
Actualisé en 2017 selon recommandations de l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée

1																	18									
H																	He									
2																	10									
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne									
3	4											5	6	7	8	9	11									
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar									
11	12											13	14	15	16	17	19									
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr									
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36									
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe									
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54									
Cs	Ba											Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
55	56	57 & 117	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86									
Fr	Ra											Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Fl	Mc	Lv	Ts	Og	
87	88	89 & 118	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	119	120									
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu												
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr												

## Bibliographie

- J. Audouze et S. Vauclair, « L'astrophysique nucléaire »,  
Que Sais-je? PUF, 4ème éd., 2004
- S. Vauclair, « La Naissance des Eléments »,  
Odile Jacob, 2006
- H. Reeves, « Dernières nouvelles du cosmos »  
Editions du Seuil