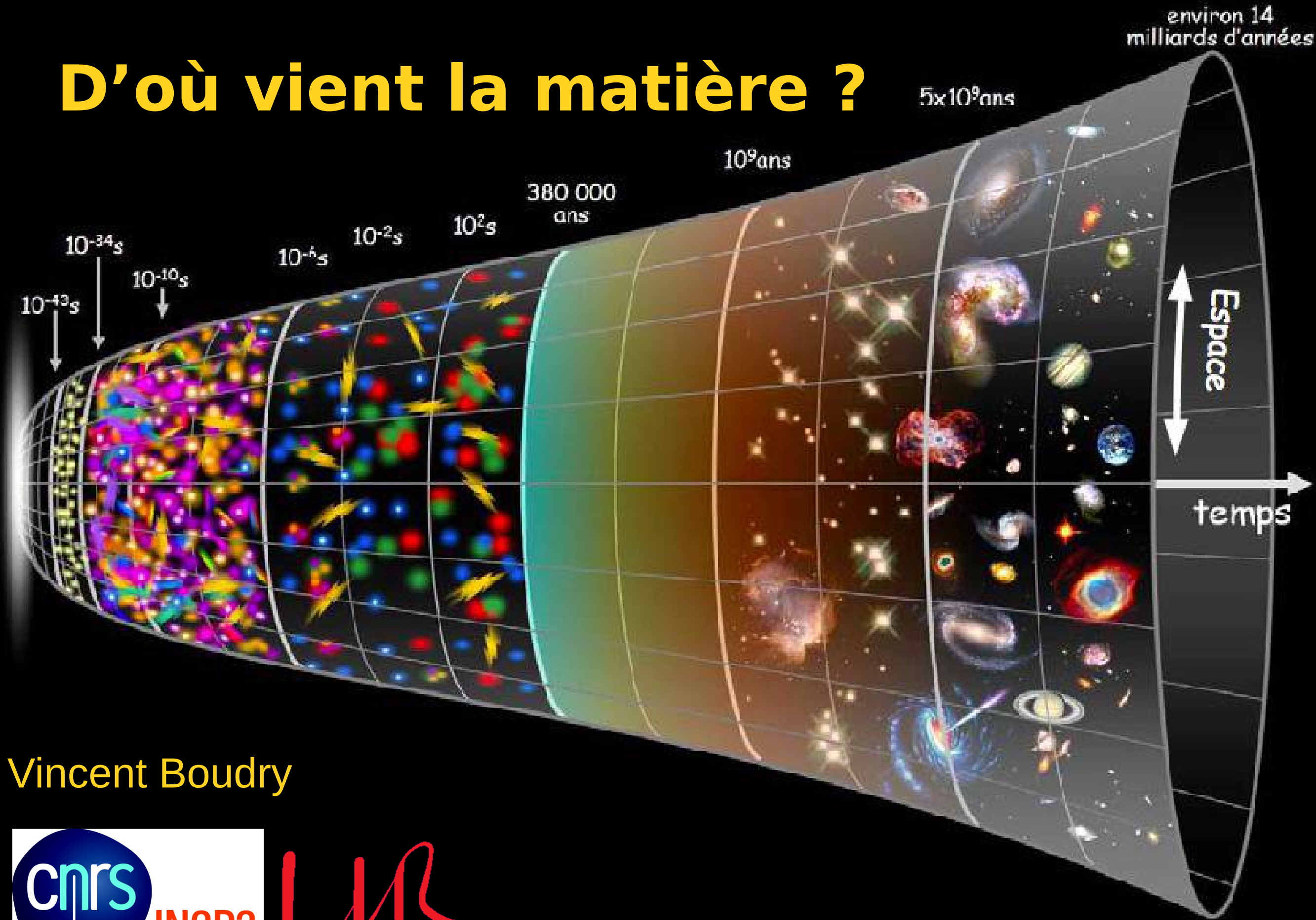


# D'où vient la matière ?



Vincent Boudry



Crédit : O. Drapier

# Quel âge a votre corps ?

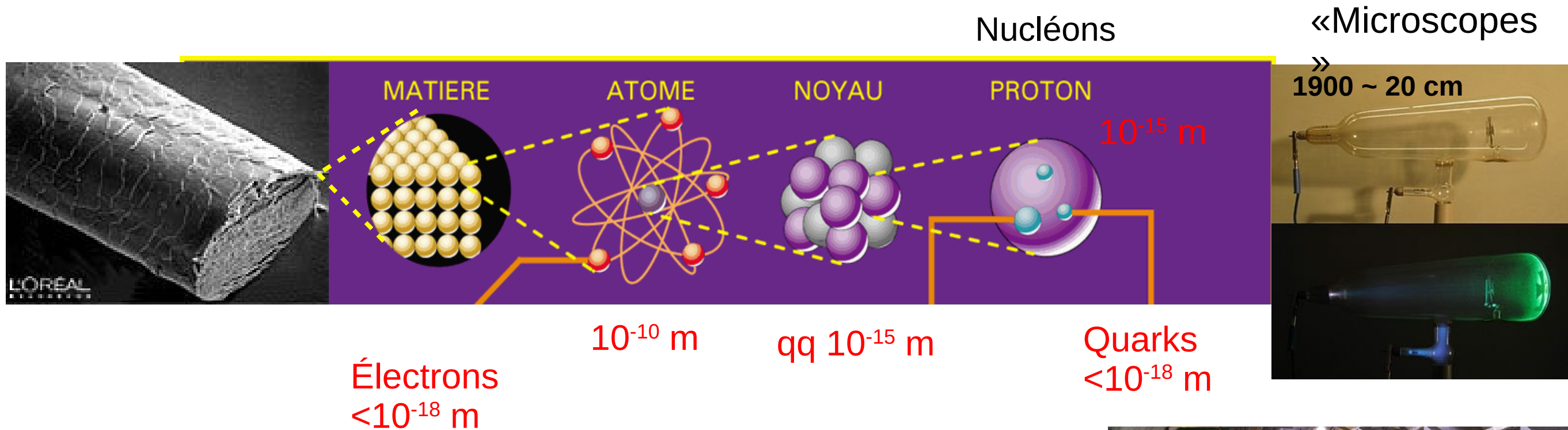
**16±1 ans**

Mais quel âge à la matière de votre corps ?

- au niveau intermédiaire: molécules, etc: très variable
- ... au niveau élémentaire, les constituants « élémentaires » de votre corps ?  
Noyaux & électrons
  - entre ~1 jour, et 5–10 milliard d'années pour les noyaux complexes.
  - 13,798±0,037 milliard d'années... -1 s pour les électrons...
  - 13,798±0,037 milliards d'années... -1 μs pour les noyaux d'H

**Comment sait-on cela ?**

# De quoi est-on fait ?



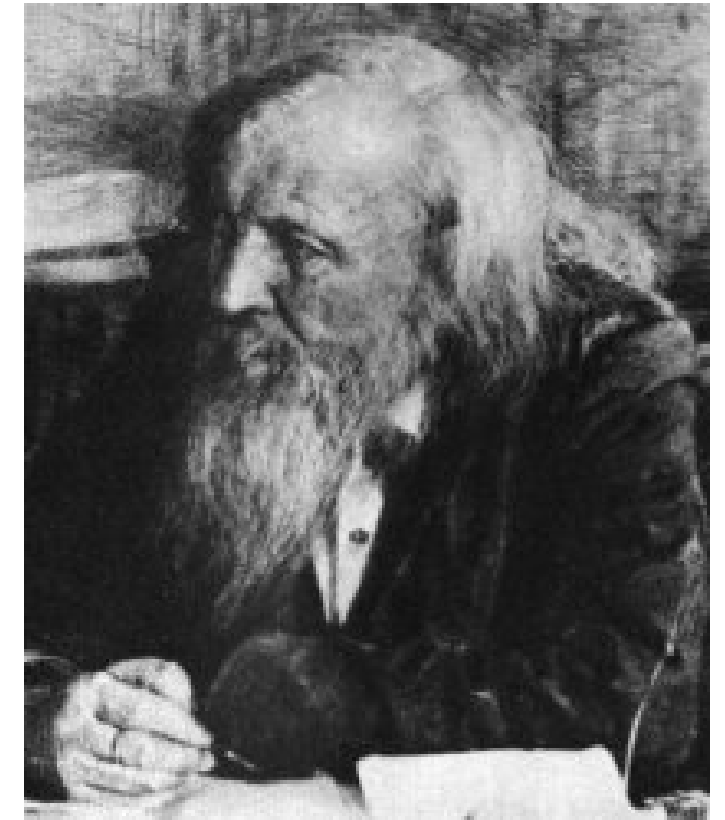
À l'échelle 10 000 000 000 000 ( $10^{13}$ ) 1 atome d'hydrogène

- Noyau/proton [ $10^{-15}$  m = 1 femtomètre]  $\Rightarrow$  1 bille (1 cm)
  - 1 atome [ $10^{-10}$  m = 0.1 nm = 100.000 fm]  $\Rightarrow$  ~ 1km de là...
  - 1 cheveu [0.1 mm =  $10^{-4}$  m]  $\Rightarrow$  1 Million de km (3× la distance Terre-Lune)
- Électrons & Quarks au moins mille fois plus petits que le proton

# Les éléments chimiques classés par leur nombre de charge

La table périodique des éléments de Mendeleev

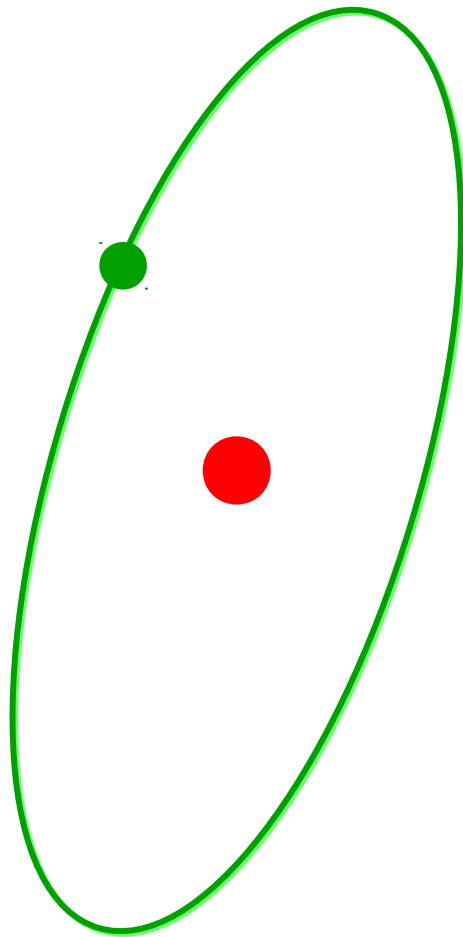
1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	8		
H															He		
Li	Be									B	C	N	O	F	Ne		
Na	Mg									Al	Si	P	S	Cl	Ar		
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Rf	Ha	Sg	Ns	Hs	Mt	110	111	112						
Lanthanides			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb		
Actinides			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No		



1 élément =  
1 nombre de  
charge (électrons  
ou protons)

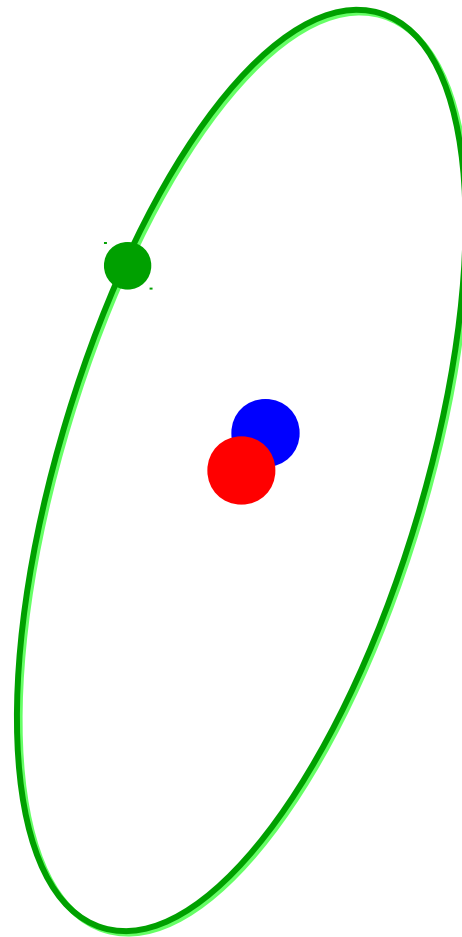
# Les isotopes de l'Hydrogène

1  
électron  
1 proton



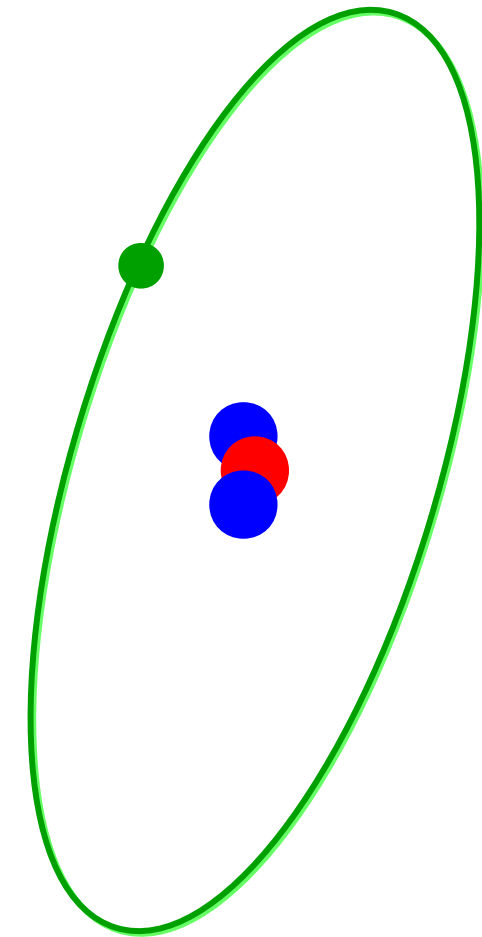
Hydrogène  
 ${}^1\text{H}$

1  
électron  
1 proton  
1 neutron



Deutérium  
 ${}^2\text{H}$

1 électron  
1 proton  
2 neutrons



Tritium  
 ${}^3\text{H}$

# Isotopes

**Nombre de masse**  
(neutrons + protons)



**Numéro atomique** (protons)



**uranium 238**

**238**

**U**

**92**

**Protons = 92**

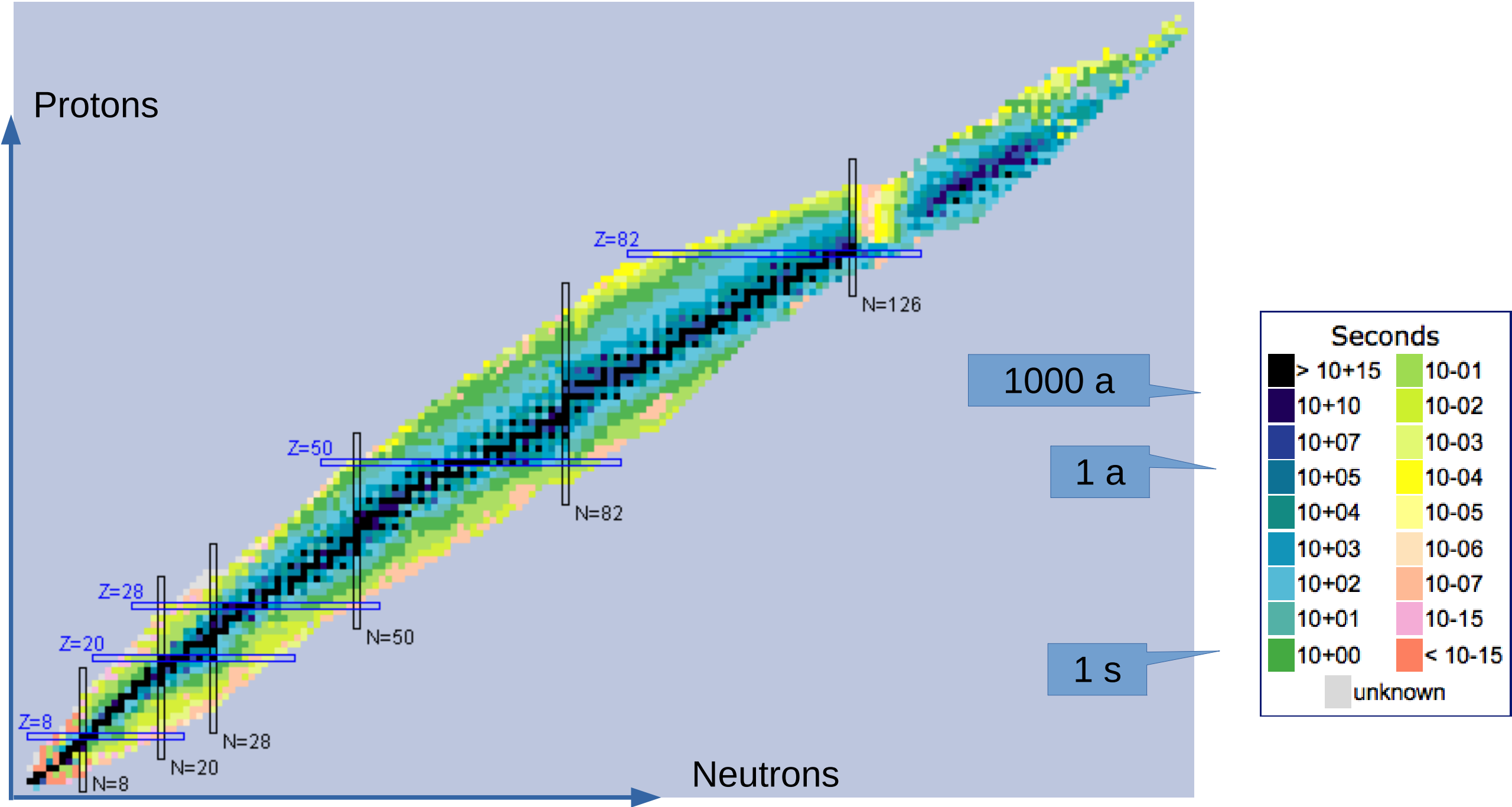
**Neutrons = 146**

**Masse = 238**

# Carte des isotopes

## Classement en nombre de neutrons & de protons

Temps de 1/2 vie:  $N = N_0 / 2^{t/T}$





# Donc de quoi est-on fait ?

En résumé :

- beaucoup, beaucoup de vide...
- qq grains de matière,  
... arrangés de manière plus ou moins complexe ..
- un peu (ou beaucoup) d'énergie
- ...

Mais quel âge a et d'où vient la matière ?



# Le plus récent: le carbone 14

Le  $^{14}\text{C}$  est produit dans l'atmosphère en permanence,  
intégré au  $\text{CO}_2$ , consommé par les plantes et par les humains

Les autres forces:

- **Interaction faible:** ~1900



- **Physique nucléaire** ~1940

*seulement entre les nucléons à haute énergie*

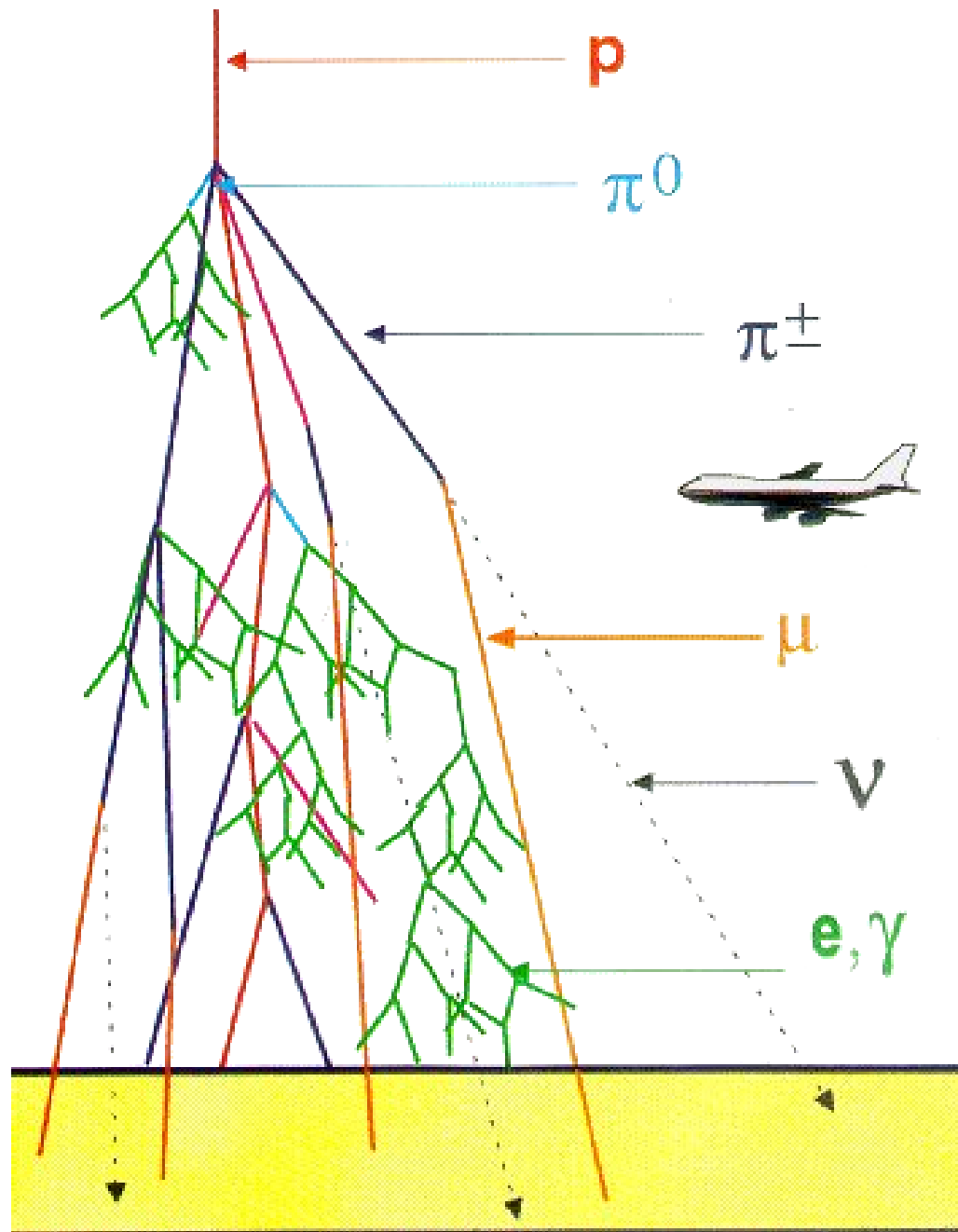
*(10 MeV = énergie cinétique d'un flocon de neige...)*



0 + 7 → 6 + 1 : la charge est conservée,

1 + 14 → 14 + 1 : le nombre de nucléons (n+p)

# Le Rayonnement cosmique



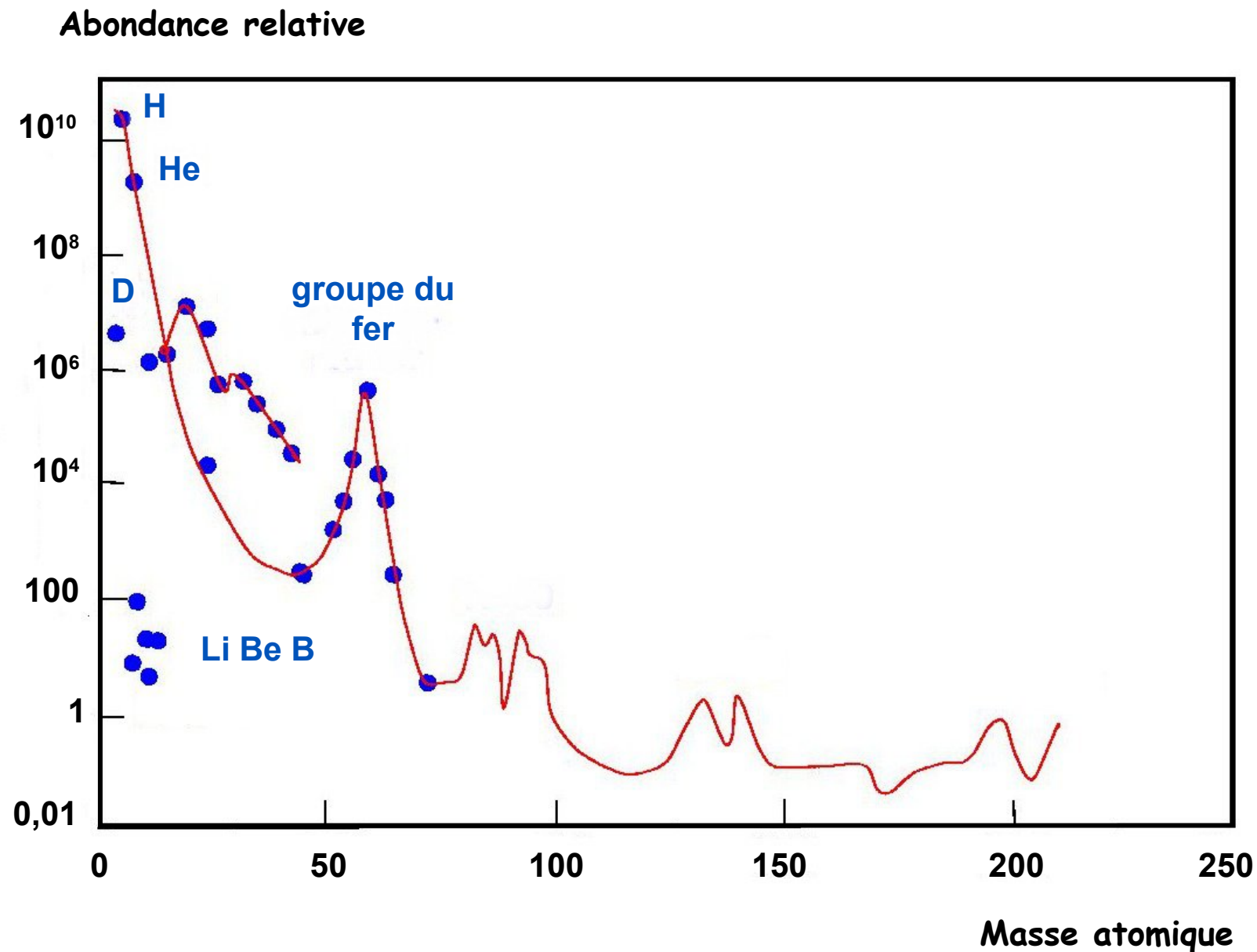
Bombardement de rayons cosmiques:

- 1 muon par surface de main par seconde...
- Résidus de Supernova (explosion d'étoile):
  - 90 % de protons ( $H^+$ , 90%) , et
  - 10% de particules  $\alpha$  ( $He^{2+}$ , 10%)
- Certains on 1J d'énergie!  
» ce quoi sait faire dans 1 accélérateur

+ 600 000 000 000 ( $6 \times 10^{11}$ ) neutrinos /s en direct du soleil.

# L'abondance des éléments

- Spectres de lumière des étoiles et du soleil
- Echantillons de terre, lune, météorites, matière interstellaire
- Rayonnement cosmique



# Les noyaux « moyens » : Poussières d'étoiles...

Les étoiles sont formées essentiellement d'Hydrogène (et un peu d'Hélium) + traces

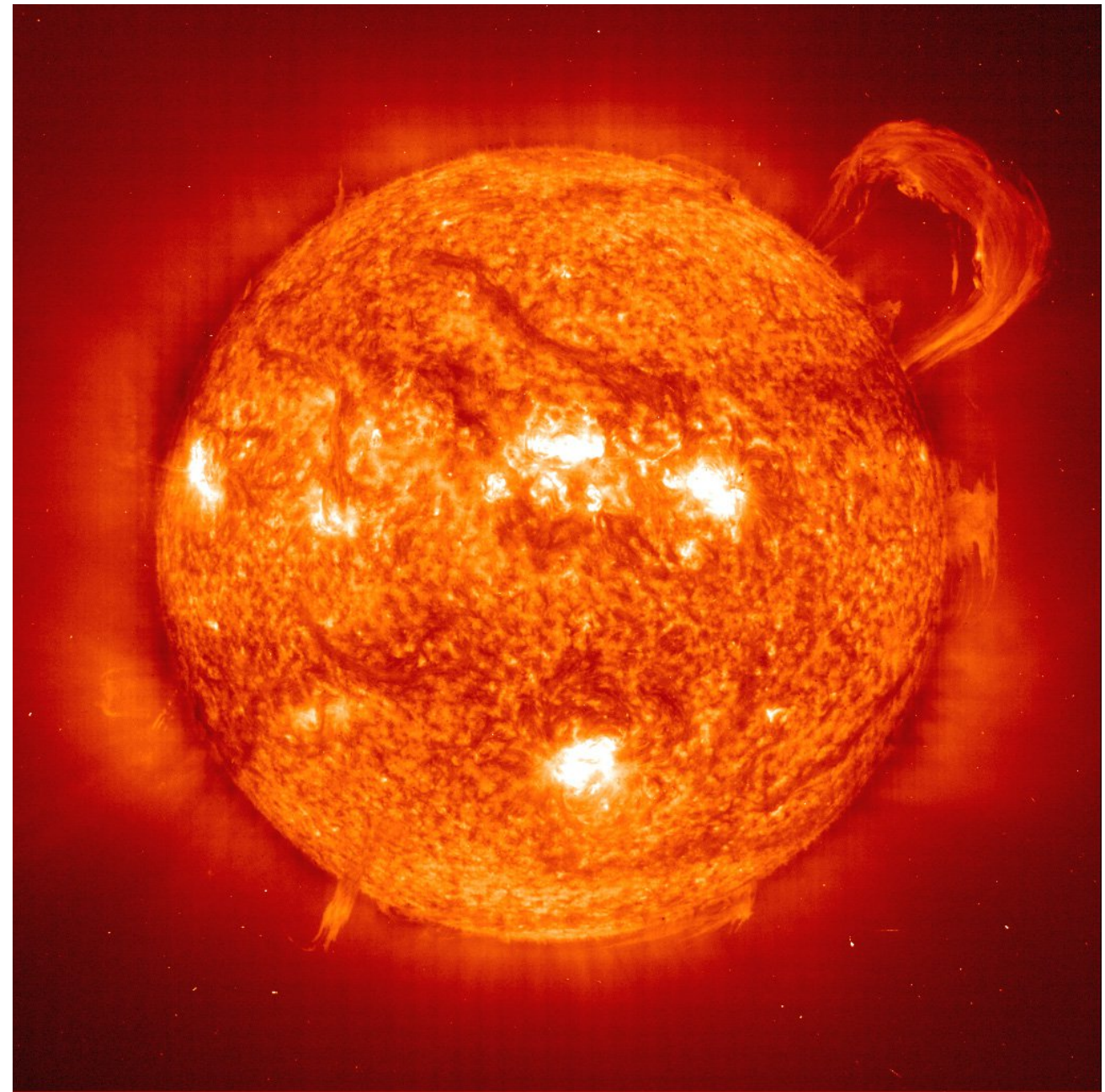
[Raies des Spectre]

Chauds

- Surface du soleil ~ 6000°C
- Centre du soleil ~ 15 Millions °C

D'où vient l'énergie du Soleil ?

- chimique : quelques millions d'années, réactions < 5700 degrés
- contraction gravitationnelle : 50 millions d'années

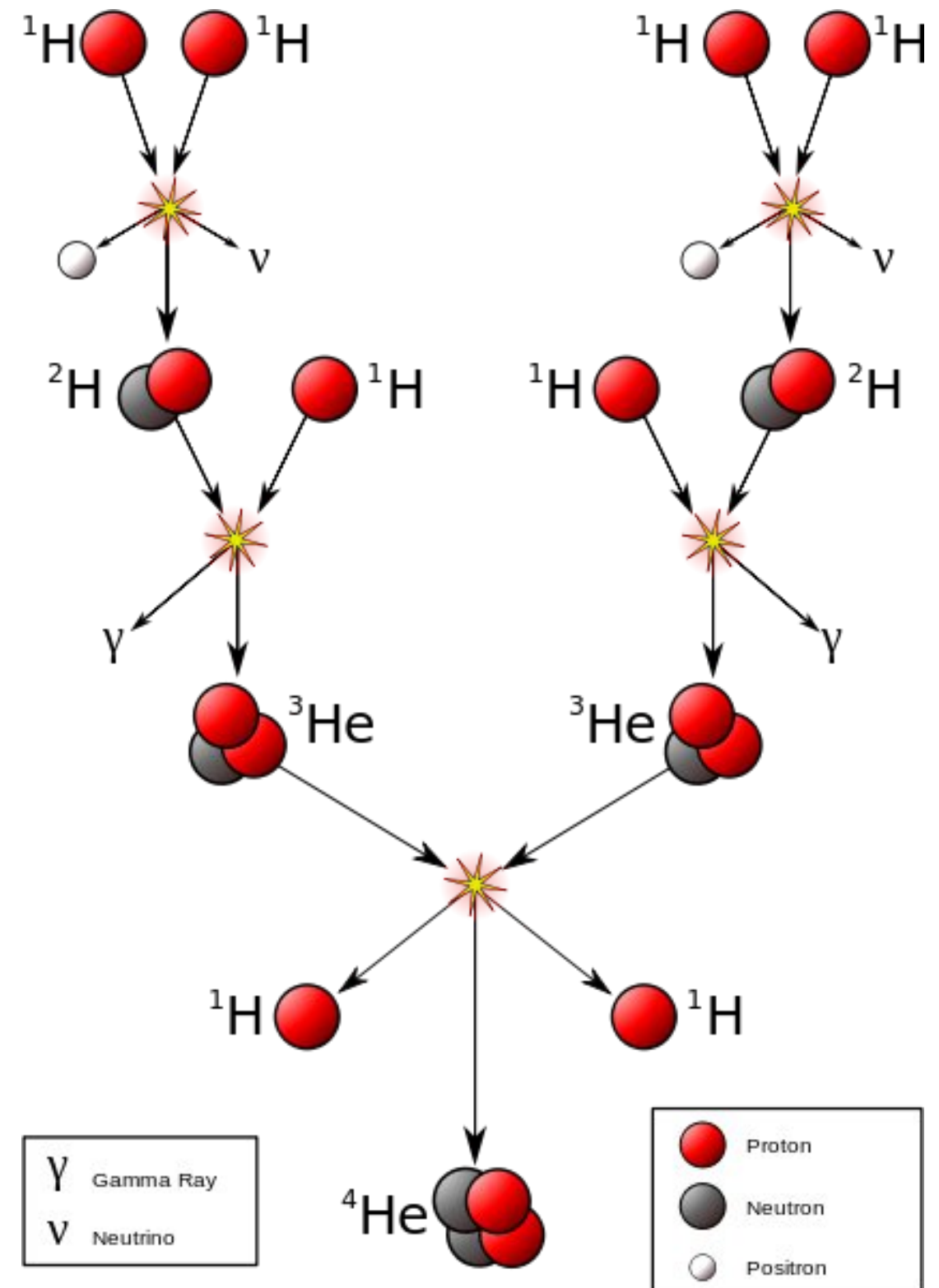


# Fusion de l'Hydrogène

## Le cycle proton – proton

cycle PP I ( $\geq 10$  Millions de  $^{\circ}\text{C}$ )

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



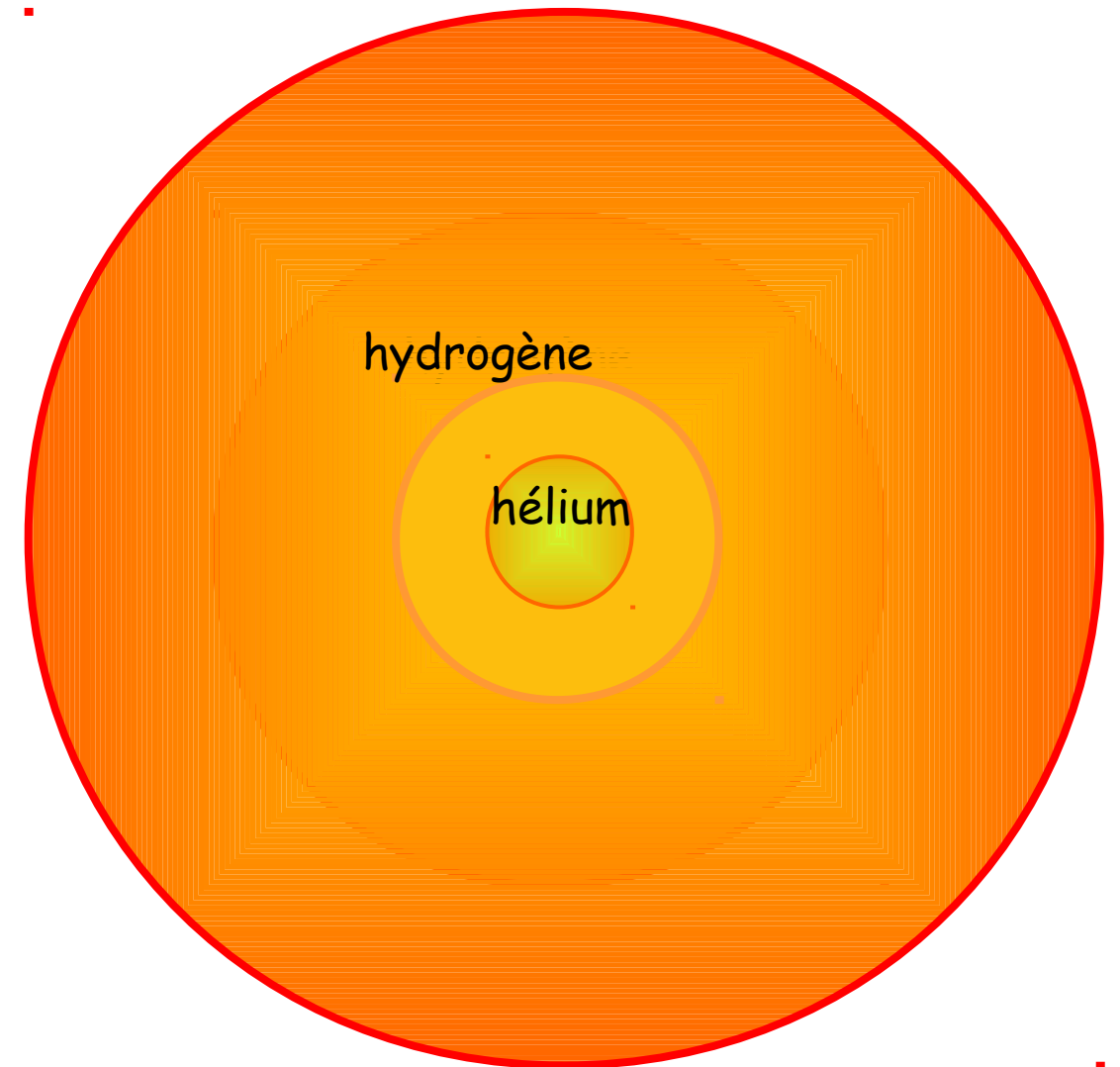


# Allumage

Principalement de l'hydrogène et de l'hélium

Contraction gravitationnelle

→ Fusion de l'hydrogène



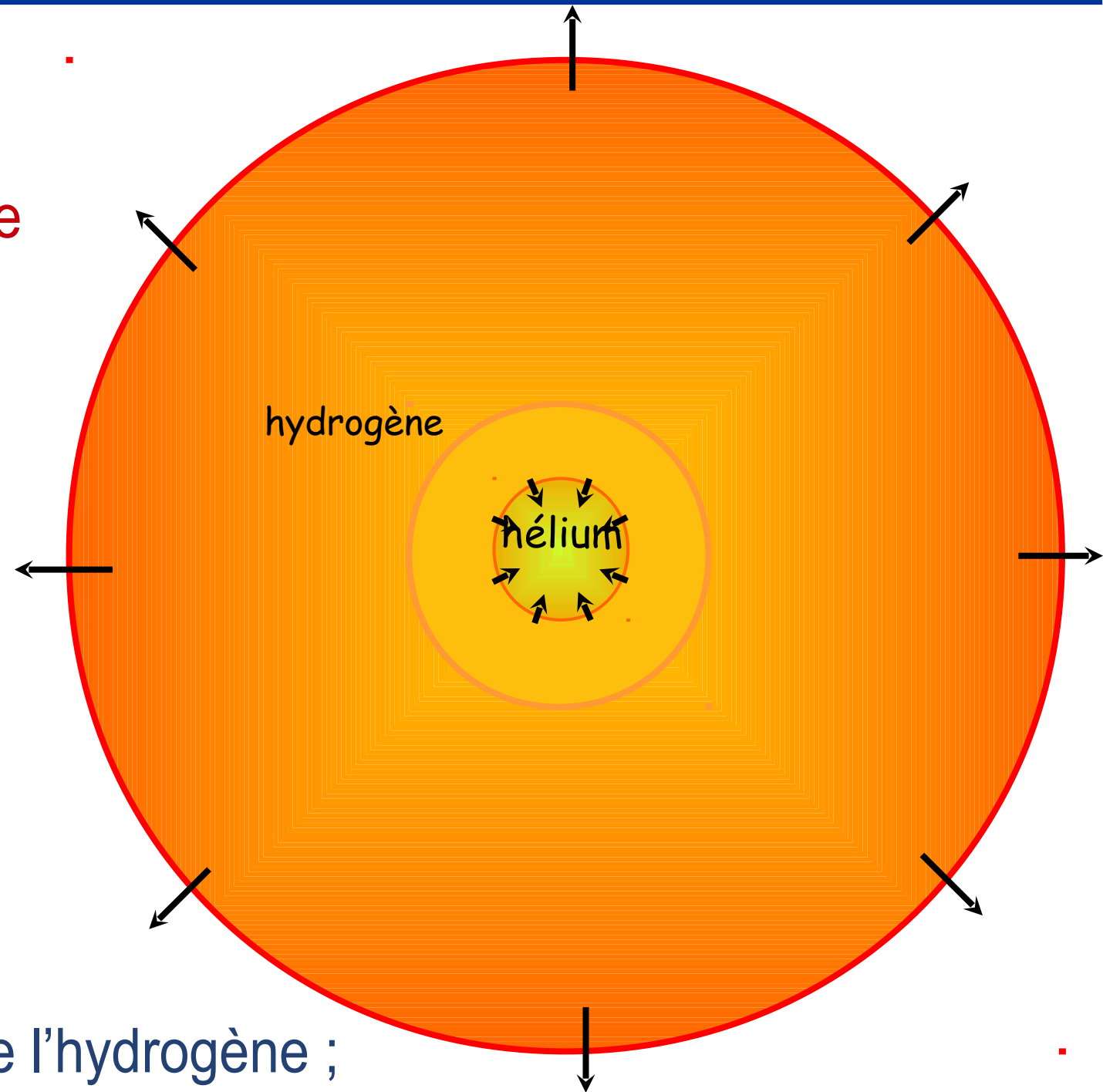
Equilibre gravitation – rayonnement

Augmentation de la concentration en hélium au cœur

# Fin de la combustion

Peu d'hydrogène au cœur:

- Fin de la combustion de l'hydrogène
- Contraction du cœur d'hélium
- Contraction de l'étoile



Augmentation de la

température au cœur et en périphérie ;

Eventuelle combustion en couche de l'hydrogène ;



# Étoile Géante Rouge

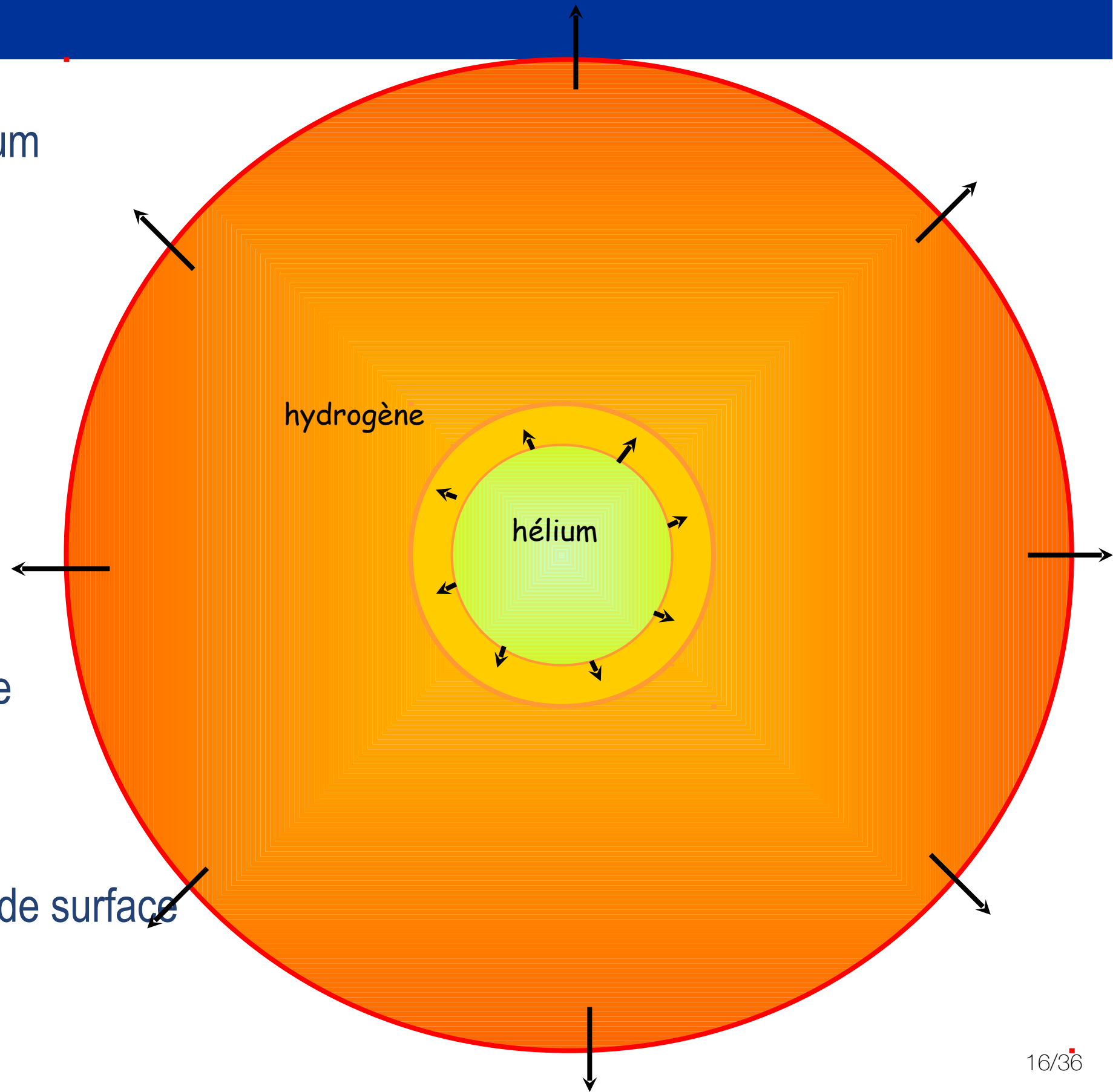
Combustion centrale de l'hélium

Combustion en couche  
de l'hydrogène ;

Augmentation considérable de  
la taille de l'étoile

Diminution de la température de surface

⇒ ROUGE

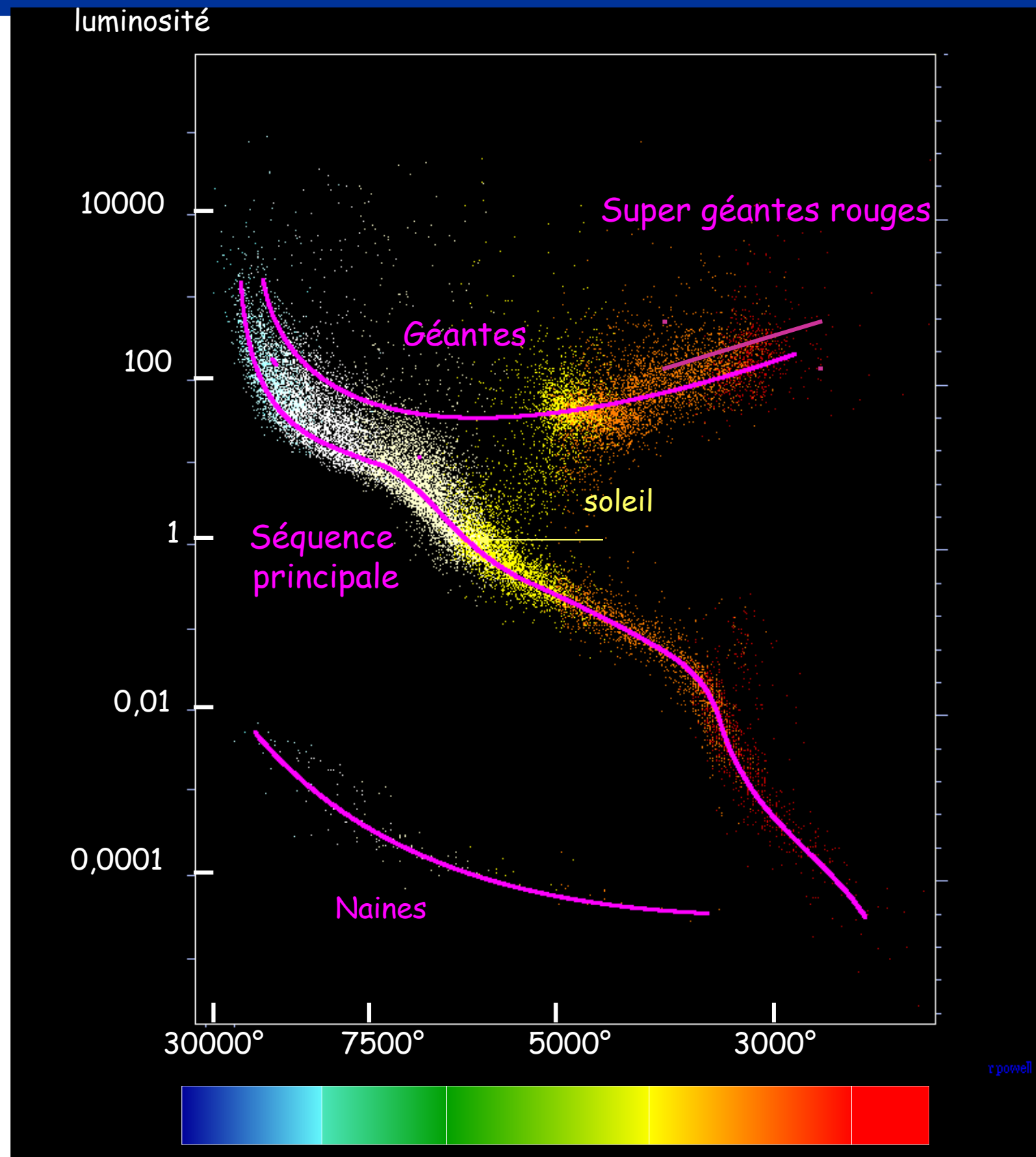


# Le classement des étoiles

Fin XIXème, on mesure  
Les luminosités,  
Les distances,  
les couleurs  
des étoiles

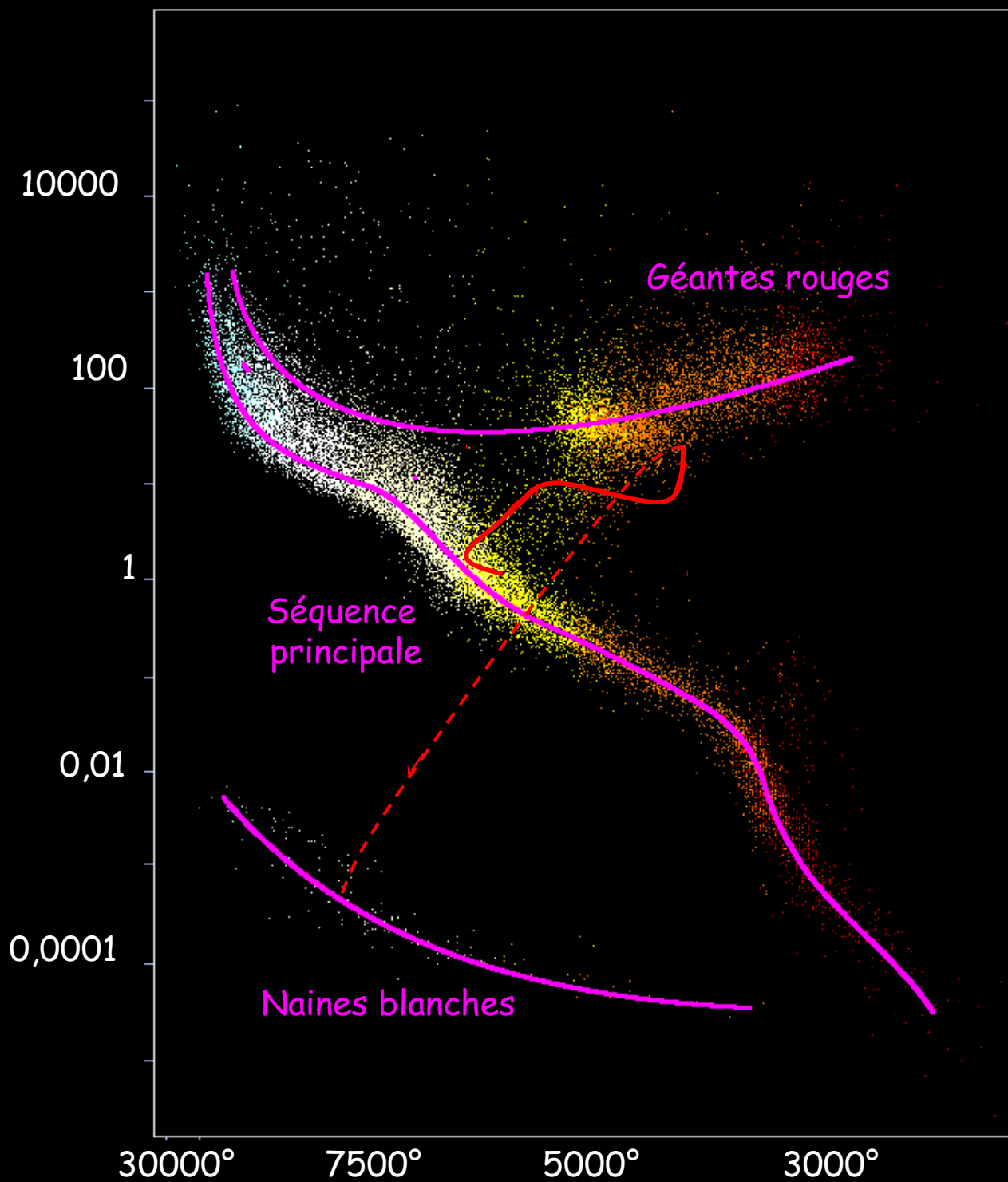


En 1905,  
Hertzsprung au Danemark,  
Russel aux USA,  
placent les étoiles  
sur un diagramme  
selon leur luminosité  
et leur température



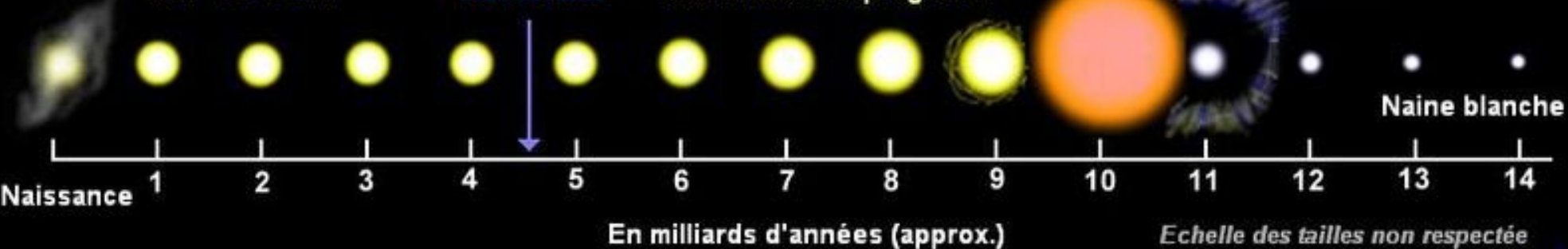
# Le destin du soleil

luminosité



rpowell

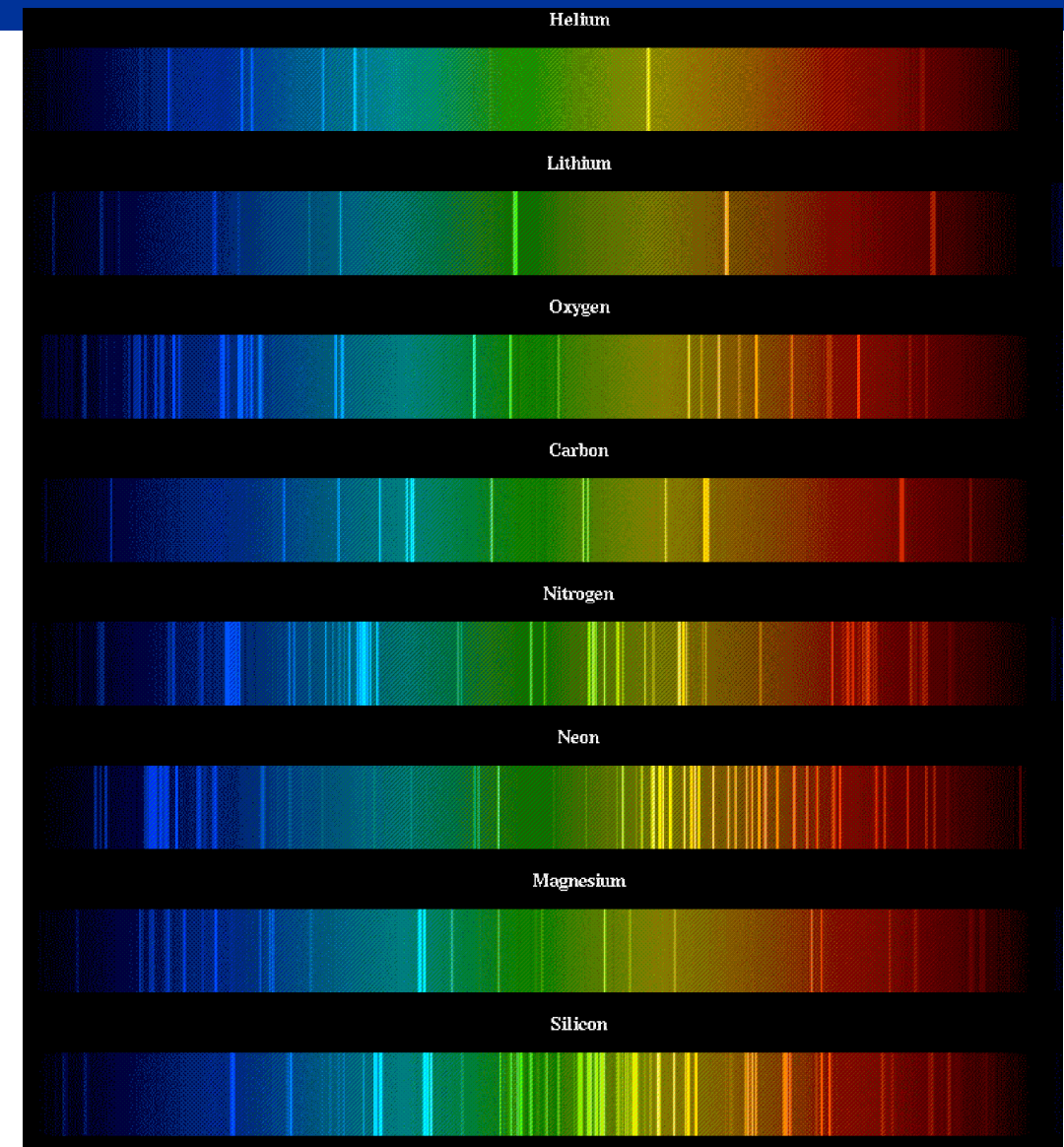
## Cycle de vie du Soleil



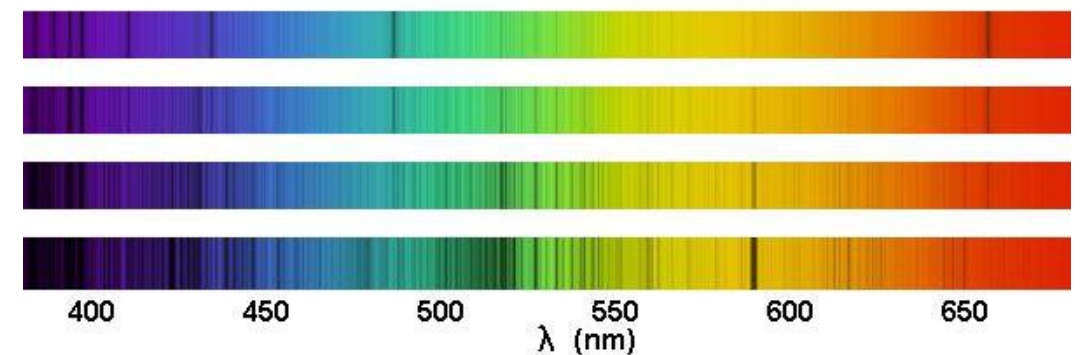
Echelle des tailles non respectée

# Les spectres lumineux

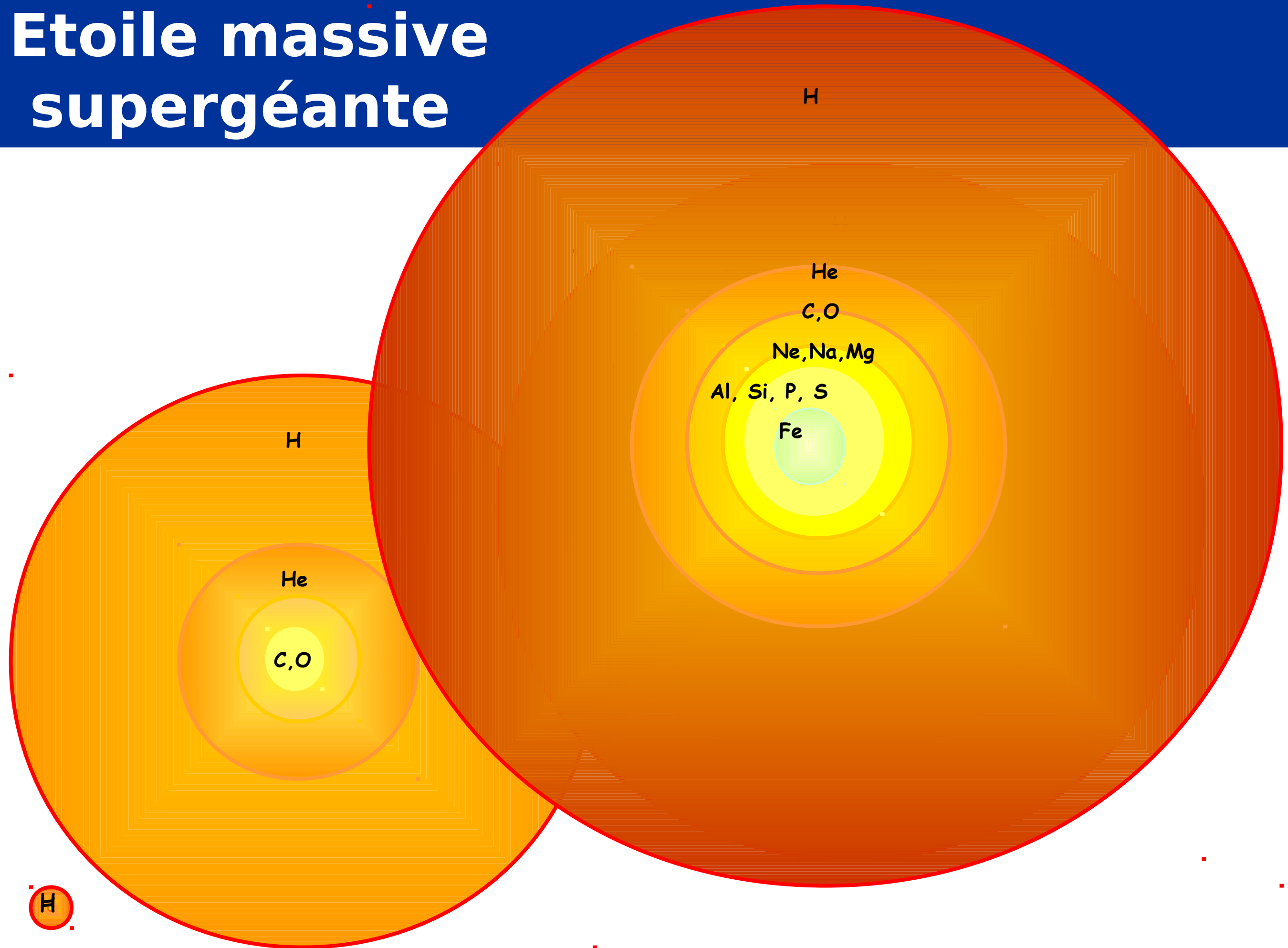
A très haute température chaque élément émet un spectre de lumière caractéristique des éléments chimiques présents



Si la lumière traverse de la matière chaude, comme à la surface des étoiles, on peut observer à la place un spectre d'absorption

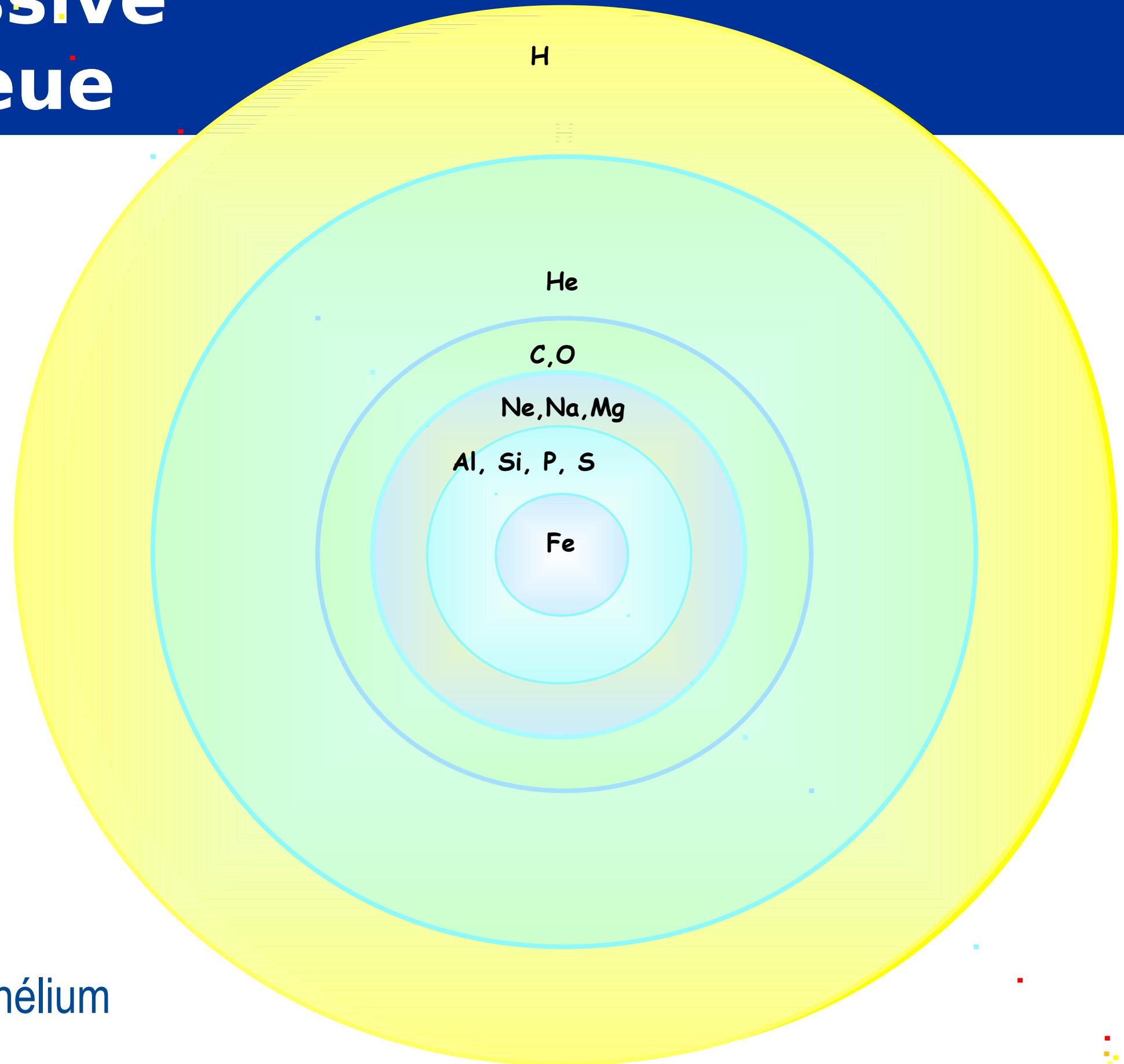


# Etoile massive supergéante



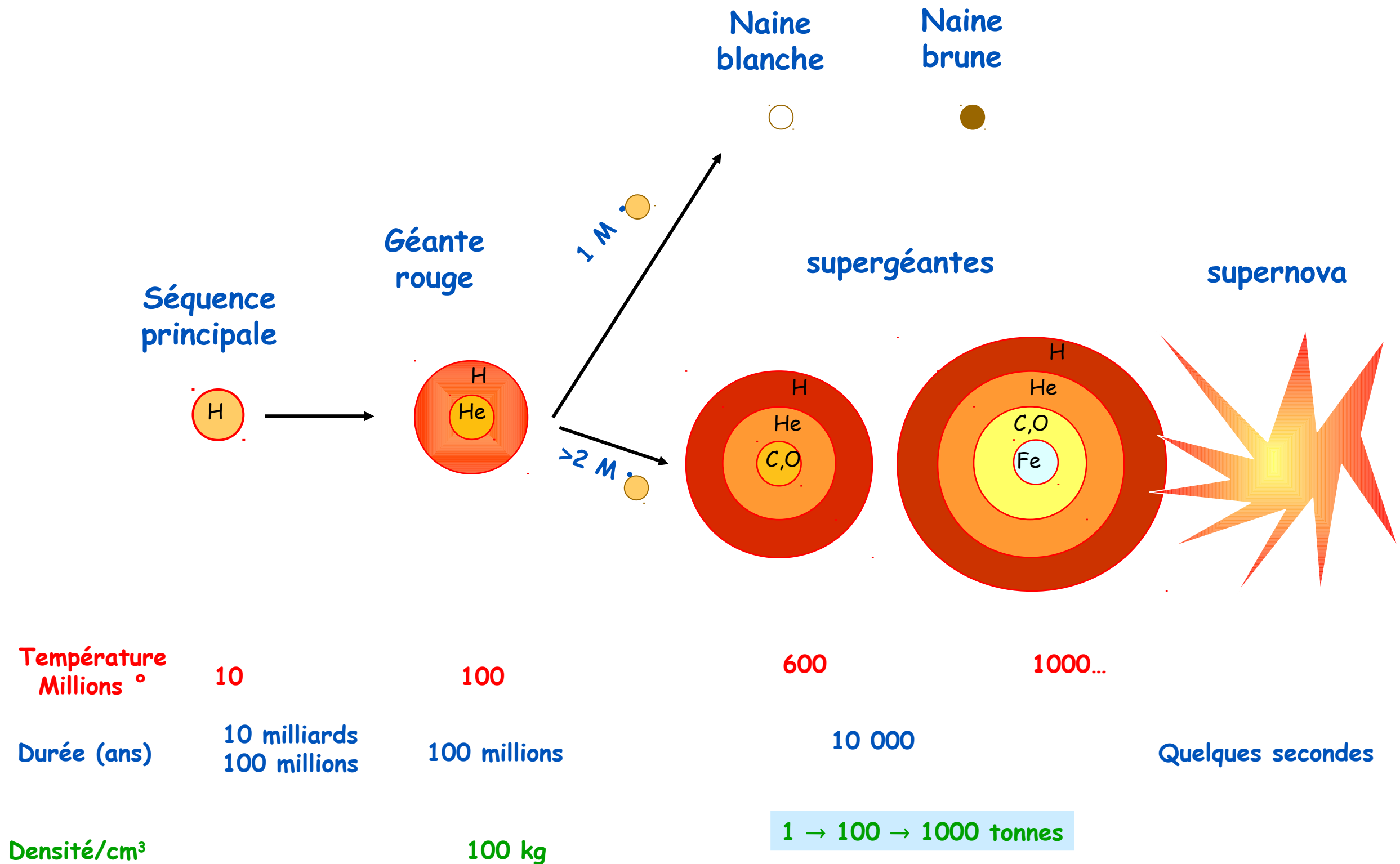


# Étoile massive géante bleue



Certaines  
étoiles  
massives  
perdront  
toute leur  
enveloppe  
d'hydrogène  
et même d'hélium

# Le destin des étoiles...





# Explosion d'une supernova

© Anglo-Australian Observatory



1985

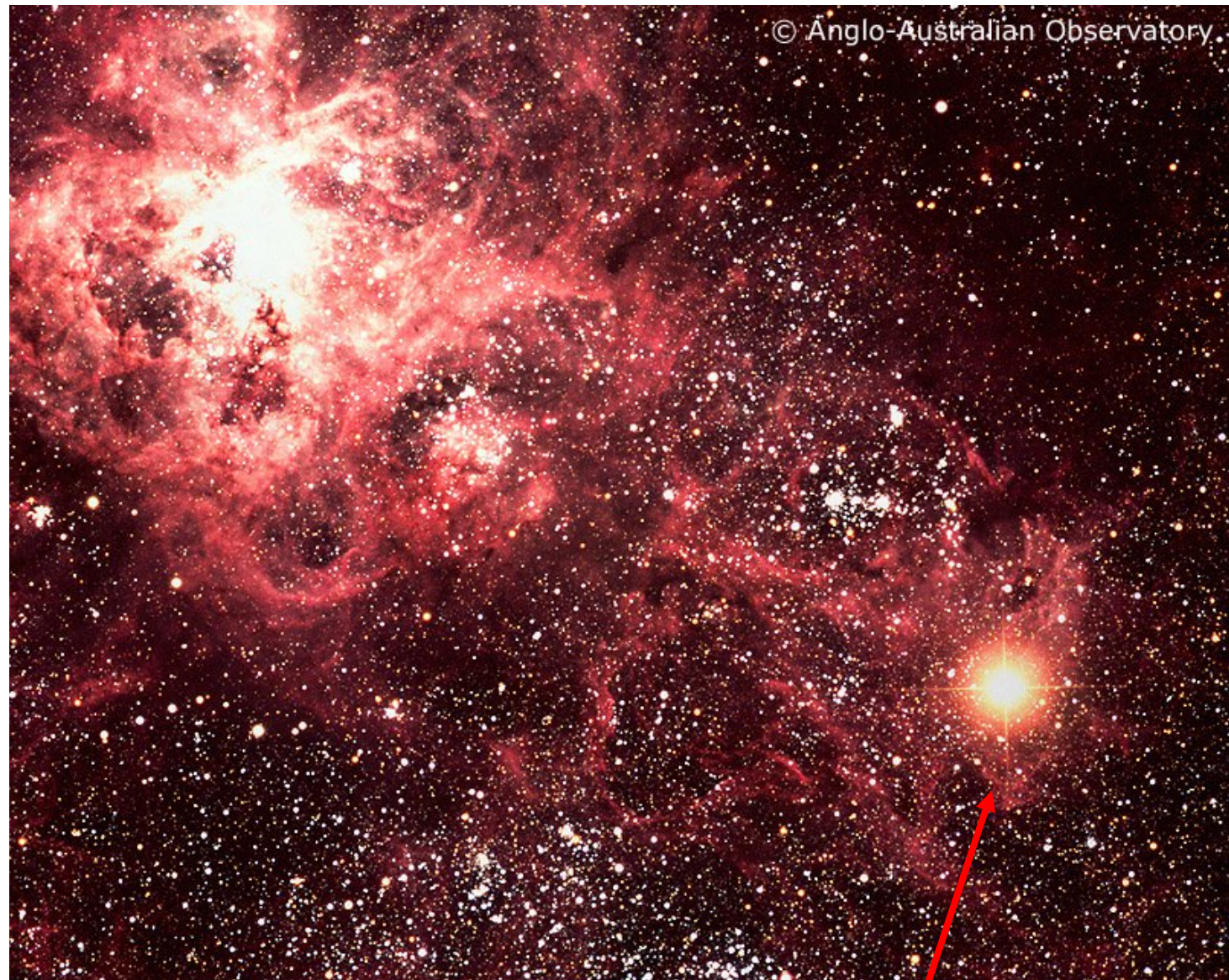
© Anglo-Australian Observatory



février 1987

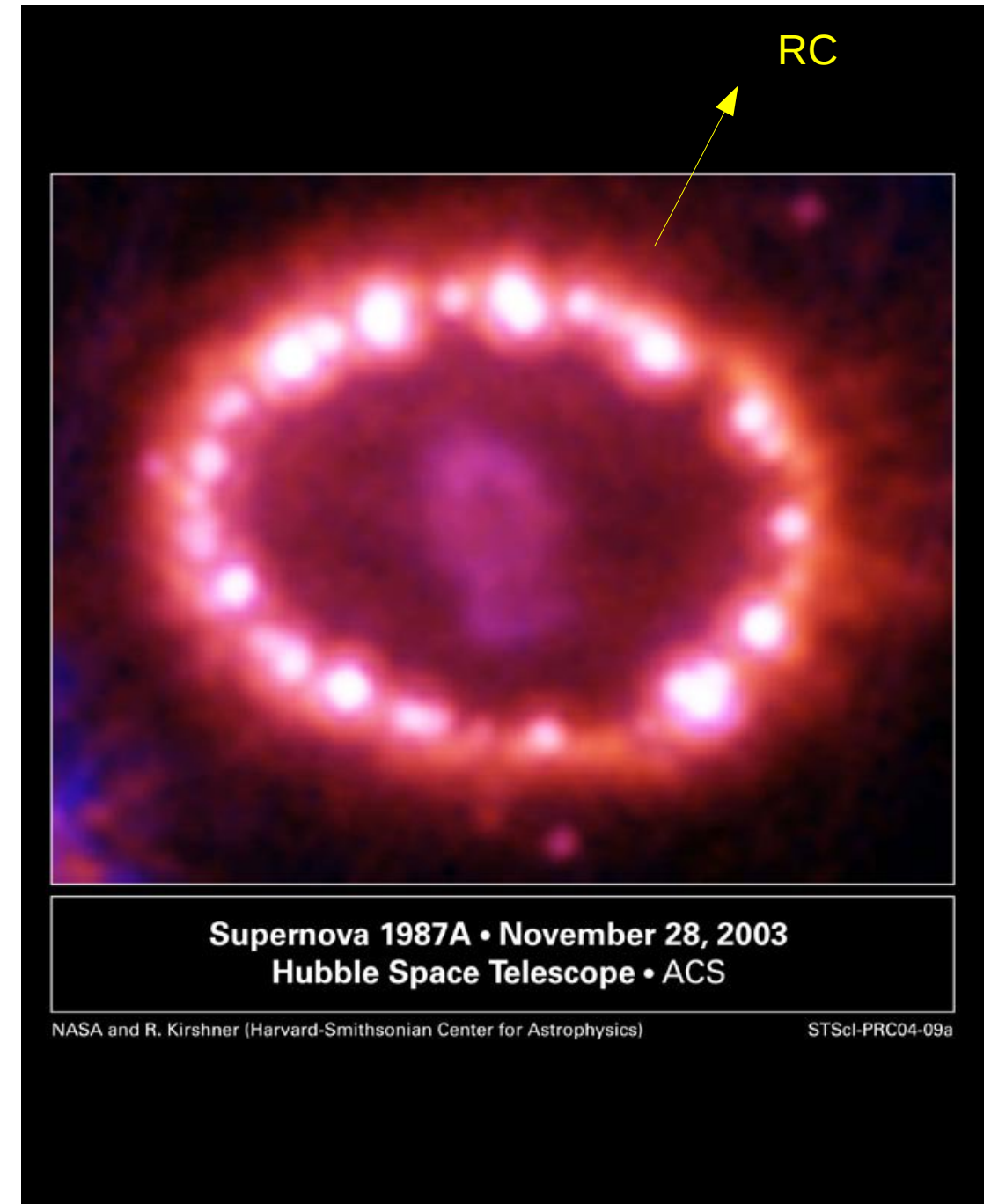


# La supernova SN1987A



**En février 1987**  
**2 semaines après l'explosion**

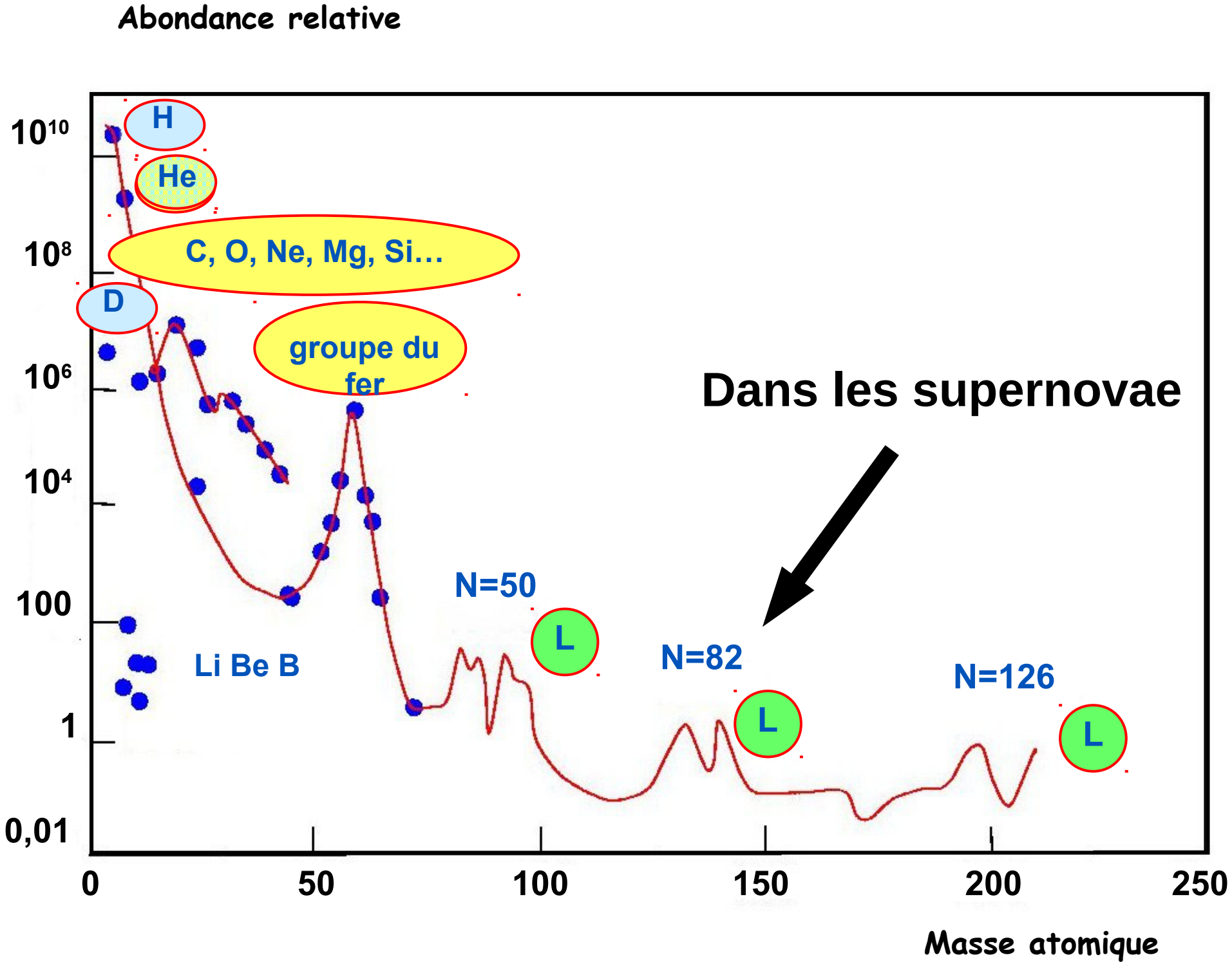
Il a fallu 170 000 ans  
pour que la lumière nous parvienne !



**En 2003**



# Abondances des éléments



# Le système solaire:

Soleil = étoile de 3e génération :

- éléments lourds (jusqu'au Fer) → la terre (et ce qui vit dessus).

Création du système solaire: ~ 4.6 Ga

- désintégrations radioactive des éléments produits dans la supernova  
~ âge de nos os (C, O, Ca, etc...)







# Au chaud

Température (Kelvin)	Temps (s) depuis le big-bang	Objets
3	$5 \times 10^{17} = 13,77$ Mds d'année = Aujourd'hui	
	$10^{17} = 13,77$ Mds d'année = Aujourd'hui	1eres galaxies
	$3 \times 10^{16}$ (1 mds d'année)	1eres étoiles
3000	$10^{13}$ (300 000 ans)	Atomes
$10^9$	100 s	Noyaux légers (He, Li, ...)
$10^{10}$	1 s	Électrons–Positrons* (Anti-électrons)
$10^{13}$	$10^{-6} = 1 \mu\text{s}$	Protons
$10^{16}$	$10^{-12}$	Autres particles → Bosons de Higgs
???	???	??? Dimensions supplémentaires ???? Cordes ??



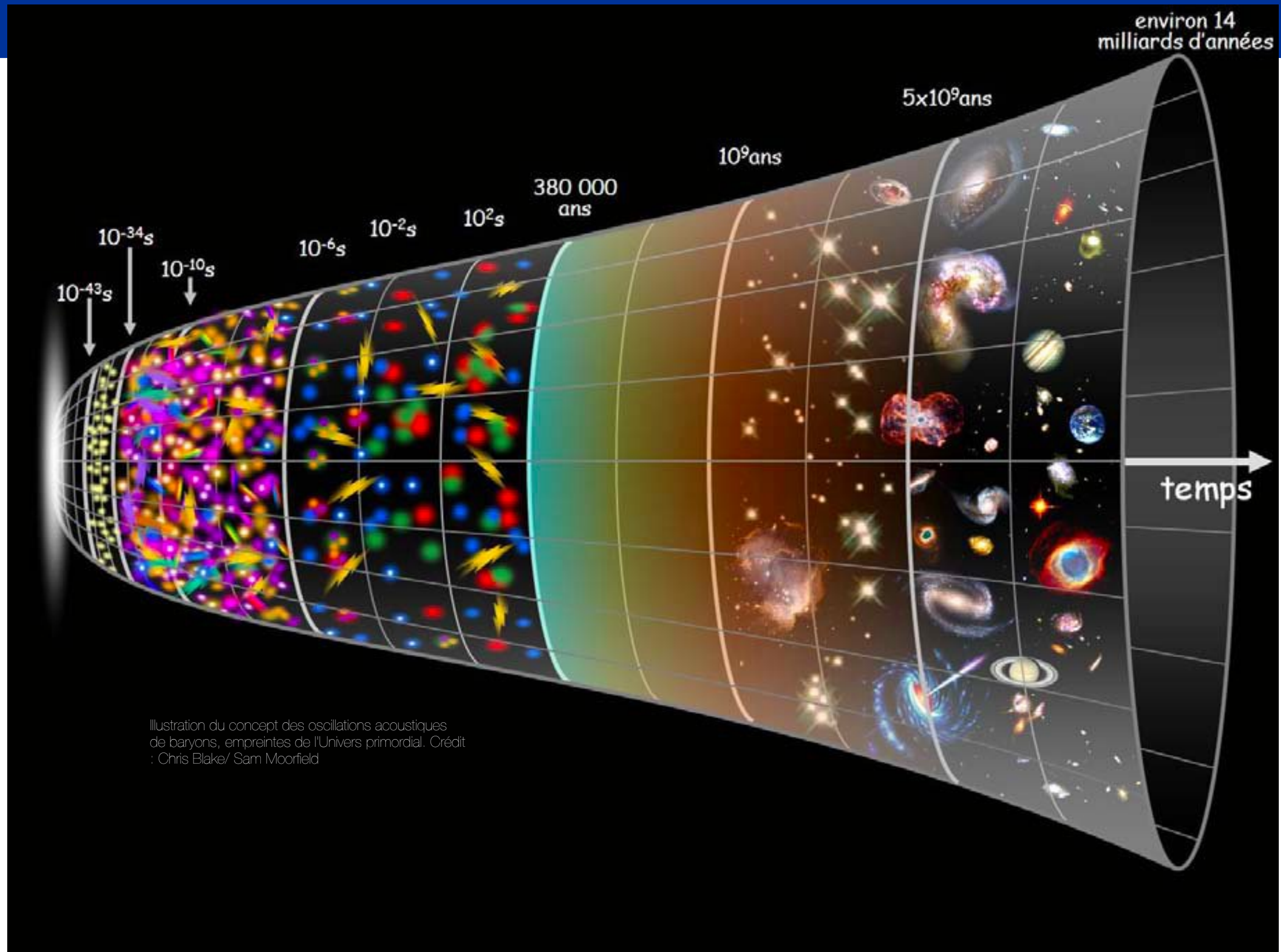


Illustration du concept des oscillations acoustiques de baryons, empreintes de l'Univers primordial. Crédit : Chris Blake/ Sam Moorfield



# Retour sur terre

## Noyaux & électrons

- entre ~1 jour, et 5–10 milliard d'années pour les noyaux complexes.
- $13,798 \pm 0,037$  milliard d'années... -1 s pour les électrons...
- $13,798 \pm 0,037$  milliards d'années... -1  $\mu$ s pour les noyaux d'H

donc en moyenne (en poids) la matière de votre corps a  
>~5 milliards d'années (C, O)

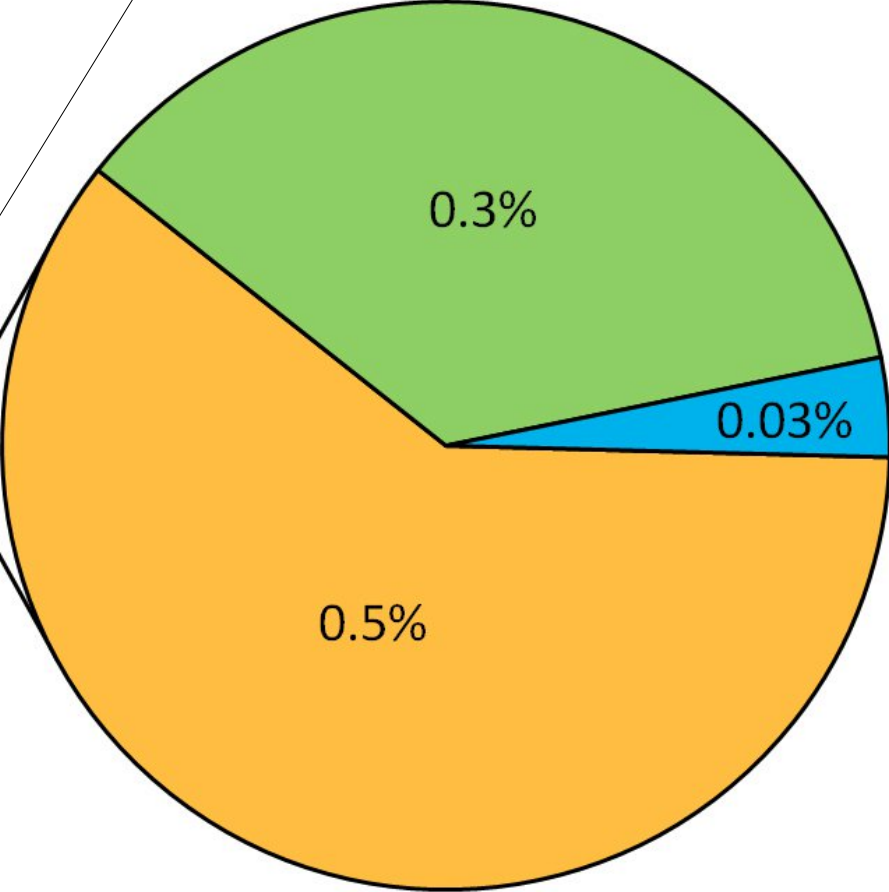
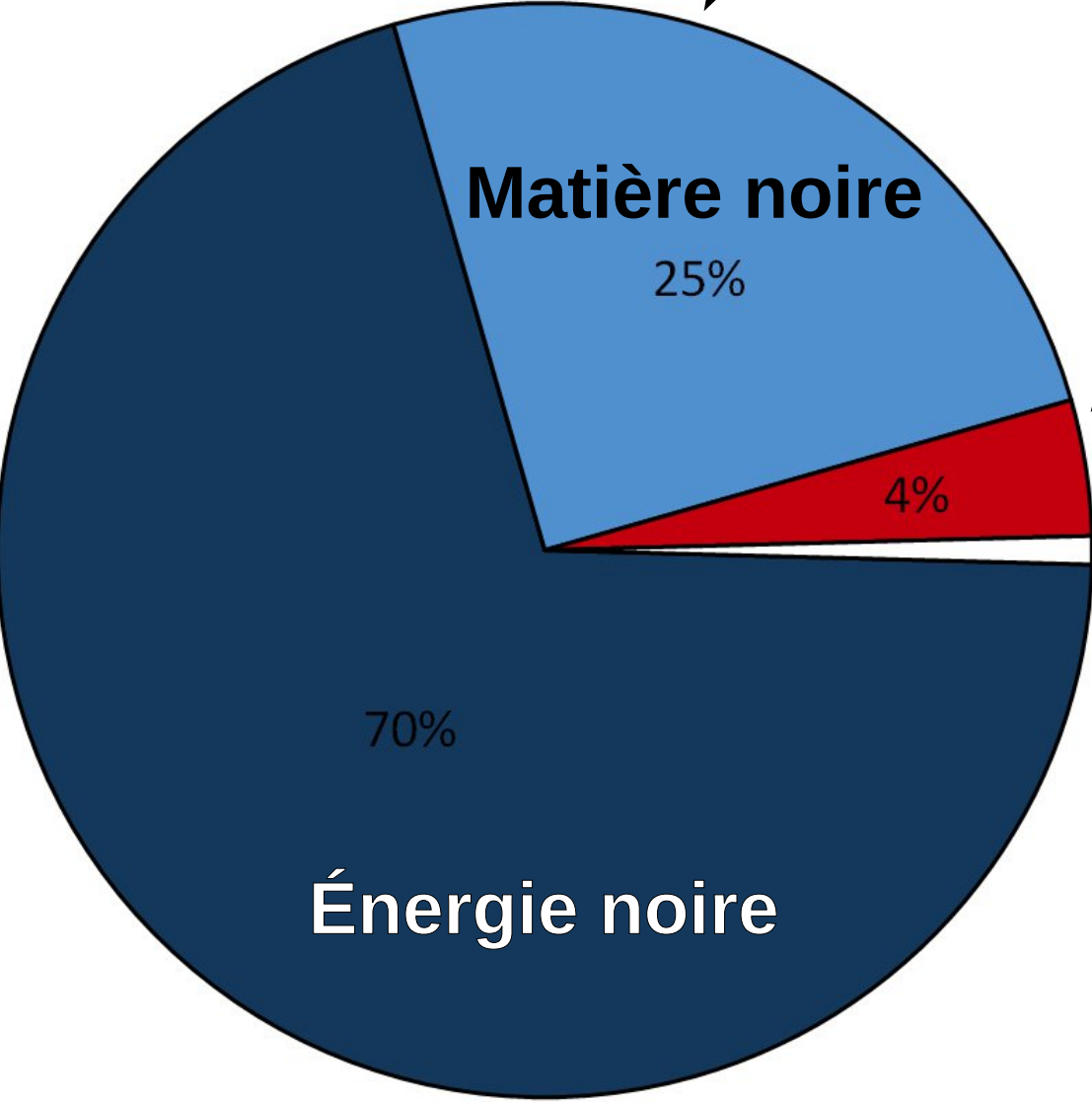
*Fin de l'histoire... ?*

# Composition du cosmos

Planck (2013)

**INCONNU**

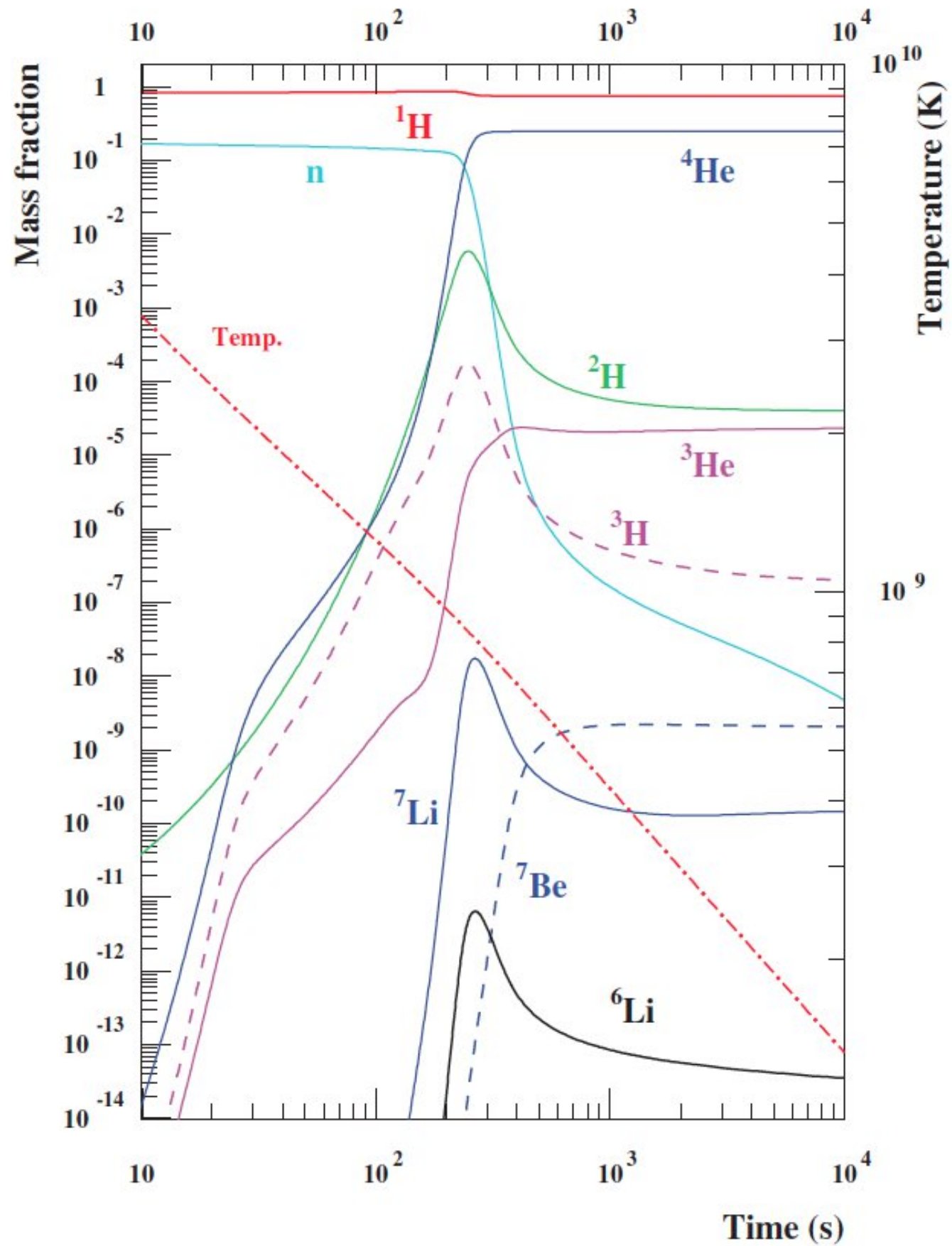
**Connu**



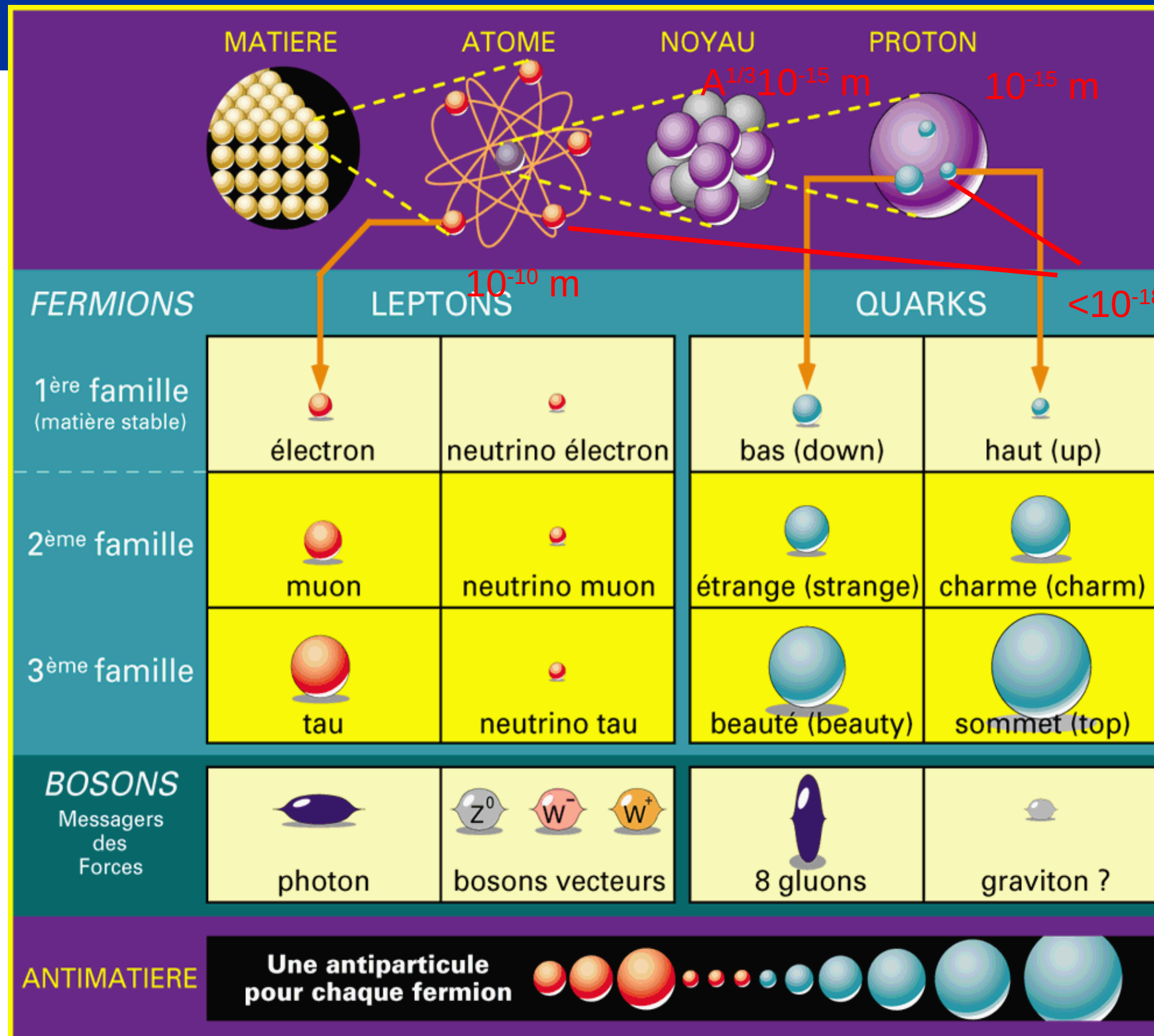
- Dark Energy
- Dark Matter
- Free Hydrogen & Helium
- Stars
- Neutrinos
- Heavy Elements



$$\eta_{10} = 6.14$$



# L'univers subatomique / sub-nucléaire / sub-nucléonique



Matière

Interactions

# Le Soleil

Distance	149 600 000 km
Rayon	696 000 km
Masse	$2 \times 10^{30}$ kg
Densité	1,41

Puissance reçue sur Terre , hors atmosphère  $1396 \text{ W / m}^2$

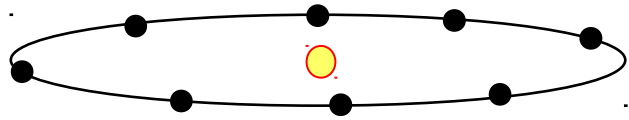
Puissance du Soleil  $3,9 \times 10^{26} \text{ W}$

Centrale nucléaire  $1400 \text{ MW} = \frac{1 \text{ km}^2 \text{ surface terrestre}}{22 \text{ m}^2 \text{ solaire}}$

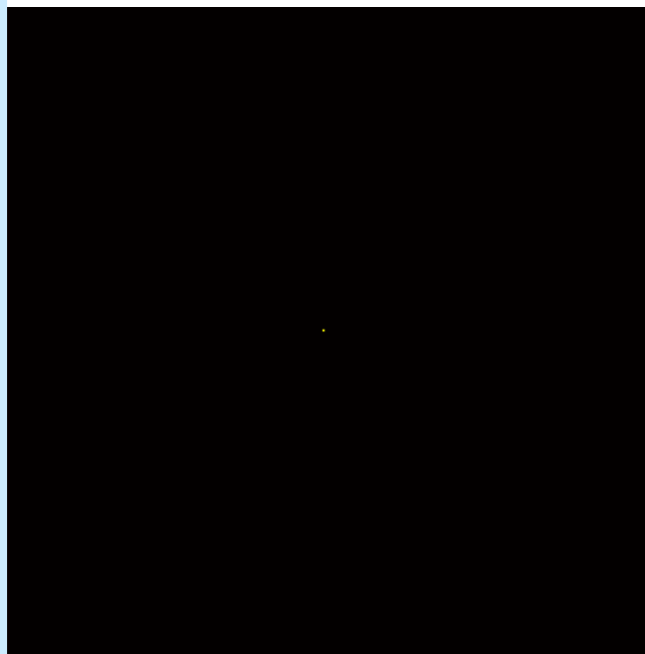
Corps noir (Planck) : loi de Wien  $\lambda_m T = 2897 \text{ } \mu\text{m K}$

$T = 5800 \text{ K}$  loi de Stefan  $P = S \sigma T^4$

# Le destin du soleil

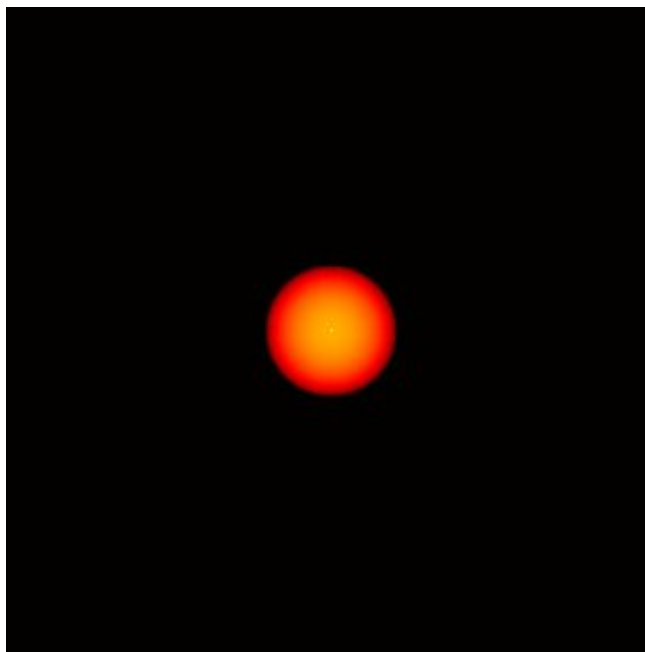


Séquence principale



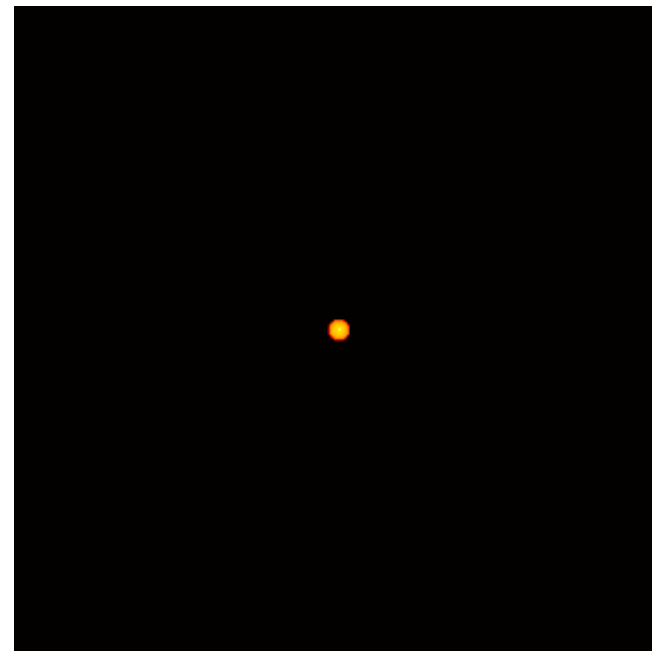
Maintenant, après  
4-5 milliards d'années

Une géante rouge



Dans 5-6 milliards d'années

Une naine blanche



Une naine sombre

