CE DOCUMENT EST DESTINÉ AUX ETUDIANTS DE LA FACULTÉ DES SCIENCES DE RABAT

(MAROC)

LE CONTENU DE CE DOCUMENT EST COMMENTÉ DANS LE DETAIL PENDANT LES SEANCES DE COURS

POUR TOUT AUTRE USAGE IL CONVIENT DE CITER LA SOURCE

Chapitre II

NUCLEOSYNTHESE ET EVOLUTION DE L'UNIVERS

INTRODUCTION

Deux types de matière :

La matière ordinaire :

% faible de la masse de l'Univers

Propriétés physiques connues

La matière noire :

% grand de la masse de l'Univers

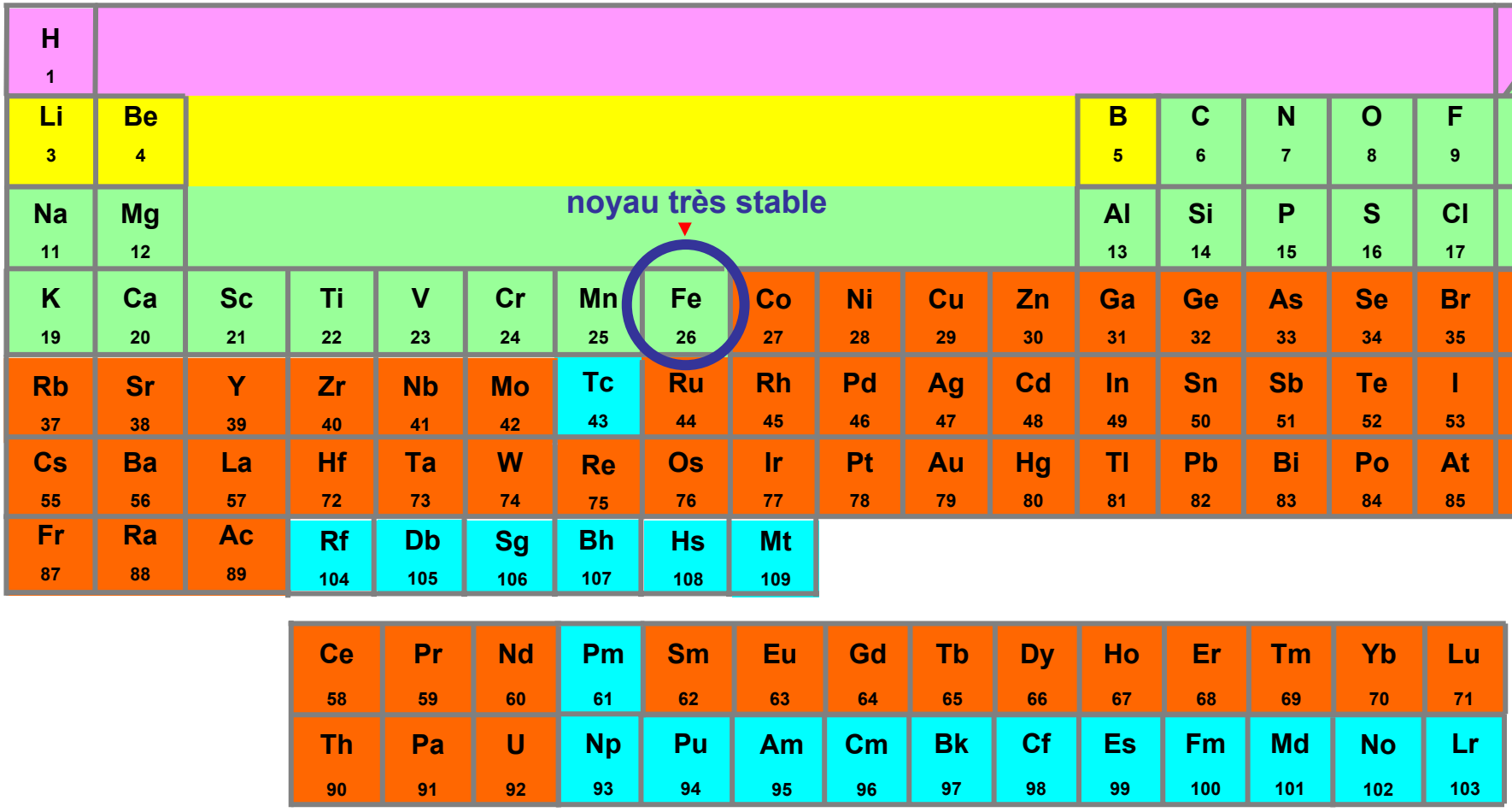
Propriétés physiques sont inconnues : on parle de *singularité* (physique)

On s'intéresse à la matière ordinaire de l'Univers

La matière ordinaire correspond à la combinaison des éléments chimiques définis dans le tableau de Mendeleïv

Nucléosynthèse = ensemble de processus physiques conduisant à la synthèse d'atomes

TABLEAU DES ELEMENTS CHIMIQUES DE LA MATIERE



nucléosynthèse 3mn après la création de l'Univers jusqu'à 300.000 ans

nucléosynthèse stellaire (300.000 ans après la création de l'Univers)

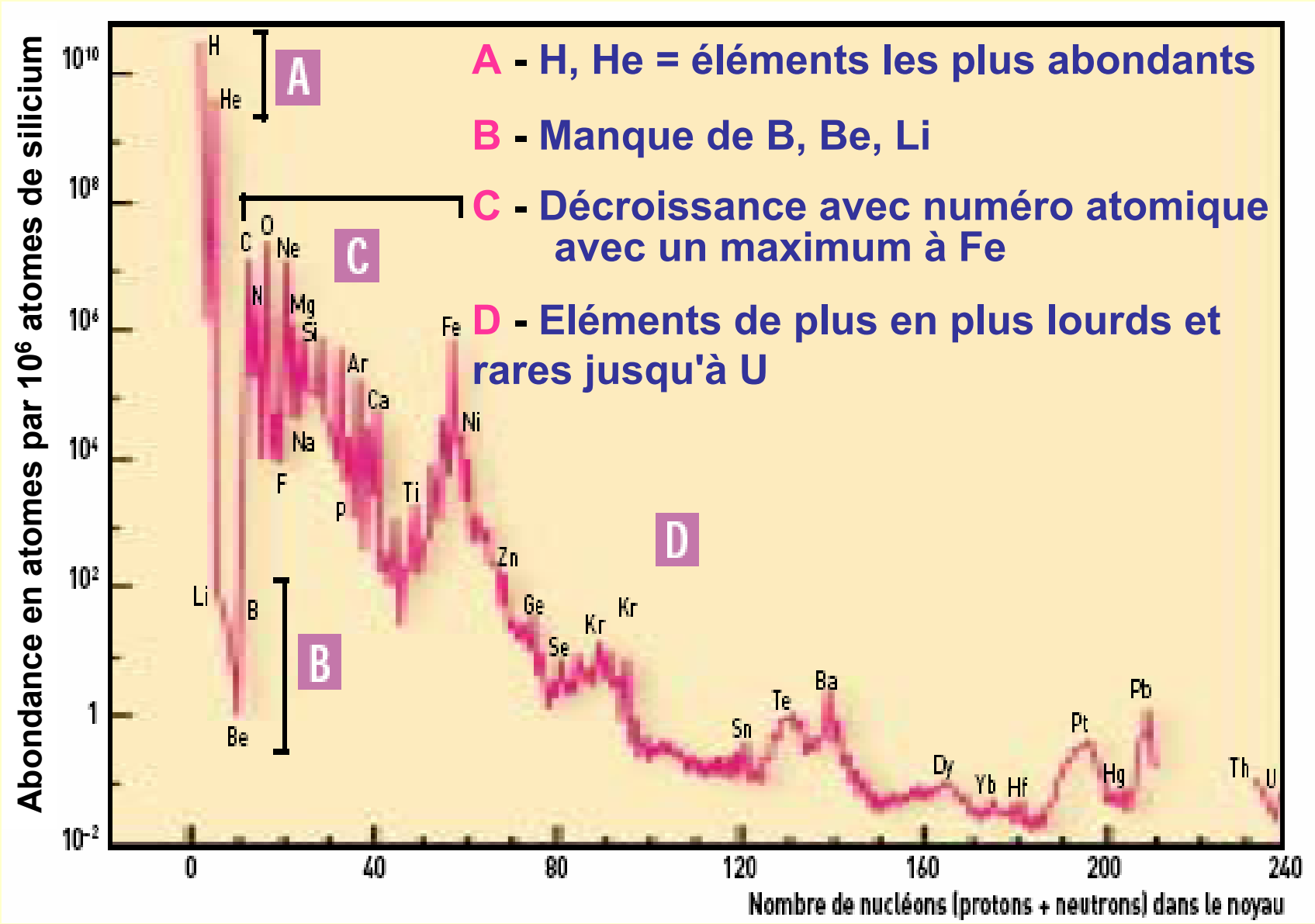
nucléosynthèse interstellaire (*réaction de spallation*)

nucléosynthèse après explosion des étoiles (*capture de neutrons*)

nucléosynthèse artificielle

ABONDANCE DES ELEMENTS CONSTITUTIFS DE LA MATIERE DANS L'UNIVERS

source : www.cea.fr



I - NUCLEOSYNTHESE PRIMORDIALE ET NAISSANCE DE L'UNIVERS

1 – LES PARTICULES ELEMENTAIRES DE L'UNIVERS

a.- LES PARTICULES ELEMENTAIRES QUI FORMENT TOUTE LA MATIERE DE L'UNIVERS SONT APPELEES FERMIONS

FERMIONS

QUARKS

- corps sphériques de taille $< 10^{-18}$m
- notés u, d, s, b, c, t
- courte durée de vie
- quarks (u d) légers forment la matière ordinaire
- ne sont jamais solitaires, toujours combinés en → **hadrons**

baryons : ***proton*** (d u u), ***neutron*** (u d d), ***particule A*** (s u d) — ***nucléons***

mésons : (u a) — a = antiquark

LEPTONS

- **électrons** (taille $< 10^{-18}$m)
- **neutrinos**
  - taille 50.000 fois < à celle du quark
  - ils traversent toute la matière
  - rôle énigmatique

b. - POUR SE COMBINER, LES FERMIONS AURONT BESOIN D'AUTRES PARTICULES PORTEUSES DE « FORCES » APPELEES BOSONS :

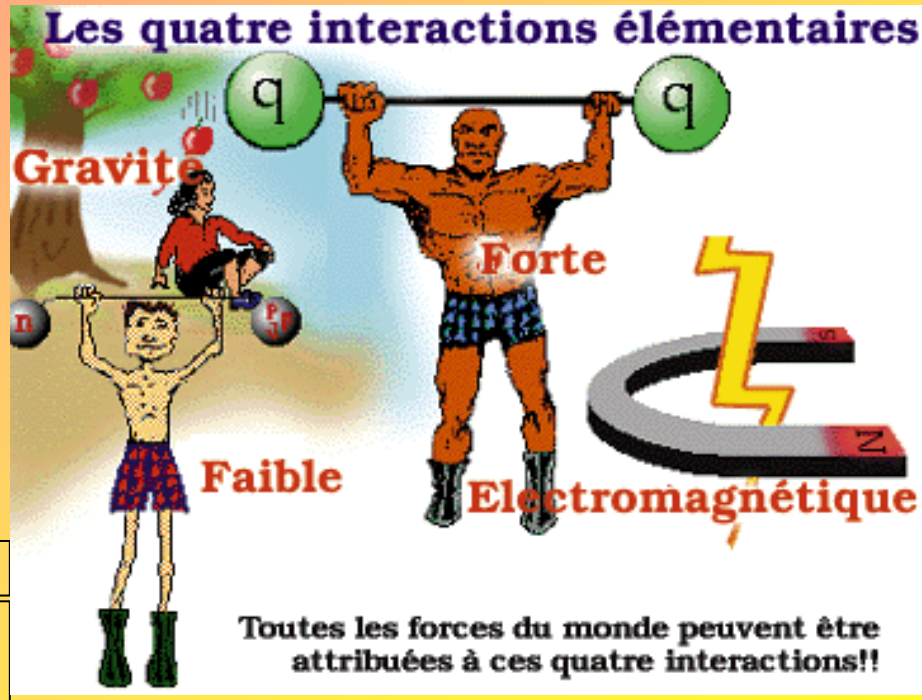
- PHOTONS, - GRAVITONS, - GLUONS, - W-,W+,Z°,

a.- LES PARTICULES ELEMENTAIRES QUI FORMENT TOUTE LA MATIERE DE L'UNIVERS

b. - POUR SE COMBINER, LES FERMIONS AURONT BESOIN D'AUTRES PARTICULES

c. - FERMIONS ET BOSONS AURONT AURONT BESOIN DE 4 INTERACTIONS FONDAMENTALES POUR FORMER LA MATIERE :

- **LA GRAVITATION**
- **L'INTERACTION NUCLEAIRE FORTE**
- **L'INTERACTION NUCLEAIRE FAIBLE**
- **L'INTERACTION ELECTROMAGNETIQUE**



INTERACTION	BOSONS	AGIT SUR	FERMIONS
gravité	graviton		
faible	W-,W+,Z°		Leptons
Électromagnétique	photon		
forte	gluon		Quarks

L'ANTIMATIERE

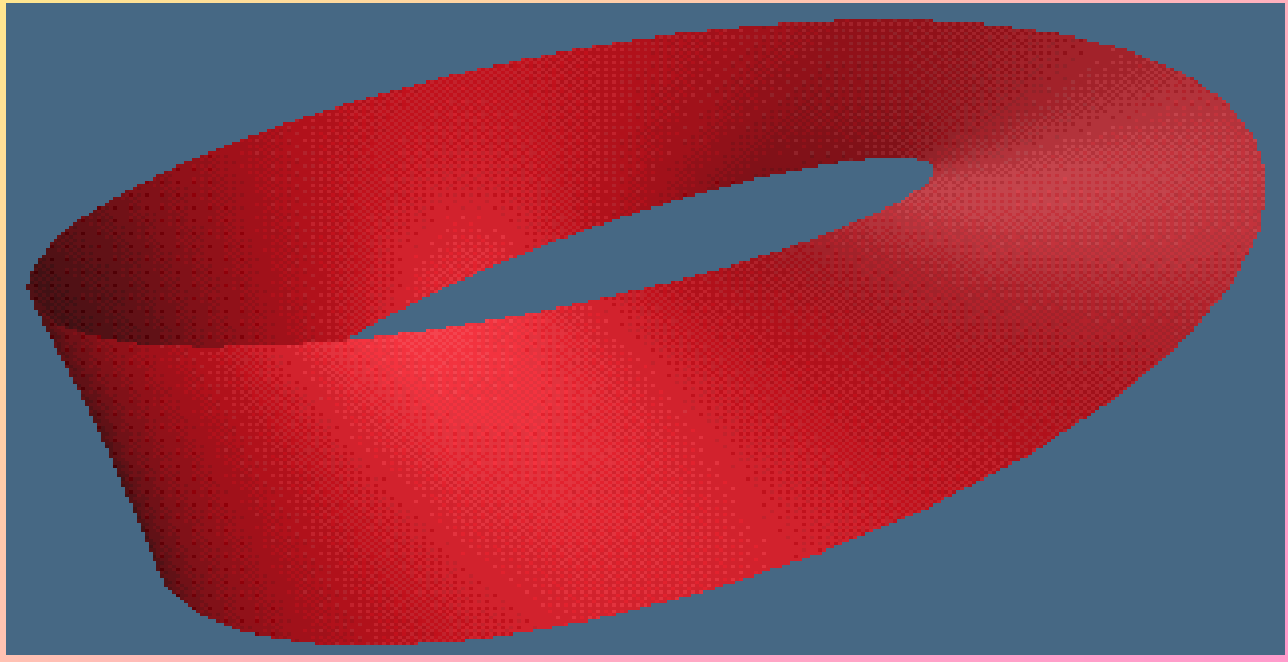
- A chaque particule correspond une antiparticule (de courte durée de vie)

- Dans la réaction matière-antimatière, la conversion est total, le rendement est de 100%

- A l'heure actuel seul des éléments comme des positons et des anti-protons ont été détectés.

- Hypothèse : l'Univers serait un ruban de mœubius avec une "face" de matière et "l'autre" d'antimatière.

Nous passerions donc de l'une à l'autre sans en ressentir les conséquences



I - NUCLEOSYNTHESE ET NAISSANCE DE L'UNIVERS

1 - LES PARTICULES ELEMENTAIRES DE L'UNIVERS

2 - LA PREMIERE SECONDE DE LA CREATION DE L'UNIVERS : LE BIG BANG

BIG BANG

Temps	0s	10^{-45}s	10^{-35}s	10^{-12}s	10^{-6}s	1 s
Température	10^{32} °K	10^{32} °K	10^{25} °K	10^{15} °K	10^{13} °K	
Dimension de l'Univers	Univers encore petit	Univers encore petit	grande inflation	300 millions de km	= à celle du système solaire	
Types de particules	particules-antiparticules s'annihilent	particules-antiparticules s'annihilent	apparition de quarks	naissance de Leptons	naissance des hardons	
Types de force	Une force unique = Superforce	gravitation	gravitation	gravitation	gravitation	
		interaction électronucléaire	interaction forte	interaction forte	interaction forte	
			interaction électrofaible	interaction faible	interaction faible	
				interaction électromagnétique	interaction électromagnétique	

I - NUCLEOSYNTHESE ET NAISSANCE DE L'UNIVERS

1 - LES PARTICULES ELEMENTAIRES DE L'UNIVERS

2 - LA PREMIERE SECONDE DE LA CREATION DE L'UNIVERS : LE BIG BANG

3 - FORMATION DES NOYAUX ATOMIQUES D'HYDROGENE ET D'HELIUM

⟶ NUCLEOSYNTHESE PRIMORDIALE (1 s à 3 mn)

- **La température chute à 10^6 °K**
- **L'Univers encore sombre**
- **Les éléctrons encore libres**
- **Protons d'hydrogène déjà présents continuent de se former**
- **Les noyaux d'hydrogène + neutrons → *noyaux d'hélium* (2 protons + 2 neutrons)**

Réaction H, He

$$H + H \rightarrow 2D + e^-$$
$$(p + p \rightarrow p + n)$$
$$D + H \rightarrow {}^3He$$
$$^3He + {}^3He \rightarrow {}^4He + 2H$$

$$4H \rightarrow {}^4He + \text{énergie}$$

75 % d'hydrogène, 25 % d'hélium

I - NUCLEOSYNTHESE ET NAISSANCE DE L'UNIVERS

1 - LES PARTICULES ELEMENTAIRES DE L'UNIVERS

2 - LA PREMIERE SECONDE DE LA CREATION DE L'UNIVERS : LE BIG BANG

3 - FORMATION DES NOYAUX ATOMIQUES D'HYDROGENE ET D'HELIUM

⟶ NUCLEOSYNTHESE PRIMORDIALE (1 s à 3 mn)

4 - NAISSANCE DES ATOMES D'HYDROGENE ET D'HELIUM

⟶ TRANSPARENCE DE L'UNIVERS (3 mn à 3.10^5 ans)

- 3 mn après le Big Bang

Capture des éléctrons : formation des atomes d'H et He

Photons réémis puis absorbés ⟶ Univers avait une structure de corps noir

- 300.000 ans après le Big Bang

Expansion de l'Univers ⟶ chute température à 3.000 °K

conséquences
- **fin de la nucléosynthèse H et He**
- **libération de photons**

⟶ découplage matière-rayonnement

- **l'Univers devint alors "brusquement" transparent**

ce rayonnement est actuellement perceptible dans l'Univers à une T° 2,73° K

⟶ rayonnement fossile

Découverte du rayonnement fossile

- Etape 1

En 1965 A. Penzias et R. Wilson en essayant de capter les signaux micro-ondes d'un satellite de communication, se rendirent compte qu'ils captaient un signal « parasite » identique dans toutes les directions.

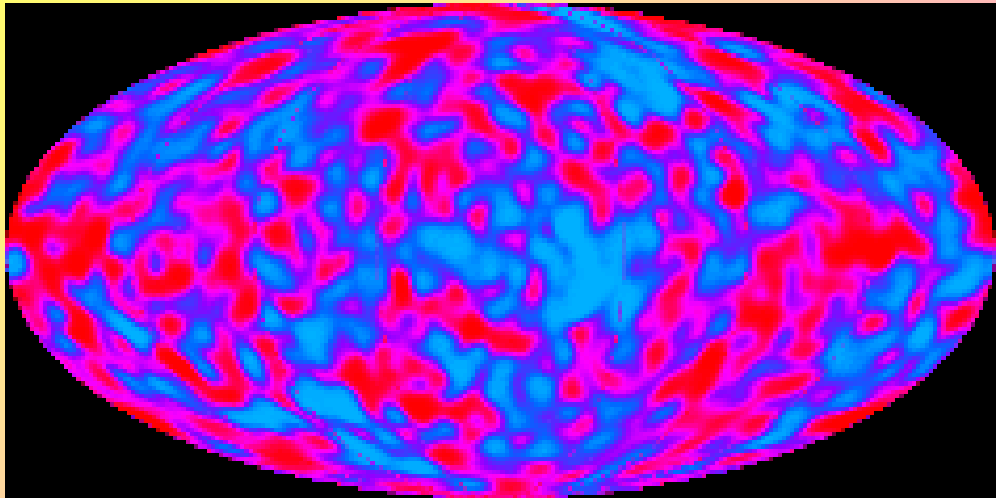
Ils vérifièrent tout l'appareillage, mais sans succès

Leurs recherches sur ce bruit les conduisent à conclure qu'il s'agit d'un rayonnement cosmique fossile à 3°K (Prix Nobel)

- Etape 2

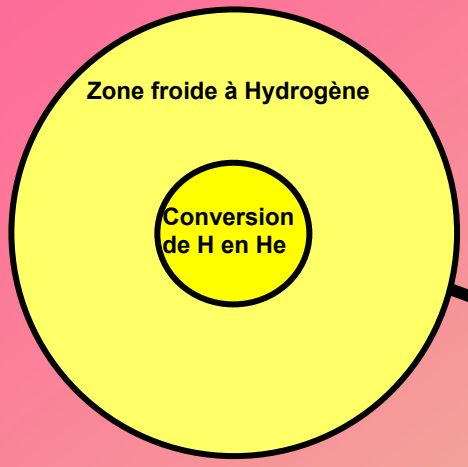
En 1989, le satellite COBE fournit une carte de ce rayonnement cosmique fossile avec un spectre qui correspondait à celui d'un corps noir de température 2,73 kelvins

Cette lumière micro-onde constituait bien une preuve que l'Univers était passé par une phase extrêmement dense et chaude



les variations relatives de température (couleur rouge pour les plus chaudes, couleur bleue pour les plus froides) sont interprétées en termes de variation de densité de l'Univers primordial. Ces inhomogénéités de densité seraient à l'origine de la formation des galaxies observées aujourd'hui

$4\ {}^{1}H \rightarrow {}^{4}He + \beta + \gamma$

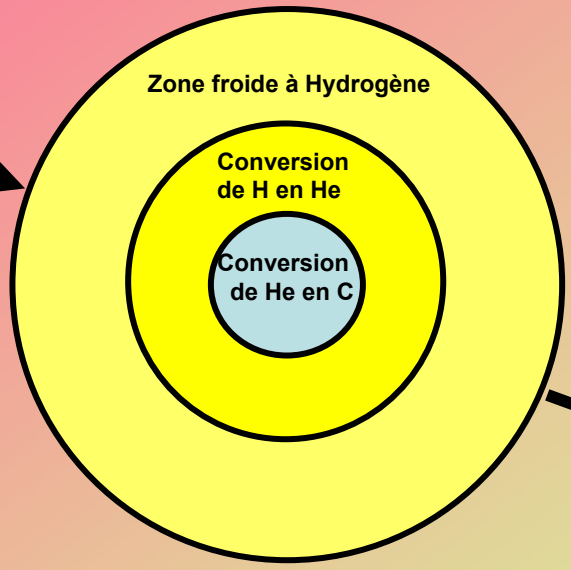


$T \sim 10^{6}\ °K$

L'étoile brille, perd de son énergie, donc se contracte, en consommant son carburant nucléaire (hydrogène) jusqu'à épuisement; sa contraction fait remonter la température

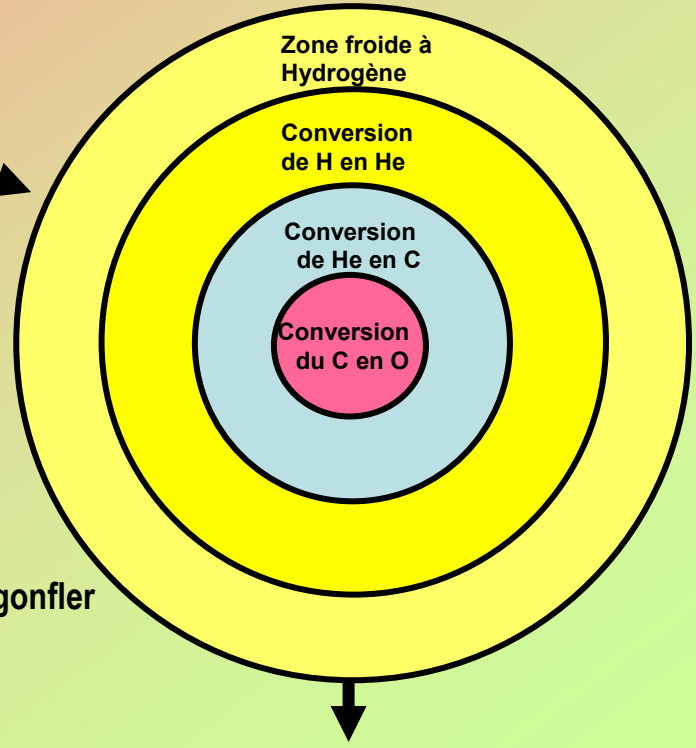
$T \sim 10^{8}\ °K$

$3\ {}^{4}He \rightarrow {}^{12}C + \gamma$



L'étoile gonfle et vire au rouge (géante rouge)

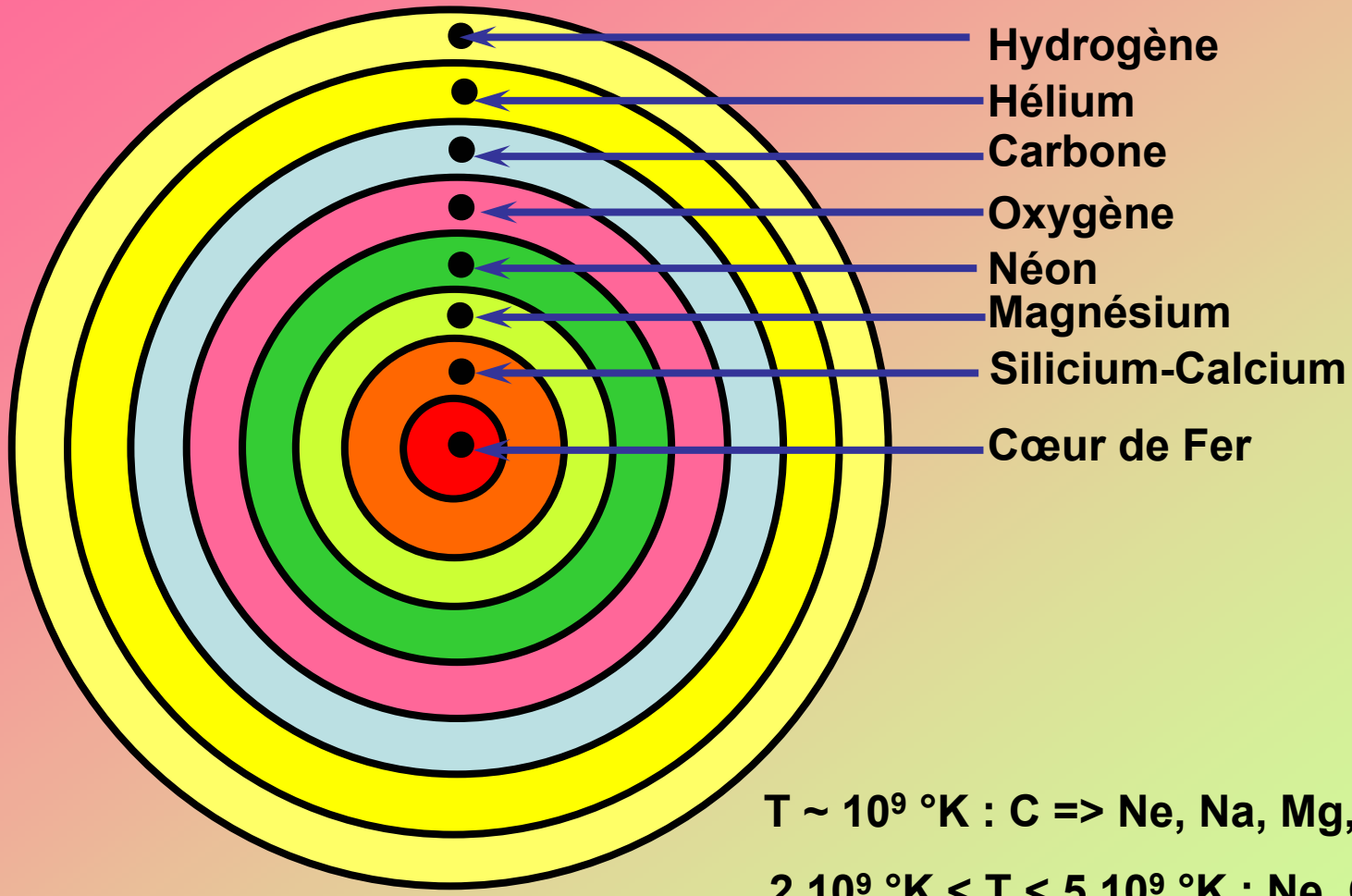
$^{4}He + {}^{12}C \rightarrow {}^{16}O$



L'étoile continu de gonfler

L'étoile continue de gonfler en produisant des éléments de plus en plus lourd jusqu'au Fe

Coupe d'une étoile ayant une masse 25 fois celle du Soleil



T ~ 10^9 °K : C => Ne, Na, Mg, Al, Si,…

2.10^9 °K < T < 5.10^9 °K : Ne, O, Si => Fe

T ~ 5.10^9 °K : l'étoile explose en supernovae

Les éléments issus de la nucléosynthèse stellaire sont disséminés dans l'espace à la suite de l'explosion de l'étoile

Exemple de supernovae = *nébuleuse du Crabe* (M1C)

située à 6000 années lumière, et elle a fait son apparition en 1054

Source : European Southern Obervatory

A ce stade d'autres éléments de la matière seront synthétisés à la suite de réactions de *spallation* et de *capture de neutrons*

B, Be et Li

- **peu abondants dans l'Univers**
- **faits dans l'espace interstellaire**
- **résultent des réactions de « Spallation »**

→ **noyaux atomiques de C, N et O bombardés par des protons (rayonnement cosmique) puis brisés**

↓

fragments = noyaux de B, Be et Li

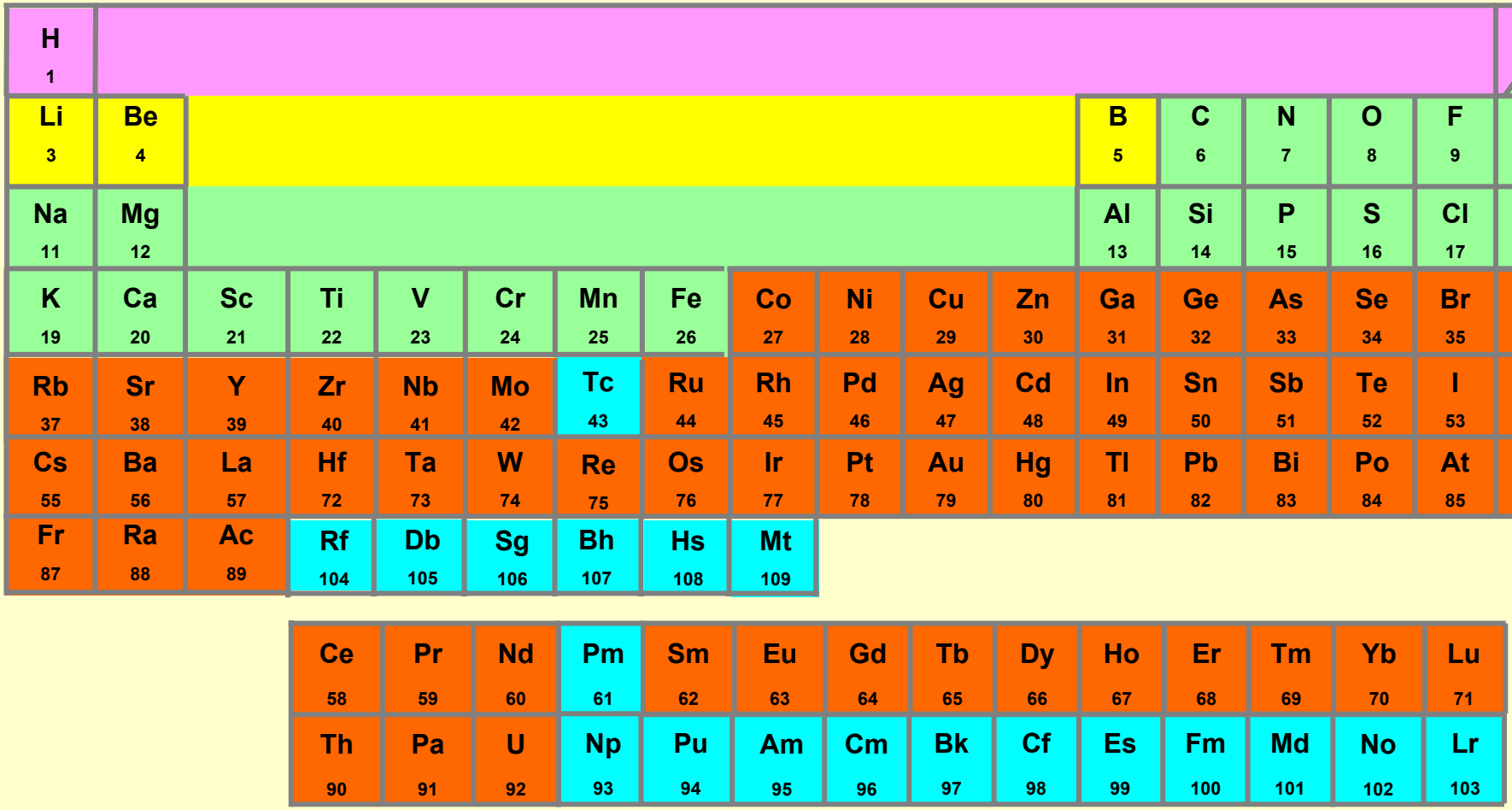
Temps estimé de l'évolution d'une étoile en une supernovae entre 2 à 5 Milliard d'années

Dans les étoiles géantes, les réactions nucléaire produisent des neutrons libres

T ~ 5.10^9 K : l'étoile explose en supernova

A partir de cet instant commence la formation d'atomes lourds par addition de neutrons selon différents processus thermonucléaires jusqu à l'Uranium

NUCLEOSYNTHESE : RECAPITULATIF



3mn après la création de l'Univers jusqu'à 300.000 ans

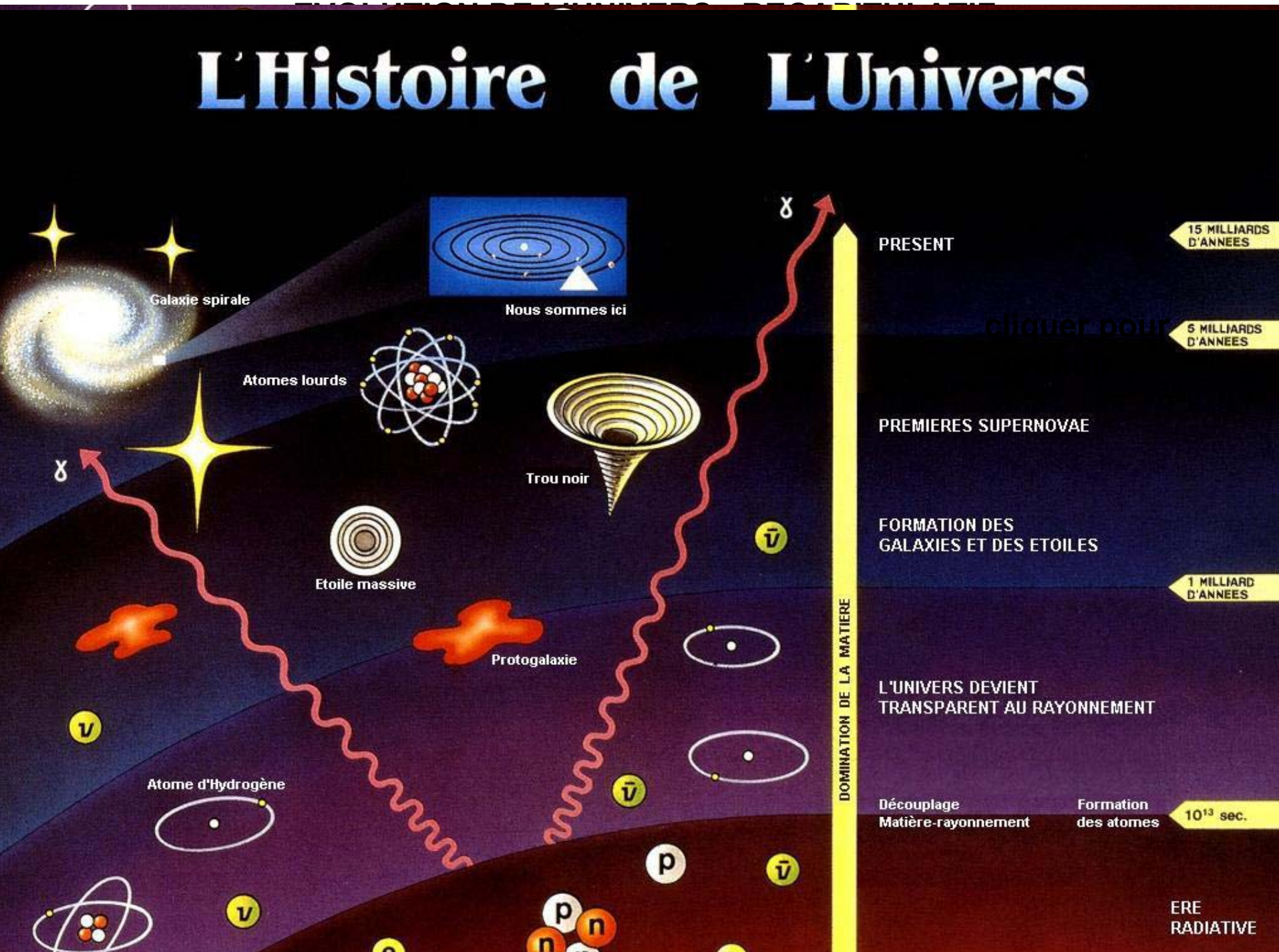
nucléosynthèse stellaire (300.000 ans après la création de l'Univers)

nucléosynthèse interstellaire (*réaction de spallation*)

nucléosynthèse après explosion des étoiles (*capture de neutrons*)

nucléosynthèse artificielle

L'Histoire de L'Univers



I - NUCLEOSYNTHESE ET NAISSANCE DE L'UNIVERS
II - NUCLEOSYNTHESE STELLAIRE
III - NUCLEOSYNTHESE SPALLATIVE : PRODUCTION DE B, Be ET Li
IV - NUCLEOSYNTHESE DES ELEMENTS LOURDS ET RARES
IV - SYNTHESE MOLECULAIRE INTERSTELLAIRE

milieu interstellaire se compose de restes de supernovas et de nébuleuses planétaires

milieu froid (qq dizaines de degrés) favorable aux réactions nucléaires électromagnétiques

formation d'atomes à partir des noyaux et la combinaison de l'hydrogène avec les éléments lourds pour former des molécules complexes: l'eau, l'ammoniac et des molécules organiques

pellicules de glace sur la poussière

recombinées grâce au rayonnement cosmique

I - NUCLEOSYNTHESE ET NAISSANCE DE L'UNIVERS

II - NUCLEOSYNTHESE STELLAIRE

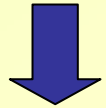
III - NUCLEOSYNTHESE SPALLATIVE : PRODUCTION DE B, Be ET Li

IV - NUCLEOSYNTHESE DES ELEMENTS LOURDS ET RARES

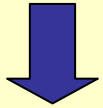
IV - SYNTHESE MOLECULAIRE INTERSTELLAIRE

V - SYNTHESE DE MOLECULES MINERALES PLANETAIRE

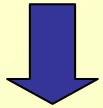
condensation de la poussière interstellaire : nébuleuse diffuse



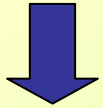
synthèse de nouvelles molécules minérales : nébuleuse planétaire



agglomération des éléments synthétisés et nouvelles recombinaisons



astéroides et protoplanètes



planètes

Cette phase planétaire sera examinée en détail dans le chapitre III

MERCI DE VOTRE ATTENTION