

# La Physique des 2 Infinis

Alexia HOCINE

*Physicienne subatomique & Développeuse*

Université de Rouen-Normandie & Université de Claude Bernard Lyon 1

<https://github.com/alexhxia/LVA/tree/main>

alexia.hocine@proton.me

Les Vendredis de l'Astronomie

Vendredi 1<sup>er</sup> Décembre 2023



# Introduction

Qu'est-ce que l'infini ?

## Vision Mathématiques

Intuitivement, il existe toujours un nombre plus grand.

## Application Physique

- ▶ On cherche des quantités mesurables (masse, énergie, taille)
- ▶ Mais les calculs mathématiques le sont pas toujours

## L'infiniment grand

*La Cosmologie & La Gravitation*

- ▶ À grandes échelles
- ▶ La description des grands corps

## Les 2 Infinis

*Astro-Subatomique*

- ▶ L'histoire de l'Univers
- ▶ Le fonctionnement des grands corps

## L'infiniment petit

*La Physique Quantique & La Théorie des Champs*

- ▶ À très petites échelles
- ▶ Le fonctionnement des petits corps

# Introduction

Objectifs de cette conférence

## La Physique des 2 Infinis *De quoi est constitué l'Univers ?*

*Quels sont les constituants élémentaires ? Et leurs interactions ?*

*Quand ? Où ? Comment se sont-ils formés ?*

*Quelles sont les problèmes communs ?*

# Vers l'infiniment petit

Sommaire

## La Physique des 2 Infinis

*Quels sont les constituants élémentaires ? Et leurs interactions ?*

## Qu'est-ce qu'une particule ?

### Définition (Particule élémentaire *ou particule fondamentale*)

Une particule dont on ne connaît pas la composition, on ne sait pas si elle est constituée d'autres particules plus petites.

### Définition (Particule composite)

- ▶ regroupement de particules élémentaires
- ▶ contient plusieurs particules élémentaires.

## Qu'est-ce que la Matière ?

### Définition (La Matière)

► objet qui occupe de l'espace et qui ont une masse.

Réiproquement, tout ce qui a une masse est de la matière.

## De quoi est composée la Matière ?

Intuition de Démocrite (460-370 avant J.-C.)

La matière est composée d'objets élémentaires *indivisibles*.

Aristote, Nouveau Testament, ...

- ▶ Nommé "**atome**" (partie de matière indivisible)

### Définition (L'Atome)

- ▶ Petit corps
- ▶ La plus petite partie d'un corps simple pouvant se combiner chimiquement avec un autre.
- ▶ Les constituants élémentaires de toutes les substances solides, liquides ou gazeuses.

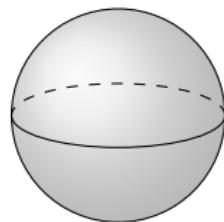


Figure 1 – 1<sup>re</sup> vision de l'atome

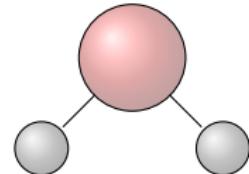


Figure 2 –  
Représentation d'une molécule d'eau

# L'Électron

## Historique :

1838-51 Prédiction de l'électron par Richard Laming :

- ▶ Afin d'expliquer les propriétés chimiques des atomes

1894 Stoney pose le mot "électron" :

- ▶ "électrique" + "-on" suffixe des particules subatomiques

1897 Découverte de l'électron par Joseph John Thomson

- ▶ 1<sup>re</sup> particule élémentaire découverte

## Description

- ▶ Appartient à l'atome
- ▶ Permet la liaison entre les molécules
- ▶ **Particule élémentaire**

## Propriétés

Masse  $551 \text{ keV}/c^2 (= 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg})$

Charge électrique  $-1 \text{ eV} (= -1,602 \times 10^{-19} \text{ C})$

Durée de Vie Stable

Dimension Ponctuelle

# Le Modèle atomique de Thomson

Le Modèle du *cookie aux pépites de chocolat*

## Modèle atomique de Thomson

- 1904 L'atome composé de charges positives et de particules négatives.
- 1909 Invalidation du modèle par Rutherford

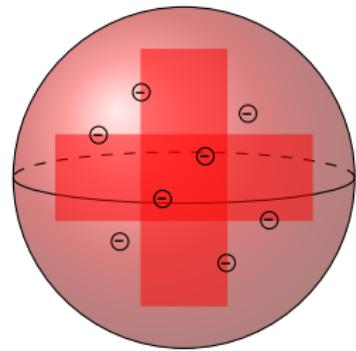


Figure 3 – Vision de l'atome de Thomson

# L'expérience de Rutherford (1909)

## L'expérience de la feuille d'Or

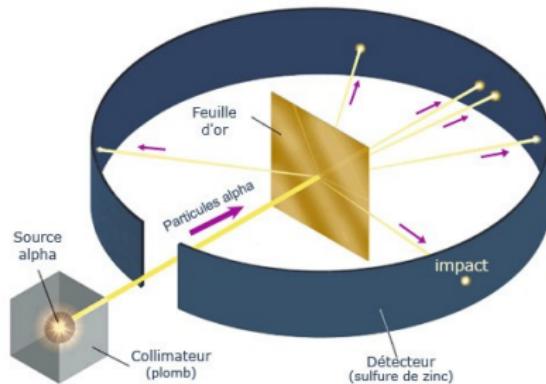


Figure 4 – Expérience de Rutherford

1. Émission de particules  $\alpha$  (noyau d'Hélium :  ${}^4_2He^{2+}$ )
2. Une feuille d'Or de  $6\ 000\ \text{\AA}$  ( $\text{\AA} = 10^{-10}\ \text{m}$ )
3. Un écran de Sulfure de Zinc (ZnS)
  - ▶ Lors d'une collision ( $\alpha + \text{ZnS}$ ), on observe un scintillement lumineux

## Modèle de Rutherford (1909)

Résultat de l'expérience de Rutherford

≈ 0.01% des particules  $\alpha$  sont déviées

- ▶ l'atome est principalement constitué de vide

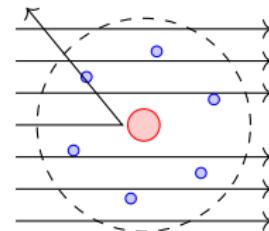


Figure 5 – Modèle de Rutherford

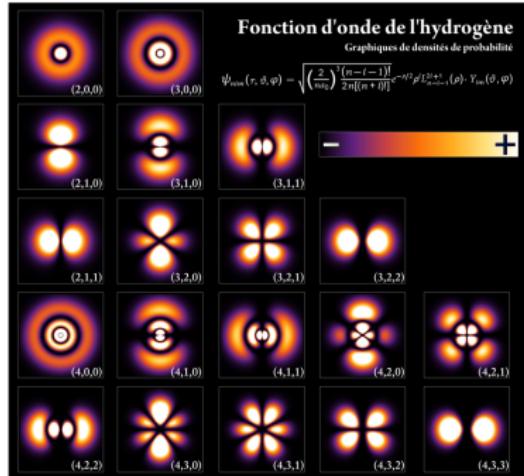
### Modèle de Rutherford, Modèle planétaire

- |       |   |          |   |
|-------|---|----------|---|
| Noyau | ▶ de charge positive<br>▶ très petit<br>▶ au centre | Électron | ▶ de charge négative<br>▶ qui "gravitent" autour du noyau |
|-------|---|----------|---|

# Modèle de Schrödinger (1925)

## Particule : Objet quantique

- ▶ dualité onde-corpuscule
- ▶ pas de localisation précise, mais une probabilité de présence
- ▶ Théorème d'Heisenberg :
  - ▶ *on ne peut pas connaître la position et la vitesse avec une précision infinie*



**Figure 6 – en fonction de 3 nb quantiques : l'énergie de l'électron, son moment angulaire et la projection de ce moment angulaire sur un axe donné.**

# Électromagnétique

## Définition (Électromagnétisme)

Étude des interactions entre les particules chargées électriquement.

## Propriétés

- ▶ Charge électrique
  - ▶ Les signes opposés s'attirent
  - ▶ Les signes identiques se repoussent
- ▶ Portée infinie
- ▶ Force additive

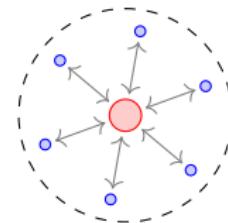


Figure 7 – Représentation schématique dans le cas classique

# De quoi est constitué le Noyau ?

## Les Nucléons

- ▶ Masse  $\approx 939,5 \text{ MeV}/c^2$   
 $(\approx 1,674 \times 10^{-27} \text{ kg})$

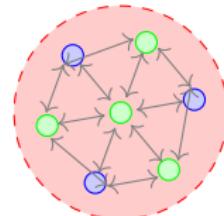


Figure 8 – Représentation schématique d'un noyau

## Proton

- ▶ Charge électrique positive
- ▶ Détermine la nature de l'élément chimique

Masse  $938,272 \text{ MeV}/c^2$

Charge  $+e = 1 \text{ eV} =$   
 $1,602\,176\,565 \times 10^{-19} \text{ C}$

Durée de vie Stable

## Neutron

- ▶ Sans charge électrique
- ▶ Détermine l'isotope

Masse  $939,565\,4 \text{ MeV}/c^2$

Charge 0

Durée de vie  $880,3 \text{ s}$  mais stable dans un noyau

# Interaction Faible

## Historique :

1930 Découverte par Enrico Fermi

## Faible

- ▶ force nucléaire faible
- ▶ désintégration radioactive :
  - ▶ radioactivité  $\beta$
  - ▶ désintégration du neutron

$$n \longrightarrow p + e^- + \nu_e$$

- ▶ désintégration du muon
- ▶ datation au carbone 14

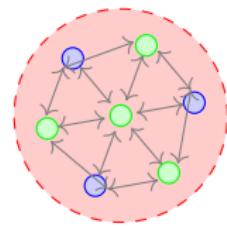


Figure 9 – Représentation schématique d'un noyau

## Les différents atomes

## **Tableau périodique des éléments chimiques**

Figure 10 – Tableau de Mendeleïev de 2016 avec 118 éléments[?]

# De quoi sont constitués les Nucléons ?

## Nucléon

- ▶ Particule composé de 3 plus petites particules appelées **quarks**.

### Proton

- ▶ 2 quarks **u**
- ▶ 1 quark **d**

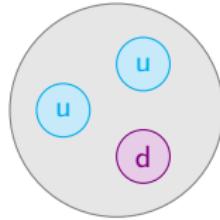


Figure 11 – Proton

### Neutron

- ▶ 1 quark **u**
- ▶ 2 quarks **d**

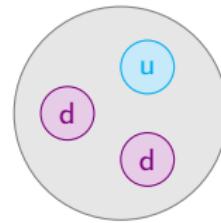


Figure 12 – Neutron

# Interaction Forte

## Historique :

- 1964 Découverte par Murray Gell-Mann  
1969 Prix Nobel, pour la classification des particules élémentaires et leurs interactions

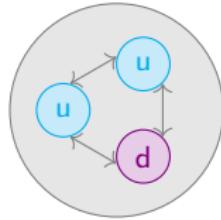


Figure 13 – Proton

## Forte

- ▶ Force nucléaire forte
- ▶ Charge de couleur

## Propriétés

- ▶ Confiné
- ▶ Porte une charge de couleur

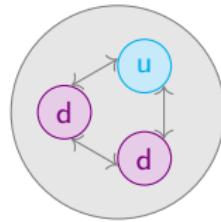


Figure 14 – Neutron

## Bilan de la composition de la Matière

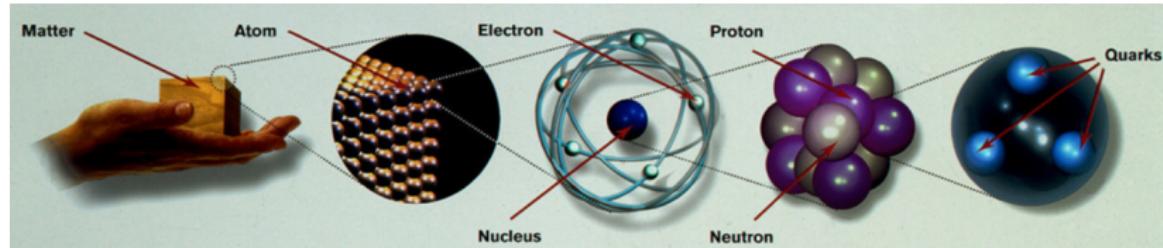


Figure 15 – Décomposition de la Matière

## Ordre de grandeur des composants de la matière

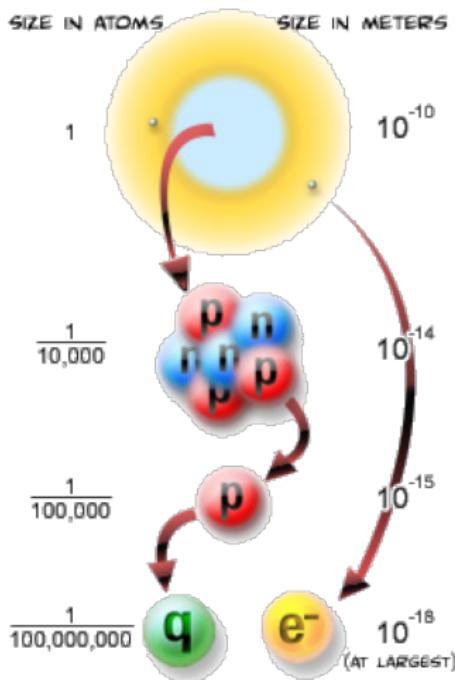


Figure 16 – Décomposition d'un atome avec l'échelle des diamètres

# Le Modèle Standard

## Définition (Modèle Standard de la Physique des particules)

- ▶ La Physique des Particules, c'est l'étude de la **matière** et des **forces**.
- ▶ Basé sur la Mécanique Quantique et les Symétries
- ▶ Validé expérimentalement jusqu'à un certain niveau d'énergie



Figure 17 – Emmy Noether, « monument de la pensée mathématique » selon Einstein pour Hilbert

### Matière

- ▶ constituants fondamentaux de l'Univers
- ▶ particules élémentaire

### Force

- ▶ interactions fondamentales entre les particules élémentaires
- ▶ échanges de particules appelé **boson médiateur**

# La Matière

## Leptons

- ▶ particule élémentaire
- ▶ insensible à l'interaction forte
- ▶ 6 saveurs
  - ▶ 3 chargés :  $e^-$ ,  $\mu^-$ ,  $\tau^-$
  - ▶ 3 neutres :  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$

## Quarks

- ▶ particule élémentaire confiné dans des **hadrons**
- ▶ sensible à toutes les interactions
- ▶ 6 saveurs
  - ▶ de charge  $2/3$  :  $u$ ,  $c$ ,  $t$
  - ▶ de charge  $-1/3$  :  $d$ ,  $s$ ,  $b$
- ▶ porte une charge de couleur :  
**Rouge**, **Vert**, **Bleu**

# L'Anti-Matière

## Définition (Anti-Matière)

- ▶ Particule élémentaire
- ▶ Toutes les charges sont opposées
- ▶ Toutes les masses sont conservées

### Propriétés conservées

- ▶ Masse
- ▶ Spin

### Leptons

Génération	Particule → Antiparticule
I	$e^- \rightarrow e^+$ $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_e$
II	$\mu^- \rightarrow \mu^+$ $\nu_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu$
III	$\tau^- \rightarrow \tau^+$ $\nu_\tau \rightarrow \bar{\nu}_\tau$

### Propriétés inversées

- ▶ Nombres Quantiques
- ▶ Charge électrique
- ▶ Charge de couleur

### Quarks

Génération	Particule → Antiparticule
I	$u \rightarrow \bar{u}$ $d \rightarrow \bar{d}$
II	$s \rightarrow \bar{s}$ $c \rightarrow \bar{c}$
III	$b \rightarrow \bar{b}$ $t \rightarrow \bar{t}$

- ▶ Le photon et les gluons sont leurs propres antiparticules.

# Les Hadrons

## Les Hadrons

- ▶ particule composé de quarks
- ▶ se comporte comme des particules ponctuelles

### Baryon

- ▶ 3 quarks

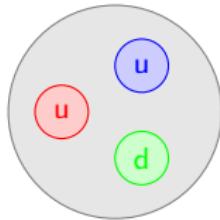
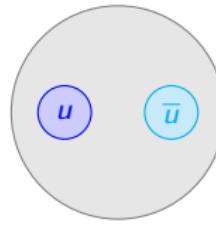


Figure 18 – Proton

### Méson

- ▶ quark + antiquark

Figure 19 –  $\pi^+$ 

### Antibaryon

- ▶ 3 antiquarks

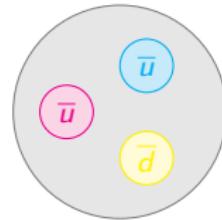


Figure 20 – Anti-Proton

# Les 4 interactions fondamentales

## Électromagnétique (QED)

- ▶ Portée :  $\infty$
- ▶ Charge électrique
- ▶ Acteurs : Leptons chargés, Quarks
- ▶ Médiateur : Photon  $\gamma$  ( $m_\gamma = 0$ )

## Gravitation

- ▶ Portée :  $\infty$
- ▶ Charge de Masse
- ▶ Acteurs : Particules massives
- ▶ Médiateur : Higgs  $H$   
( $m_H = 125$  GeV)
- Bonus : unification électrofaible

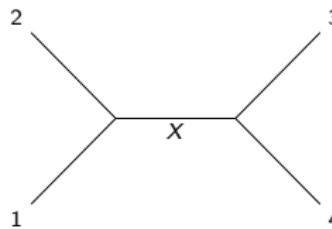
## Faible

- ▶ Portée :  $10^{-18}$  m
- ▶ Charge faible
- ▶ Acteurs : Leptons, Quarks
- ▶ Médiateurs :
  - ▶  $W^\pm$  ( $m_W = 80$  GeV)
  - ▶  $Z^0$  ( $m_Z = 91$  GeV)

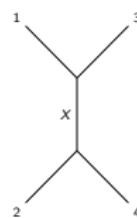
## Forte (QCD)

- ▶ Portée :  $10^{-15}$  m
- ▶ Charge de Couleur
- ▶ Acteurs : Quarks
- ▶ Médiateurs : 8 Gluons  $g$  ( $m_g = 0$ )

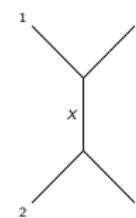
## Les diagrammes de Feynman



(a) annihilation



(b) diffusion



(c) diffusion croisée

Figure 21 –  $1 + 2 \longrightarrow 3 + 4$

## Légende

Fermion :

Bosons  $\gamma, W, Z$  :

Gluons :

Boson de Higgs :

# Interaction Électromagnétique

- ▶ Acteurs :

  - ▶ Leptons chargés ( $e, \mu, \tau$ )
  - ▶ Quarks ( $u, d, s, \bar{d}, \bar{b}, \bar{t}$ )

- ▶ Médiateur : Photon  $\gamma$

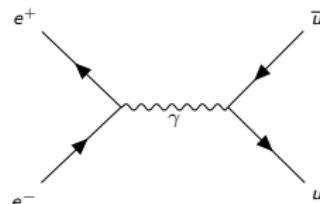
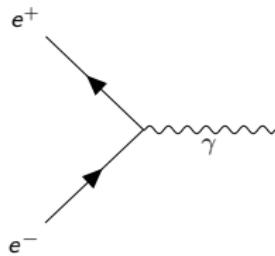
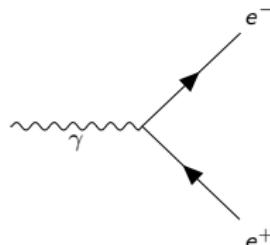


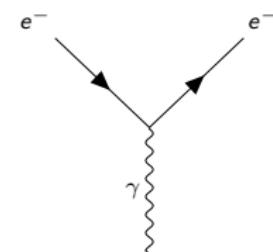
Figure 22 – Diagramme de Feynman :  
 $e^+ + e^- \rightarrow u + \bar{u}$



(a) annihilation :  
 $e^- + e^+ \rightarrow \gamma$



(b) création :  $\gamma \rightarrow e^- + e^+$



(c) diffusion

Figure 23 –  $e^- + e^+ \longleftrightarrow \gamma$

Interaction Faible : avec le boson  $W$ 

## ▶ Acteurs :

- ▶ Leptons chargés ( $e, \mu, \tau$ )
- ▶ Quarks ( $u, d, s, b, t$ )

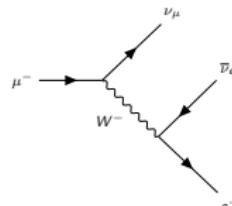
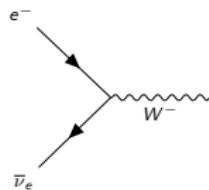
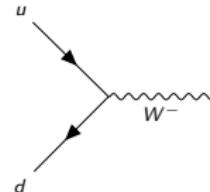
▶ Médiateur : Boson  $W$ 

Figure 24 – Désintégration du muon :  
 $\mu^- \longrightarrow \nu_\mu + \bar{\nu}_e + e^-$



(a)  $f^- + \bar{\nu}_f \longrightarrow W^-$ , l'interaction faible transforme un électron (lepton) en anti-neutrino électronique (leptonique)

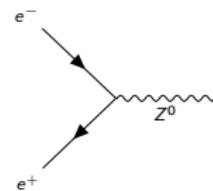


(b)  $u + d \longrightarrow W^-$ , l'interaction faible transforme un quark ( $u, c, t$ ) dans un autre saveur qui l'autre charge électrique ( $d, s, b$ )

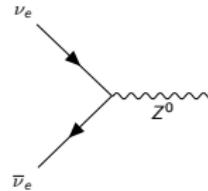
Figure 25 – Interaction faible (chargée), avec le boson  $W$

Interaction Faible : avec le boson  $Z$ 

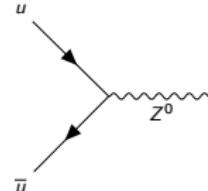
- ▶ Acteurs :
  - ▶ Leptons chargés ( $e^\pm, \mu^\pm, \tau^\pm$ ) et neutres ( $\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$ )
  - ▶ Quarks ( $u, \bar{u}, d, \bar{d}, s, \bar{s}, c, \bar{c}, b, \bar{b}, t, \bar{t}$ )
- ▶ Médiateur : Boson  $Z$



$$(a) \ell^- + \ell^+ \rightarrow Z^0$$



$$(b) \ell^- + \ell^+ \rightarrow Z^0$$

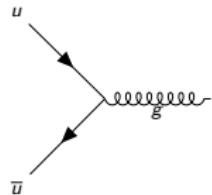


$$(c) u + \bar{u} \rightarrow Z^0$$

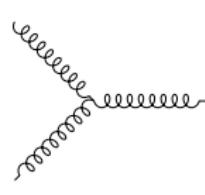
Figure 26 – Interaction faible (neutre), avec le boson  $Z$

# Interaction Forte

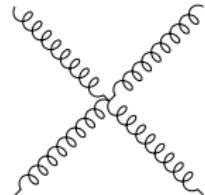
- ▶ Acteurs :
  - ▶ Quarks ( $u, d, s, c, b, t$ )
  - ▶ Anti-Quarks ( $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}, \bar{c}, \bar{b}, \bar{t}$ )
- ▶ Médiateur : 8 gluons  $g$



(a)  $u + \bar{u} \longrightarrow g$



(b)  $g + g \longrightarrow g$



(c)  $g + g \longrightarrow g + g$

Figure 27 – Interaction forte, avec les gluons  $g$

## Le Mécanisme de Higgs

### Définition (La vitesse limite, noté $c$ )

$$c \approx 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

- ▶ constante physique de l'Univers
- ▶ vitesse maximale atteignable uniquement par les particules sans masse

### Définition (Mécanisme de Brout-Englert-Higgs-Hagen-Guralnik-Kibble)

- ▶ Les particules n'ont pas de masse
- ▶ Un champ imprèche le vide, le **champ de Higgs**. Et c'est l'interaction avec ce champ que les particules acquièrent leurs masses.

### Définition (Boson de Higgs)

$$m_{Higgs} = 125 \text{ GeV}$$

## Bilan des constituants de la matière et des interactions fondamentales

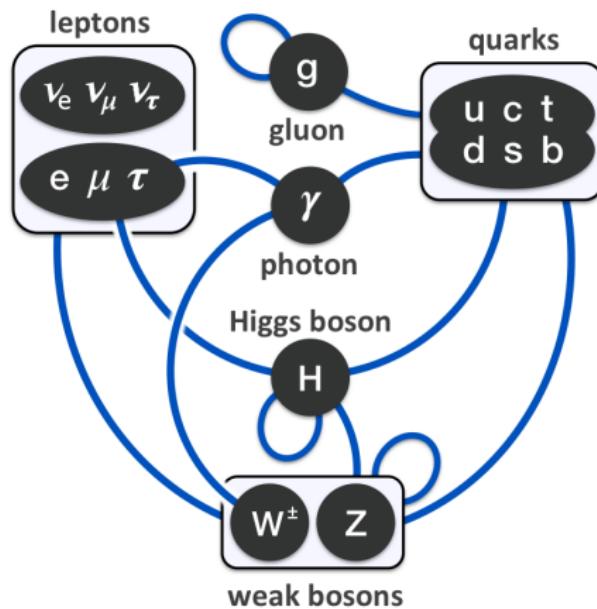


Figure 28 – Interaction entre toutes les particules du Modèle Standard

# Conclusion

## Bilan du Modèle Standard des Particules

### Bilan du MS

- ▶ Théorie autonome et cohérente
- ▶ Beaucoup de succès
- ▶ Reste des phénomènes inexplicables
  - ▶ l'oscillation et la masse des neutrinos.
- ▶ N'est pas une théorie du tout

### Avantages

- ▶ Unanimité scientifique sur ce modèle à basse énergie
- ▶ Ses limites pourraient être comblées avec des corrections mineures ou des extensions

### Exemples de Problèmes

- ▶ Exclusion de la **gravitation** :
  - ▶ *Unification de la Physique Quantique et la Relativité*
  - ▶ *Existence d'un graviton ?*
- ▶ Explication des **3 familles** de fermions :
  - ▶ *Y a-t-il des d'autres familles (plus lourdes) ?*
  - ▶ *Pourquoi leurs masses sont si différentes ?*
- ▶ Théorie de l'**Unification** :
  - ▶ *Unification de l'interaction forte et électrofaible ?*
  - ▶ *Unification des 4 interactions*
- ▶ **Asymétrie** Matière-Antimatière :
  - ▶ *Pourquoi on est dans un monde de Matière ?*
  - ▶ *Violation du nombre leptonique des neutrinos ?*
- ▶ **Matière noire** :
  - ▶ *Aucune description, ni explication ?*

# La Physique des 2 Infinis

*Quand ? Où ? Comment se sont-ils formés ?*

## Cosmologie Quantique

### Le Modèle du Big Bang

- ▶ L'Univers émerge d'un état singulier de densité et température infinie
- ▶ À partir duquel l'espace s'étire et se refroidi progressivement
- ▶ Il y a  $\sim 13$  milliards d'années

### Limites philosophique/physique

- ▶ Y a-t-il eu un instant zéro ? Le temps a-t-il réellement eu un commencement ?
- ▶ La physique n'est plus valide quand on s'y approche :  $\infty$ .

# Cosmologie Quantique

## L'ère de Planck

- ▶ Hypothèse de la *Théorie du tout*
  - ▶ domaine de la **force universelle**
  - ▶ séparation de la *Gravitation et des 3 autres forces ?*

## Propriétés de l'Univers

Âge De 0 à  $10^{-43}$  s

Taille

Température

Densité

Domination

# Cosmologie des Particules élémentaires

## La Naissance de l'espace-temps

- ▶ Début de l'espace-temps
- ▶ L'Univers devient un objet mesurable

## Propriétés de l'Univers

Âge  $10^{-43}$  s : *le temps de Planck*

Taille  $10 \mu\text{m} = 10 \times 10^{-6} \text{ m} = 0,000\,01 \text{ m}$

Température  $10^{32}$  K

Densité  $10^{96}$

Domination Densité énergétique de la Lumière

# Cosmologie des Particules élémentaires

## L'Inflation

- ▶ De  $[10^{-36} \text{ s}, 10^{-33} \text{ s}]$
- ▶ La taille de l'Univers est multipliée par  $10^{50}$  en  $\sim 10^{26} \text{ s}$
- ▶ Changement de phase
  - ▶ Séparation de l'interaction forte avec l'interaction électrofaible
- ▶ le **faux vide**
  - ▶ Le changement de phase est retardé
  - ▶ L'Univers reste en **surfusion**
    - ▶ *Comme de l'eau liquide à  $-10^\circ\text{C}$*

## L'énergie du Vide

- ▶ jusqu'à  $10^{-32} \text{ s}$  : une expansion brutale des 3 dimensions de l'espace
  - ▶ *taille de l'Univers multipliée par  $10^{50}$  en  $\sim 10^{26} \text{ s}$*
  - ▶ enroulement des autres dimensions
- ▶ disparition du faux vide
  - ▶ Création de toute la matière de l'Univers
  - ▶ Création de l'énergie gravitationnelle négative
- ▶ la température chute ( $\Rightarrow$  expansion) :  $10^{27} \text{ K}$

## Cosmologie Classique ou Standard

### La Cristallisation

- ▶ Séparation des forces faible et électromagnétisme
  - ▶ Depuis des lois de la physique actuelle.

### Propriétés de l'Univers

Âge  $10^{-12}$  s

Taille rayon de l'orbite terrestre

Température  $10^{15}$  K = 1 million de milliard de degrès

Densité  $10^{33}$

Domination Densité énergétique de la Lumière

## Cosmologie Classique

### Le Plasma de Quark et de Gluon, QGP

- ▶ L'Univers est rempli d'une "soupe" désorganisée de quarks et de gluons.
  - ▶ les quarks sont déconfinés
- ▶ Possible de recréer cet état de la matière (mais pas à ces niveaux d'énergie encore)
  - ▶ dans les accélérateurs de particules
    - ▶ exemple : l'expérience ALICE du CERN
- ▶ des paires : protons / anti-protons & neutrons / anti-neutrons
  - ▶ se créent à partir de l'intense rayonnement qui remplit l'Univers
  - ▶ mais s'annihilent aussitôt

### Propriétés de l'Univers

Âge  $10^{-9}$  s

Température  $10^{12}$  K = 1 000 milliard de degrès

Domination Densité énergétique de la Lumière

## Cosmologie Classique

### L'Ère hadronique

- ▶ Fixe les populations de protons et neutrons.
  - ▶ l'énergie n'est plus assez élevée (pour le processus Création/Annihilation)
- ▶ presque tous les protons et neutrons disparaissent
  - ▶ reste le - milliardième- de particules normales en excédent
  - ▶ assymétrie en faveur de la matière
  - ▶ absence d'antimatière dans l'Univers actuel

### Propriétés de l'Univers

Âge  $10^{-6}$  s = un millionième de seconde

Taille 1 a.l.

Température  $10 \times 10^9$  K = 10 milliard de degrès

Domination Densité énergétique de la Lumière

## Cosmologie Classique

### L'Ère leptonique

- ▶ Soupe de photons, d'électron et de neutrinos, avec quelques protons et neutrons
- ▶ l'Univers est opaque
  - ▶ car trop dense

### Propriétés de l'Univers

Âge  $10^{-4}$  s = un dix-millième de seconde

Domination Densité énergétique de la Lumière

## Cosmologie Classique

### Le 2nd grand nettoyage

- ▶ L'Univers est principalement composé de lumière :
  - ▶ Positrons et électrons s'annihilent en lumière
  - ▶ Reste un milliardième excédentaire d'électrons (ceux d'aujourd'hui)
  - ▶ Les neutrons se désintègrent et se raréfient

### Propriétés de l'Univers

Âge  $10^{-4}$  s = un dix-millième de seconde

Température  $10^9$  K = 1 milliard de degrès

Densité  $10 \times 10^4 = 100\ 000$

Domination Densité énergétique de la Lumière

## Cosmologie Classique

### La Nucléosynthèse Primordiale

- ▶ La formation des **noyaux atomiques** :

$^1\text{H}$  hydrogène : 1 proton

$^2\text{H}$  deutérium : 1 proton + 1 neutron

$^3\text{H}$  tritium : 1 proton + 2 neutrons (instable)

$^4\text{He}$  hélium : 2 protons + 2 neutrons

$^7\text{Li}$  lithium : 3 protons + 4 neutrons

- ▶ Réaction de fusion nucléaire

- ▶ permis par la température et la pression élevées

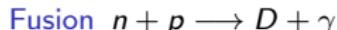
### Propriétés de l'Univers

Âge 100 s

Domination Densité énergétique de la Lumière

# La Nucléosynthèse Primordiale

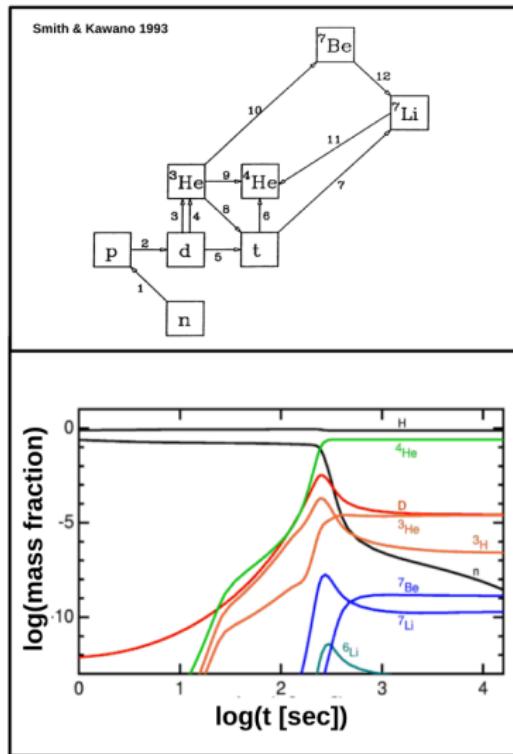
## Enclanchement



- ▶ Photodésintégration « Fusion
- ▶ Apparition du Deutérium

## L'abondance relative des éléments

- ▶ Évolue avec les noyaux déjà formés et la température
- ▶ 12 réactions principales
- ▶ 6 noyaux légers



# La Nucléosynthèse Primordiale

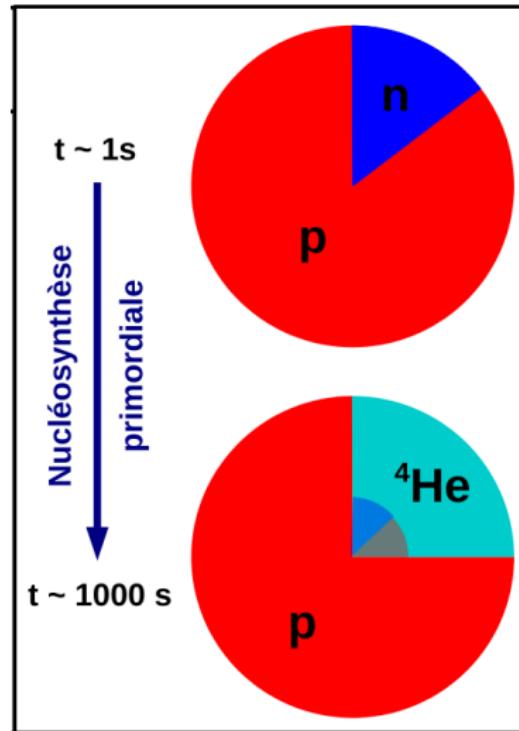
## Bilan

- ▶ Fin de la Nucléosynthèse Primordiale :
  - ▶ l'Univers est trop froid et trop dilué
- ▶ L'Univers est constitué de :
  - $\sim 3/4^1\text{H}$  hydrogène
  - $\sim 1/4^4\text{He}$  hélium

## Propriétés de l'Univers

Âge  $180\text{ s} = 3\text{ min}$

Domination Densité énergétique de la Lumière



# Cosmologie Classique

## La Recombinaison

- ▶ Formation des atomes
  - ▶ Combinaison entre les noyaux et les électrons
  - ▶ La température est suffisamment basse
- ▶ L'Univers devient transparent
  - ▶ La fixation des électrons laisse le chemin libre pour les photons, pour la lumière
- ▶ Univers dominé par la matière
  - ▶ Aujourd'hui, le rayonnement ne représente plus qu'un millième de la densité générale.

## Propriétés de l'Univers

Âge [300 000 ans - 1 million d'années]

Température  $3 \text{ à } 4 \times 10^4 \text{ K} = 4 000 \text{ K}$

Domination Densité énergétique de la Matière

# Fond Diffus Cosmologique

La preuve de la Recombinaison

## Historique

- ▶ 1960' : Arno Penzias et Robert Wilson (radio-astronomes) essayaient de reconvertis une antenne d'observation désaffectée du satellite Echo en radio-télescope
- ▶ Un "bruit" radioélectrique, isotrope, uniforme, sans variation diurne ou saisonnière se superposant à toutes leurs observations.
- ▶ L'un d'eux faisait part de leurs difficultés à un astronome qui connaissait des cosmologistes lancés à la recherche du rayonnement fossile du Big Bang.
- ▶ Juillet 1965, annonce de la découverte du FDC
  - ▶ trace indiscutable du Big Bang,
  - ▶ 2 articles de l'Astrophysical Journal
- ▶ Prix Nobel de physique 1978 : Penzias et Wilson



Photo from the Nobel  
Prize archive.  
Pyotr Leonidovich  
Kapitsa  
Prize share: 1/2



Photo from the Nobel  
Prize archive.  
Arno Allan Penzias  
Prize share: 1/4



Photo from the Nobel  
Prize archive.  
Robert Woodrow  
Wilson  
Prize share: 1/4

**Figure 29 – Pour ses inventions et découvertes fondamentales dans le domaine de la physique basse température & Pour leur découverte du rayonnement cosmique de fond micro-onde**  
<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1978/summary/>

## Fond Diffus Cosmologique

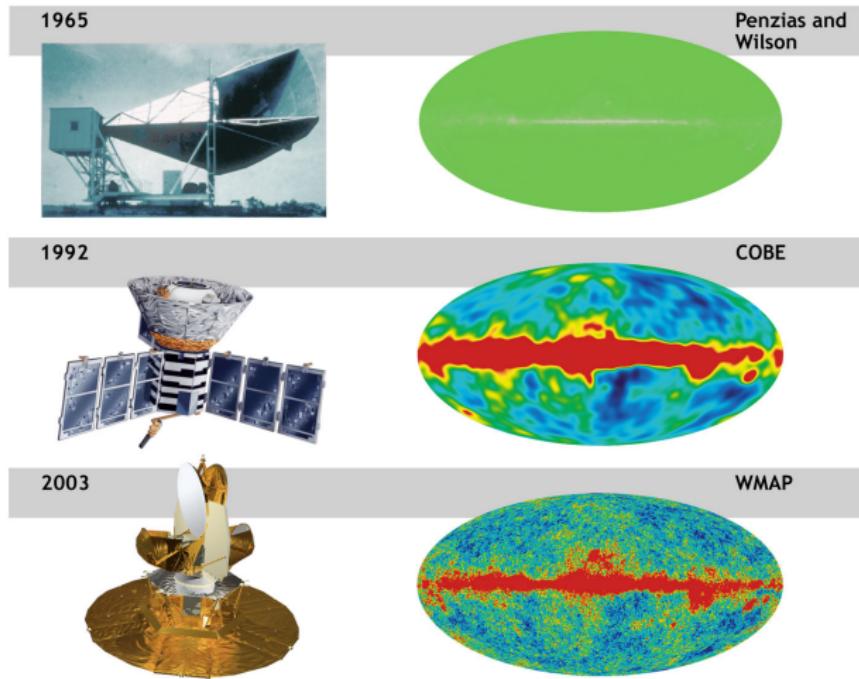


Figure 30 – <https://map.gsfc.nasa.gov/media/081031/index.html>

## Fond Diffus Cosmologique

- ▶ *Cosmic Microwave Background, CMB*
- ▶ Découplage matière/rayonnement :
  - ▶ Température de  $\sim 4\,000$  K
  - ▶ Entre 300 000 ans et 1 million d'années
  - ▶ Redshift :  $z \sim 1100$
- ▶ **Rayonnement fossile :**
  - ▶ Température 3 K
  - ▶ Fluctuations de température  $\sim 10^{-5}$

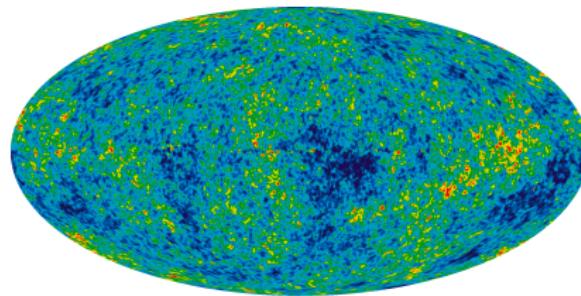


Figure 31 – <https://map.gsfc.nasa.gov/media/081031/index.html>

# Cosmologie Classique

## Les Premières étoiles

- ▶ Premières générations d'étoiles
  - ▶ La libération de la lumière libère aussi la matière
  - ▶ La matière évolue sous la seule emprise de la gravitation
  - ▶ Les premières condensations se mettent à grossir jusqu'à s'allumer
  - ▶ Ces étoiles sont :
    - ▶ très massives
    - ▶ une courte durée de vie
- ▶ Héritage de ces étoiles - Explosent en supernovae :
  - ▶ Produisent une énorme quantité d'éléments lourds
  - ▶ Leurs restes deviennent des trous noirs
  - ▶ Qui en s'agglomérant au centre des galaxies, forment des trous noirs galactiques

## Propriétés de l'Univers

Âge  $1 \times 10^6 - 5 \times 10^6$  années = [1 – 5] milliards d'années

Domination Densité énergétique de la Matière

## Les Premières étoiles

- ▶ Données du TSJW de la NASA/ESA/CSA
- ▶ Collaboration « JADES » (+80 astronomes de 10 pays) qui a développé pour TSJW :
  - ▶ Caméra Proche-Infrarouge (NIRCam)
  - ▶ Spectrographe Proche IR (NIRSpec')
- ▶ JADES s'est concentrée sur la zone dans et autour de la NASA/ESA Télescope spatial Hubble's Champ ultra profond.
- ▶ + 1 mois sur 2 ans de temps de télescope
- ▶ Découverte des premières galaxies
- ▶ Émis il y a plus de 13,4 milliard d'années
  - ▶ Quand l'Univers avait moins de 400 millions d'années (2% de son âge)
- ▶ Résultat en attente de validation par des pairs

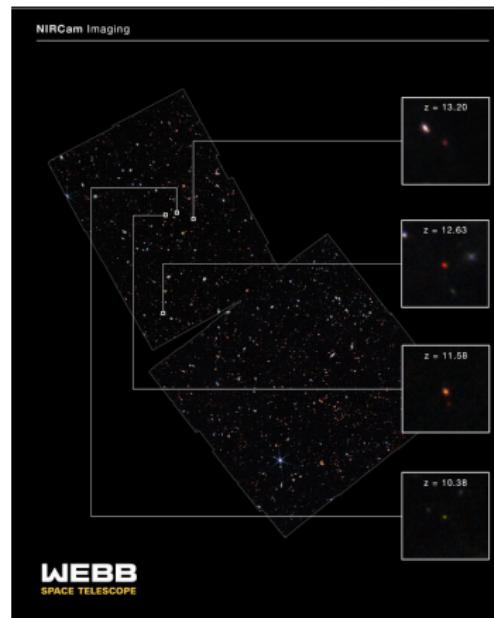


Figure 32 – Publié le 9 Décembre 2022, <https://esawebb.org/images/JADES1/>

## Cosmologie Classique

([5 – 10] milliards d'années)

### La formation des systèmes planétaires

- ▶ Le milieu interstellaire contient des éléments lourds (carbone, fer, oxygène, azote, etc...)
- ▶ Formations des étoiles de seconde, troisième,... génération
- ▶ Formation de planètes autour des étoiles naissantes
- ▶ Sur ces planètes, la Vie peut apparaître

### Propriétés de l'Univers

Âge  $5 \times 10^6 - 10 \times 10^6$  années = [5 – 10] milliards d'années

Domination Densité énergétique de la Matière

## Galaxie naine bleue compacte

- ▶ Blue Compact Dwarf (BCD) galaxies
- ▶ Régions de formation d'étoiles très actives.
  - ▶ Jeunes, Massives et Chaudes
  - ▶ Souvent des géantes bleues
- ▶ Faible teneur en poussière
- ▶ Manque comparatif de métaux (*ingrédients de base de la formation d'étoiles*)
- ▶ Nuages moléculaires similaires aux nuages qui ont formé les premières étoiles dans l'Univers primitif, qui étaient dépourvues de poussière et d'éléments plus lourds.
- ▶ Idéal pour mieux comprendre le processus primordial de formation d'étoiles.

### Exemple de NGC 5253

- ▶ A environ 12 millions d'années-lumière dans la constellation australe du Centaure
- ▶ Une des plus proches des galaxies connues de Blue Compact Dwarf



Figure 33 – Publiée le 30 Novembre 2012  
[https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/  
Images/2012/11/Hubble\\_spots\\_a\\_  
compact\\_blue\\_galaxy](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2012/11/Hubble_spots_a_compact_blue_galaxy)

# L'Univers

- ▶ Qu'elles sont ses limites ?
- ▶ Constitué :
  - ▶ Principalement de vide
  - ▶ Puis la Matière (étoiles, gaz, poussières, roches)
    - ▶ 118 éléments : principalement  $H$ ,  $He$ ,  $C$ ,  $O$
    - ▶ structurée (galaxies, amas, superamas)
    - ▶ sur des espaces de sur densité (la toile cosmique)

## Propriétés de l'Univers

- ▶ homogène et isotrope à grand échelle ( $\gtrsim 100$  Mpc)

# L'Univers Local

La Terre appartient :

- ▶ Au Système Solaire
- ▶ À la Voile Lactée (galaxie spirale)
- ▶ Groupe local
- ▶ Superamas de la Vierge

Les voisins de la Terre :

- ▶ Proxima du Centaure, étoile située à  $39 \times 10^{12}$  km = 4,2 a.l.
- ▶ Galaxie d'Andromède située à  $2,5 \times 10^6$  a.l.

Propriétés de l'Univers local

- ▶ distributions non uniforme



# Les différentes générations d'étoiles, Diagramme HR

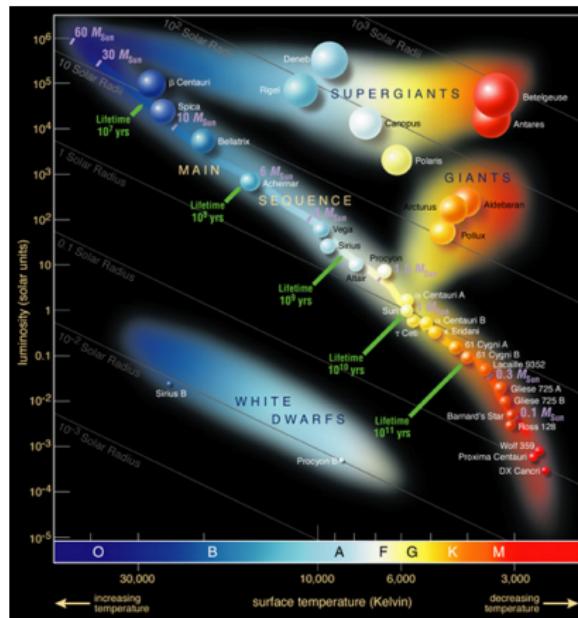
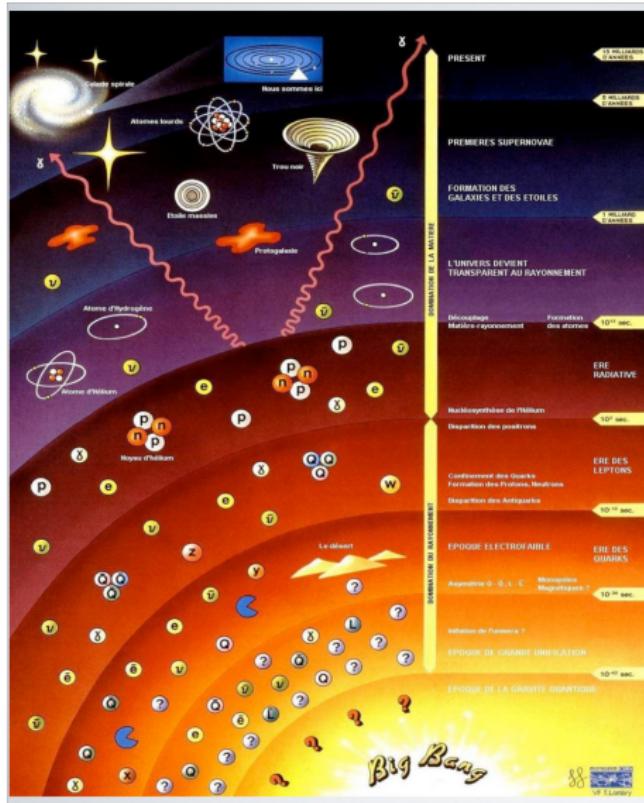


Figure 34 – Le diagramme de Hertzsprung, qui retrace l'évolution des étoiles.  
<https://www.cosmos.esa.int/web/cesar/the-hertzsprung-russell-diagram>



# L'histoire de notre univers

$10^{13}$  s

premiers atomes

I s

hadrons

$10^{-6}$  s

quarks  
leptons

$10^{-34}$  s

??

$10^{-44}$  s

gravitation  
quantique

## Notre Histoire

13 Milliards d'années Le Big Bang

4,6 Milliards d'années Naissance du Système Solaire

- ▶ Formation du Soleil
- ▶ Formation autre corps

3,5 Milliards d'années Apparition de la vie sur Terre

7 Millions d'années Premières formes de vie humaine

200 000 années Premières formes de vie homo sapiens

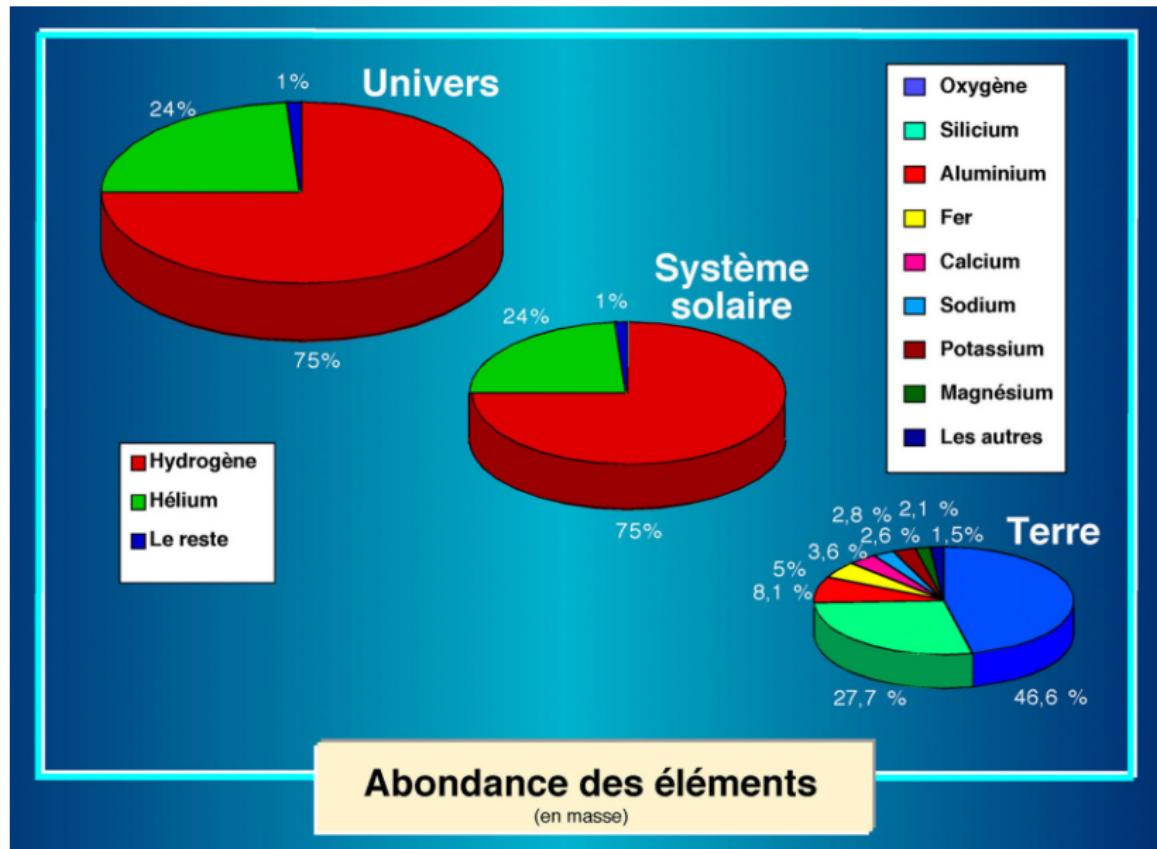
6 000 années Début de l'Histoire : Naissance de l'écriture

3400 et 3100 av. J.-C Mésopotamie

3250 av. J.-C Égypte

1200 av. J.-C Chine

500 av. J.-C Mexique et Guatemala



## 4 Types de Nucléosynthèses

### Définition (Nucléosynthèse)

Formation de noyaux atomiques

#### Nucléosynthèse primordiale

- ▶ Épisode du Big Bang
- ▶ Création des éléments légers :  ${}_1^1\text{H}$ ,  ${}_2^4\text{He}$ , ...

#### Nucléosynthèse interstellaire

- ▶ ou *Spallation cosmique*
- ▶ Bombardement de la matière par des rayonnement cosmique
  - ▶ Production d'éléments légers :  ${}_3^3\text{Li}$ ,  ${}_4^4\text{Be}$ ,  ${}_5^5\text{B}$

#### Nucléosynthèse stellaire

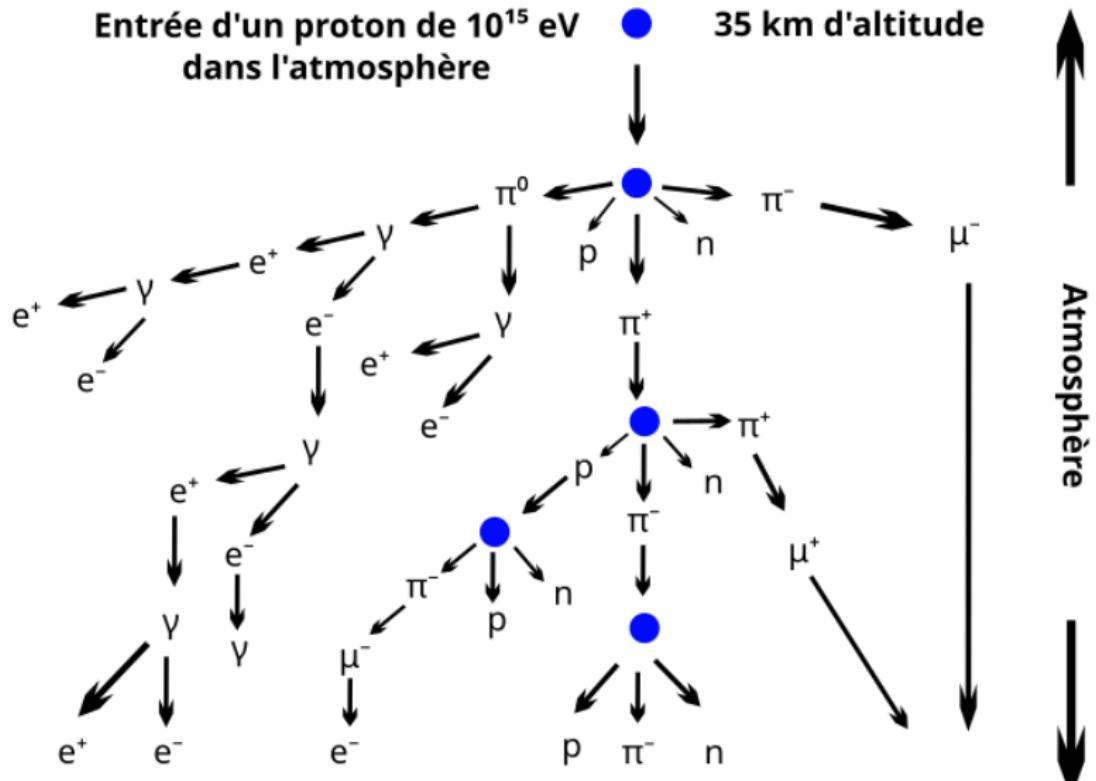
- ▶ Vie de l'étoile
  - ▶ Création de l'Hélium entre le  ${}_2^4\text{He}$  et le  ${}_26^{56}\text{Fe}$
- ▶ « Fin de Vie » de l'étoile
  - ▶ Création d'éléments plus lourd jusqu'au  ${}_26^{56}\text{Fe}$
  - ▶ Capture (lente) de neutrons : après le  ${}_26^{56}\text{Fe}$

#### Nucléosynthèse explosive

- ▶ Capture de protons
- ▶ Capture (rapide) de neutrons
  - ▶ Au delà du  ${}_26^{56}\text{Fe}$

## Nucléosynthèse Interstellaire

Les Rayons Cosmiques



# Nucléosynthèse stellaire

## Combustion de ${}_1^1\text{H}$

- ▶ Composé :  ${}_1^1\text{H}$ ,  ${}_2^4\text{He}$
- ▶ Fusion  ${}_1^1\text{H}$  :  $\nearrow {}_2^4\text{He}$
- ▶ Contraction gravitationnelle

## Fin de la combustion de ${}_1^1\text{H}$

- ▶ Peu  ${}_1^1\text{H}$  au cœur
- ▶ Contraction de cœur  ${}_2^4\text{He}$
- ▶ Contraction
  - ▶  $\nearrow T$  au cœur et en périphérie
  - ▶ Combustion possible en couche d' ${}_1^1\text{H}$

## Combustion de ${}_2^4\text{He}$

- ▶ Combustion du cœur d' ${}_2^4\text{He}$
- ▶ Combustion en couche d' ${}_1^1\text{H}$
- ▶ Contraction
  - ▶  $\nearrow \nearrow$  taille
  - ▶  $\searrow T$  en surface
- ▶ Couleur rouge

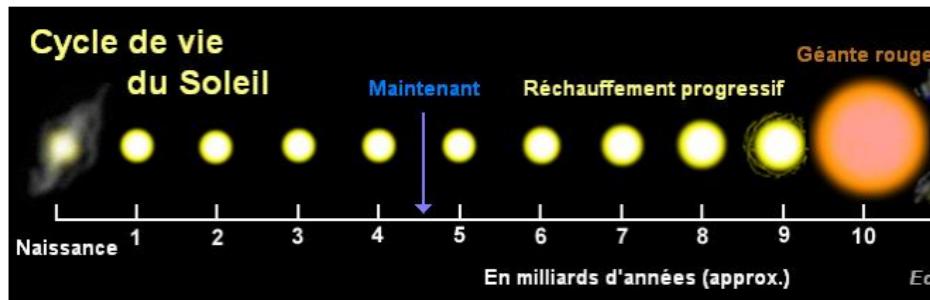


Figure 36 – [https://fr.wikipedia.org/wiki/Naine\\_blanche](https://fr.wikipedia.org/wiki/Naine_blanche)

## Nucléosynthèse stellaire des Étoiles massives

Combustion	Produits	Température en K	$\rho$ en $\text{g cm}^{-3}$	Durée
Hydrogène	$^4\text{He}$	$4 \times 10^7$	4	$7 \times 10^6$ années
Hélium	$^{12}\text{C}$ , $^{16}\text{O}$	$2 \times 10^8$	760	$8 \times 10^5$ années
Carbone	$^{16}\text{O}$ , $^{20}\text{Ne}$ , $^{24}\text{Mg}$	$8 \times 10^8$	$10^5$	500 années
Néon	$^{16}\text{O}$ , $^{24}\text{Mg}$ , $^{28}\text{Si}$	$1,6 \times 10^9$	$3,9 \times 10^6$	0,9 années
Oxygène	$^{28}\text{Si}$ , $^{32}\text{S}$	$2,1 \times 10^9$	$3,6 \times 10^6$	0,4 années
Silicium	$^{26}\text{Fe}$	$4 \times 10^9$	$3 \times 10^7$	1 jour

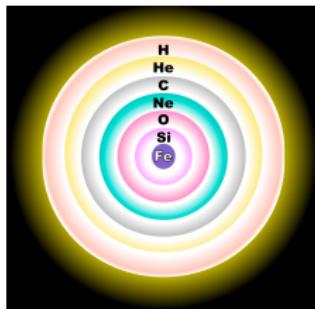


Figure 37 – Représentation de la structure en « oignon »  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Supernova\\_à\\_effondrement\\_de\\_cœur](https://fr.wikipedia.org/wiki/Supernova_à_effondrement_de_cœur)

- ▶ Coeur du **groupe du fer**
- ▶ La fusion s'arrête (car plus de création d'énergie)
- ▶ Le cœur de l'étoile refroidit
- ▶ La pression de radiation baisse
- ▶ La pression des électrons se maintient
- ▶ Quand le cœur de l'étoile atteint la Masse de Chandrasekhar  $1,4M_\odot$
- ▶ Effondrement gravitationnel du cœur
- ▶ **Supernova de type II**

# La Nucléosynthèse Explosive

## Les Naines blanches

### ► Caractéristiques

- ▶ Densité élevée
  - ▶ Masse :  $\lesssim M_{\odot}$  (/ jusqu'à 8)
  - ▶ Volume : ~ celui de la Terre
  - ▶ Masse Volumique :  $\sim 1 \text{ t cm}^{-3}$
- ▶ Température de surface élevée
  - ▶ Initialement  $> 100\,000 \text{ K}$
- ▶ Faible luminosité  $\sim \frac{1}{1000} L_{\odot}$
- ▶ Composition :  $^{6}\text{C}$  et  $^{8}\text{O}$

### ► Origine

- ▶ Étoile de masse  $< 8M_{\odot}$

### ► Formation

- ▶ Cœur de l'étoile parente
- ▶ Couches externes sont expulsées et formé une nébuleuse planétaire

### ► Evolution

- ▶ Si isolée
  - ▶ Très stabilité
  - ▶ se refroidir très lentement
  - ▶ Jusqu'à devenir une naine noire
- ▶ Sinon
  - ▶ Supernova de Type Ia

## Les Naines blanches

Exemple de Sirius

- ▶ Étoile la plus brillante du ciel
- ▶ Système d'étoile binaire
- ▶ À 8,6 a.l.
- ▶ Âgé de 250 millions années

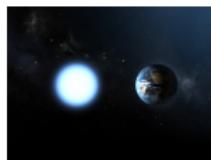


Figure 38 – Sirius B VS Terre, [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Search?SearchText=sirius&result\\_type=images](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Search?SearchText=sirius&result_type=images)

### Sirius A

- ▶ Étoile blanche
- ▶ Type A
- ▶  $2,12M_{\odot}$
- ▶  $1,711R_{\odot}$
- ▶  $26,1L_{\odot}$
- ▶ 9 900 K



Figure 39 – Sirius A et B, [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Search?SearchText=sirius&result\\_type=images](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Search?SearchText=sirius&result_type=images)

### Sirius B

- ▶ Naine blanche
- ▶  $1,5M_{\odot}$
- ▶ Av. explosion  $6 - 7M_{\odot}$
- ▶  $0,008R_{\odot}$
- ▶  $0,000\ 24L_{\odot}$
- ▶ 24 800 K



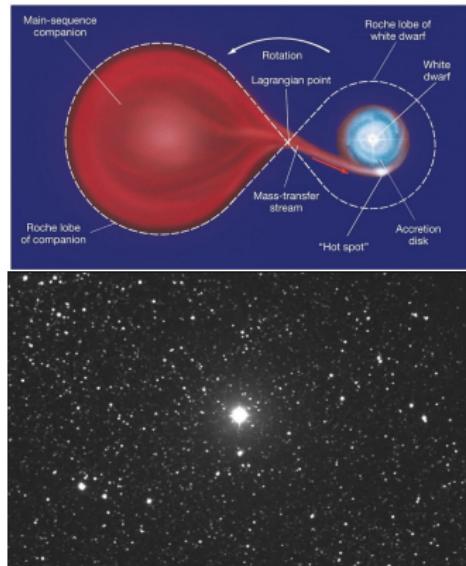
Figure 40 – Sirius A et B, au rayon X, télescope Spatial Chandra <https://chandra.harvard.edu/photo/2000/0065/>

# Les Naines Blanches

## Les Supernovae de Type Ia

### Nova

- ▶ Une naine blanche canibalise son compagnon
- ▶ Dépasse la masse de Chandrasekhar
- ▶ Explosion thermonucléaire
- ▶ ↗ Luminosité durant quelques jours
- ▶ Processus qui peut se répéter
  - ▶ RS Ophiuchi : en 1898, 1933, 1958, 1967, 1985, 2006 et 2021
- ▶ Chandelle standard
  - ▶ Luminosité connue
  - ▶ Méthode de calcul de distance



**Figure 41 – RS Ophiuchi,**  
<https://trustmymscience.com/nova-etoile-rare-brillante-possible-observer>

# La Nucléosynthèse Explosive Massive

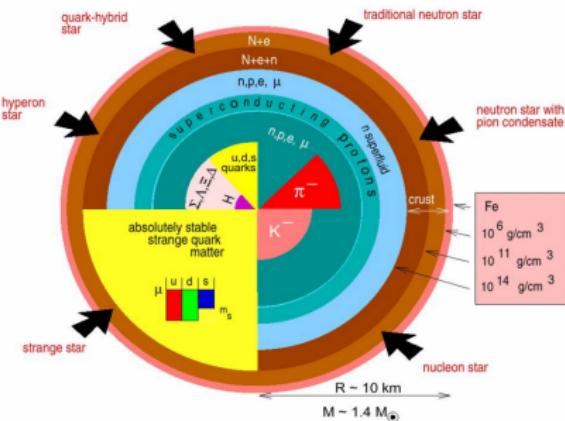
## Les Étoiles à Neutrons

### ► Caractéristiques

- Densité très élevée
  - Densité > Densité des noyaux :  
 $\sim 10^{15} \text{ g cm}^{-3}$   
 $\Rightarrow$  déconfinement des quarks
- Température de surface très élevée
  - $10^9 \text{ K}$
  - ne crée pas de chaleur
  - donc refroidit

### ► Origine

- Étoile supermassive  
 $8M_{\odot} < \text{Étoile parente} < 25M_{\odot}$
- Supernovae type II (perte couche  ${}^1\text{H}$ )



# La Nucléosynthèse Explosive Très Massive

## Les Pulsars

### Découverte

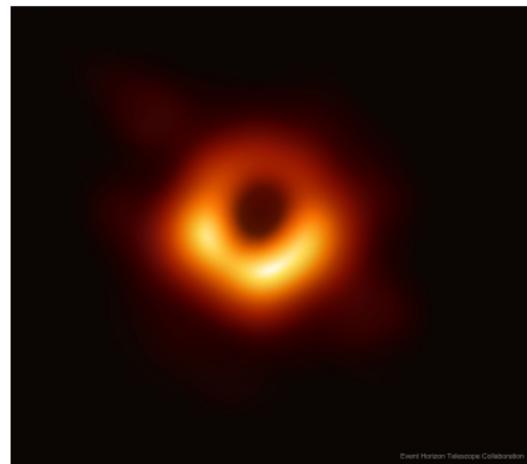
- 1967 Découvert par Anthony Hewish et Jocelyn Bell
- 1968 Découverte des pulsars du crabe (33 ms) et de Vela (89 ms)  
associés à des restes de supernovae
- 1974 Prix Nobel, mais Anthony Hewish seulement

- ▶ Une étoile à neutrons tournant très rapidement sur elle-même
  - ▶ période typique de l'ordre de la seconde
  - ▶ voire beaucoup moins pour les pulsars milliseconde
- ▶ Émettant un fort rayonnement électromagnétique dans la direction de son axe magnétique
- ▶ Produit un signal périodique
  - ▶ ~ de la milliseconde à quelques dizaines de secondes

# La Nucléosynthèse Explosive Très Massive

## Les Trous Noirs

- ▶ Si compact qu'il emprisonne toute forme de matière ou de rayonnement
- ▶ L'**horizon des événements**, la zone sphérique qui délimite la région plus rien ne peuvent s'échapper
- ▶ La **singularité**, au centre, le champs gravitationnelle est infini
- ▶ Physique au delà de toutes nos connaissances



Event Horizon Telescope Collaboration

Figure 42 – Trou noir au centre de la galaxie M87, Image Credit : Event Horizon Telescope Collaboration

## Bilan sur le Cycle de Vie des Étoiles

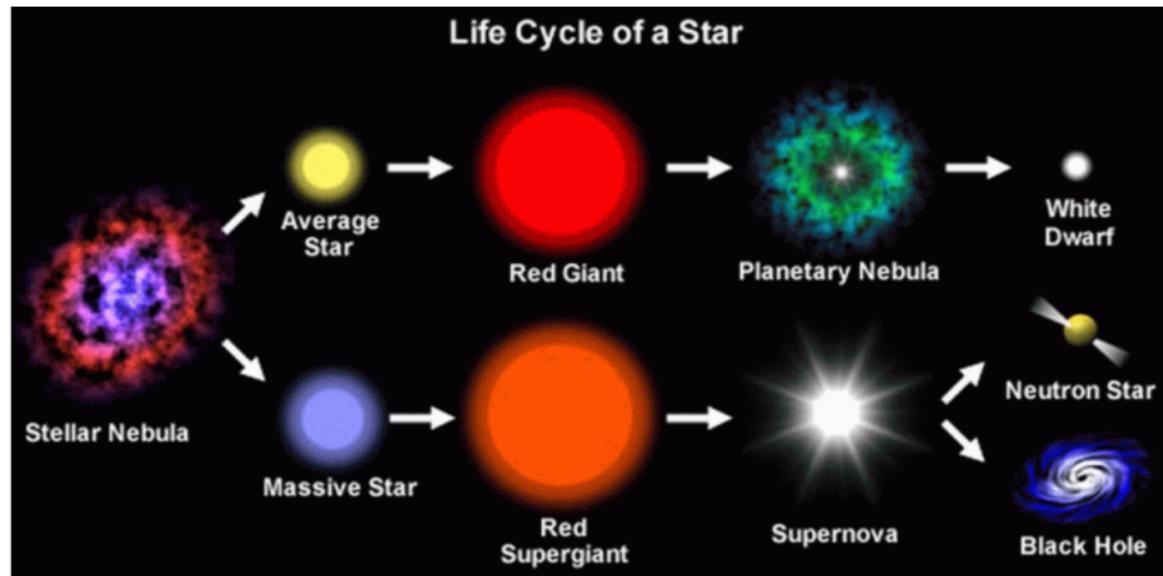


Figure 43 – L'évolution d'une étoile au cours de sa vie dépend de sa masse initiale.  
Credits :students.um.edu

# Origine des éléments

Tableau de Mendeleïev

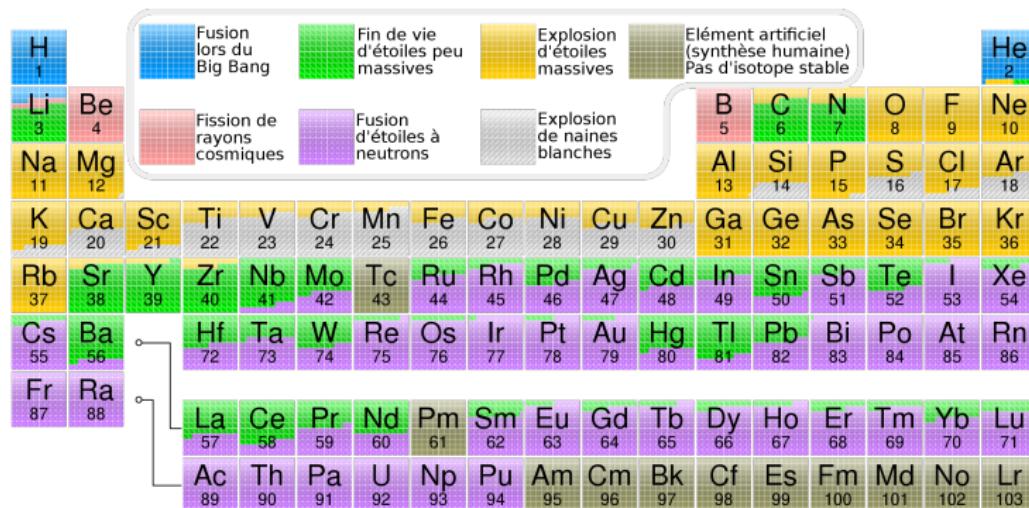


Figure 44 – <https://fr.wikipedia.org/wiki/Nucl%C3%A9osynth%C3%A8se>

# Les Modèles Cosmologiques

## Définition (Modèle)

- ▶ Un cadre représentatif, idéalisé
- ▶ Approximatif et schématique
- ▶ Répond à un but donné :
  - ▶ prévoir,
  - ▶ agir sur la nature,
  - ▶ la connaître mieux,
  - ▶ etc.

## Définition (Cosmologie)

L'étude de l'Univers dans son ensemble :

- ▶ de sa composition,
- ▶ de sa structure,
- ▶ de son origine
- ▶ et de son évolution.

## Définition (Modèle Cosmologique)

- ▶ Description mathématiques de l'histoire de l'Univers
- ▶ Cherche à décrire l'Origine et l'Évolution de l'Univers
- ▶ Les 1<sup>ers</sup> sont apparus au début du XX<sup>e</sup> avec la Relativité Générale

## Le Modèle Cosmologique stationnaire

### Univers d'Einstein, 1917

- ▶ 1<sup>er</sup> modèle cosmologique
- ▶ Basé sur la théorie de la Relativité Générale (Albert Einstein, 1915)

### Propriétés

Statique qui n'évolue pas au cours du temps

Fermé pas d'échange avec l'extérieur

Principe cosmologie l'Univers est homogène et isotrope.

### Constante cosmologique $\Lambda$

- ▶ Avec la gravité, tous objets massifs s'attirent
- ▶ Introduction d'une force répulsive équivalente

## Invalidation d'un Modèle stationnaire

### Expansion de l'Univers

1923 Georges Lemaître conclut que l'Univers a débuté sous la forme d'une petite région compacte qui s'est ensuite dilatée pour devenir l'Univers que nous connaissons

- ▶ le Big Bang

Fin 1920 Edwin Hubble invalide ce modèle et la nécessité de la constante cosmologique.

### Loi de Hubble-Lemaître, (mesuré en 1929, prédit en 1927)

- ▶ + les objets sont loin, + ils semblent s'éloigner rapidement
- ▶ 1<sup>re</sup> preuve de l'expansion de l'Univers

# Modèle de concordance

## Définition (Modèle « $\Lambda$ CDM »)

- ▶ Modèle cosmologique du Big Bang
  - ▶ Paramètré par la constante cosmologique  $\Lambda$  (associé à l'énergie sombre)
  - ▶ *Cold Dark Matter*, la Matière Noire Froide
- ▶ Description la plus satisfaisante de l'histoire de l'Univers observable
- ▶ Toutes les sondes cosmologiques s'accordent
  - ▶ Le fond diffus cosmologique
  - ▶ Supernovæ de type Ia
- ▶ Il est basé sur deux piliers :

Universalité des lois de la physique ▶ modèle standard des particules,

- ▶ relativité générale,
- ▶ physique statistique et thermodynamique,
- ▶ mécanique des fluides,
- ▶ etc.

Hypothèses fondatrices ▶ principe cosmologique (homogénéité et isotropie),

- ▶ petites fluctuations primordiales,
- ▶ période inflationnaire,
- ▶ etc.

- ▶ Le Modèle Standard de la Cosmologie

# Bilan du Modèle $\Lambda$ CDM

## « Bonne » théorie physique

- ▶ Très prédictif
- ▶ Décrit les conséquences des observations
- ▶ Anomalies peu nombreuses et peu significatifs

## Difficultés théoriques fondamentales

- ▶ 2 inconnus : l'énergie sombre  $\Lambda$  et la matière noire CDM
- ▶ modèle d'inflation

## Cosmologie

- ▶ Quelle est l'origine de l'asymétrie baryonnique ?
- ▶ **Qu'est-ce que la matière noire ?**
- ▶ **Qu'est-ce que l'énergie sombre ?**
- ▶ L'inflation a-t-elle eu lieu ?
- ▶ La cosmologie standard est-elle basée sur des principes physiques corrects ?

## La Physique des 2 Infinis

*Quelles sont les problèmes communs ?*

## Les théories de l'inflation chaotique

- ▶ Big Bang non universelle
  - ▶ **Big-Bang** : événement extrêmement violent
  - ▶ il y aurait sans cesse des myriades de big-bangs, créant autant de bulles-univers (dans une sorte de mousse de pré-espace-temps)
- ▶ Le **multivers**

## Vers l'au-delà

### Problème de la Matière manquante

#### Matière noire froide ?

- ▶ La matière baryonique : visible & invisible
- ▶ Forme de matière non baryonique mais massive

Méthode directe *Weakly Interacting Massive Particles (WIMP)* jamais détecté  
Méthode indirecte ▶ Signature dans le CMB

▶ Photons d'auto-annihilation de WIMPs

LHC Aucune particule hors MS détecté

- ▶ Relativité générale non valide à grande échelle

## Vers l'au-delà

### Problème de l'expansion accélérée

$\Lambda$  ?

- ▶ Forme de matière non baryonique mais massive

Énergie sombre énergie du vide, champs scalaire évoluant avec le temps

Méthode indirecte les équations d'Einstein doivent être modifiées , l'accélération est une manifestation de la gravitation

Remise en cause des principes l'Univers n'est pas homogène aux grandes échelles (principe cosmologique)

## *Backreaction*

Cette rétroaction cosmologique conduit à deux contributions différentes :

- ▶ aux grandes échelles, un comportement de type « énergie noire »,
- ▶ aux petites échelles, un comportement de type « matière noire ».

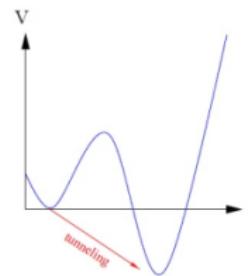
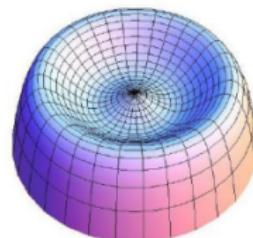
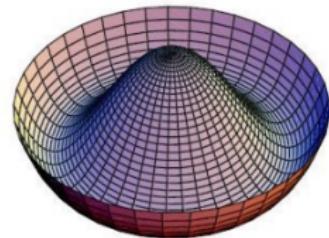
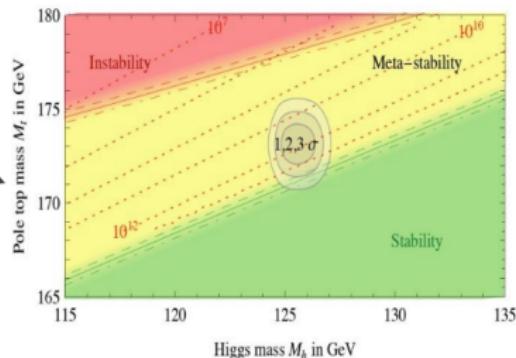
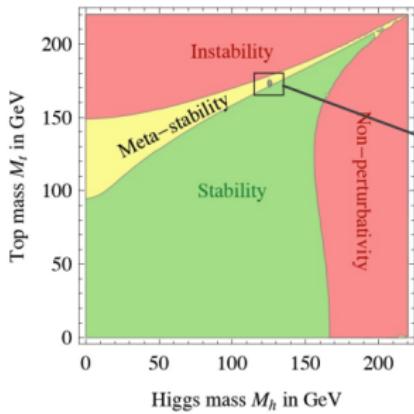
Il n'est cependant pas encore établi que la rétroaction cosmologique peut remplacer tout ou partie des composantes sombres.

# Destiné de l'Univers

## Stabilité du Vide

- ▶ Déterminé par le comportement du potentiel de Higgs
  - ▶ en particulier l'évolution de  $\Lambda$  affecté par des corrections radiatives et dépend de l'échelle d'énergie
  - ▶ Sommes-nous assis sur un minimum local du potentiel de Higgs ? Existe-t-il une limite inférieure à ce potentiel ?

## Destiné de l'Univers

Figure 45 – Couplage entre les masses du quark *top* et du boson de Higgs

## Exemples de Modèles cosmologiques

- ▶ Atome primitif
- ▶ Big Bang
- ▶ Big Crunch
- ▶ Big Rip
- ▶ Classification de Bianchi
- ▶ Cosmologie branaire
- ▶ Cosmologie cordiste
- ▶ Dimensions supplémentaires
- ▶ Espace anti de Sitter
- ▶ Espace de Sitter
- ▶ Espace de Taub-NUT
- ▶ Inflation cosmique
- ▶ Modèle  $\Lambda$ DM
- ▶ Modèle cyclique
- ▶ Modèle cosmologique bi-métrique
- ▶ Modèle OCDM
- ▶ Modèle SCDM
- ▶ Modèle standard de la cosmologie
- ▶ Pré Big Bang
- ▶ Théorie de l'état stationnaire
- ▶ Univers d'Einstein
- ▶ Univers de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker
- ▶ Univers de Gödel
- ▶ Univers de Milne
- ▶ Univers de de Sitter
- ▶ Univers ekpyrotique
- ▶ Univers en tore bidimensionnel
- ▶ Univers fractal
- ▶ Univers hésitant
- ▶ Univers mixmaster
- ▶ Univers phénix

# Etat de la Recherche dans ce domaine

## Laboratoires

- ▶ Le Grand collisionneur de hadron haute luminosité (HL-LHC) et ses détecteurs
- ▶ Cherenkov Telescope Array (CTA)
- ▶ Large Synoptic Survey Telescope (LSST)
- ▶ Cubic Kilometre Neutrino Telescope (KM3NeT)
- ▶ Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE)
- ▶ Jiangmen Underground Neutrino Observatory (JUNO)
- ▶ Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR)
- ▶ Télescope spatial EUCLID
- ▶ LISA (Laser Interferometer Space Antenna)

## Grands instruments

- ▶ Le LHC au CERN à Genève
- ▶ GANIL à Caen
- ▶ EGO-VIRGO, à Pise en Italie
- ▶ Le détecteur BELLE-2 auprès de l'accélérateur KEK au Japon
- ▶ L'expérience T2K au Japon (neutrinos)
- ▶ Les détecteurs AEGIS et GBAR au CERN (gravité des antiparticules)
- ▶ Les détecteurs XENON et EDELWEISS dans les laboratoires souterrains de Modane (EDELWEISS) et Gran Sasso (XENON) en Italie.
- ▶ Le détecteur SuperNEMO, dans le Laboratoire souterrain de Modane ( $2\beta0\nu$ )
- ▶ Le détecteur AUGER en Argentine (rayons cosmiques d'ultra haute énergie)
- ▶ Le télescope HESS en Namibie (rayons gamma de haute énergie)

## Conclusion

Merci de votre attention !