

Cours de physique des particules (MA1 ou MA2)
Année académique 2023-24
PHYSF-416 (5ECTS)

CHAPITRE 1: INTRODUCTION ET RAPPELS

Rappel: Plan du cours

- I. Introduction et rappels
- II. Symmétries et lois de conservation
- III. Modélisation des interactions fondamentales et prédictions
- IV. Interactions faibles
- V. Interactions électrofaibles
- VI. Violation CP
- VII. Les oscillations des neutrinos
- VIII. Les oscillations des neutrinos: solaires et atmosphériques
- IX. Les oscillations des neutrinos: sources artificielles
- X. Les propriétés des neutrinos

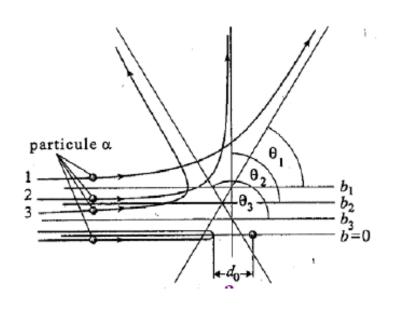
Chapitre I: Introduction et rappels

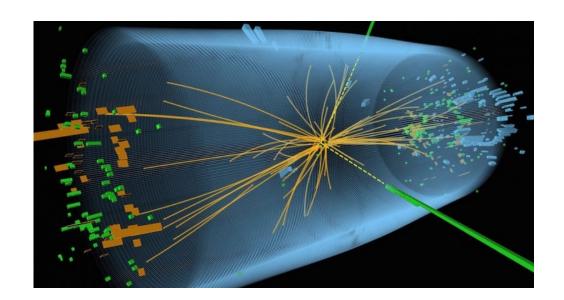
- I.1. La physique des particules élémentaires
- I.2. Particules élémentaires de matière
- I.3. Interactions fondamentales et particules messagères
- I.4 Le modèle standard

- La physique des particules élémentaires tente d'élucider les lois fondamentales de la matière en étudiant les systèmes les plus simples, les particules élémentaires, ou des systèmes constitués d'un petit nombre de particules élémentaires, les hadrons (quarks, antiquarks et gluons = partons).
- Elémentaire signifie sans structure interne dans la limite de la résolution expérimentale, c-à-d. ~ 10⁻¹⁹ m (résolution ~λ == h/p = hc/E (si m petit) et E = 13 TeV, au LHC). Les particules élémentaires sont donc actuellement considérées comme des objets ponctuels, sans dimensions spatiales, avec un certain nombre de propriétés intrinsèques telles que : la masse, le spin, la charge électrique, la charge de couleur, ...

Les informations concernant les propriétés des particules élémentaires sont obtenues essentiellement en observant:

☐ Leurs diffusions/interactions:





Les informations concernant les propriétés des particules élémentaires sont

obtenues essentiellement en observant:

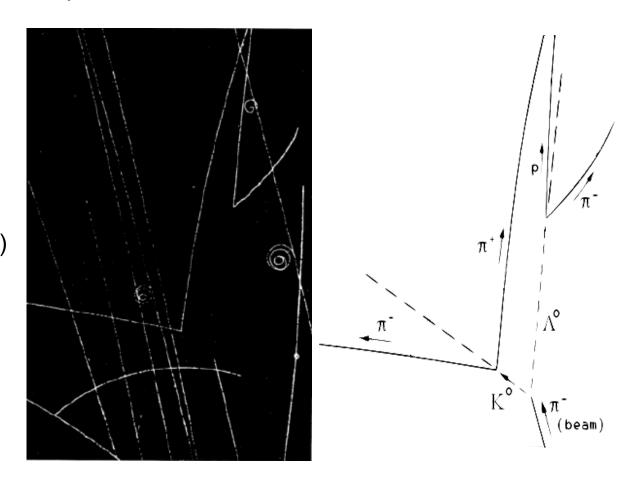
- □ Leurs diffusions/interactions
- ☐ Leurs désintégrations:

Ici : faisceau de π^- de p=1.2 GeV/c (v=0.99331 c) interagit avec un proton cible : π^- p \to K⁰ Λ^0 et K⁰ \to $\pi^+\pi^-$

$$\Lambda^{0} \to p \pi^{-}$$

$$m_{\Lambda^{\circ}}^{2} = M_{\text{inv}}^{2} (\pi^{-}, p) = (E_{\pi^{-}} + E_{p})^{2} - (\bar{p}_{\pi^{-}} + \bar{p}_{p})^{2}$$

$$m_{K^{\circ}}^{2} = M_{\text{inv}}^{2} (\pi^{-}, \pi^{+}) = (E_{\pi^{-}} + E_{\pi^{+}})^{2} - (\bar{p}_{\pi^{-}} + \bar{p}_{\pi^{+}})^{2}$$



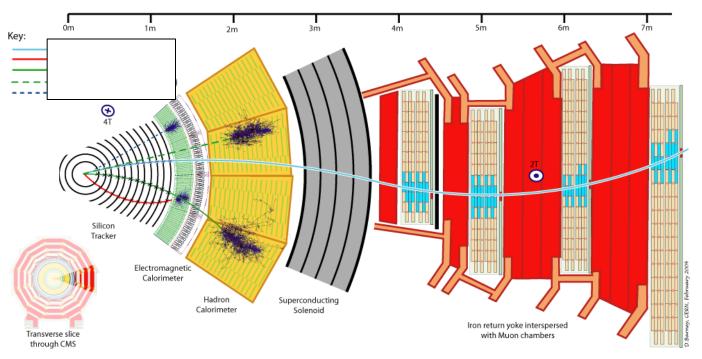
- Les informations concernant les propriétés des particules élémentaires sont obtenues essentiellement en observant:
 - □ Leurs diffusions/interactions
 - □ Leurs désintégrations
 - □ Et quelques états liés tels que les atomes d'antimatière (\overline{p} e⁺) et le positronium (e⁻ e⁺)

■ Les particules étudiées sont produites par:

- □ Des accélérateurs (e⁻, p, ions)
- \square Des faisceaux secondaires (e⁺, π [±], K [±], \overline{p} , ν , ...)
- □ Des collisionneurs (pp, pp, e⁺ e⁻, e[±] p, Pb⁺Pb⁺)
- \square Des réacteurs nucléaires (n et ν)
- \Box Le rayonnement cosmique (μ^{\pm} , ν , γ)
- ☐ (Les sources radioactives)

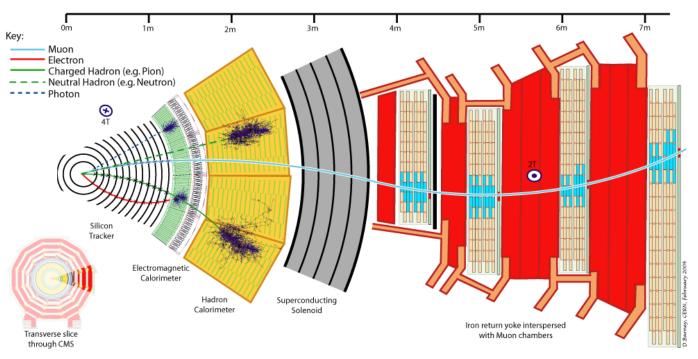
Les particules produites ne peuvent être observées directement; elles sont beaucoup trop petites. Elles le sont par l'intermédiaire de détecteurs de particules qui utilisent les interactions des particules avec la matière pour les détecter, mesurer leurs propriétés et si possible les identifier.

Un secteur (1/8) du détecteur CMS au LHC (CERN)



Les particules produites ne peuvent être observées directement; elles sont beaucoup trop petites. Elles le sont par l'intermédiaire de détecteurs de particules qui utilisent les interactions des particules avec la matière pour les détecter, mesurer leurs propriétés et si possible les identifier.

Un secteur (1/8) du détecteur CMS au LHC (CERN)

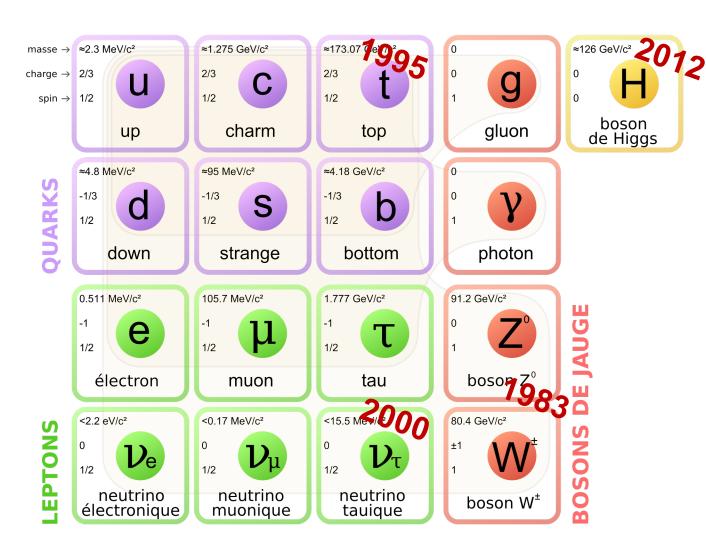


Les particules élémentaires:

A chaque particule de matière est associée son antiparticule, de même masse, de même temps de vie, de même spin. Par contre, les autres nombres quantiques sont inversés

Boson scalaire de Brout, Englert et Higgs

Graviton?



Nombres quantiques des leptons:

Q_e : charge électrique

L_i: # leptonique

B:#baryonique

Opposés pour les antileptons

| Lepton | Q _e | L _e | L _µ | $oldsymbol{L}_{	au}$ | $ \mathcal{B} $ |
|------------|----------------|----------------|----------------|----------------------|-----------------|
| électron | -1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| $ u_{e}$ | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| muon | -1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| $ u_{\mu}$ | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| tau | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| $ u_{	au}$ | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |



Nombres quantiques des quarks:

Convention:

la saveur d'un quark, S (étrangeté), C (charme), B (beauté) ou T (top) et l3 (composante de l'axe 3 de l'isospin), ont le même signe que sa charge Q

Opposés pour les antiquarks

| Quark | Q _e | L _i | B | S | С | В | Т | I ₃ |
|---------|----------------|----------------|-----|----|---|----|---|----------------|
| up | 2/3 | 0 | 1/3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1/2 |
| down | -1/3 | 0 | 1/3 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1/2 |
| charmé | 2/3 | 0 | 1/3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| étrange | -1/3 | 0 | 1/3 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| top | 2/3 | 0 | 1/3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| beau | -1/3 | 0 | 1/3 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 |

Les hadrons:

Les quarks sont confinés par l'IF dans des systèmes liés, singulets de couleur, les hadrons. Il existe 3 charges de couleur pour les quarks et l'anti-couleur correspondante pour les antiquarks (cf. ± pour Qe). L'IF est attractive entre couleurs ou anti-couleurs différentes, entre une couleur et une anti-couleur. Les systèmes possibles sont donc:



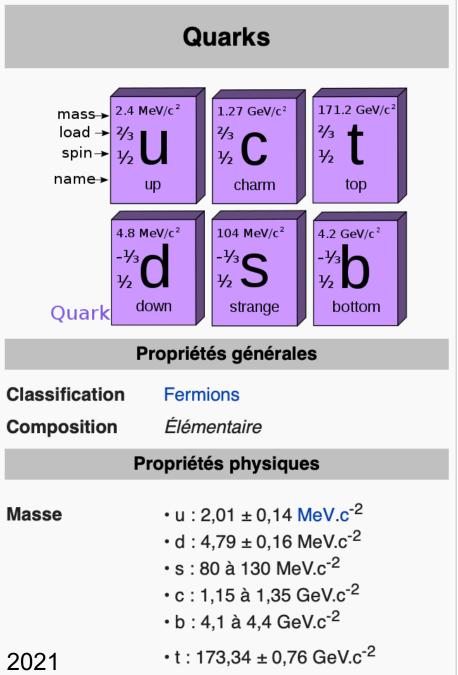
Ces 3 quarks ou ces paires quark-antiquark fixent les nombres quantiques des hadrons; ce sont les quarks de valence. Il s'y ajoute une infinité de gluons et de paires quark-antiquark de la mer.

1.2 Particules élémentaires

■ La masse des quarks:

Il est difficile de déterminer la masse ou même de définir ce que l'on entend par masse d'un quark, vu qu'il ne peut être isolé. Leur masse se détermine alors à partir de la masse mesurée des états liés qu'ils composent (hadrons), en appliquant des "modèles" de liaison des quarks dans les hadrons.

Dans le cas du top qui ne forme pas d'états liés, elle est déterminée à partir de la mesure des produits de désintégration.



Celles-ci sont classées d'après leur intensité exprimée par la **constante de couplage** α de l'interaction; c'est un nombre sans dimension qui se définit en comparant les énergies potentielles d'interaction d'une particule pour les différentes interactions.

| Interaction | Intensité | Effet |
|--------------|--|---------------------------------------|
| Forte | $\alpha_{s} \approx 1$ | Lie les q dans les nucléons. |
| Electromagn. | $\alpha_{\rm em} = \frac{e^2(G)}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}$ | Lie les e ⁻ aux Noyaux. |
| Faible | $\alpha_{\rm f} \approx 10^{-5}$ | Pas de syst. liés désintégrations |
| Gravitation. | $\alpha_{\rm g} \approx 10^{-38}$ | Lie les objets de grande masse |

■ Remarque sur les unités:

La constante $\alpha_{\text{\'em}}$ est sans dimension et vaut ~1/137 quel que soit le système d'unités choisi. Par contre, son expression en fonction de la charge dépend de ce choix, qui lui-même varie d'un auteur à l'autre.

SI:
$$\alpha_{\text{\'em}} = \frac{e_{Clb}^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c}$$
 e s'exprime en Coulomb

Unités naturelles :
$$c = \hbar = \varepsilon_0 = \mu_0 = 1$$
 $\alpha_{\rm \acute{e}m} = \frac{e^2}{4\pi}$ (Thomson)

Unités gaussiennes:
$$\alpha_{\text{\'em}} = \frac{e_G^2}{\hbar c}$$
 avec $e_{Clb} = e_G \sqrt{4\pi\varepsilon_0}$ (Griffith)

□ Unités naturelles : formules sont simples, mais cela implique:

c=1 -> même unités pour les distances et le temps

 \hbar =1 -> inverse de l'unité d'énergie pour les distances et le temps ($\sim \lambda$ = h/p = hc/E (si m petit))

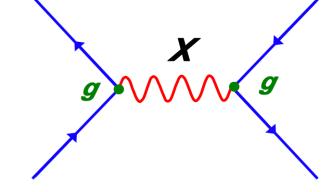
□ SI:

$$c = 299792458 \text{ m/s}$$

$$h = 6.582...10^{-22} \text{MeVs}$$

$$\hbar c = 197.3...MeV \text{ fm}$$

■ Les particules messagères:



Le Modèle Standard de la physique des particules (MS) décrit 3 des forces fondamentales : Iém, I.f. et I.F. par des théories basées sur les mêmes concepts. Notamment, elles sont toutes trois construites suivant un mécanisme d'échange de particules messagères ou bosons intermédiaires, des particules de spin 1.

Ces bosons transmettent quantité de mouvement et nombres quantiques entre les particules qui interagissent. Le principe d'incertitude d'Heisenberg autorise une non conservation de l'énergie durant le temps très court de l'interaction. Le boson est alors dit "virtuel"

(MS = théorie quantique des champs, invariance de jauge locale, groupe de symétrie SU(3)xSU(2)xU(1))

■ Les particules messagères:

| oo particulo | 0 111000 | 490. | 00. | | | | |
|-------------------|-----------------------|------|-----------------|---------------|-----------------------|---------------------|--------------|
| | | | Inter | action | ıs | | |
| Nom | Intensité relative | | icules ssant | Portée (m) | Quanta du Champ | Domaine d'action | Charge |
| Forte | 1 | | | | , | | ' |
| Electromagnétique | 10-2 | | | | | | |
| Faible | 10-5 | | | | | | |
| Gravitationnelle | 10-39 | | | | | 11003 110113 | |
| articipation | | | Int. FO | ORTES | Int. EN | AI. | Int. faibles |
| EPTONS : | NEUTRI | NOS | | | | | |

| participation | | Int. FORTES | Int. EM | Int. faibles |
|---------------|-----------|-------------|---------|--------------|
| LEPTONS | NEUTRINOS | | | |
| | Chargés | | | |
| HADRONS | BARYONS | | | |
| | MESONS | | | |

■ Les particules messagères:

| ٦ | г | | | | | | |
|---|--------------|----|----|----|----|----|----|
| 1 | \mathbf{n} | te | ra | C1 | 10 | 71 | ns |

| | Intensité | Particules | | Quanta | Domaine | |
|-------------------|------------|----------------|------------|----------|--------------------|------------|
| Nom | relative | subissant | Portée | du | d'action | Charge |
| | | | (m) | Champ | | |
| | | Quarks | | | Baryons, Mésons | |
| Forte | 1 | Hadrons | 10^{-15} | 8 Gluons | Nucléons | Couleur |
| | | | | | Etoiles à Neutrons | |
| | | Particules | | | Atomes | Charge |
| Electromagnétique | 10^{-2} | électriquement | Infinie | Photon | Optique | électrique |
| | | chargées | | | Electricité | |
| | | Electrons | | W^+ | Bêta | Charge |
| Faible | 10-5 | Neutrinos | 10^{-18} | Z^0 | Mésons π | faible |
| | | Quarks | | W^- | Muons | |
| Gravitationnelle | 10^{-39} | Tout | Infinie | Graviton | Orbites | Masse |
| | | | | ??? | Trous Noirs | |

| participation | | Int. FORTES | Int. EM | Int. faibles |
|---------------|-----------|-------------|------------------|--------------|
| LEPTONS | NEUTRINOS | NON | NON | OUI |
| | Chargés | NON | OUI | OUI |
| HADRONS | BARYONS | OUI | Si chargés : OUI | OUI |
| | MESONS | OUI | Si chargés : OUI | OUI |

[⇒]Les neutrinos (ν) ne subissent que l'interaction faible.

■ La portée des forces:

Peut être estimée en faisant appel au principe d'incertitude d'Heisenberg.

Considérons le vertex élémentaire auquel le boson intermédiaire X est émis et plaçonsnous dans le SCM de la particule a qui émet le boson; la conservation de l'énergie est violée de:

$$\Delta E = \sqrt{m_b^2 + p^2} + \sqrt{m_X^2 + (-p)^2} - m_a$$

$$\Delta E_{min} = m_b + m_X - m_a \qquad (p=0)$$

Cette violation du principe de conservation de l'énergie peut se produire seulement si $|\Delta E_{min}|$ est alors de l'ordre de l'incertitude sur ΔE , c'est-à-dire si la durée de la violation est: $\Delta t < \hbar/|\Delta E_{min}|$

21

Si on fait l'hypothèse que la vitesse de propagation de X d'un vertex à l'autre est maximum, c'-à-d la vitesse de la lumière, c:

$$\Delta r < c\Delta t < \hbar c/\Delta E_{min}$$

Pour l'I_{ém}, $m_a = m_b$ et $m_x = 0$ \rightarrow portée infinie.

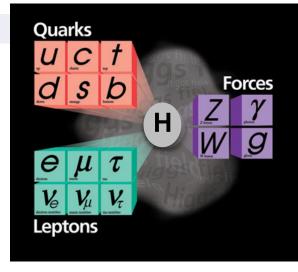
Pour l'If, sauf si le top est impliqué, $|m_a - m_b| \ll m_X \sim 80 - 90 \text{ GeV/c}^2$

$$\rightarrow \Delta E_{min} \sim m_X \text{ et}$$
:

$$\Delta r < \hbar c/m_X \simeq \frac{197 \, MeV.fm}{90 \, x \, 10^3 \, MeV} = 2 \, x \, 10^{-3} \, fm$$
 Cf slide 20

Le Lagrangien du MS : $L_{MS} = L_{Cinétique} + L_{BEH} + L_{Yukawa}$

Importance des symétries L invariant sous $G = U(1)_Y \times SU(2)_L \times SU(3)_C$



L_{Cinétique}: Fermions + bosons de jauge + interactions

L_{BEH}: Le champs et potentiel scalaire

Mécanisme de brisure de BEH

après brisure : Les bosons Z, W sont massifs

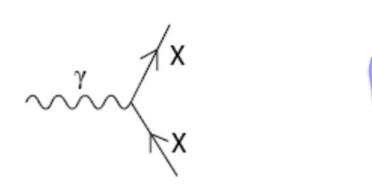
Le boson H apparaît

L_{Yukawa}: Interaction du champ scalaire avec les fermions

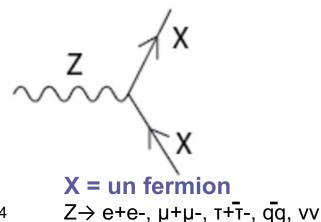
après brisure : Les masses des fermions

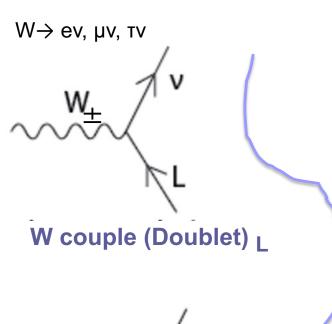
The particle drawings are simple artistic representations

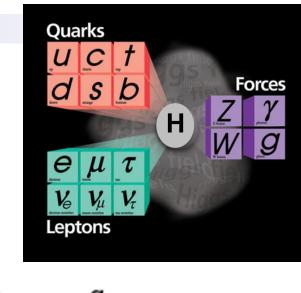
L_{Cinétique}: Interaction entre fermions et bosons de jauge $G = U(1)_Y \times SU(2)_L \times SU(3)_C$

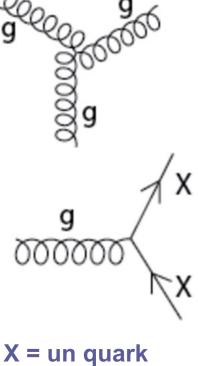


X = particule chargée



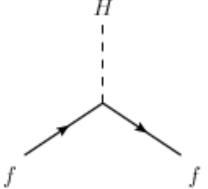


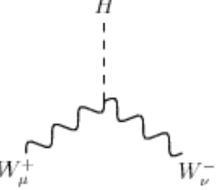




Interactions du boson H avec les fermions et les bosons de jauge







Fermions : g_f ≈ m_f / v

W/Z boson : $g_v \approx m_v^2 / v$

Couplage dépend de la masse v = 246 GeV

 \rightarrow pas de couplage direct entre H et γ et entre H et g

Quarks

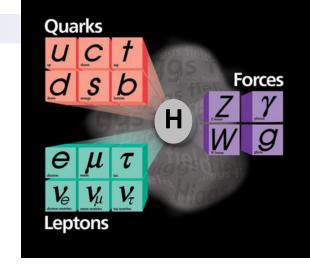
Leptons

Forces

H

Le nombre de paramètres libres du MS :

- 9 masses des fermions (+ 3 m_v)
- 1 masse du Z : $m_Z = 91.1876(21)$ GeV
- 1 masse du H: m_H
- 1 constante de couplage éléctromagnétique : α
- 1 constante de couplage forte : α_s
- 1 constante de couplage faible : $G_F = 1.16637(1) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$
- 3 angles de mélange CKM + 1 phase (+ 3+1 for m_v ≠ 0)
- 1 angle Theta QCD
- → 19 paramètres libres (+ 7 for m_v ≠ 0)



Attention: particule élémentaire ne veut pas dire particules stable ! La plupart des particules élémentaires sont instables

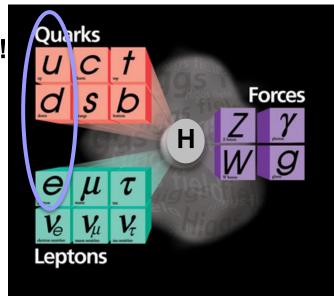
Particules de matière :

Molécules, atomes

protons et neutrons + nuage d'électrons

p, n : composés de partons : q, g

→ notre monde stable : q (u,d), e



+ Les anti-particules

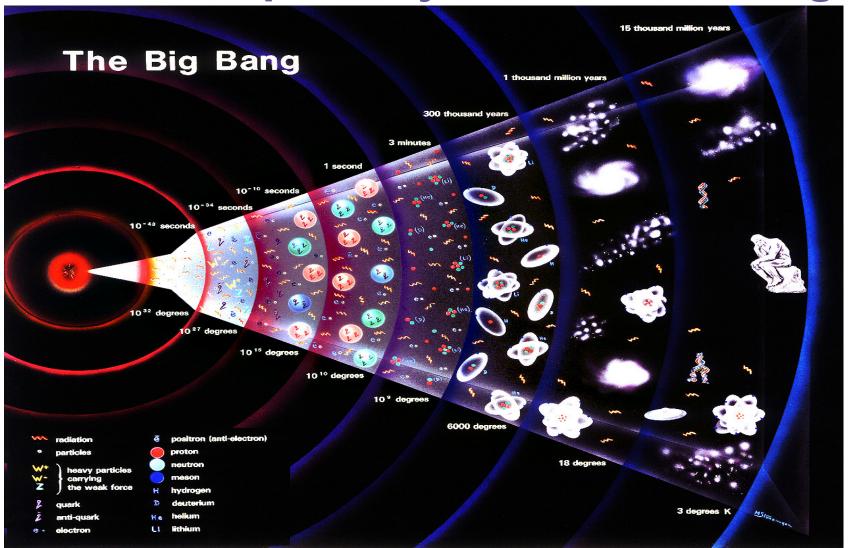
Les autres particules :

- Créées en laboratoire (accélérateur de particules)

Lien
avec l'astroparticules,
la cosmologie

- Produites naturellement (interactions de rayons cosmiques dans l'atmosphère), ...
- Produites aux premiers instants de l'Univers

L'infiniment petit rejoint l'infiniment grand



L'infiniment petit rejoint l'infiniment grand

