




















# Classification des Particules



Avant d'aller plus loin sur les symétries et lois de conservation, il faut introduire les nombres quantiques qui interviennent dans la classification des particules.

## Les 3 familles de fermions élémentaires : leptons et quarks

- **Elémentaire** ↔ pas de structure interne connue
- 6 saveurs de leptons et 6 saveurs de quarks

FERMIONS	LEPTONS		QUARKS	
1 <sup>ère</sup> famille (matière stable)	 électron	 neutrino électron	 bas (down)	 haut (up)
2 <sup>ème</sup> famille	 muon	 neutrino muon	 étrange (strange)	 charme (charm)
3 <sup>ème</sup> famille	 tau	 neutrino tau	 beauté (beauty)	 sommet (top)
BOSONS Messagers des Forces	 photon	   bosons vecteurs	 8 gluons	 graviton ?
ANTIMATIÈRE	Une antiparticule pour chaque fermion 			

## Aux particules il faut ajouter leurs antiparticules.

La physique des particules ne peut être correctement décrite que dans le cadre de la **théorie quantique des champs**, qui combine mécanique quantique et théorie de la relativité restreinte → **sort du cadre de ce cours mais on peut en déduire quelques résultats**

Par la résolution de l'équation de Dirac (équation quantique et relativiste), on obtient des solutions d'énergie négative qui correspondent aux antiparticules.  
Ainsi, la mécanique quantique relativiste explique l'existence des antiparticules.

En fait, lors du passage d'une particule à son antiparticule, ce sont tous les **nombres quantiques additifs** ( $Q/e$ ,  $T_3$ , ...) qui **changent de signe** (la parité intrinsèque  $\pi$  ne change de signe que pour les fermions et pas pour les bosons).

C'est l'opération de symétrie  $C$  qui, partant d'un système donné, en construit un autre dans lequel toutes les particules sont remplacées par leurs antiparticules.

## Les leptons chargés

On distingue 3 familles de leptons chargés, de charge  $Q/e = -1$

L'électron	$e^-$	$m_e c^2 = 0,511 \text{ MeV}$	1 <sup>ère</sup> famille
Le muon	$\mu^-$	$m_e c^2 = 105,66 \text{ MeV}$	2 <sup>ème</sup> famille
Le tau	$\tau^-$	$m_e c^2 = 1776,82 \text{ MeV}$	3 <sup>ème</sup> famille

Ce sont des fermions élémentaires de la matière, de spin  $\vec{s} = \frac{1}{2}$  et de parité intrinsèque  $\pi = +1$

Leurs antiparticules sont  $e^+$ ,  $\mu^+$  et  $\tau^+$  de charge  $Q/e = +1$

L'électron est stable, le muon et le tau sont instables, avec les durées de vie respectives  $\tau_\mu = 2,197 \cdot 10^{-6} \text{ s}$  et  $\tau_\tau = 290,3 \cdot 10^{-15} \text{ s}$

Les leptons chargés sont des particules

- qui ne subissent pas l'interaction forte,
- qui subissent les interactions électromagnétique et faible

## Les leptons neutres

On distingue 3 familles de leptons neutres, de charge  $Q/e = 0$ , de masse  $\sim 0$ , qui sont les **neutrinos**

Le neutrino électron	$\nu_e$	1 <sup>ère</sup> famille
Le neutrino muon	$\nu_\mu$	2 <sup>ème</sup> famille
Le neutrino tau	$\nu_\tau$	3 <sup>ème</sup> famille

$\Sigma m_\nu < 0,12 \text{ eV}$  à 95% *CL* (N. Palanque-Delabrouille et al 2015 JCAP 11 011)

Ce sont des **fermions élémentaires** de la matière, de spin  $\vec{s} = \frac{1}{2}$  et de parité intrinsèque  $\pi = +1$

Leurs antiparticules, appelées antineutrinos, sont  $\bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau$  de charge  $Q/e = 0$

On ne sait pas si les (anti)neutrinos sont stables (des phénomènes d'oscillations ont été observés expérimentalement)

### Les leptons neutres

Les neutrinos sont des particules

- qui ne subissent ni l'interaction forte, ni l'interaction électromagnétique
- qui subissent seulement l'interaction faible

Cette propriété est intéressante pour l'étude de l'interaction faible. En effet, toute réaction incluant des neutrinos ne peut se produire que par interaction faible.

## Les nombres leptoniques

### Historique

Les muons ont été observés pour la première fois en 1938 dans le rayonnement cosmique, dans les désintégrations de pions

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

On note que les muons sont émis avec le neutrino associé  $\nu_\mu$  (qui apparaît comme de l'énergie manquante). La forme du spectre en énergie des électrons émis dans la réaction  $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$  a montré qu'il y avait 2 types de neutrinos  $\nu_\mu$  et  $\nu_e$ . Confirmation expérimentale du  $\nu_\mu$  en 1962 à l'AGS au BNL.

On a constaté d'autre part que :

$\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n$  est observé expérimentalement

$\nu_\mu + p \rightarrow e^+ + n$  n'est pas observé

$\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$  n'est pas observé

On en a conclu que les couples  $(\nu_e, e)$  et  $(\nu_\mu, \mu)$  se conservaient isolément. Il en va de même du couple  $(\nu_\tau, \tau)$  associé à la 3<sup>ème</sup> famille.



Les nombres leptoniques

Introduction d'un nouveau nombre quantique, le nombre leptonique L global, pour traduire ces résultats expérimentaux.

Le nombre leptonique global L est conservé dans toutes les interactions

$$L = L_e + L_\mu + L_\tau$$

où  $L_e, L_\mu$  et  $L_\tau$  sont les nombres leptoniques de saveur (flavour)

	$e^-$	$\nu_e$	$e^+$	$\overline{\nu_e}$	$\mu^-$	$\nu_\mu$	$\mu^+$	$\overline{\nu_\mu}$	$\tau^-$	$\nu_\tau$	$\tau^+$	$\overline{\nu_\tau}$
$L_e$	1	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
$L_\mu$	0	0	0	0	1	1	-1	-1	0	0	0	0
$L_\tau$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	-1	-1

et  $L_e, L_\mu$  et  $L_\tau$  sont nuls pour toutes les autres particules

Le nombre leptonique global L est un nombre quantique additif, conservé dans toutes les interactions. Les nombres leptoniques de saveur  $L_e, L_\mu$  et  $L_\tau$  peuvent ne pas être conservés (oscillations de neutrinos).

Exemple :  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$      $L = 0 \rightarrow (L_{\mu^+} = -1) + (L_{\nu_\mu} = +1)$  conservation du nombre de lepton et aussi conservation de  $L_\mu$

$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$      $L = 1 \rightarrow 1 + 1 - 1 = 1$  conservation du nombre de leptons  
 $L_\mu = 1 \rightarrow (L_e = 1 - 1) + (L_\mu = +1) \equiv L_\mu = +1$  conservation du nombre leptonique de muons

## Introduction du concept d'isospin

### Le cas du nucléon

Historiquement, le fait que les masses du proton et du neutron, les deux constituants du noyau atomique, étaient très proche, a conduit à postuler que c'était deux états d'une même particule : le nucléon. Par analogie avec le spin de l'électron, on va donc définir une nouvelle quantité : l'isospin des nucléons.

**Concept d'isospin** : les nucléons existent sous deux états de charge

Proton	$Q/e = +1$	$T_3 = +1/2$
Neutron	$Q/e = 0$	$T_3 = -1/2$

où  $T_3$  est la troisième composante du **nombre quantique d'isospin**  $\vec{T}$

La charge du nucléon apparaît comme une observable,  $Q/e$ , qui possède deux valeurs propres, 1 et 0

→ ceci correspond aux deux états d'isospin du nucléon

Pour un nucléon :  $Q/e = T_3 + 1/2$

On définit les opérateurs vectoriels d'isospin qui agissent dans l'iso-espace. C'est un espace abstrait, défini tel que le hamiltonien d'interaction forte soit invariant dans toutes les rotations de cet iso-espace.

Les matrices d'isospin  $\tau_i$  sont analogues aux matrices de Pauli  $\sigma_i$

$$\tau_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \tau_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad \tau_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad \tau^2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Et les relations de commutation sont :

$$[\tau_i, \tau_j] = 2i\tau_k$$

$$[\tau^2, \tau_i] = 0$$

On exprime de façon mathématique l'indépendance de charge des forces nucléaires en disant que le hamiltonien d'interaction forte commute avec l'isospin total.

Soit un état pur d'isospin  $|T, T_3 >$

$$\widehat{T}^2 |T, T_3 > = T(T + 1) |T, T_3 >$$

$$\widehat{T}_3 |T, T_3 > = T_3 |T, T_3 >$$

$$\widehat{T}_{\pm} |T, T_3 > = \sqrt{T \mp T_3 (T \pm T_3 + 1)} |T, T_3 \pm 1 >$$

L'isospin  $\vec{T}$  a pour composantes  $(T_1, T_2, T_3)$  dans l'isoespace.  
Seule la composante  $T_3$  est utilisée.

L'isospin  $\vec{T}$  est associé à la fonction d'onde d'isospin  $\theta_{\tau}(\vec{T})$

La fonction d'onde du nucléon s'écrit donc finalement :

$$\Psi(\vec{r}, \vec{s}, \vec{T}) = \Phi(\vec{r}) \cdot \chi_{\sigma}(\vec{s}) \cdot \theta_{\tau}(\vec{T}) = (\text{espace}) \times (\text{spin}) \times (\text{isospin})$$

## Les trois familles de quarks (6 saveurs)

Les quarks de charge  $Q/e = 2/3$

On distingue 3 familles de quarks de charge  $Q/e = 2/3$

Le quark Up	$u$	$m_u c^2 = 2,2_{-0,4}^{+0,5} \text{ MeV}$	1 <sup>ère</sup> famille
Le quark Charm	$c$	$m_c c^2 = 1,275_{-0,035}^{+0,025} \text{ GeV}$	2 <sup>ème</sup> famille
Le quark Top	$t$	$m_t c^2 = 173,0 \pm 0,4 \text{ GeV}$	3 <sup>ème</sup> famille

PDG 2018

Leurs antiquarks correspondants ont une charge  $Q/e = -2/3$

- Le quark  $u$  porte un nombre quantique d'isospin  $\vec{T}(u) = \frac{\vec{1}}{2}$  avec  $T_3(u) = \frac{1}{2}$  (l'antiquark  $\bar{u}$  a  $\vec{T}(\bar{u}) = \frac{\vec{1}}{2}$  avec  $T_3(\bar{u}) = -\frac{1}{2}$ )
- Le quark  $c$  (resp. l'antiquark  $\bar{c}$ ) porte un nombre quantique de saveur, le charme  $c = 1$  (resp.  $c = -1$ ) (avec  $c = 0$  pour les autres particules)
- Le quark  $t$  (resp. l'antiquark  $\bar{t}$ ) porte un nombre quantique de saveur, qui vaut  $t = 1$  (resp.  $t = -1$ ) (avec  $t = 0$  pour les autres particules)

## Trois familles de quarks (6 saveurs)

Les quarks de charge  $Q/e = -1/3$

On distingue 3 familles de quarks de charge  $Q/e = -1/3$

Le quark Down	$d$	$m_d c^2 = 4,7_{-0,3}^{+0,5} \text{ MeV}$	1 <sup>ère</sup> famille
Le quark Strange	$s$	$m_s c^2 = 95_{-3}^{+9} \text{ MeV}$	2 <sup>ème</sup> famille
Le quark Bottom (Beauty)	$b$	$m_b c^2 = 4,18_{-0,03}^{+0,04} \text{ GeV}$	3 <sup>ème</sup> famille

PDG 2018

Leurs antiquarks correspondants ont une charge  $Q/e = +1/3$

• Le quark  $d$  porte un nombre quantique d'isospin  $\vec{T}(d) = \frac{\vec{1}}{2}$  avec  $T_3(d) = -\frac{1}{2}$  (l'antiquark  $\bar{d}$  a  $\vec{T}(\bar{d}) = \frac{\vec{1}}{2}$  avec  $T_3(\bar{d}) = +\frac{1}{2}$ )

• Le quark  $s$  (resp. l'antiquark  $\bar{s}$ ) porte un nombre quantique de saveur, l'étrangeté  $s = -1$  (resp.  $s = +1$ ) (avec  $s = 0$  pour les autres particules)

• Le quark  $b$  (resp. l'antiquark  $\bar{b}$ ) porte un nombre quantique de saveur, qui vaut  $b = -1$  (resp.  $b = +1$ ) (avec  $b = 0$  pour les autres particules)

Le quark  $b$  est aussi appelé quark beau et la saveur  $b$  la beauté...

## Les hadrons

### Quelques caractéristiques des quarks

Ce sont des **fermions élémentaires** de la matière, de spin  $\vec{s} = \frac{1}{2}$  et de parité intrinsèque  $\pi = +1$ .

Les quarks sont des particules **qui subissent les trois interactions forte, électromagnétique et faible**

Les quarks n'apparaissent pas à l'état libre : **on ne connaît que des particules de charge électrique entière dans la nature.**

⇒ Les quarks et antiquarks sont confinés dans les hadrons

⇒ Les hadrons sont des structures composites, formés de plusieurs quarks et/ou antiquarks, dont les nombres quantiques internes s'ajoutent pour former les nombres quantiques du hadron

Il existe un autre nombre quantique interne porté par les quarks, fractionnaire comme la charge électrique, c'est le **nombre baryonique**, qui vaut

$B = +1/3$  pour les quarks       $B = -1/3$  pour les antiquarks

$B = 0$  pour toutes les autres constituants élémentaires



Enfin, les quarks portent un autre nombre quantique interne, la charge de couleur, qui peut prendre trois valeurs différentes :

rouge, vert, bleu pour les quarks

antirouge, antivert, antibleu pour les antiquarks.

avec les propriétés suivantes :

rouge	}	= blanc	rouge + antirouge	= blanc
+ vert			vert + antivert	= blanc
+ bleu			bleu + antibleu	= blanc

Cette propriété permet elle aussi d'expliquer pourquoi les quarks et les antiquarks n'apparaissent pas à l'état libre : on ne connaît que des particules de couleur « blanche » dans la nature.

⇒ Les quarks et antiquarks sont donc confinés dans les hadrons

## Quelques remarques supplémentaires sur la notion de couleur

Nous verrons comment le nombre quantique de couleur a été introduit en étudiant le modèle des quarks pour former les hadrons.

La couleur n'a évidemment rien de commun avec la couleur que nous connaissons dans la vie courante.

Les mots **couleur, rouge, vert, bleu** ou **blanc** font ici référence à des notions mathématiques complexes et sont utilisés uniquement par analogie à la décomposition de la lumière visible en trois couleurs primaires.

## Classification des hadrons et caractéristiques

Les **mésons** sont des systèmes quark-antiquark  $q_1 \bar{q}_2$   
(pour lesquels on peut avoir 1 et 2 identiques dans certains cas)

Les mésons sont des **bosons (spin entier)**. Les mésons  $\pi$ ,  $K$  et  $\eta$  se désintègrent par interaction faible, les autres sont des résonances.

Pour un méson, on ne peut dire qui est la particule et qui est l'antiparticule.

Le nombre baryonique d'un méson vaut  $B = +1/3 - 1/3 = 0$

## Classification des hadrons et caractéristiques

Les baryons sont des systèmes de trois quarks  $q_1 q_2 q_3$  (pour lesquels on peut avoir 1, 2 et 3 identiques).

Les baryons sont des fermions (spin demi-entier).

Le nucléon N est le plus léger baryon.

Les hypérons (baryons avec au moins un quark s :  $\Lambda^0$ ,  $\Sigma$ ,  $\Xi$  et  $\Omega$ ), plus lourds que N, se désintègrent par interaction faible. Il existe un grand nombre de résonances baryoniques.

Les baryons sont des particules, il existe les antibaryons, qui sont des antiparticules, composées des trois antiquarks associés.

Le nombre baryonique d'un baryon vaut  $B = +1/3 + 1/3 + 1/3 = +1$

Le nombre baryonique d'un antibaryon est  $B = -1/3 - 1/3 - 1/3 = -1$ .

	1 <sup>er</sup> famille		2 <sup>ème</sup> famille		3 <sup>ème</sup> famille	
Nom	u (up)	d (down)	c (charm)	s (strange)	t (top)	b (bottom ou beauty)
Masse (MeV/c <sup>2</sup> )	2,3	4,8	1275	95	173210	4180
Charge (unité de e)	+ 2/3	- 1/3	+ 2/3	- 1/3	+ 2/3	- 1/3
Spin	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
Nombre baryonique	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
Isospin T <sub>3</sub>	+ 1/2	- 1/2	0	0	0	0
Charme	0	0	+ 1	0	0	0
Etrangeté	0	0	0	- 1	0	0
Top	0	0	0	0	+ 1	0
Beauté	0	0	0	0	0	- 1

## Arbre généalogique de la famille !

Particules

Insensible à  
l'interaction forte

Leptons

$e^{-}, \nu_e$

$\mu^{-}, \nu_{\mu}$

$\tau^{-}, \nu_{\tau}$

Sensible à  
l'interaction forte.  
Composés de quarks.

Hadrons

Mésons

Quarks + antiquarks

Ex :  $\pi$ , K,  $\Phi$ , ....

Baryons

3 quarks ou 3 antiquarks

Ex : p, n,  $\Lambda_0$ ,  $\Sigma$ , ...

p et n sont les nucléons

