Cours de Physique Des Particules Elémentaires

1. Notions de Bases

Introduction : C’est l’étude des composants ultimes de la matière et leurs interactions.
Il existe plusieurs façon de classer les particules élémentaires, commençons par les classer selon leurs masses.
Les Leptons : Les trois familles de leptons connues sont :

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}.$$

Ils sont nommés de la sorte à cause de leur masse relativement faible ce qui les rends difficile à détecter, et qui ont les propriétés suivantes

1- Ce sont des particules qui n’interagissent pas fortement (Int faible ou int E.M)
2- Les trois particules suivantes (e^-, μ^-, τ^-) sont l’électron, le muon et le taon qui sont toutes les trois des particules chargées.
3- Ils sont regroupés en doublets par rapport à leur charge faible (Isospin).
4- Ce sont des fermions donc ils obéissent à la statistique de fermi-Dirac.

Les Hadrons : Ce sont des particules lourdes et qui ont les propriétés suivantes :
1- Ils interagissent fortement.

2- Ils portent des charges électriques entières.
3- Ils ont des interactions faibles.
4- Ils sont formés de quarks.

On peut les classer en deux groupes :

a- Les mésons : qui sont des particules scalaires, un exemple de mésons connus sont : le méson $\pi \rightarrow \pi^{+}, \pi^{0}, \pi^{-}$ et le méson $K \rightarrow K^{+}, K^{0}, K^{-}$.

b- Les Baryons : Qui sont des fermions, et les baryons connus sont les nucléons (proton, neutron) et les hypérons Λ, Σ, Ω etc.

Le Photon : Le photon est de masse nulle et de spin égal à 1 donc c'est un boson.

Bosons de jauge $W^{\pm}, Z$ ***:*** Sont des bosons massifs.

Le Graviton : Particule hypothétique de masse nulle et de spin égal à 2.

- Ces cinq classes de particules constituent ensemble des particules appelés particules fondamentales.
- Les particules fondamentales sont les particules avec une durée de vie supérieur à 10(-16)s
- Expérimentalement Il existe des particules dont la durée de vie est inférieur à 10(-20)s, ce qu' on appelle résonances.

Les types d'interactions :

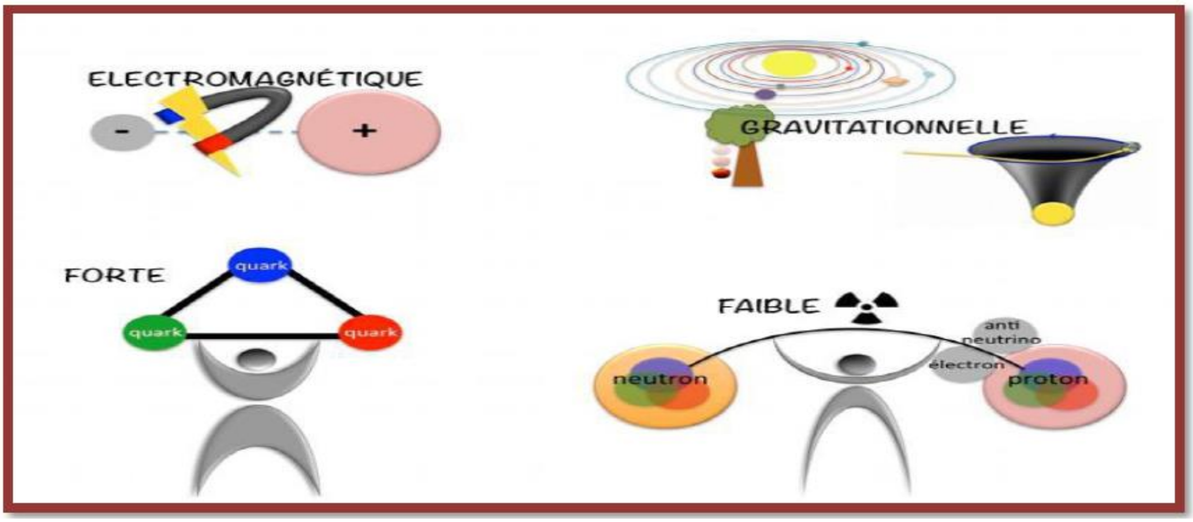
L'interaction Electromagnétique : Lors d'une interaction EM c'est un photon qui est échangé seulement ce dernier ne peut être mis en évidence car il est virtuel.

L'interaction Forte : Dans les Hadrons, les quarks échangent des gluons, sans masse, de spin unité.

L'interaction Faible : Lors d'une interaction faible à courant chargé c'est un boson W qui est échangé; et dans le cas d'un courant neutre c'est le Z qui intervient

La Gravitation : On suppose que les systèmes échangent des gravitons, bosons sans masse, de spin probablement égal à 2.

	gravitation	WI	EM	strong
Champ application	Mec céleste	Dési beta	Chimie moleculaire	Noyaux des hadrons
Diagramme De Feynman				
Durée de vie	Infinie	10(-10)	10(-16)	10(-23)s



Relativité et Formalisme Quadridimensionnel : En général en RR on adopte un formalisme quadridimensionnel, tel que en espace temps le vecteur position **x** est représenté de la manière suivante :

$$x^{\mu} = \left(x^0, x^1, x^2, x^3\right) = \left(x^0, \vec{x}\right)$$

C'est la représentation contra variante du quadrivecteur x. En général on peut écrire un quadrivecteur A en fonction de ses composantes contra variante (parallèles aux vecteurs unitaires) par :

$$A = \sum_{\mu=0} A^{\mu} e_{\mu} = A^{\mu} e_{\mu}$$

Et le produit scalaire de deux quadrivecteurs est :

$$AB = A^{\mu} e_{\mu} B^{\nu} e_{\nu} = A^{\mu} B^{\nu} g_{\mu\nu}$$

où

$$g_{\mu\nu} \equiv e_{\mu} e_{\nu}$$

est le tenseur métrique.

Dans l' espace de Minkowski le tenseur métrique est :

$$g_{\mu\nu} \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Les composantes covariante (indices inférieurs) du quadrivecteur A sont les sont des projections orthogonales sur les vecteurs de base par exemple :

$$e_\mu \bullet A = A_\mu$$

Toute quantité qui a la forme :

$$a \bullet b = a^\mu b_\mu$$

Est un invariant de Lorentz.

De la même façon que pour l'espace et le temps l'énergie et l'impulsion sont aussi liées.

$$p^\mu = (E, p_x, p_y, p_z)$$

Par ailleur la grandeur de P est un invariant de Lorentz donc :

$$\begin{aligned} p^2 &= g_{\alpha\beta} p^\alpha p^\beta \\ &= (p^0)^2 - (p^1)^2 - (p^2)^2 - (p^3)^2 \\ &= E^2 - (\vec{p})^2 \\ &= m_0^2 c^2 \end{aligned}$$

Ce qui donne

$$E^2 - (\vec{p})^2 = m_0^2 c^2$$

Ce qui permet d'exprimer les relations de conservation de l'énergie et de l'impulsion. L'énergie totale d'un système est la somme

$$P^\mu = \sum_n p_n^\mu$$

Si il y a conservation avant et après:

$$P^\mu_{\text{avant}} = P^\mu_{\text{après}}$$

Pour une interaction élastique on peut écrire

$$P^i_{\text{avant}} = P^i_{\text{après}} \text{ ou } \vec{P}_{\text{avant}} = \vec{P}_{\text{après}}$$

Ce qui représente la conservation de l'impulsion totale et la conservation de l'énergie totale est

$$P^0_{\text{avant}} = P^{à}_{\text{après}}$$

Où

$$E^{\text{tot}}_{\text{avant}} = E^{\text{tot}}_{\text{aprés}}$$

Et comme le carré de l'impulsion est un invariant de Lorentz on a

$$\begin{pmatrix} P^\mu_{\text{avant}} \\ \text{Lab} \end{pmatrix}^2 = \begin{pmatrix} P^\mu_{\text{aprés}} \\ \text{Lab} \end{pmatrix}^2 = \begin{pmatrix} P^\mu_{\text{avant}} \\ \text{CM} \end{pmatrix}^2 = \begin{pmatrix} P^\mu_{\text{aprés}} \\ \text{CM} \end{pmatrix}^2$$

Et dans le repère de CM on a

$$\begin{pmatrix} P^\mu_{\text{avant}} \\ \text{CM} \end{pmatrix}^2 = \begin{pmatrix} P^0_{\text{avant}} \\ \text{CM} \end{pmatrix}^2 - \begin{pmatrix} \vec{P}_{\text{avant}} \\ \text{CM} \end{pmatrix}^2$$

$$= \begin{pmatrix} P^0_{\text{avant}} \\ \text{CM} \end{pmatrix}^2 = \begin{pmatrix} E^{\text{tot}}_{\text{avant}} \\ \text{CM} \end{pmatrix}^2$$

Notions de Physique Quantique ;

Equation de Schrödinger :

En définissant l' Hamiltonien et l'impulsion par les opérateurs différentiels suivant :

$$H = i\hbar\frac{\partial}{\partial t}$$

$$P = \left(-i\hbar\frac{\partial}{\partial x}, -i\hbar\frac{\partial}{\partial y}, -i\hbar\frac{\partial}{\partial z}\right), -i\hbar\nabla$$

Dans le langage quadridimensionnel on a

$$P^\mu = \left(i\hbar\frac{\partial}{\partial t}, -i\hbar\nabla\right) = i\hbar\frac{\partial}{\partial x_\mu}$$

Qui est souvent simplifier par

$$\partial^\mu = \frac{\partial}{\partial x_\mu}$$

Tel que $(\hbar = c = 1)$

Et l'équation de mouvement est

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi + V\psi = i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t}$$

L'Equation de Klein-Gordon

De la relation

$$p_\mu p^\mu = E^2 - \vec{p}^{\,2} = m^2$$

Et en substituant les opérateurs on obtient l'équation suivante :

$$\left(i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\right)^2\psi - (-i\hbar\nabla)^2\psi = m^2\psi$$

$$-\frac{\partial^2}{\partial t^2}\psi + \nabla^2\psi = m^2\psi$$

$$0 = -\left(-\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \nabla^2\right)\psi + m^2\psi$$

$$= (-\partial_\mu\partial^\mu - m^2)\psi$$

$$= (p^2 - m^2)\psi$$

L'Equation de Dirac :

Elle est donnée par :

$$(i\gamma_\mu\partial^\mu - m)\psi = 0$$

2. *Symétries Additives*

Les Nombres Quantiques :
L'état quantique d'une particule quelconque est définit par son énergie, son impulsion, sa masse, son spin et d'autres nombres quantiques que l'expérience a rendu nécessaire leur éxistance
Nombre Baryonique : Une particule lourdes ne se désintègre jamais en particules légères ce qui a laissé les physiciens à définir le nombre barionique pour fair la différence entre particules lourdes et autres légères :
Si

$$A \in \{\text{Baryons}\} \Rightarrow B = +1$$ par convention

p, n, Λ, Σ
Anti-Baryons

$$A \in \{\text{Anti - Baryons}\} \Rightarrow B = -1$$

$$A \notin \{\text{Baryons}\} \cup \{\text{Anti - Baryons}\} \Rightarrow B = 0$$

π, K, ρ

Par ailleurs, les constituants des hadrons. Les quarks doivent aussi porter des charges baryoniques :

$$B(\text{quark}) = \frac{1}{3} \text{ et } B(\text{anti-quark}) = -\frac{1}{3}$$

Isospin :

Si on néglige les interactions E-M (le cas des interactions fortes), on ne peut pas différencier entre un proton et un neutron et en général entre un groupe de particules qui ont la même masse, par exemple le proton et le neutron ou d’autres multiplets de particules tel que

$$\begin{pmatrix} K^+ \\ K^0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \pi^+ \\ \pi^0 \\ \pi^- \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \rho^+ \\ \rho^0 \\ \rho^- \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \Sigma^+ \\ \Sigma^0 \\ \Sigma^- \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \Delta^{++} \\ \Delta^+ \\ \Delta^0 \\ \Delta^- \end{pmatrix}$$

Donc le proton et le neutron constituent un doublet pour l’isospin ½ donc 2I+1 nombre d’état pour le nucléon

2I+1=2 donc I=1/2 tel que

$$I_+|n\rangle = |p\rangle, I_-|p\rangle = |n\rangle \text{ et } I_+|p\rangle = I_-|n\rangle = 0$$

Exemple :

$$\pi \to \pi^+, \pi^-, \pi^0 \to \text{trois états possibles du } \pi$$

$$I = 1 \leftarrow (2I+1) = 3$$

Donc on peut définir

$$\vec{I}, I_z, I_+ \text{ et } I_-$$

$$|\pi^0\rangle = |1,0\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, |\pi^+\rangle = |1,+1\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, |\pi^-\rangle = |1,-1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

où

$$I_+|\pi^-\rangle = |\pi^0\rangle, I_+|\pi^0\rangle = |\pi^+\rangle$$

Nombres Leptoniques : Expérimentalement on observe trois leptons chargés e^-, μ^- et τ^- et trois leptons neutres, les neutrinos ν_e, ν_μ et ν_τ . Selon le modèle standard on peut les regrouper en trois familles distinctes où chaque famille est formée d'un lepton chargé et de son neutrino (et de leurs antiparticules respectives). De l'expérience on définit le nombre leptonique comme suit

$A \in \{\text{Leptons}\} \Rightarrow L = +1$ par convention

$A \in \{\text{Anti-Leptons}\} \Rightarrow L = -1$

$A \notin \{\text{Leptons}\} U \{\text{Anti-Leptons}\} \Rightarrow L = 0$

Donc ona :

Leptons

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}.$$

Anti-Leptons

$$\begin{pmatrix} e^{+} \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu^{+} \\ \bar{\nu}_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau^{+} \\ \bar{\nu}_\tau \end{pmatrix}$$

Remarque : Même cette assignation n'est pas suffisante, puisque définir un seul nombre leptonique pour tous les leptons ne peut pas expliquer à lui seul l'observation suivante :

Lorsque un anti-neutrino provenant de la désintégration du pion

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

Entre en collision avec un proton, la réaction

$$\bar{\nu}_\mu + P \rightarrow n + e^{+}$$

N'est jamais observée, par ailleurs la réaction est possible dans le cas où on bombarde par des neutrinos électroniques

$$\bar{\nu}_e + P \rightarrow n + e^{+}$$

Ce qui nous oblige à assigner les nombres leptoniques suivants

	L_e	L_μ	L_τ	L
e^{-}, ν_e	+1	0	0	+1
$e^{+}, \bar{\nu}_e$	-1	0	0	-1
μ^{-}, ν_μ	0	+1	0	+1
$\mu^{+}, \bar{\nu}_\mu$	0	-1	0	-1
τ^{-}, ν_τ	0	0	+1	+1
$\tau^{+}, \bar{\nu}_\tau$	0	0	-1	-1

Etrangeté (strangeness):

Dans des études, sur les rayons cosmique, il a été trouvé que quelques particules qui ont été identifiées aux mésons K, Σ et Λ qui sont des baryons produits dans des interactions fortes (avec des sections efficace de quelques milibarnes ce qui n'est pas négligeable). Mais qui ont une durée de vie qui caractérise les interactions faibles (10^{-10} sec), ces particules sont généralement produites en paires, où le méson K est toujours associé au Σ ou Λ, ce qui constitue en fait un puzzle et ce qui a laissé suspecter d' exister un nouveau nombre quantique qui doit être associer à chaque particule.

En étudiant les réactions suivantes :

$$\pi^- + p \xrightarrow{strong} K^0 + \Lambda^0$$

Et le Λ^0 et le K^0 qui se désintègrent par : $\Lambda^0 \to \pi^- + p$ le Λ^0 est toujours produit en association avec le K^0 et plus jamais seulement avec le π^0, le Λ^0 se produit aussi en association avec le K^+ et non pas avec le K^-.

$$\pi^- + p \to K^+ + \pi^- + \Lambda^0$$

Mais non pas

$$\pi^- + p \to K^- + \pi^+ + \Lambda^0$$

Ou

$$\pi^- + p \to \pi^- + \pi^+ + \Lambda^0$$

Et la même chose pour la réaction

$$\pi^- + p \to \Sigma^+ + K^+$$

Et de même le Σ^+ et K^+ se désintègrent en :

$$\Sigma^+ \to \pi^+ + n$$

$$K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$$

Il est observé que le Σ^+ est toujours produit en association avec le K^+, mais plus jamais seulement avec le π^+.

Des réactions que nous venons de voir, on peut tout de suite conclure que pour les méson π^+ ils sont ordinaires ils ne sont pas étrange (S=0), maintenant et pour les productions associée, avec un état initial non étrange, l’étrangeté de l’état final initial non étrange, l’étrangeté de l’état final doit être nulle.

Ce qui nous ramène à déduire que :

S(K^+) et S(K^0) = 1

3. Symétries Discrètes

Conjugaison de charge C	L'échange entre matière et antimatière
La parité P	**Une réflexion de l'espace**
Renversement du temps T	**L’échange de signe du temps t**
La symétrie CP	**Combine la conjugaison de charge avec C la paritéP**

C’est le cas où le paramètre de la transformation qui ne peut prendre que des valeurs discrètes comme :
La parité P, la conjugaison de charge C, et le renversement de temps T, symétrie CP et CPT sont des symétries discrètes [14].

1 Parité :

C’est le renversement des coordonnées spatiales d’un système ($\vec{r} \rightarrow -\vec{r}$).
Cette transformation notée par P sous l’action d’une telle opération. Si P est conservée cela signifie que les lois de la physique microscopique ne font aucune différence entre la gauche et la droite, le haut et le bas, l’avant et l’arrière.

Le quadrivecteur espace-temps change de la manière suivante:

$$\begin{pmatrix} ct \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} ct \\ -x \\ -y \\ -z \end{pmatrix}$$

$\vec{r} \xrightarrow{P} -\vec{r}$ $\vec{p} = m\vec{v} \xrightarrow{P} -\vec{p} = -m\vec{v}$ $\vec{L} = \vec{r} \wedge \vec{p}$ reste inchangé

deux parité successive laissent le système inchangé

$$\vec{r} \xrightarrow{P} -\vec{r} \xrightarrow{P} \vec{r}$$

En mécanique quantique si on considère P comme un operateur

$$(P) \rightarrow (\hat{P}) \ , \ P^2\Psi = +1\Psi \ \text{Avec} \ P^2=1$$

$$\Psi(r,t) \xrightarrow{P} \Psi'(r,t) = \Psi(-r,t)$$

Si on considère la valeur propre de (P) agit sur un état propre

$$P\,\Psi(r,t) = \eta\,\Psi(r,t)$$

$$P^2\Psi(r,t) = \eta^2\,\Psi(r,t) = \Psi(r,t) \qquad ,\eta^2 = \pm 1$$

Avec :

$\eta = +1$ pour $\Psi(r,t)$ paire

$\eta = -1$ pour $\Psi(r,t)$ impaire

Conjugaison de charge :

On définit la conjugaison de charge comme étant un opérateur C qui change une particule en son antiparticule. Un état quantique : $|\Psi >= |\mathrm{x};\ \mathrm{p},\ \mathrm{s},\ \lambda >$
représentant une particule x avec une impulsion p, un spin s et des .charges.(charges électriques, leptoniques, baryoniques, etc...) :

$$C|x; p, s, \lambda >= C_x|x; p, s, -\lambda >$$

où C_x est une phase. Toutes les charges quantiques changent de signe, ainsi que le moment magnétique, mais pas l.impulsion ni le spin
Convention : donc $C_x = 1$ $(car\ le\ carr\square\ de\ C$ = 1) caractérise le couple (x, x).
Convention : $C_{fermion}$ = +1 et $C_{bosondejauge}$ = -1
Nombre quantique multiplicatif pour un systéme composé :

$$\eta_C^{tot} = \prod_i \eta_C^i$$

Renversement du temps
L.opération du renversement du temps transforme le quadrivecteur x = (t,x,y,z) en x =(-t,x,y,z) par l.action d.un op´erateur unitaire T. Pour les champs on dé.nit
$T(t, r) = \dot{\vee}(\square t, r)$ (1.6)

La symétrie CP :
La symétrie CP combine la conjugaison de charge avec la parité. L.action de l.opérateur
CP sur un système physique $|$ $(\square\rightarrow p$, h)$>$ est dé.nie par :