Chapitre I
Classification Des Particules
Introduction
C'est l'étude des composants ultimes de la matière et leuts interactions.

Physique des particules → Physique à hautes énergies

Il existe plusieurs lois de classification.
Constituants fondamentaux
Les constituants fondamentaux de la matière ont tous un spin $J = \frac{1}{2}$ → fermions.

Les fermions : (leptons, quarks)

Théorème CPT:

Toutes les particules ont des anti-particules.

Elles ont la masse et la durée de vie égal à l'anti-particulem mais toutes les autres charges sont opposées

avant 50 ans on ne connaissait que (p - n - e^- - ν - γ). mais ce nombre a cru à mesure de la progression des moyens expérimentaux, on provoqua des interactions (Nucléaires, de pcs) par l'utilisation des accélérateurs. Et c'est ici qu'on a découvert un grand nombre de particules qui sont plus ou moins instables. et ce qui a permis de mettre plusieurs lois de classification.

Bosons: Les bosons sont des particules de spin entier.

Ce sont des particules qui obéissent à la statistique de Bose Einstein, deux bosons peuvent se trouver au même état quantique, la fonction d'onde des bosons est symétrique par
permutation de ces particules, les bosons sont de spin entier. Il y a 12 particules de spin

entier, qui sont les vecteurs des différentes interactions:
- les 8 gluons qui transmettent l'interaction forte.
-les bosons vecteurs: W^+ et W^- qui transmettent l'interaction faible, Z^0 qui transmet une
forme de l'interaction faible provenant de l'interaction électrofaible.
-le photon γ qui transmet l'interaction électromagnétique.

Les leptons

Il y a six leptons qui sont des particules indivisibles distingués à partir de leurs masses leurs charges électriques et leurs mode d'interactions, il y a 3 leptons massifs (électron, muon, taon) de charge électrique (-1), avec une valeur de masse différente pour chaque particule, les 3 autres leptons sont les neutrinos sans charges et de très petites masses.

On a trois familles de leptons:

$$m = 0 \quad \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} \text{ et } \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$$

$m =$ 0,511 MeV 105 MeV 1,78 GeV

c'est l'echelle de masse des deux premier leptons qui est à l'origine du mot lepton (leger).

on voit donc qu'il y'a six leptons repartis en 3 doublets

Dans une interaction faible on peut obderver une transformation d'un lepton à un autre mais seulement dans le même doublet
Remarque: La désintegration suivante:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$$

n'a jamais été observé ce qui a laissé les physiciens leur associer deux nombres quantiques différents.

	ν_e / e	ν_μ / μ^-	ν_τ / τ^-
L_e	1	0	0
L_μ	0	1	0
L_τ	0	0	1

le nbre leptonique est un nombre additif

et $L_i(\bar{\ell}) = -L_i(\ell)$.

Les quarks

Six quarks, (up, charm, top) avec une charge (+2/3e) et (down, étrange, Bottom) avec une charge
(-1/3e). Quark et antiquark sont l'ensemble qui forment les mésons, et les baryons sont formés parl'assemblage de 3 quarks.

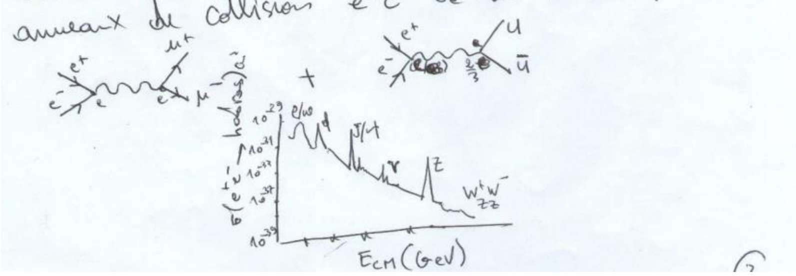
On a de la même façon que les leptons.

$$\begin{array}{cccc} m= & 2\,MeV & 1{,}3\,GeV & 175\,GeV \\ Q=+2/3 & \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \\ =-1/3 & & & \\ m= & 7\,MeV & 150\,MeV & 5\,GeV \end{array}$$

Et c'est Murey-Gell-Man qui a proposé leur éxistance.

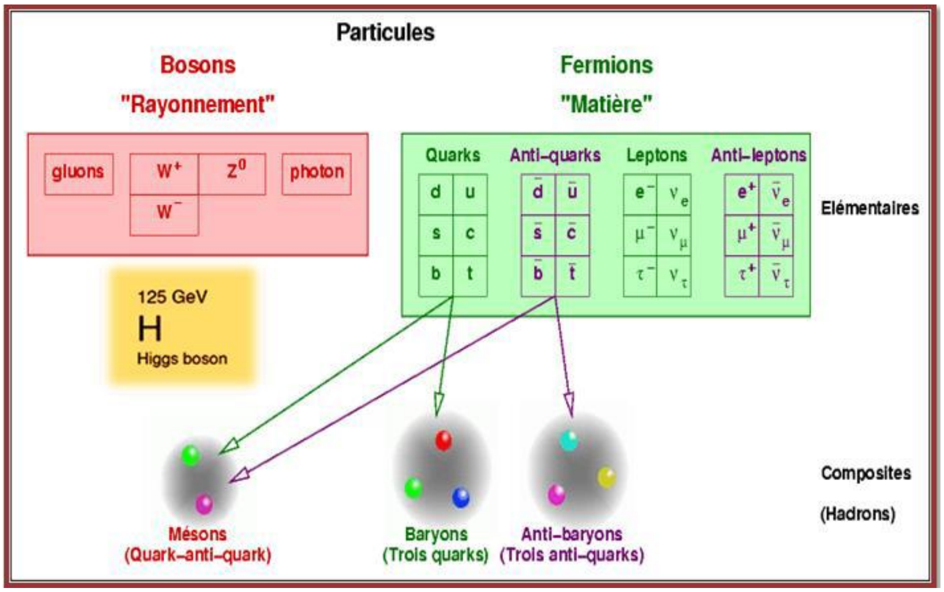
1-c. Les quarks

Apres la decouverte des pcs etrange, Gell Mann a proposé l'existance d'un triplet de constituants fondamentaux, les quarks (u,d,s) de charge fractionnaire ($2e/3$, $-e/3$, $-e/3$). L'existance ~~des~~ des quarks a été mise en evidence experimentalement par l'utilisation des anneaux de collision e^+e^- de haute energies.



Les fermions élémentaires peuvent être classés en 3 familles. Chaque famille contient 2 quarks, un lepton chargé et son neutrino, leurs masses sont de plus en plus élevées de la première à la troisième famille. La première famille contient les particules les plus stables

et les plus courantes :
Les quarks (u, d) et (e^-, ν_e) . Dans la deuxième famille on trouve les (c, s) ainsi que (μ^-, ν_μ). Les (t, b) et (τ^-, ν_τ) forment la troisième famille.

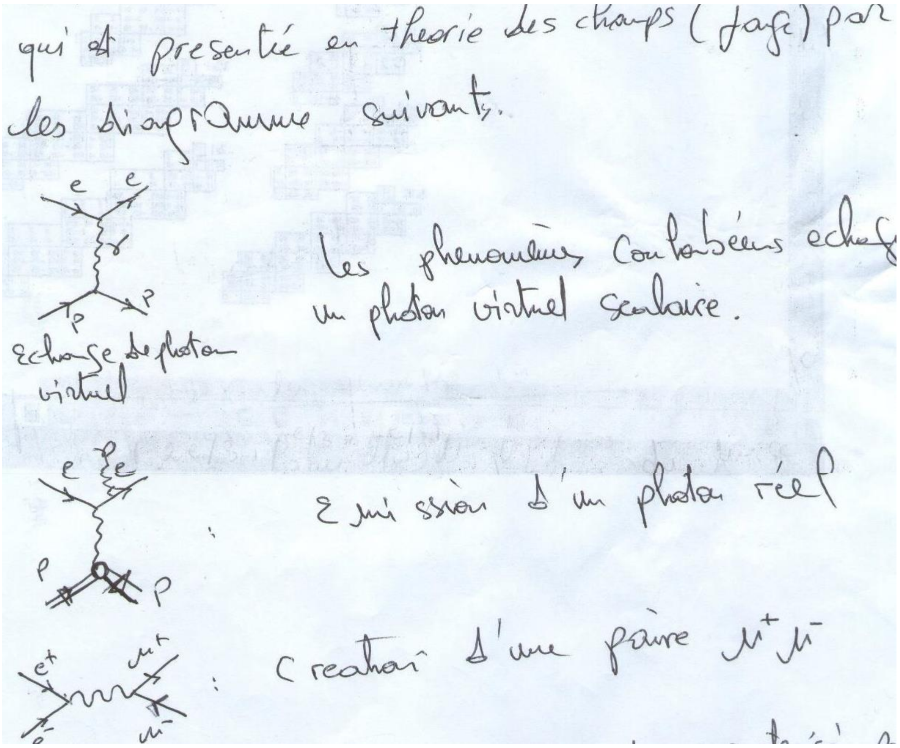


Les interactions fondamentales

Dans l'univers on a quatre interactions fondamentales qui sont :
-L'interaction électromagnétique
-L'interaction faible
-L'interaction forte
-La gravitation
Chacune d'elles est définie à partir de ses caractéristiques:

L'interaction électromagnétique

C'est une théorie qui unifie les deux forces électriques (la charge positive ou négative) et magnétique (le pôle nord ou sud), le composant essentiel dans cette interaction c'est le photon (composant fondamental de la lumière) de masse nulle et de spin 1. Les particules qui sont sensibles à cette interaction sont les particules chargées.
L'interaction électromagnétique est décrite en physique classique par les équations de Maxwell, et il lui correspond l'électrodynamique quantique(QED) dans le cadre de la mécanique quantique. Elle est véhiculée par un photon.



Elle est caractérisée par un nombre sans dimension: $\alpha = \frac{1}{137}$ constante de structure fine

Elle conserve tous les nombres quantiques sauf l'Isospin total.

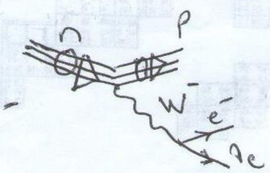
L'interaction faible

c'est l'interaction qui est responsable de la radioactivité beta, un neutron se désintègre en un proton, et un électron en un antineutrino, cette interaction sensible au neutrino, est caractérisée par une intensité très faible. les médiateurs de cette interaction sont trois: « les bosons intermédiaires »: W^+ , W^- et Z^0 .

L'interaction faible echange les bosons W ou Z.
qui intervient par exemple dans la desintegration du
neutron $n \longrightarrow p e^- \bar{\nu}$ et aussi dans la desintegration
β des noyaux : ${}^{12}B \longrightarrow {}^{12}C e^- \bar{\nu}$

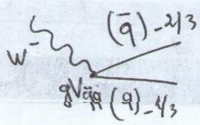
rq : toute interaction où un neutrino apparait
$\longrightarrow$ c'est une IW.

esp : 1 –



Desintegration semi-leptonique du neutron.

2 –



Desintegration Hadronique du Boson W.

Elle est caractérisée par une constante de couplage sans dimension:

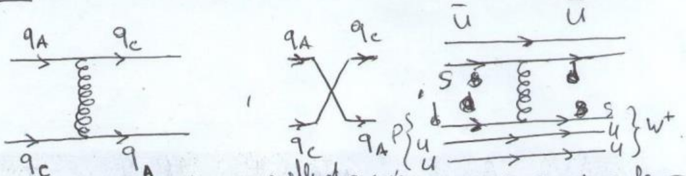
$$\frac{g^2}{4\pi} = \frac{\alpha}{sin^2 \theta_w} \qquad sin^2 \theta_w = 0{,}231$$

θ_w : l'angle de Weinberg.

L'interaction forte

C'est l'interaction qui est responsable de la cohésion des noyauxatomiques et liant les protons et les neutrons. Puisqu'il existe une force de répulsion entre les protons. C'est la seule force qui explique la cohésion nucléaire. Les physiciens utilisent une théorie qui décrit cette interaction c'est: la chromodynamique quantique (QCD).
L'élément qui joue le rôle essentiel que celui de la charge électrique en EM est la charge de couleur des quarks. Les médiateurs de l'interaction forte sont: les gluons (il y a 8 gluons différents de spin 1).

exemples :



< la saveur : elle est conservée par l'IS, mais en même temps la force de couleur peut interchanger des quarks

- le Confinement.

La "force" attractive de "couleur" entre deux quarks ↑ avec la distance < un système de quarks va en attirer d'autres jusqu'à l'annulation de la charge de couleur, et il pourra alors former des états stables : les Hadrons. Il en résulte que les quarks ne peuvent pas exister à l'état libre, et que les systèmes hadroniques stables ou metastables ont nécessairement une charge de couleur nulle. ce qui est nommé par < le confinement >

la charge de couleur qui est à l'origine de l'IS ne se manifeste pas de manière aussi directe que la charge électrique.

La Gravitation

c'est une interaction essentielle à l'échelle macroscopique, et négligeable à l'échelle microscopique (la taille de l'atome, et le noyau).

La gravitation est responsable de la cohésion de la terre, du soleil et du système solaire. Elle est décrite par la mécanique classique et la relativité générale mais non pas par la théoriede jauge.

Chapitre II
Théorie des groupes & symétries

Introduction

Les symétries qui laissent le système invariant forment un groupe et donc une symetrie peut être déduite d'une théorie de groupe sans être obliger à faire une étude dynamique.
On utilise les groupes.
On utilise les groupes en physique des particules à deux niveaux:
1- Classification des particules $\rightarrow$ modèle des quarks $SU(3)$, $SU(4)$
2- Decrire la dynamique des quarks et des leptons $\rightarrow$ Théorie de Jauge.

Définition d'un groupe et notion de représentation

Soit G un ensemble d'éléments $a, b, c, \ldots$ munit d'une loi de multiplication.
- Fermeture: a : $b \in G \Rightarrow c = a \cdot b \in G$, $\forall a \in G$
- Associativité: $a(bc) = (ab)c$
- $\exists$ un élément identité, tel que $e \cdot a = a \cdot e = a$
- $\exists$ un inverse tel que, $\forall a \in G \rightarrow a^{-1}$, $aa^{-1} = e$
- Commutativité: La multiplication est commutative $\rightarrow$ Groupe abelien.
- Sous groupe: C'est un sous ensemble de $G \rightarrow$ groupe.

Exemples

Ex1: groupe de l'addition des entiers.

$$m, n \in \mathbb{N}$$
$$m+n \in \mathbb{N}$$

Ex2: Ensemble des matrices unitaires $n \times n$.

$$UU^+ = U^+U = \mathbb{1}$$. non abélien pour $n > 1$.

$SU(n)$: groupe des matrices unitaires, unimodulaire
$\det U = 1$.

Exercice 1: Montrer que la permutation de 3 objets forme un groupe.
3 objets $\rightarrow 3$ positions $(1,2,3)$.

Représentations

un ensemble d'éléments peut être étudier en utilisant des représentation adéquates.

Exemple:
On peut étudier le groupe de l'addition des entiers par la représentation d'un élément suivante:
Soit $D(n) = e^{in\theta}$ $\rightarrow$ la représentation d'un élément

$$m + n = e^{in\theta} \cdot e^{im\theta} = e^{i(n+m)\theta}$$

Exercice 2: Dans le cas de la permutation de 3 objets Exo 1 Trouver la représentation matricielle adéquate.

Conclusion

On peut définir un groupe comme une table de multiplication:

	a	b	c
a			
b			
c			

$\rightarrow$ donc on doit avoir une représentation régulière pour bien pouvoir les manipuler.

Groupes de symetries fini

Ce sont des groupes qui contiennent un nombre fini d'éléments.
Tel que pour un groupe de é éléments: $\{e, g\} \to g^2 = e$

Point de vue mécanique quantique

$U(g)$. unitaire et $[U, H] = 0$

$\Longrightarrow \quad U^2 = \mathbb{1}$ ou $U^+U = 1 = U^2 \Rightarrow U = U^+$ Hermitien

soit P valeur propre de $U \rightsquigarrow |P\rangle$

$U^2|P\rangle = P^2|P\rangle = |P\rangle \Longrightarrow P = \pm 1 \rightsquigarrow$ réel

- Soit, l'inversion de l'espace:

$$\overleftrightarrow{r} \to (-\overleftrightarrow{r})$$

donc dans ce cas $U = P$ est la parité ou $U = C$ est la conjugaison de charge.

Définition:

Si un système Σ est un état propre de U, une opération de symétrie $\to$ états propres de même valeurs propres.

Groupe SU(n)

Définition:

$G = SU(n) =$ groupe des matrices $(n \times n)$ unitaire de déterminant égal à 1 (Matrices à éléments dans C).

$SU(n) = \{U \ \ n \times n \text{ tq } \{UU^+ = U^+U = 1, det\ U = 1\} \text{ et } U \text{ à éléments complexes}\}$.

Proposition

$$\forall U \in SU(n), \exists H \text{ tq } U = e^{iH}$$

Conséquence:

* $1 = UU^+ = e^{iH} e^{-iH^+} = e^{i(H-H^+)} = 1 \Rightarrow H = H^+$

H est Hermitique.

* On peut démontrer que $\det(e^A) = e^{\mathrm{tr} A}$

d'où $1 = \det U = \det(e^{iH}) = e^{i \mathrm{Tr}(H)}$

$\Rightarrow \mathrm{tr}\, H = 0 \longrightarrow$ trace de H est nulle.

$0 \Longrightarrow \boxed{D(\theta) = U = \exp\left[i \sum_{n=1}^{n^2-1} \theta_a T_a\right]}$; θ_a : para... réels ind...

T_a : générateurs ; $T_a = -i \dfrac{\partial U}{\partial \theta_a}$, $a = 1, 2, \dots n^2\text{-}$

n^2-1 = nbre des paramètres indépendants, i.e SU(n) std...

• nbre de générateurs diagonaux $\longrightarrow n-1$

Exerciec3!

Quel est l'ordre et le rang des groupes : $SU(2), SU(3), SU(5)$?

Algèbre de Lie

$$G \text{ groupe continu} \Rightarrow \partial\theta_a \to 0$$

Définition:

Une algèbre de Lie est défini sur G si:

a-

$$[T_i, T_j] = C_{ij}^k T_k \qquad C_{ij}^k \; : \; \text{constante de structure réèlle}$$

b- Identité de Jacobi

$$\left[T_i, [T_j, T_k]\right] + \left[T_j, [T_k, T_i]\right] + \left[T_k, [T_i, T_j]\right] = 0$$

Conclusion:

Pour chaque groupe de Lie on peut définir une algèbre de Lie.

Représentations:

$SU(n)? \, U = D(a)$: représentation matricielle de l'élément a d'un groupe donné, telque:

$$D(a_1)D(a_2) = D(a_1 \cdot a_2) \qquad \text{Isomorphisme}$$

Représentation conjuguée

$D^*(a_1)\, D^*(a_2) = D^*(a_1 \cdot a_2)$

$* \quad D(a(\vec{\theta})) = \exp(i \vec{\theta} \vec{T})$ t.q. $[T_i, T_j] = C_{ij}^{l} T_l$

$\Downarrow$

$D^*(a(\vec{\theta})) = \exp(-i \vec{\theta} \vec{T}^*) = \exp[i\vec{\theta} [-\vec{T}^*]]$

$\Longrightarrow \; -\vec{T}^* =:$ générateurs de la rep. conjuguée

- pour $n=2$: T_j et $-T_j^*$ sont équivalentes

pour $SU(2)$, $D(a) \sim D^*(a)$

Donc pour $SU(2)$

$\Longrightarrow$ toutes les représentations de $SU(2)$ sont réelles.

• $SU(n)$, $n \neq 2$ certaines représentations sont réelles : ...

Représentation adjointe

les générateurs de la représentation adjointe:

$$i(T_j)_k^m = C_{jk}^m \qquad\qquad j = n^2 - 1$$

Tel que les T_j son tnormalisés de la façon suivante:

$$Tr(T_i T_j) = \lambda \delta_{ij} \qquad\qquad \lambda \text{ est un scalaire}$$

Conséquences : les C_{jk}^m sont complètement antisymétriques.

Groupe $U(1)$

$$\text{Une charge conservée} \leftrightarrow \text{Une symétrie } U(1) \text{ respectée}$$

$$U \in U(1) \Rightarrow U = e^{-i\lambda Q}$$

où λ est une constante réèlle → parametre du goupe, Q : opérateur.

Application : *) $Q|\psi\rangle = q|\psi\rangle$ → charge du système.

Si $[Q, H] = 0$ alors le Σ est invariant / $U(1)$

→ conservation de la charge.

$|\psi\rangle \longrightarrow e^{-i\alpha Q}|\psi\rangle = e^{-i\alpha q}|\psi\rangle$.

Conséquence : * a- Pour les Lagrangiens il faut prendre $\mathcal{L} = \psi_e \gamma \bar{\psi}_e$ pour que $\mathcal{L}$ soit invariant par U ($U\mathcal{L} = \mathcal{L}$)

exemple : $\mathcal{L} = \bar{\psi}_e \psi_\nu$ interdit car $\begin{cases} \psi_e \to e^{-iq_e\alpha}\psi_e \\ \psi_\nu \to \psi_\nu \end{cases}$

$\Rightarrow \mathcal{L}' = e^{iq_e\alpha}\mathcal{L}$ qui n'est pas invariant

Nombre quantique baryonique

Conservation de B → symetrie $U_B(1) \to U = e^{-i\alpha B}$ où B est l'opérateur de charge baryonique

Exemple:

$$b|p\rangle = b|leptons\rangle = 0 = b|\pi\rangle$$

<u>Conservation du nbre baryonique:</u> On n'a jamais rencontré la reaction $p + p \longrightarrow \pi^+ + \pi^+$

et la desintegration

$p \longrightarrow e^+ + \gamma$

↳ $\mathcal{L} \sim (\bar{\psi}_p \gamma_\mu \psi_e) A^\mu \to \begin{cases} \text{Invariant relativiste (Lorentz)} \\ \text{Inv} / Q \end{cases}$

→ Mais ce terme est interdit car $\mathcal{L}$ n'est pas invariant / B.

Nombre leptonique

Conservation de L → une symetrie $U_L(1) \to U = e^{-i\alpha L}$ tel que:

$$L|\psi\rangle\rangle = l|\psi\rangle\rangle$$

exp: $\pi^+ \not\longrightarrow e^+ + \gamma$

$\underset{0}{\gamma} \longrightarrow \underset{-1}{e^-} + \underset{+1}{e^+}$

Remarque

Les symetries $U_Q(1); U_B(1); U_L(1)$ sont exactes, elles n'ont jamais été violées ce qui nous permet en se servant de ces symetries pour limiter les termes du lagrangien d'une quelquonque théorie ben physique théorique.

Nombre d'étrangeté

$$U_S(1) \to U = e^{-i\alpha S} \text{ telque } S|\psi\rangle = s|\psi\rangle$$

exp: $S|\pi\rangle = 0$; $S|K^+\rangle = |K^+\rangle$

$\boxed{\text{Rq}}$: $U(1) = \mathbb{C}$.