N° Attribué par la bibliothèque | | | | | | | | |

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
UNIVERSITÉ DOCTEUR YAHÏA FARÈS DE MÉDÉA



Faculté des Sciences et de la technologie
Département du Génie des Procédés et Environnement
Section Science de la Matière

3ème *Année Licence Physique*

Année universitaire : 2012/2013

Thème

Les particules élémentaires et leurs représentations

Préparé sous la direction de : **Pr Smain KOUADIK**

Titre présenté et soutenu publiquement par :

SAADAT Djillali
et
ZIOUCHE Oueam

Date de soutenance : Le 27 Juin 2013

Promoteur :
Professeur S. KOUADIK UYF Médéa

Membres du jury :
Président : Docteur L. DEKAR prof. UYF Médéa
Examinateur : Monsieur K. BOUCHACHIA prof. UYF Médéa
Examinateur : Mme L. YETTOU prof. UYF Médéa

Table des matières

Table des matières ii

Table des figures iii

Liste des tableaux iv

Dédicace v

Dédicace vi

Remerciements vii

Résumé viii

Avant-propos ix

Chapitre I – Généralités

I.1 Introduction 1
I.2 Les quatre interactions fondamentales 2
I.2.1 Introduction 2
I.2.2 La 1re interaction : la force de gravitation 3
I.2.3 La 2e interaction : la force électromagnétique 3
I.2.4 La 3e interaction : la force nucléaire forte 5
I.2.5 La 4e interaction : la force nucléaire faible 6
I.3 La désintégration bêta 6
I.4 L'intensité des quatre forces 7
I.4.1 Classement de l'intensité des quatre forces 8

Chapitre II – Les particules élémentaires

II.1 Elémentaire en physique des particules 9
II.1.1 Réduire la matière en miettes 9
II.1.2 Réalité virtuelle et vice-versa 10
II.1.3 Les particules élémentaires 12
II.2 Classification des particules 12
II.2.1 Classification historique ou classification par masse 12
II.2.2 Classification par sensibilité aux interactions 13
II.2.3 Classification des hadrons par produits de désintégration 14
II.2.4 Classification des hadrons par vitesse de désintégration 14

II.2.5 Classification des hadrons par(isospin) . . . 15
II.2.6 Classification des hadrons en octets (eightfold way) . . . 15
II.3 Un quark . . . 16
II.4 la structure des hadrons . . . 18

Chapitre III – Représentation des particules

III.1 Représentation du groupe SU(3) "Saveur" . . . 19
III.1.1 Le modèle en quarks constituants . . . 19
III.1.2 Les particules fondamentales . . . 19
III.1.3 Les quarks . . . 20
III.1.4 Baryons du groupe SU(3) . . . 22
III.1.5 Baryons du groupe SU(3) . . . 23
III.2 La nécessité de la couleur . . . 25
III.2.1 Le nombre quantique couleur "QCD" . . . 25
III.3 Le groupe SU(3) "Couleur" . . . 25
III.4 Le groupe SU4 "Charmé" . . . 26

Conclusion . . . **28**

Annexes . . . **29**

A — Annexe . . . **30**

A.1 Les unités et ordres de grandeur de la physique des hautes énergies . . . 30
A.2 Masse et énergie de repos . . . 31
A.3 Les relations d'incertitude de Heisenberg . . . 31
A.3.1 Fluctuation quantique . . . 31
A.4 La "QCD" . . . 31
A.5 Un proton comme trois quarks . . . 31
A.6 L'électron . . . 33

B — Annexe . . . **34**

B.1 La chambre à brouillard, ou chambre de Wilson . . . 34
B.2 La chambre à bulles . . . 35
B.3 La découverte des rayons cosmiques . . . 36
B.4 Lieux et collaborations de la physique des particules . . . 37

Notations utilisées . . . **39**

Bibliographie . . . **40**

Table des figures

I.1 Représentation schématique de la désintégration bêta d'un neutron. 7

II.1 un électron (e^-) emet un photon virtuel (γ) en ① et le réabsorbe en ② . . 10
II.2 un photon (γ) se désintègre en ①, en une paire virtuelle électron-positron ($e^- - e^+$), laquelle s'annihile en ② pour redonner un photon 11
II.3 diffusion photon-photon résultant de l'existence de fluctuations virtuelles . 11
II.4 un électron contient virtuellement des particules de charge positive (ici un positron) 11
II.5 les quarks bosons leptons 17

III.1 Les particules fondamentales 20
III.2 Diagrammes de poids de la représentation fondamentale et sa conjuguée de SU(3) 22
III.3 diagrammes de poids SU(3) de la représentation **un octet**. 23
III.4 diagrammes de poids SU(3) de la représentation **un décuplet**. 24
III.5 diagramme de poids de la représentation SU(4) de dimension 20. 27

A.1 La mer du proton, un ensemble de paires quark-antiquark en interaction permanente avec des gluons. 32
A.2 Les quarks de valence du proton, avec des gluons représentés sous forme de ressort. Tels de la colle, ils assurent la cohésion du proton en étant les médiateurs de l'interaction forte entre les quarks. 32

B.1 La chambre de Wilson 35
B.2 Principe de La chambre à bulles 35

Liste des tableaux

II.1 Les quarks sont classés par valeur croissante de leurs masses 17
II.2 Hadrons définis par la règle de trialité 18

III.1 Quarks et leurs nombres quantiques 21

Dédicace

Rien ne s'accomplit à la solitude !

À mes parents et ma famille pour leur soutien. Je leur serai toujours reconnaissant de m'avoir permis d'en arriver là à travers toutes les concessions et toute leur affection.

Je tiens à remercier le D^{r} Hannachi ZITOUNI pour l'effort qu'il a déployé pour nous donner les (ABC)$_{(s)}$ de LaTeX dont j'ai développé ce mémoire.

Djillali

❀ ❁ ✾ Dédicace ✾ ❁ ❀

Je dédie ce modeste travail :

À mon très cher père qui a souhaité vivre pour longtemps juste pour nous voir qu'est ce qu'on nous allons devenir.

À celle qui m'a transmis la vie, l'amour, le courage, à toi maman toutes mes joies, mon amour et ma reconnaissance. À mes chers frères et sœurs que j'aime surtout ma précieuse sœur Achouak, les mots ne peuvent pas résumer mon amour à ton égard.

À toutes mes chères nièces et neveux que j'aime tant.

À toute l'équipe de bibliothèque de la faculté des sciences et de la technologie pour son aide, sa gentillesse et son dévouement.

Pour mes adorables amies : Imane MHAMDI, Souhila HASSAS, Imane SKANDER et Madina RABHI.

À touts mes collègues de la promotion des $3^{\text{ème}}$ années physique 2013.

Que toute personne m'ayant aides de près ou de loin, trouve ici l'expression de ma reconnaissance.

Oueam

Remerciements

Louange à **Allah** de nous avoir accordé le courage, la force et la volonté pour réaliser ce travail.

Nous tenons à remercier, en premier lieu notre encadreur le Professeur Smain KOUADIK qui à accepté de nous diriger. Son aide, ses orientations, ses encouragements et surtout sa gentillesse, ont été une réelle motivation.

Toute notre reconnaissance va à notre professeur, monsieur Djamel HOUATIS.
Un chaleureux remerciement à monsieur le docteur Hannachi ZITOUNI pour l'intérêt qu'il a porté pour ce travail.

C'est avec un grand plaisir que nous adressons aussi nos remerciements aux professeurs le docteur L. DEKAR, O. HOUHOU et A.R. BENREKIA.

Ainsi qu'à l'ensemble de nos professeurs qui nous ont prodigué le savoir et les cours dès la première année à l'université de Médéa.

À tous nous adressons notre gratitude.

Résumé

En premier chapitre (Généralités) on reprend un bref historique des particules élémentaires et quelques dates marquantes de la physique des particules, les quatre interactions fondamentales avec une classification suivant l'intensité de leurs forces.

Le deuxième chapitre est conçu pour la définition du concept élémentaire en physique des particules, les particules élémentaires, des classifications (qui nous ont apparu importantes) des particules, les quarks, et la structure des hadrons.

Troisième chapitre c'est pour la représentation des particules, nous nous attacherons essentiellement aux groupes SU(3) saveur , SU(3) couleur et SU(4) saveur .

Ce mémoire étant essentiellement un travail qui s'appuis sur l'approche physique.

Avant-propos

La physique des particules est la branche de la physique qui étudie les constituants élémentaires de la matière et les rayonnements, ainsi que leurs interactions. On l'appelle aussi physique des hautes énergies car de nombreuses particules élémentaires n'existent pas à l'état naturel et peuvent seulement être détectées lors de collisions à hautes énergies entre particules plus grandes dans les accélérateurs de particules[1].

Le concept de « particule élémentaire » existait en Physique bien avant le développement de ce que l'on appelle aujourd'hui la « Physique des Particules Élémentaires », ou « Physique des Hautes Énergies »[2].

La physique des particules est née du désir de comprendre la structure ultime de la matière et des forces qui la transforment. Elle touche par là aux aspects fondamentaux de la connaissance.

Et cherche à comprendre les détails les plus fins de la matière en isolant et en étudiant ses constituants ultimes. Au cours du XX^{e} siècle, cette quête a conduit les physiciens à étudier des objets de taille infime dont le comportement défie le sens commun. Ainsi, les lois de la mécanique classique doivent être abandonnées au profit de celles de la mécanique quantique. Pour cette dernière, les constituants élémentaires de la matière sont des objets situés à mi-chemin entre des ondes et des particules, au sujet desquels notre savoir est par essence limité. Même avec une connaissance parfaite de la situation de départ, il n'est parfois pas possible de déterminer le résultat d'une expérience, mais seulement de calculer la probabilité d'observer un résultat donné parmi tous ceux envisageables. Ce qui a poussé les physiciens à adopter une vision si déroutante des détails les plus fins de la nature[3].

L'histoire de la physique des particules a maintenant plus d'un siècle d'existence. Durant cette période, elle n'a cessé de repousser les limites de l'infiniment petit à l'aide de technologies et de théories toujours plus puissantes les unes que les autres. La notion de particule élémentaire a considérablement changé au cours de cette période.

À l'heure actuelle, un modèle qui semble être la théorie adéquate pour décrire les particules (quarks, leptons, bosons de jauge) et leurs interactions (électrofaible et forte (QCD [1])). Même si ce modèle a toujours été confirmé par les expériences jusqu'à ce jour, il est une certitude qu'il n'est pas La théorie ultime, ne serait-ce que par le fait qu'il n'incorpore pas la quatrième force fondamentale, la gravitation. C'est d'ailleurs là un grand défi des physiciens que de réunifier toutes ces forces [2]

Notre travail à l'objet de prendre le minimum à savoir de ce monde des particules, on va définir les particules élémentaires, les classer et donner quelques exemples de représentations, mais de point de vu (approche physique). Puisque la représentation des

1. Quantum ChromoDynamics ou la chromodynamique quantique
2. On note que la théorie des cordes fait un objet de nombreux débats concernat la grande unification des forces fondamentales

particules demande un prérequis (la théorie des groupes, la théorie des champs quantiques, la chromodynamique quantique ...). Et il est clair qu'un développement précis des différents modèles théoriques et aspects expérimentaux s'avérerait une tâche trop ardue pour un mémoire comme le notre.

Chapitre I

Généralités

I.1 Introduction

Il y a longtemps que l'homme s'interroge sur les constituants les plus petits de la matière. dont Aristote, supposait que les choses sont constituées de terre, de feu, de vent et d'eau. Au IV^{e} siècle av. J.-C., les philosophes grecs Leucippe et Démocrite émettent l'hypothèse que toute matière est composée de particules [1] minuscules, invisibles à l'oeil nu, en mouvement perpétuel, très solides et éternelles : les atomes [2].

Il a fallu plus de vingt siècles pour que ce concept resurgisse : en 1818, après avoir étudié de nombreuses réactions chimiques, John Dalton établit que chaque substance chimique est formée d'atomes, indivisibles. En 1811, Amedeo Avogadro émet l'idée que les atomes se combinent pour former des molécules et évalue la taille des atomes, de l'ordre de 10^{-10} m.

À la fin du XIX^{e} siècle, Joseph John Thomson montre que l'atome n'est pas une particule élémentaire mais qu'il contient lui-même des particules négatives, appelées électrons. Il établit ainsi le premier modèle de l'atome : les électrons, chargés négativement, sont immergés dans une masse positive, « comme les raisins dans un gâteau ».

En 1911, Ernest Rutherford precise la structure de l'atome. Quand il bombarde une mince feuille d'or avec des particules α (noyau de l'atome d'helium), la majorite des particules traverse la feuille d'or en subissant une légère déviation, mais certaines sont rejetées en arrière. Ce dernier phénomène ne peut se produire que si la charge positive est concentrée dans une petite partie centrale de l'atome, appelée noyau atomique, dont la taille est de l'ordre de 10^{-14} m : l'atome est « plus creux que plein ». Les électrons tourneraient autour du noyau comme les planètes du système solaire gravitent autour du Soleil.

Le modèle atomique de Rutherford n'était pas satisfaisant car il était instable. En effet, selon les lois de l'électromagnétisme, toute particule chargée ayant un mouvement accéléré émet du rayonnement électromagnétique. D'après le modèle de Rutherford, les électrons, dans leur mouvement circulaire autour du noyau atomique, devraient donc émettre du rayonnement, perdre leur énergie et tomber sur le noyau atomique.

Ce problème conduit Niels Bohr à émettre en 1913 des hypothèses audacieuses : les orbites circulaires des électrons sont stables et leur rayon a une valeur fixe. C'est en

1. Emprunté du latin particula ,« petite partie »
2. du mot grec atomos qui signifie indivisible

émettant ou en absorbant un photon que l'électron peut passer d'une orbite à une autre. Bohr applique ces hypothèses à l'atome le plus simple, celui d'hydrogène, et son explication des niveaux d'énergie connaît un grand succès.

En 1918, Rutherford bombarde de l'azote avec des particules α et trouve des traces d'hydrogène. Il en conclut que le noyau d'Hydrogène est une particule élémentaire qui entre dans la constitution du noyau atomique et l'appelle proton [3].

En 1932, James Chadwick bombarde du béryllium avec des particules α et met en évidence un flux de particules électriquement neutres et de masse voisine à celle du proton : il découvre le neutron.

I.2 Les quatre interactions fondamentales

I.2.1 Introduction

Ce sont les interactions entre particules élémentaires qui entraînent la formation des objets. L'histoire de la découverte des particules élémentaires est intimement liée à celle de leurs interactions.

L'étude de la structure de la matière et de l'univers, est basée sur trois théories fondamentales qui ont vu le jour au début du XX^{e} siècle :

- la théorie de **la relativité restreinte** (1905) dont l'élément central est l'invariance de la vitesse de propagation de la lumière dans le vide c et qui a conduit à la fameuse équation d'Einstein où il apparaît que la masse d'un corps n'est autre qu'une forme d'énergie égale à cette masse multipliée par le carré de la célérité de la lumière ($E = mc^2$). Ainsi, la théorie de la relativité restreinte permet d'établir que le temps et la masse ne sont pas des invariants. C'est la vitesse de la lumière qui est invariante, quel que soit le référentiel.
- la théorie de **la relativité générale** (1915) est une généralisation de la théorie précédente. Il en résulte que les métriques de l'espace et du temps vont se trouver modifiées en fonction de la présence de masse.
- la théorie des **quanta** (1926) (mécanique ou physique quantique [4]) que l'on rencontre lorsqu'on s'intéresse à la structure microscopique de la matière. L'élément central de la théorie est h la constante de Planck, qui va établir un lien entre l'énergie d'une particule et la fréquence de l'onde qui lui est associée.

Ces trois théories ont permis de mieux comprendre et de quantifier les forces qui régissent l'univers, **les quatre interactions fondamentales** (en fait, on en connaissait

3. du grec protos, qui signifie premier
4. (*quanta* = pluriel latin de *quantum* qui signifie quantité) Ce nouveau mot apparaît dans le registre de la physique le 14 Décembre 1900 grâce à un mémoire révolutionnaire lu devant l'Académie des sciences de Prusse par l'Allemand Max Planck.

déjà deux lorsque ces théories ont émergé). À ce jour, les scientifiques cherchent à unifier ces quatre forces, c'est-à-dire à les intégrer dans un système théorique d'ensemble : théorie de **la Grande Unification** (G.U.T.) et théorie du **Tout** (la gravitation comprise). Mais, le moment est encore loin !

L'univers est régi par quatre interactions (quatre forces) ! Voyons-les dans l'ordre chronologique de leur découverte.

I.2.2 La 1re interaction : la force de gravitation

Les trois principes de la dynamique (principe d'inertie, principe fondamental $m \cdot \vec{a} = \vec{F}$, principe d'action -réaction) et les lois de Kepler permettent à Newton d'énoncer la loi de la gravitation universelle, en 1686 deux masses (ponctuelles) m et m' s'attirent mutuellement d'autant plus fortement qu'elles sont proches l'une de l'autre, selon la relation suivante :

$$F = G\,\frac{m \cdot m'}{r^2} \tag{I.1}$$

- F s'exprime en N
- m , m' : en kg
- r : la distance séparant les deux masses en m
- G : la constante de gravitation universelle, dite de Newton [5], vaut $6,672{\times}10^{-11}$ (SI) [4].

La gravitation est *uniquement une force attractive* La force répulsive n'existe pas dans le domaine de la gravitation. De ce fait, il n'y a pas d'effet d'écran possible. Au contraire, essayer de placer un écran, c'est-à-dire ajouter une troisième masse entre les deux masses initiales, ne ferait qu'augmenter l'attraction entre ces dernières. La portée de l'interaction gravitationnelle est donc réellement infinie (F ne s'annule qu'à l'infini d'après l'expression I.1).

Sur le plan macroscopique, la force de gravitation joue un rôle très important ; elle gère les mouvements des corps célestes, des planètes aux galaxies. Sur le plan microscopique, elle est tellement faible qu'elle joue un rôle négligeable par rapport aux autres forces que nous décrivons ci-dessous. Cependant, pour des distances extrêmement courtes (de l'ordre de 10^{-30} m), ce pourrait n'être plus le cas.

On arriverait alors dans des dimensions où la « gravitation quantique » jouerait un rôle important. On ne maîtrise pas le sujet à ce jour.

I.2.3 La 2e interaction : la force électromagnétique

Au repos, deux charges électriques de même signe se repoussent et deux charges électriques de signes opposés s'attirent. Considérons deux charges électriques ponctuelles Q

5. Henry Cavendish qui mesura pour la première fois en 1798 la constante G à l'aide d'une balance de torsion.

et Q' (exprimées en C), au repos, séparées par une distance r (en m) ; on a la relation suivante (établie par Charles Coulomb en 1780) :

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \frac{Q \cdot Q'}{r^2} \tag{I.2}$$

- F s'exprime en N
- La grandeur ε porte le nom de *permittivite électrique absolue* et dépend du milieu dans lequel sont placées les deux charges électriques.

Si nous plaçons de la matière électrisée entre les deux charges, il y aura modification de la force ; cette matière joue le rôle d'écran. La force n'est pas réellement de portée infinie. Prenons deux charges électriques de 1 C dans le vide et plaçons-les à 1 m l'une de l'autre On a :

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q \cdot Q'}{r^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{1 \times 1}{1} = 9 \times 10^9 \text{ N} \tag{I.3}$$

Remarque : l'indice 0 indique que l'on se trouve dans le vide.

La permittivité électrique de l'eau est 80 fois plus forte que celle du vide ; la force entre les deux mêmes charges placées à même distance est 80 fois plus faible que dans le vide.

C'est pourquoi on introduit une permittivité relative : $\varepsilon_{r(\text{relative})} = \frac{\varepsilon_{(\text{milieu})}}{\varepsilon_{0(\text{vide})}}$. Dans le cas de l'eau, $\varepsilon_r = 80$ et la force dans l'eau vaut simplement F_0/ε_r.

En magnétisme, on trouve un coefficient de même type que la permittivite électrique : la *permeabilite magnétique absolue* μ du milieu dans lequel s'exerce l'influence magnétique ; il intervient, par exemple, dans l'expression des forces apparaissant entre deux fils parallèles, de longueur ℓ, séparés d'une distance r, dans lesquels circulent les courants d'intensités I_1 et I_2 : on a

$$F = \mu \cdot \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot \ell}{2\pi r} \tag{I.4}$$

Remarques :

i. Les relations caractérisant la gravitation et la force électrique se ressemblent étrangement. Dès le XIX$^{\text{e}}$ siècle, des physiciens comme Faraday et Ampère essayèrent déjà de trouver un moyen pour unifier les deux forces. En 1864, James Maxwell parvint à effectuer une première unification. Il exposa sa théorie électromagnétique de la lumière, dans laquelle figurent les équations générales du champ électromagnétique (équations que nous n'aborderons pas ici) : en associant ε_0 et μ_0 ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ N/A^2) et $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ A$^2 \cdot$s^2/(m$^2 \cdot$N), Maxwell trouva que leur produit a les dimensions de l'inverse du carré d'une vitesse et pour valeur l'inverse du carré de la vitesse de propagation de la lumière dans le vide ($\varepsilon_0 \cdot \mu_0 = 1/c^2$).Il en déduisit que la lumière ne pouvait être que le résultat de l'association d'une grandeur électrique (un champ électrique) et d'une grandeur magnétique (un champ d'induction magnétique). Ce fut *la première unification* de plusieurs branches séparées de la physique : électricité, magnétisme et optique.

ii. En 1897, Joseph Thomson interprète correctement la nature des rayons cathodiques : ce sont des électrons . Pour lui, les atomes sont constitués de « billes », des sphères

dures formées d'éléments positifs et négatifs(voir I.1 , page 1). La découverte de la radioactivité (par Becquerel en 1896, suivie des travaux des Curie) va améliorer considérablement la compréhension de la structure de l'atome. Rappelons la célèbre expérience du bombardement d'une feuille d'or(voir I.1 , page 1)La proportion des noyaux α subissant un rebond par rapport aux noyaux traversant la feuille d'or a permis d'estimer la dimension des noyaux atomiques (quelques 10^{-15} m), donc très petite par rapport à celle des atomes (quelques 10^{-10} m)

Le modèle de l'atome est ainsi affiné : des électrons (de charge électrique négative) circulent autour du noyau (de charge électrique positive). L'atome est neutre électriquement.

iii. Comparons les deux interactions existant entre le proton et l'électron de l'atome d'hydrogène dans son état fondamental. Sachant que la distance les séparant vaut 0,0529 nm ou $0,0529 \times 10^{-9}$ m, que $m_{p^+} = 1,67 \times 10^{-27}$ kg, $m_{e^-} = 0,911 \times 10^{-30}$ kg, que $|Q_{e^-}| = Q_{p^+} = e = 1,602 \times 10^{-19}$ C et $1/(4\pi\varepsilon_0) = 9 \times 10^9$,calculons les deux forces en question : la force électrique vaut $0,83 \times 10^{-7}$ N et la force gravitationnelle $0,36 \times 10^{-46}$ N. On peut constater que la force électrique est beaucoup plus importante que la force de gravitation ; leur rapport vaut :

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{0,83 \times 10^{-7}}{0,36 \times 10^{-46}} \approx 2,3 \times 10^{39} \tag{I.5}$$

I.2.4 La 3e interaction : la force nucléaire forte

Si les deux premières interactions permettent de comprendre la stabilité des atomes, elles ne permettent pas, par contre, de comprendre celle des noyaux. S'ils contiennent plus d'un proton, la force de gravitation est insuffisante pour compenser la force de répulsion électrique entre charges positives.

Une autre force, beaucoup plus forte que la force électrostatique répulsive doit être introduite. Sans cette nouvelle force, on ne comprend pas comment deux protons ou même un proton et un neutron ou encore deux neutrons tiennent aussi solidement ensemble, la seule force de gravitation ne pouvant y suffire.

Nous n'aurons certainement plus ici une relation en $1/r^2$. Cette force n'a, en effet, qu'une courte portée. La « portée » décrit la façon dont l'influence des forces se fait sentir au voisinage de leur source.

En observant le comportement radioactif (découvert dès 1896) de certains isotopes du radium, du polonium etc..., Rutherford pense à cette interaction forte à faible portée : l'éjection naturelle de particules α implique que la portée de cette interaction n'est pas suffisante pour maintenir la cohésion de ces gros noyaux. On sait aujourd'hui que la portée de l'interaction forte ne dépasse pas « quelques fois » la dimension du proton (soit 10^{-15} m = 1 fermi ou 1 *femtomètre*). Au-delà de quelques fois 10^{-15} m, la force forte s'annule.

I.2.5 La 4^{e} interaction : la force nucléaire faible

Il manque une dernière interaction pour comprendre notamment la désintégration β de la radioactivité naturelle ou celle du neutron *libre*. Le neutron se désintègre en :

$$^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + {}^{0}_{0}\bar{\nu}$$

où ${}^{0}_{0}\bar{\nu}$ est un antineutrino.

Chaque fois que l'interaction faible agit, il apparait des leptons, ici e et $\bar{\nu}$ L'interaction faible est essentielle dans la compréhension de la constitution des noyaux au-delà de l'hydrogène.

Par exemple, sans cette force, il n'y aurait pas la colossale énergie que nous recevons du Soleil. Le nuage d'hydrogène primordial s'effondrerait sur lui même en fournissant très peu d'énergie par rapport à ce que nous observons. L'interaction forte ne permet l'union de deux protons qu'en présence d'un neutron. L'intervention de l'interaction faible est nécessaire pour « fabriquer » un neutron à partir d'un proton par la réaction

$$^{1}_{1}\mathrm{p} \longrightarrow {}^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{0}_{1}\mathrm{e}^{+} + {}^{0}_{0}\nu$$

où ${}^{0}_{1}\mathrm{e}^{+}$ est un antiélectron ou *positon* (ou bien positron)

L'interaction faible a une portée de « quelques fois » 10^{-18} m (10^{-18} m = 1 attomètre).

Remarque : à propos de la dénomination **antimatière**.
L'antimatière est tout simplement de la matière dont certains nombres quantiques, comme la charge électrique, sont changés de signe par rapport à ceux de la matière. Seule cette dernière est connue sur Terre, mais on pourrait concevoir un univers d'antimatiere qui aurait les mêmes propriétés physico-chimiques que le nôtre. Un antihydrogène est constitue d'un p^{-} et d'un e^{+} La spectroscopie de l'antihydrogène apparaîtra exactement identique à celle de l'hydrogène.

I.3 La désintégration bêta

La désintégration « bêta » est un des trois types de rayonnements, émis par des éléments radioactifs, découverts au début du XXème siècle. Suivant leur capacité à pénétrer dans la matière, Rutherford proposa les termes de « alpha », « bêta » et « gamma » en allant du moins au plus pénétrant. La production d'anti-neutrinos dans les centrales nucléaires provient de la désintégration bêta des nombreux éléments radioactifs qu'elles contiennent. Lors d'une désintégration bêta, un neutron se transforme en proton et émet un électron accompagné d'un anti-neutrino (*qui sera dit de « saveur » électron*). Ce mécanisme a lieu en réalité au niveau des quarks qui sont contenus dans le proton et le neutron. Un quark « d » du neutron se transforme en quark «u », les autres constituants étant essentiellement spectateurs et assurant la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement lors du processus. Ce type de désintégration est gouverné par l'interaction faible. On le schématise habituellement en considérant que le quark «d» émet une particule W^{-}lors de sa transformation en quark «u». On dit que le W^{-}transmet l'interaction faible. Ce W^{-} donne ensuite naissance à l'électron et à l'anti-neutrino-e [5].

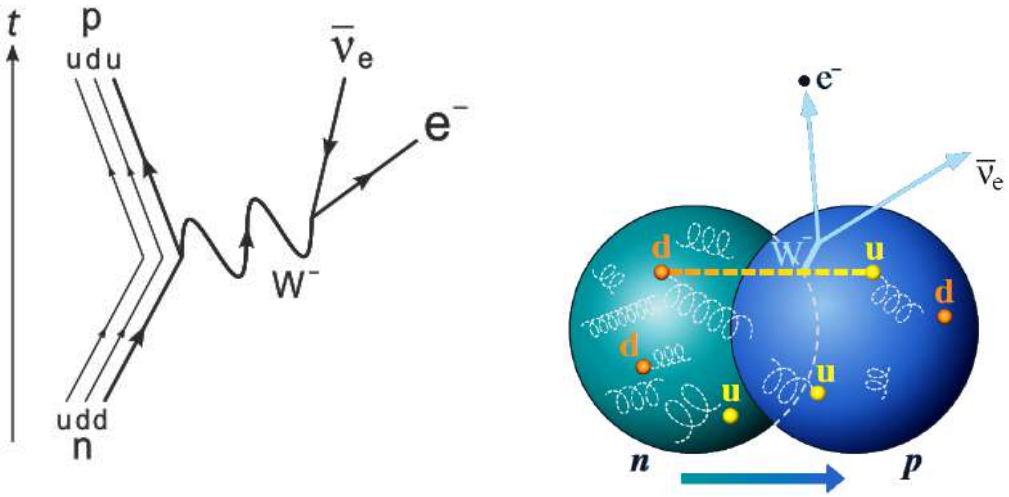


Fig. I.1: Représentation schématique de la désintégration bêta d'un neutron.

I.4 L'intensité des quatre forces

Essayons de calculer les quatre interactions pour deux mêmes particules, par exemple deux protons, à des distances identiques, donc de type nucléaire, et les comparer à une grandeur commune de même dimension de sorte que leur rapport fournisse un nombre sans dimension. Cette grandeur commune est le produit $\hbar \cdot c = 3,16 \times 10^{-26}$ N $\cdot$ m^2 où $\hbar = h/2\pi$. c'est la recherche des **constantes de couplage**,valeurs numériques qui spécifient l'intensité relative de chacune de ces forces.
On trouve que :

1. pour la force de gravitation, $F_g \cdot r^2 = G \cdot m \cdot m'$ ($F_g \cdot r^2$ s'exprime comme $\hbar \cdot c$ en N$\cdot$m^2)

   avec : $m = m' = 1.67 \times 10^{-27}$ kg, la constante de couplage vaut :

   $$\frac{G \cdot m \cdot m'}{\hbar \cdot c} = 6 \times 10^{-39}, \text{(ce nombre est sans unité)}$$

2. pour la force électrique, $F_e \cdot r^2 = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot Q \cdot Q'$

   avec : $Q = Q' = e = 1.602 \times 10^{-19}$ C, la constante de couplage vaut :

   $$\frac{\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot e \cdot e}{\hbar \cdot c} = \frac{1}{137}.$$

   Remarque : en spectroscopie, une raie spectrale, lorsque l'atome est soumis a certaines conditions physiques particulieres, se divise en raies serrées. Cette constante intervient dans le calcul des niveaux d'énergie des électrons et donc dans le calcul des longueurs d'onde de ces raies spectrales. C'est pourquoi cette constante porte le nom de « constante de structure fine ».

3. pour la force nucléaire forte, où F représente la « charge » nucléaire forte, la constante de couplage vaut :1 d'où son nom.

   $$\frac{F \cdot F}{\hbar \cdot c} \cong 1$$

4. pour la force nucléaire faible,où f représente la « charge » nucléaire faible, la constante de couplage vaut :
$$\frac{f \cdot f'}{\hbar \cdot c} \cong 10^{-14}$$

I.4.1 Classement de l'intensité des quatre forces

En conclusion, le classement par intensité des forces se présente de la façon suivante :

1. l'interaction forte (≈ 1)
2. l'interaction électromagnétique ($\approx 10^{-2}$)
3. l'interaction faible ($\approx 10^{-14}$)
4. l'interaction gravitationnelle ($\approx 10^{-39}$)

Chapitre II

Les particules élémentaires

II.1 Elémentaire en physique des particules

Nous savons aujourd'hui que toute la matière connue est composée d'atomes, qui sont eux-mêmes formés d'électrons et de noyaux, lesquels, à leur tour, sont des agencements de protons et de neutrons. Ces derniers ne sont pas non plus des objets élémentaires, mais plutôt des objets composites, faits de **quarks** et de **gluons**. Jusqu'où cela s'arrêtera-t-il ? Y a-t-il une fin à cette descente dans le monde subatomique, sub-nucléaire, sub-nucléonique ? Nul ne le sait à l'heure actuelle. Il n'est d'ailleurs pas clair que cette question ait une réponse. Ce qui est sûr en revanche, c'est que les notions d'objet composite et de particule élémentaire ont été profondément modifiées au fur et à mesure suivant les découvertes.

II.1.1 Réduire la matière en miettes

Commençons notre descente dans l'infiniment petit avec un atome. Pour savoir de quoi il est composé, une méthode consiste à le casser et à « compter » les morceaux. Pour cela, il faut lui fournir de l'énergie, par exemple à l'aide d'un choc avec une autre particule. A basse énergie, on a un choc élastique et notre atome reste intact. En augmentant progressivement l'énergie de la collision, on finit par réussir à le casser. Tant que l'énergie fournie est suffisamment faible, les morceaux que nous obtenons sont invariablement des électrons et un noyau. En faisant quelques (bons) comptes, on trouve que la masse de l'atome initial est approximativement égale à la somme des masses de ses constituants. De même, sa charge électrique est égale à la somme des charges de l'électron et du noyau. Il est alors naturel de conclure que notre atome est bien constitué d'un noyau et d'électrons.

On peut reprendre l'expérience avec le noyau atomique. En lui fournissant suffisamment d'énergie, on arrive à le briser en protons et en neutrons. Là encore, les propriétés globales du noyau se comprennent à partir de celles de ces nucléons, d'où on peut conclure que le noyau est bien constitué de ces derniers.

Mais arrêtons-nous un instant sur cette conclusion. Dans les deux cas précédents, la charge électrique de l'objet composite est exactement égale à la somme des charges des constituants (électrons et noyau de l'atome, protons et neutrons du noyau). Rien de mystérieux là-dedans : c'est simplement une conséquence de la loi de conservation de la charge électrique. Mais qu'en est-il pour la masse de l'objet composite, qui, elle, n'est qu'approximativement égale - et en fait légèrement inférieure - à la somme des masses des constituants ? Ici aussi une loi de conservation est à l'oeuvre : celle de l'énergie.

En vertu de l'équivalence entre masse et énergie - conséquence de la relativité restreinte - cette différence de masse correspond à la différence entre l'énergie de repos de l'objet composite et la somme des énergies de repos des constituants « séparés ». L'énergie manquante n'est autre que ce qu'il a fallu fournir pour vaincre l'interaction qui maintient les constituants ensemble et briser ainsi l'atome ou le noyau. On l'appelle « énergie de liaison ». Dans les cas de l'atome et du noyau, celle-ci est très petite devant l'énergie de repos de l'objet composite. Cela explique que la somme des énergies de repos (et donc des masses) des constituants soit approximativement égale à celle de l'objet composite, qu'on appelle « état lié ». Cette quasi-égalité justifie notre image d'un atome constitué d'électrons et d'un noyau .

On peut procéder de même avec le noyau, constitué de protons et de neutrons liés par une force nucléaire résiduelle. *En fait, c'est sur cette quasi-égalité qu'est basée l'image habituelle, classique, d'un objet composite : un objet que l'on peut briser en morceaux*[6].

II.1.2 Réalité virtuelle et vice-versa

Être une particule élémentaire ne signifie pas être un objet ponctuel dépourvu de toute structure... En effet, nous sommes dans un domaine de la physique où mécanique quantique et relativité restreinte conjuguent leurs efforts pour compliquer toujours un peu plus notre vision de la matière... Les théoriciens du XX^{e} siècle, qui ont combiné ces deux théories, ont obtenu des résultats assez surprenants, parmi lesquels le fait qu'une particule élémentaire peut fort bien adopter des visages très différents, et apparaître sous forme d'un état lié d'autres particules élémentaires.

On parle de *fluctuations quantiques de la particule*. Par exemple, un électron peut émettre un photon pour le réabsorber ensuite, selon le processus représenté sur la figure II.1 ci-contre.

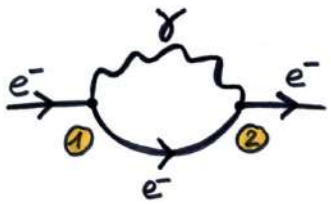


Fig. II.1: un électron (e^-) emet un photon virtuel (γ) en ① et le réabsorbe en ②

Dans cette réaction, l'état intermédiaire contenant un électron et un photon n'est pas observé : on parle d'un état **virtuel**, ou encore d'une fluctuation quantique virtuelle (voir A.3.1)de l'électron.

Un autre exemple est représenté sur la figure II.2, où un photon se convertit en une paire électron-positron.

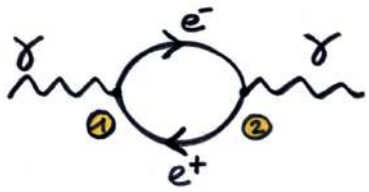


Fig. II.2: un photon (γ) se désintègre en ①, en une paire virtuelle électron-positron ($e^- - e^+$), laquelle s'annihile en ② pour redonner un photon

Mais si ces états virtuels ne peuvent être observés directement, ils ont des effets physiques bien tangibles. L'exemple de la figure II.2 montre que *le photon est virtuellement composé de deux particules chargées*, de charges égales et opposées. Il est donc susceptible d'interagir avec un autre photon selon la réaction de la figure II.3 où, dans un premier temps, un des photons devient une paire formée d'un électron et d'un positron ① ; puis l'autre photon interagit avec l'électron selon la diffusion Compton ② et ③ ; enfin, l'électron diffusé et le positron s'annihilent pour donner un nouveau photon ③.

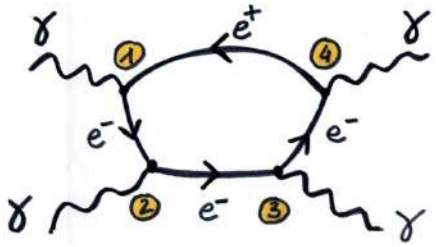


Fig. II.3: diffusion photon-photon résultant de l'existence de fluctuations virtuelles

Au final, on obtient une collision élastique entre deux photons, c'est-à-dire une réaction de diffusion de la lumière par la lumière. Un tel phénomène, pourtant bien réel, est interdit par les lois de la physique classique. Il n'est rendu possible que grâce aux effets de fluctuations **??** quantiques... virtuelles.

De même, l'électron peut fort bien exister sous la forme d'un état lié de trois particules chargées, à savoir deux électrons et un positron II.4.

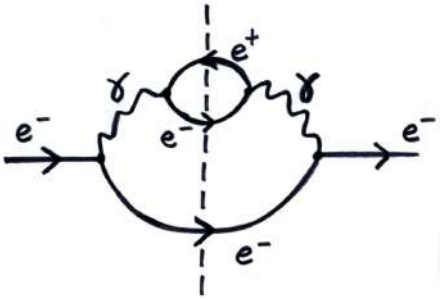


Fig. II.4: un électron contient virtuellement des particules de charge positive (ici un positron)

L'électron, particule élémentaire de charge électrique négative, contient donc virtuellement des particules de charge électrique positive ! Alors : **la notion de particule élémentaire a considérablement évolué avec l'exploration du monde subatomique**[6]

dans le monde des particules, savoir si un objet peut être considéré comme élémentaire ou non n'est pas une tache aisée. Cela nécessite une analyse de l'objet en question sous toutes les coutures ! Ainsi, **toutes les expériences menées jusqu'à présent sont en accord avec l'image d'un électron ponctuel**, sans contenu interne, mais susceptible de passer par des états virtuels contenant d'autres particules élémentaires du Modèle Standard.

En revanche, les expériences menées sur le proton dans les années 50 ont rapidement invalidé un modèle ponctuel du proton, même en tenant compte d'effets liés aux états virtuels. Il est important de souligner que la réponse à la question : « composite ou élémentaire ? » dépend aussi de façon cruciale de notre capacité à sonder la matière à des échelles toujours plus petites, ce qui nécessite des énergies toujours plus élevées.

II.1.3 Les particules élémentaires

À ce jour, sont considérées comme particules élémentaires :

- le photon (interaction électromagnétique)
- les gluons (interaction forte)
- les bosons Z et W (interaction faible)
- les six quarks u,d,s,c,b,t
- l'électron, le muon, le tau et les neutrinos associés (on les appelle les leptons)
- ainsi que leurs antiparticules respectives

les quarks et les gluons, sont donc, jusqu'à preuve du contraire, des particules élémentaires

II.2 Classification des particules

II.2.1 Classification historique ou classification par masse

- L'électron e^-(à cause de sa faible masse) est **un lepton** (leptos = léger) ;
- Le proton p^+et le neutron n^0 ont une masse semblable. Ce sont, vu leur masse importante, **des baryons** (baros = lourd) ;
- Les « poids moyens » sont **les mésons** (mesos = milieu).On rappelle que le μ^-, a une masse comprise entre celle de l'électron et celle du proton ($m_\mu \approx 210\ m_e$, avec m_e= 0,511 MeV) ; les premiers réels mésons découverts constituent le triplet de mésons π :
  - π^+ et π^-, de masse $\approx 273\ m_e$, de vie moyenne $\approx 10^{-8}$s, se désintègrent en $\pi^\pm \longrightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$
  - π^0, de masse $\approx 265\ m_e$, de vie moyenne $\approx 10^{-16}$s, se désintègre en $\pi^0 \longrightarrow 2\gamma$

Les mésons π interagissent vivement avec la matière : *ce sont bien les particules messagères de l'interaction forte.*

- En 1947, découverte d'une nouvelle particule, neutre le (Lambda) Λ^0, instable. Elle a une vie moyenne de $\approx 2,6 \times 10^{-10}$ s et se désintègre en

$$\Lambda^0 \longrightarrow p^+ + \pi^- \qquad (*)$$

C'est la première fois que l'on met en évidence une particule qui se désintègre en un proton (stable)→ elle est sensible à l'interaction forte. Comme c'est « étrange » : elle participe à l'interaction forte malgré une vie anormalement longue... On parle alors « d'étrangeté » ou de particule **étrange** (S pour strange).

- Toujours en 1947, on découvre quatre autres mésons (de masse $\approx 1000\ m_e$) eux aussi « étranges », qui vont par paires :

$$\begin{matrix} K^+ & K^0 \\ K^- & \bar{K}^0 \end{matrix}$$

- C'est ensuite le tour de quatre Δ : Δ^{++} Δ^+ Δ^0 Δ^-
- En 1953 : Σ^+ Σ^0 Σ^-
- En 1954 : Ξ^0 Ξ^-

Remarque : ces particules sont réellement « vues », dans les chambres à bulles par exemple (du moins celles qui sont chargées électriquement). On fait passer les particules chargées dans la chambre sous l'influence d'un champ d'induction magnétique afin de courber leurs trajectoires. À l'intérieur de la chambre se trouve un liquide en état de surchauffe. Lorsqu'une particule chargée traverse ce milieu, il passe à l'état de vapeur. Il y a apparition, le long de la trajectoire, de bulles qui marquent ainsi son passage. De même, les produits chargés de sa désintégration y laissent leur trace. On filme le processus et l'analyse permet de reconstruire toute la cinématique de l'événement. Cela permet l'identification complète des particules. On fait également passer les particules dans de la matière plus dense comme, par exemple, un empilement de plaques photographiques.

On peut là aussi reconstituer la cinétique des phénomènes en trois dimensions. En fait, plus on injecte d'énergie dans l'accélérateur de particules, plus on en découvre de nouvelles. On a également identifié des particules appelées **résonances** à durée de vie extrêmement courte 10^{-23}s, typique de l'interaction forte. On en avait découvert, à l'époque, *plus de 500*... Bref, fin des années 1950, Il est évident que, dans ces conditions, l'ancienne classification, assez simpliste, par masse (baryons, leptons...) n'a plus beaucoup de sens. On cherche d'autres classifications pour y voir plus clair [7].

II.2.2 Classification par sensibilité aux interactions

Le plus important est de connaître à quels types d'interactions la particule est sensible.

Elles sont toutes, y compris le photon, sensibles à l'interaction gravitationnelle.

Les leptons (leptos = faible) (tous de spin demi-entier) sont sensibles :

- à l'interaction électromagnétique (si chargés),
- à l'interaction faible.

Les hadrons (hadros = fort) sont sensibles :

- à l'interaction électromagnétique (si chargés),
- à l'interaction faible,
- à l'interaction forte.

Les hadrons se décomposent en deux catégories :

· les mésons (de spin entier : 0, 1, ...),

· les baryons (de spin demi-entier : 1/2, 3/2, ...),

Mais le nombre de hadrons des deux types découverts au fil du temps devint tel que d'autres classifications s'imposèrent. Citons comme exemple[7].

II.2.3 Classification des hadrons par produits de désintégration

Les particules p^+, e^-, ν_e, leurs antiparticules et γ sont stables.
Toutes les autres sont instables et se désintègrent, en :
p^+, e^-, ν_e, leurs antiparticules et γ. Cela semble cohérent :

✓ les mésons se désintègrent toujours en leptons e^+, e^-, ν_e, $\bar{\nu}_e$ et en photons ;

✓ les baryons se désintègrent inévitablement en p^+, (ou p^-)+ mésons (comme $*$ page 13)
Un baryon ne semble pouvoir se désintégrer en leptons uniquement.

Les hadrons semblent se scinder en deux catégories bien distinctes : *les baryons* et *les mésons*. Donnons la valeur +1 à chaque baryon (-1 aux antibaryons) et 0 aux mésons. Ce nombre, noté B, est appelé *nombre baryonique*. Dans toutes les désintégrations observées, il est conservé [1] ; on dit qu'il y a *conservation du nombre baryonique* ; dans l'exemple ($*$) ci-dessus, on a : $\Lambda^0(B=1) \longrightarrow p^+(B=1) + \pi^-(B=0)$ [7].

II.2.4 Classification des hadrons par vitesse de désintégration

La vie moyenne des hadrons (mésons et baryons) est courte. Une durée de10^{-23} s est normale. Dans ce cas, l'étrangeté vaut 0 (le nombre quantique $S=0$). Si cette durée est « plus longue » 10^{-10} s par exemple pour Λ^0, la particule est étrange et on lui attribue une valeur d'étrangeté $S=-1$.

D'autres particules sont « super-étranges » ; leur étrangeté devient $S=-2$. On a, par exemple, pour Ξ^- la valeur $S=-2$ car Ξ^- se désintègre d'abord en $\Lambda^0+\pi^-$ avec une vie moyenne de 10^{-10} s et Λ^0 se désintègre ensuite en $p^+ + \pi^-$ avec une vie moyenne de 10^{-10} s [7].

1. Un nombre conservé au cours d'une désintégration porte le nom de *nombre quantique*

II.2.5 Classification des hadrons par(isospin)

On constate que le p^+ et le n^0 ont à part des charges électriques différentes, quasiment les mêmes caractéristiques, en ce compris des masses très semblables. Il semble s'agir de deux aspects d'une même particule, *le nucléon*. On constate des ressemblances identiques pour d'autres catégories de particules :

- 3 π (de masses semblables)
- 3 Σ (de masses semblables)
- 4 Λ (de masses semblables)

Cela fait penser aux isotopes atomiques qui possèdent exactement les mêmes propriétés chimiques ; ils ne diffèrent que par leur nombre de neutrons, donc par des masses légèrement différentes. Voilà pourquoi on caractérise les familles de hadrons par un nouveau nombre quantique, le « spin isotopique » ou « isospin » I. Comme tout nombre quantique, l'isospin ne peut prendre que des valeurs bien définies.

Tout comme l'électron (de spin $J = 1/2$) possède deux projections (nombre de projections possibles $= 2J + 1$) de ce spin (+1/2 et -1/2), le nucléon présentant également deux aspects, les projections de son isospin I_z doit pouvoir prendre deux valeurs +1/2 et -1/2. Son isospin I vaut ainsi 1/2.

Si $I = 1$, on aura 3 possibilités pour I_z : +1, 0, -1 (c'est le cas du π et du Σ).

Si $I = 3/2$, on aura 4 possibilités pour I_z : +3/2, +1/2, -1/2 et -3/2 (c'est le cas du Δ).

Il existe cette relation [2] remarquable entre les nombres quantiques I, B, S

$$Q = I_z + \frac{B}{2} + \frac{S}{2} \tag{II.1}$$

Où Q est la charge électrique (s'exprime en unité de la charge de l'électron) et I_z est la valeur de l'une des projections possible de l'isospin I.

Deux exemples :

- le proton $Q = +\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{0}{2} = 1$
- le neutron $Q = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{0}{2} = 0$

[7].

II.2.6 Classification des hadrons en octets (eightfold way)

Ce sont des relations entre nombres quantiques, de même type que celle donnée au paragraphe précédent, qui ont fait penser à répartir les particules en octets, en nonets,...

2. La relation dite de "Gell-Mann-Nishijima"

pour les baryons d'une part, pour les mésons d'autre part. Dès 1961, Gell-Mann et Ne'emann songent à construire des graphes dans lesquels on porte, sur l'axe vertical, le nombre quantique $B + S$, appelé « hypercharge » pour les baryons (S pour les mésons, B valant 0 pour eux), en fonction de I_z sur l'axe horizontal.

Il s'agit d'un véritable tableau de Mendeleïev des particules. Les symétries qui apparaissent ainsi ont ensuite donné l'idée de l'existence de sous-structures aux mésons et aux baryons. Elles sont à la base de l'hypothèse, puis de la mise en évidence indirecte des quarks [7].

II.3 Un quark

Ce nom, pour le moins original, est attribué aux constituants des protons et des neutrons, qui, avec les électrons, sont les briques de la matière dont nous sommes faits.

Jusqu'au début du XX^{e} siècle, on pensait que protons et neutrons étaient élémentaires, c'est à dire **sans structure interne**. Mais alors, comment expliquer la multitude des particules observées dans le rayonnement cosmique ou produites dans les accélérateurs par la suite ?

En 1964 Murray Gell-Mann et George Zweig ont proposé d'introduire les quarks comme composants des protons et des neutrons.

Deux types de quarks suffisaient pour leur description, le **up** et le **down**. Mais d'autres particules connues à cette époque, les mésons K, nécessitaient l'existence d'un troisième quark, qu'on a appelé **étrange**.

Aujourd'hui nous savons que les types de quarks, encore appelés **saveurs**, sont au nombre de **six** : aux quarks précédents on doit ajouter le **charme**, le **bottom** (appelé aussi beauté ou beauty en anglais) et le **top** (appelé aussi vérité, ou truth en anglais).

Les quarks sont associés par paires au sein de « familles ». Le up et le down constituent la première famille, le charme et l'étrange la seconde, et dans la troisième on trouve le bottom et le top. Pour chaque quark il existe un anti-quark de même masse mais dont toutes les autres caractéristiques (charge, saveur, couleur) sont opposées. Parlons en d'ailleurs, de la masse ! Car elle constitue une sacrée différence entre les quarks ! Il y a un facteur 60 000 entre le quark **up**, le plus **léger**, et le **top**, le plus **lourd** ! Parmi les questions qui taraudent actuellement le physicien des particules, on trouve en bonne place l'origine de ce large éventail de masses, ainsi que la question des charges fractionnaires des quarks. Pour le moment, il n'existe pas de réponse satisfaisante à ces deux questions, et à de nombreux autres concernant ces mystérieux quarks [6].

Famille	Nom	Charge	Masse estimée en Mev/c^2
1re famille	Up (u)	$+2/3$	3 ± 2
	Down (d)	$-1/3$	6 ± 2
2e famille	Etrange (s)	$-1/3$	95 ± 25
	Charme (c)	$+2/3$	1250 ± 90
3e famille	Bottom (b)	$-1/3$	4200 ± 70
	Top (t)	$+2/3$	174200 ± 3300

Tab. II.1: Les quarks sont classés par valeur croissante de leurs masses

Les incertitudes qui sont adjointes à ces masses reflètent l'ensemble des erreurs expérimentales ainsi que celles des calculs permettant de déduire les masses des quarks à partir de celles des hadrons observés

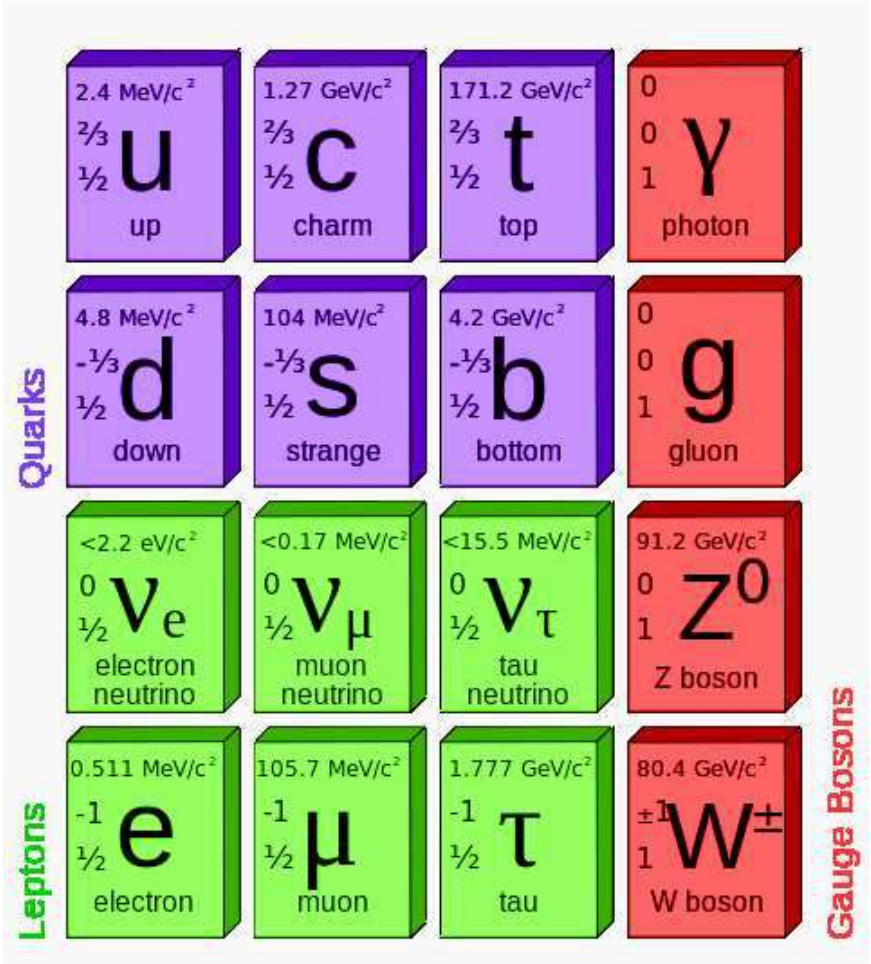


Fig. II.5: les quarks bosons leptons

[8]

II.4 la structure des hadrons

les hadrons sont des particules composites constituées dans un modèle statique de 2 ou 3 quarks. Ces quarks sont appelés ***quarks de valence*** et donnent aux hadrons leurs propriétés [3]. La structure des hadrons est en fait plus complexe que ses seuls quarks de valence (paires quark-antiquark, gluons supplémentaires). Ce nuage de quark-antiquark gluons est appelé couramment **une mer** et il est nécessaire de la considérer afin de décrire la distribution spatiale de certaines propriétés du hadron telles que la charge électrique ou le moment magnétique [6].

On peut combiner par dizaines des protons et des neutrons afin de former les noyaux des atomes, les quarks *se combinent* uniquement par *deux* ou par *trois* pour former, les hadrons ordinaires. Quand nous disons uniquement , il s'agit d'un point de vue du CQM [4]. Ce dernier (CQM) est un modèle phénoménologique non établi via QCD [5] qui elle, permet d'envisager d'autres formes hadroniques. Ainsi une propriété de QCD, le confinement, oblige les hadrons à être de couleurs neutres. Afin de comprendre la simple règle qui va suivre, signalons juste que chaque quark (comme u et d) existe sous trois couleurs différentes (bleu, rouge et vert, il s'agit d'un degré de liberté). La couleur neutre peut s'obtenir de deux façons :
- L'addition de trois couleurs différentes
- L'addition d'une couleur avec son anticouleur (portée par les antiquarks)
Ceci nous mène à la règle suivante dite **règle de trialité** qui régit le nombre de quarks et d'antiquarks dans les hadrons [6]

$$q - \bar{q} = 3n \tag{II.2}$$

avec q le nombre de quarks, $\bar{q}$ celui d'antiquarks et n un entier. La Table (II.2) regroupe quelques-unes de ces possibilités [9].

n	q	$\bar{q}$	nom donné à l'hadron
0	1	1	méson
0	2	2	tétraquark ou diquonium
1	3	0	baryon
1	0	3	antibaryon
1	4	1	pentaquark ou mésobaryonium
2	6	0	hexaquark ou dibayron
...	...	...	...

Tab. II.2: Hadrons définis par la règle de trialité

3. Comme les propriétés des atomes donnés par électron de valence
4. le modèle en quarks constituants ou encore modèle naïf de quarks
5. La théorie de la Chromodynamique Quantique
6. Cette règle ne s'applique qu'aux états multiquarks qui ne sont qu'une partie des formes exotiques possibles. Autre cas le médiateur de l'interaction forte, le gluon, est lui-même coloré , ce qui permet d'envisager des états hybrides (quarks + gluons).

Chapitre III

Représentation des particules

III.1 Représentation du groupe SU(3) ˝Saveur˝

III.1.1 Le modèle en quarks constituants

Nous allons commencer par décrire le modèle classique des quarks, introduit indépendamment par Gell-Mann et par Zweig en 1964. Il est une suite ˝logique˝d'un premier article paru en 1962 concernant la classification des hadrons, particules soumises à l'interaction forte, à l'aide du groupe SU(3).

Ce modèle a permis de comprendre bon nombre d'éléments concernant les baryons et les mésons . Il est intéressant de noter qu'avant d'être des constituants physiques de la matière, les quarks ont été introduits en tant que ˝simples˝objets mathématiques

III.1.2 Les particules fondamentales

À l'heure actuelle, **les constituants fondamentaux** de la matière, ou particules élémentaires, sont les **leptons** et les **quarks**. Ce sont tous les deux **des fermions** de spin 1/2 . Tout comme les leptons $(e, \nu_e, \mu, \nu_\mu, \tau, \nu_\tau)$, les quarks sont au nombre de six (notés d, u, s, c, b, t). Dans la nature, ces particules élémentaires peuvent interagir à travers les quatre types de forces connues : gravitationnelle, faible, électromagnétique et forte. Dans le cadre de la théorie quantique des champs, les interactions se font via l'échange de boson de jauge (par exemple le photon, médiateur de l'interaction électromagnétique) [9].

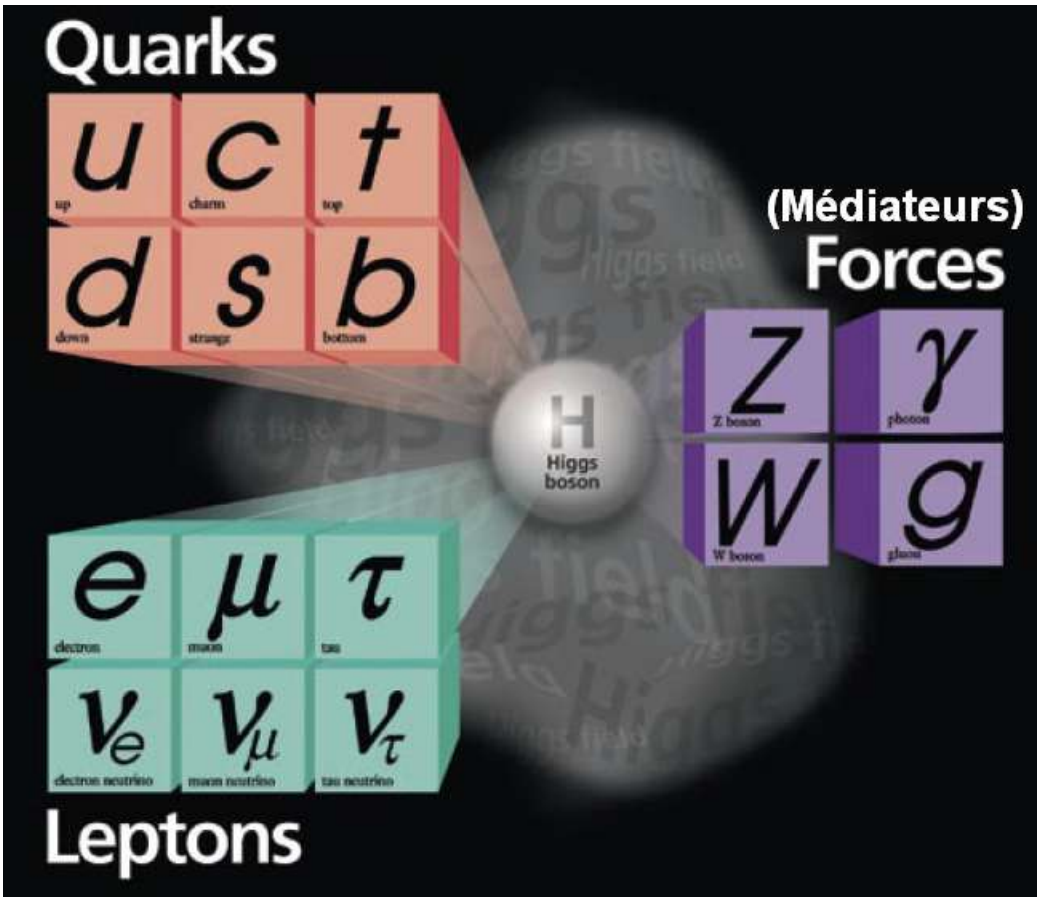


Fig. III.1: Les particules fondamentales

à gauche ceux qui forment la matière, à droite ceux qui véhiculent les 3 forces fondamentales au niveau subatomique, et au centre le ***boson de Higgs****, la pièce qui manque encore à l'appel.*

III.1.3 Les quarks

Nous avons regroupé les propriétés (nombres quantiques) des quarks dans la Table (III.1). La convention veut que la saveur d'un quark (I_z, S, C, B, T) soit de même signe que sa charge électrique et que le quark ait une parité $+1$. La charge Q s'exprime en unité de la charge de l'électron et est reliée aux autres nombres quantiques par la formule de Gell-Mann-Nishijima (généralisée)où Y est l'hypercharge [10].

$$Q = I_z + \frac{Y}{2} \quad \text{avec} \quad Y = B + S + C + B + T \tag{III.1}$$

Propriétés Quark	d	u	s	c	b	t
Q(charge électrique)	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$
B (nombre baryonique)	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
I (isospin)	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0	0	0
I_z(ou I_3) (projection de l'isospin)	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0	0	0
S (étrangeté)	0	0	-1	0	0	0
C (charme)	0	0	0	1	0	0
B (bottomness)	0	0	0	0	-1	0
T (topness)	0	0	0	0	0	1

Tab. III.1: Quarks et leurs nombres quantiques

les quarks portent également un nouveau type de charge relié à l'interaction forte, la couleur, existant sous trois variantes, bleu, rouge et vert (les antiquarks portant, eux, une anticouleur). Les quarks sont groupés en trois générations comme les leptons

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \tag{III.2}$$

Les quarks les plus légers sont ceux de la première génération, u et d, ils constituent entre autres les protons (combinaison uud) et les neutrons (udd) formant notre monde environnant. Les autres familles sont constituées de quarks plus lourds et se combinent pour former des particules plus lourdes instables. Pour les observer, il faut se placer à haute énergie, c-à-d dans les rayons cosmiques ou dans les accélérateurs. Les trois quarks légers (u, d et s) forment les vecteurs de base de la représentation fondamentale du groupe SU(3) notée **3** si on utilise sa dimension comme"label"de la représentation.

Son diagramme de poids est représenté dans la (Fig III.2) ainsi que celle du diagramme conjugué $\bar{\mathbf{3}}$. Cette symétrie est dite de saveur et notée $\mathrm{SU}(3)_f$ (flavour), chaque quark correspond à une saveur. Dans un diagramme de poids SU(3), l'abscisse donne la projection I_z (notée aussi I_3) de l'isospin et l'ordonnée l'hypercharge de chaque point du diagramme. Ce diagramme est à deux dimensions car le groupe SU(3) est un groupe de rang 2, ce qui signifie que l'on peut trouver parmi les générateurs du groupe SU(3), au maximun deux qui commutent. Les axes de la (Fig III.2) représentent les valeurs propres de ces deux générateurs commutants.

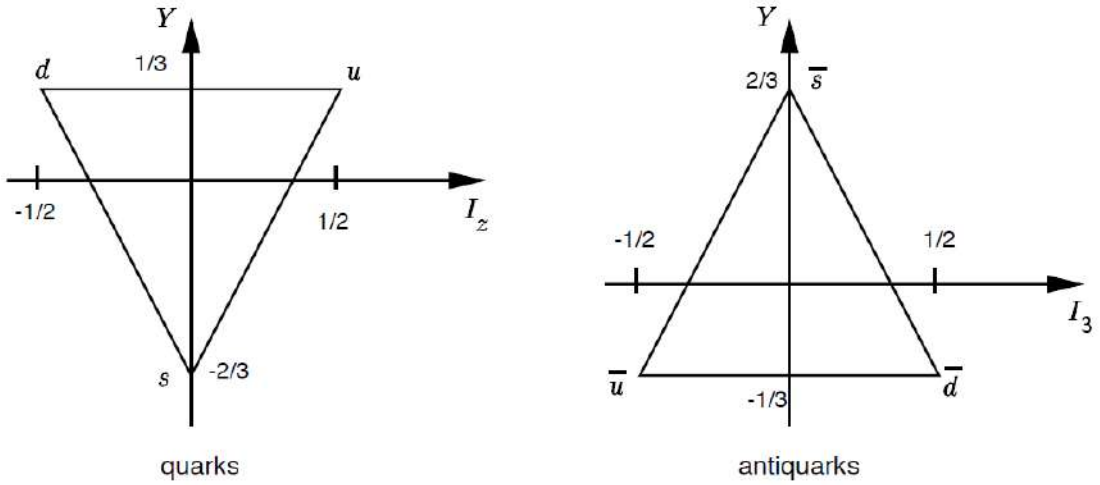


Fig. III.2: Diagrammes de poids de la représentation fondamentale et sa conjuguée de SU(3)

Du point de vue de la mécanique quantique, cela correspond à deux grandeurs mesurables simultanément. Notons que d'un point de vue mathématique, l'introduction des quarks u, d, s et de leurs antiparticules a été une conséquence naturelle de la théorie des groupes, en particulier de SU(3) où les représentations octet ou décuplet utilisées par Gell-Mann et Ne'eman peuvent se construire par produits directs à partir de la représentation fondamentale. D'une façon logique, les baryons sont formés de trois quarks (ce sont des fermions et ont un nombre baryonique égal à un) et les mésons d'une paire quark antiquark. C'est le modèle des quarks constituants (CQM).

III.1.4 Baryons du groupe SU(3)

Les baryons de ce type sont composés de trois quarks choisis parmi u, d et s . Ils se classent dans des multiplets de saveurs issus de la décomposition en représentations irréductibles du triple produit tensoriel de la représentation de dimension **3** du groupe SU(3) :

Généralement la décomposition pour un groupe de symétrie SU(n) de dimension n [10] :

$$n \otimes \bar{n} = n^2 - 1 \oplus 1 \tag{III.3}$$

$$n \otimes n \otimes n = \frac{1}{6}n(n+1)(n+2) \oplus \frac{1}{3}n(n+1)(n-1) \oplus \frac{1}{3}n(n+1)(n-1) \oplus \frac{1}{6}n(n-1)(n-2) \tag{III.4}$$

donc pour $n = 3$

$$3 \otimes \bar{3} = 8 \oplus 1 \tag{III.5}$$

alors : $8 \oplus 1$ (1octets et un singlet),

$$3 \otimes 3 \otimes 3 = 10 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 1 \tag{III.6}$$

alors : $3 \otimes 3 \otimes 3 = 10 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 1$ (1 décuplet , 2 octets et un singlet),

III.1.5 Baryons du groupe SU(3)

Les baryons sont des hadrons de nombre baryonique égal à l'unité[1] L'observation suggère de les classer dans **un octet** et **un décuplet** de SU(3) (Fig III.3 et III.4).

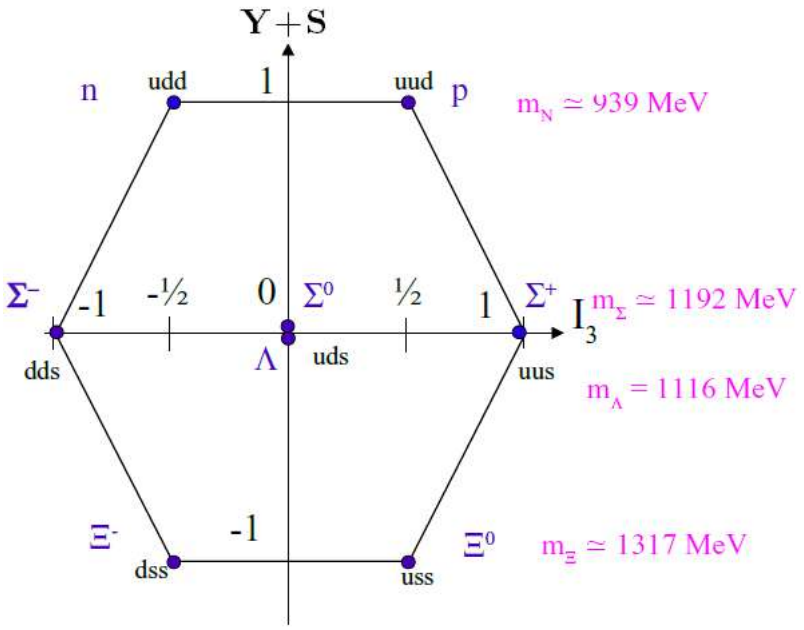


Fig. III.3: diagrammes de poids SU(3) de la représentation **un octet**.

L'octet de particules auquel appartiennent le neutron (n) et le proton (p). Chaque ligne horizontale correspond a une étrangeté donnée, tandis que les diagonales sont associées à des charges électriques identiques. Deux particules, le Σ^0 et le Λ^0, occupent le même emplacement au centre de l'octet. À droite, on a indiqué les masses approximatives des particules figurant sur chaque ligne avec la convention $c = 1$ (voir A.1 , page 30).

1. Ce nombre quantique, conservé dans les interactions, associé aux baryons est nécessaire pour expliquer la stabilité du proton et du neutron.

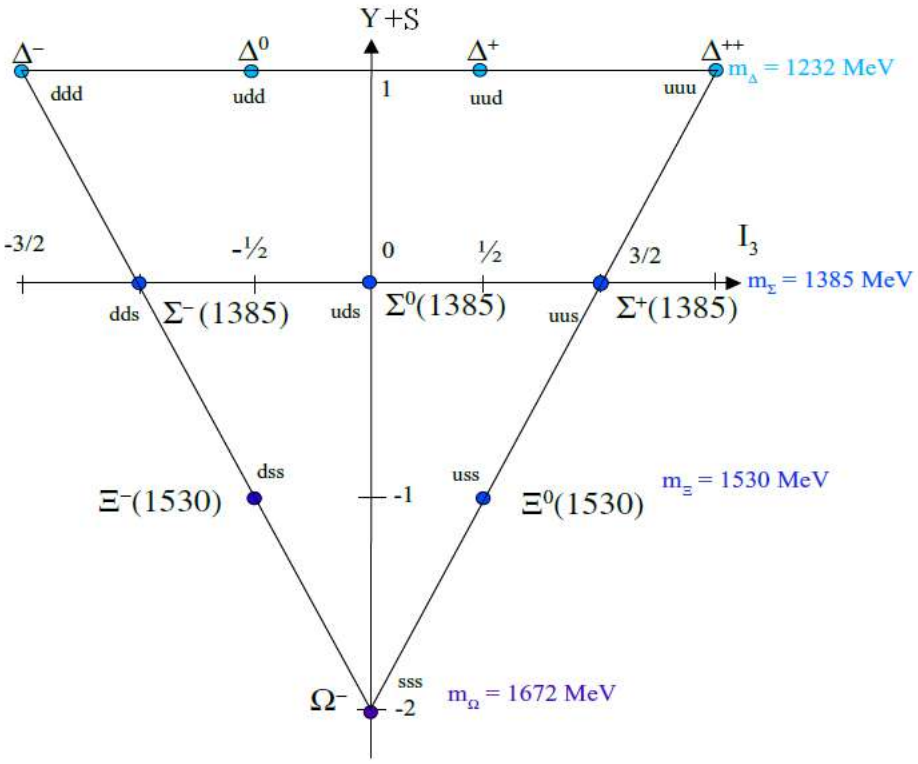


Fig. III.4: diagrammes de poids SU(3) de la représentation **un décuplet**.

III.2 La nécessité de la couleur

Dans les années 60, alors que le modèle des quarks semble de plus en plus convaincant pour les physiciens, une particule reste assez mysterieuse : le Δ^{++}. En effet, cette particule doit être constituée de trois quarks (up) placés exactement dans le meme etat. Or deux quarks de même nature sont des fermions identiques qui ne peuvent coexister dans le même état d'après le principe d'exclusion de Pauli.

En 1965, le Coreen M.Y. Han et le Japonais Y. Nambu d'une part, l'Americain O.W. Greenberg d'autre part, proposent de résoudre le problème en dotant les quarks d'une nouvelle caracteristique, qu'ils nomment **couleur**. En fait, cette *couleur* est un terme de physique des particules qui n'a rien à voir avec la couleur au sens usuel du terme.

Les quarks ne peuvent exister qu'en trois couleurs differentes, bleu, vert et rouge. L'avantage ? Les trois quarks up du Δ^{++} peuvent maintenant coexister sans défier le principe d'exclusion de Pauli, car chacun se distingue des deux autres par sa couleur. Ainsi, les quarks se différencient par leur charge électrique (certains ont une charge électrique valant 2/3 de celle du proton, d'autres -1/3), mais aussi par leur couleur [6].

III.2.1 Le nombre quantique couleur "QCD"

En effet, les quarks possédant un spin demi-entier, il est naturel de les considérer comme des fermions. Mais alors **le principe**[2] **d'exclusion de Pauli** semblerait suggérer que des hadrons exotiques tels que le Δ^{++}, le Δ^{-} et le Ω^{-} ne peuvent exister.

$$\begin{aligned} \Delta^{++} &\iff u\uparrow u\uparrow u\uparrow \\ \Delta^{-} &\iff d\uparrow d\uparrow d\uparrow \\ \Omega^{-} &\iff s\uparrow s\uparrow s\uparrow \end{aligned}$$

Ils consistent respectivement de trois quarks uuu , trois quarks ddd et de trois quarks sss et possèdent un spin égal à $\frac{3}{2}$.

Ce qui implique qu'ils possèdent tous les trois les mêmes nombres quantiques. La seule façon de résoudre ce paradoxe sans modifier profondément le modèle des quarks est de postuler l'existence d'une dégénérescence supplémentaire. **Le nombre quantique associé à cette dégénérescence fut nommée couleur**[3][11]

III.3 Le groupe SU(3) "Couleur"

En supposant l'existence de trois couleurs différentes (rouge, vert et bleu), on peut poser une règle simple qui assure qu'aucun quark isolé ne puisse être observé : *Tous les états observables doivent être des singulets de couleur - aucun multiplet de dimension*

2. Un principe ne se démontre pas
3. Un nouveau degré de liberté : la couleur

supérieure n'est permis. Un tel singulet peut être construit de deux façons : en combinant un quark coloré avec un antiquark possédant l'anticouleur correspondante (chacun des trois couleurs étant également représentées) ou encore en combinant trois quarks ou antiquarks de couleurs différentes (un rouge, un vert et un bleu).

Cette règle s'inscrit à l'intérieur d'une théorie de jauge basée sur la couleur : la chromodynamique quantique (ou QCD). Comme toute théorie de jauge, elle est fondée sur un postulat d'invariance : le monde est invariant sous une transformation locale de couleur. Le groupe de symétrie associé à cette transformation est le groupe $SU_c(3)$, où l'indice c sert à le distinguer du groupe SU(3), de saveur. Contrairement à la symétrie de saveur, qui est une symétrie brisée (en raison de la différence de masse entre les quarks up, down et étrange) et globale, la symétrie , est une symétrie exacte et locale. Par locale, on entend que la transformation considérée dépend de l'espace et du temps. Les particules qui assurent la symétrie locale de couleur sont au nombre de huit et sont nommées gluons. Par exemple, un quark donné peut changer de couleur indépendamment des autres quarks qui l'entourent, mais chaque transformation doit obligatoirement s'accompagner de l'émission d'un gluon (de la même façon qu'un électron changeant de phase émet un photon). Le gluon émis se propage et est réabsorbé par un autre quark dont la couleur variera de telle façon que le changement initial soit compensé. On retrouve donc ici notre règle selon laquelle tout hadron demeure incolore. Pour citer un exemple concret, supposons qu'un quark rouge se transforme en quark bleu. Pour cela, il devra émettre un gluon rouge-antibleu, qui une fois absorbé par un quark bleu le transformera à son tour en quark rouge. La couleur globale est alors conservée, puisque le nombre total de quarks d'une couleur donnée sera le même avant et après le processus. Les gluons agissent donc en quelque sorte comme les agents de la force forte à l'intérieur du hadron [11].

III.4 Le groupe SU4 "Charmé"

Notons que dans (III.1.4), nous n'avons considéré que les baryons formés de quarks u, d et s. Pour inclure le quark c, il faudrait passer à SU(4) et on aurait un diagramme à trois dimensions (groupe de rang 3) dont un exemple est donné par la (Fig III.5). Idem pour le quark b où il faut alors passer au groupe SU(5). La masse des quarks c et$b$ étant beaucoup plus élevée que celle des constituants du triplet SU(3), ces deux symétries de plus haute dimension sont fortement brisées. Pour ce qui est des baryons contenant un quark t, sa durée de vie est tellement courte qu'un baryon top ne peut se former [9].

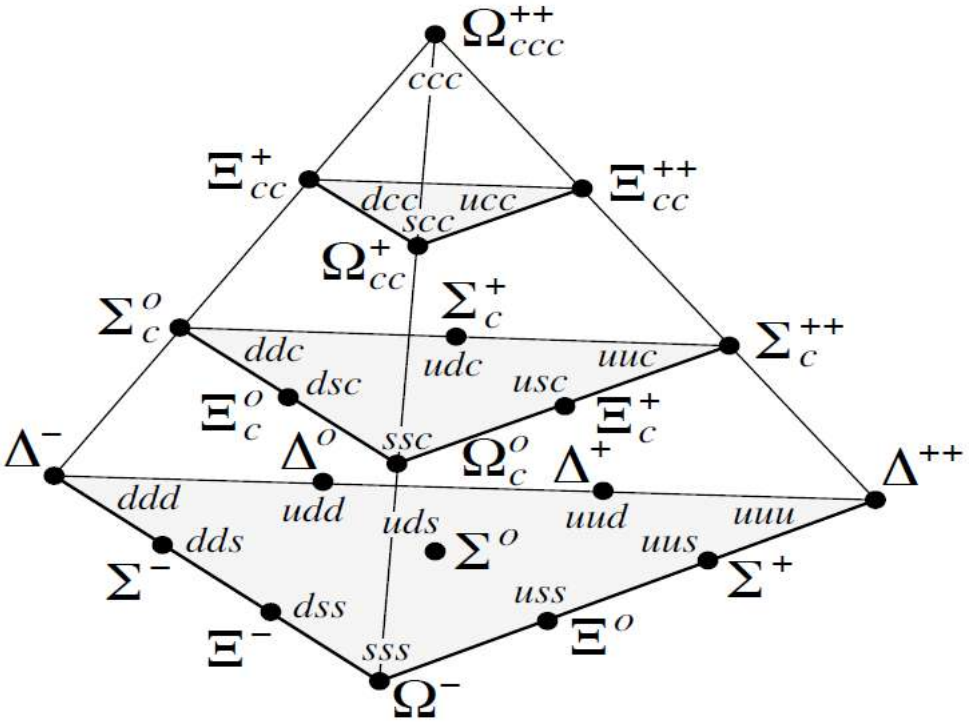


Fig. III.5: diagramme de poids de la représentation SU(4) de dimension 20.

On voit que dans la (Fig III.5), chaque plan correspond à une représentation du sous-groupe SU(3) de SU(4). Le plan du bas correspond au décuplet de Gell-Mann et Ne'eman.

Conclusion

De ce travail on vu qu'il y a quatre forces (interactions) connues : la force forte, la force faible, la force électromagnétique, et la force gravitationnelle.

Pour toutes les forces (avec la possible exception de la gravité), l'interaction se porte sur la matière élémentaire (les fermions) par la transmission d'une particule de jauge (un boson). Il reste l'un des grands défis des physiciens de la physique des particules est le développement d'une théorie qui va inclure la gravité.

En outre :
- Il y a un nombre limité des particules, identifiées par leur masse et les nombres quantiques internes
- Il y a un nombre limité des forces qui agissent entre les particules
- Les forces et la matière évoluent en espace-temps. Etendre ces limites est fortement lié par la construction des nouveaux accélérateurs, et avec le développement de l'instrumentation pour les détecteurs sophistiqués.

Les quarks, et les particules composées des quarks, sont sensibles aux interactions fortes.
- elle est à l'origine des forces nucléaires qui assurent la cohésion des noyaux,
- elle assure la liaison des 3 quarks dans le proton et le neutron Les leptons ne sont pas sensibles aux interactions fortes.

La chromodynamique quantique, est la théorie qui décrit les interactions fortes. L'interaction existe par l'échange de 8 bosons (gluons) de masse nulle. Le couplage est assuré par une charge (couleur), spécifique pour les quarks et les gluons. Les leptons n'ont aucune charge couleur.

Les fermions et les bosons n'ayant pas de la charge couleur sont observables, mais les composants colorés (les quarks et les gluons) seront confinés à l'intérieur des hadrons qui n'ont pas de couleur eux-mêmes.

Les hadrons observables sont de 2 types : les baryons (3 quarks ou 3 antiquarks) et les mésons (d'un quark et d'un antiquark)

Au sein même de la physique, il y a des objections à l'approche extrêmement réductionniste d'essayer d'expliquer tout en termes de particules élémentaires et de leurs interactions.

Ces objections sont habituellement formulées par les physiciens de l'état solide. ils considèrent que l'importance est l'étude des propriétés des atomes et des molécules et particulièrement de leurs propriétés dans des ensembles statistiquement grands.

Ces critiques maintiennent que même une connaissance complète des particules élémentaires ne donne pas la connaissance complète des atomes et des molécules, la connaissance la plus importante qui est d'un point de vue pratique.

Annexes

A

Annexe

A.1 Les unités et ordres de grandeur de la physique des hautes énergies

Les unités de base du système international (SI) sont la longueur, la masse et le temps qui s'expriment respectivement en mètres, kilogrammes et secondes. Il apparaît qu'un tel système d'unités n'est pas approprié pour décrire des particules élémentaires.

Les longueurs typiques, en physique des particules, sont de l'ordre de 10^{-15}m ($\sim$ la taille du proton) et les masses de l'ordre de 10^{-27}kg. D'autre part, il s'agit le plus souvent des phénomènes hautement relativistes c'est-à-dire, que les vitesses typiques sont de l'ordre de la vitesse de la lumière $c = 2.998 \cdot 10^8$ ms^{-1}.

Finalement, la plupart des expériences consiste à introduire dans un potentiel électrique des particules de charge égale à celle de l'électron. L'électronvolt (eV) et tous ses multiples (keV, MeV, GeV, TeV) seront donc des unités d'énergie plus appropriées. Comme son nom l'indique, l'électronvolt est l'énergie que gagne un électron accéléré par une différence de potentiel de 1 volt sur une distance de 1 m. Il vaut $1,610^{-19}$J.

En matière de *particules-sondes* signifie qu'une particule de quelques keV permet d'"observer"des systèmes de dimensions voisines de l'angström (10^{-10} m, la taille de l'atome), qu'à 100MeV elle "voit " le femtomètre (1fm = 10^{-15} m, la taille du proton) et qu'à 10 TeV elle atteint le cent-millième de femtomètre (ce sera le cas du LHC [1]).

En vertu de l'équivalence masse-énergie ($E = mc^2$, pour une particule au repos), on peut mesurer la masse dans des unités d'énergies divisées par le carré de la vitesse de la lumière$c$, par exemple, en MeV/c^2. Mais le plus souvent, on l'exprime directement en unités d'énergies (MeV). Cela revient simplement à prendre la vitesse de la lumière comme unité de mesure de vitesses ($c = 1$). Exprimée dans cette unité, toute vitesse de particule est nécessairement inférieure ou égale à 1 puisqu'une particule ne peut pas aller plus vite que la lumière [12].

1. l'accélérateur LHC (Large Hadron Collider) au Centre Européen de Recherche Nucléaire (CERN-Genève, Suisse)

A.2 Masse et énergie de repos

Masse et énergie de repos La masse m, l'énergie E et l'impulsion p d'une particule satisfont la relation proposée par Einstein :

$$E^2 - P^2c^2 = m^2c^4$$

où : c est la vitesse de la lumière dans le vide. Ainsi, une particule au repos ($P = 0$) a une énergie - de repos - non nulle, proportionnelle à sa masse $E = mc^2$

A.3 Les relations d'incertitude de Heisenberg

Pour saisir la notion de particules virtuelles, il faut comprendre et interpréter convenablement les relations d'incertitude énoncées dès 1927 par W. Heisenberg. Ce n'est pas simple, encore moins évident. On notera qu'il est plus correct de parler de « relations d'incertitude » que de « principe d'incertitude ».

A.3.1 Fluctuation quantique

En physique quantique, une fluctuation quantique est le changement temporaire du niveau d'énergie à un certain point dans l'espace selon le principe d'incertitude de Werner Heisenberg. Selon une des formulation du principe, l'énergie et le temps peuvent être liés par :

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

Cette relation montre que de l'énergie peut être créée durant un temps très court, sans pour autant violer de principe de conservation de l'énergie. D'un point de vue ondulatoire, l'énergie d'un champ peut varier sur une durée brève : on dit que la valeur de l'énergie fluctue. D'autres grandeurs sont liées à des incertitudes sur leur valeur, et peuvent donc fluctuer, généralement autour d'une valeur moyenne [13].

A.4 La "QCD"

Prix Nobel 2004 En octobre 2004, le prix Nobel de physique a été décerné à D. Gross, H. D. Politzer et F. Wilczek pour leur contribution décisive à la description théorique de la force forte. Cette théorie, connue sous le nom de Chromodynamique Quantique (QCD), explique l'attraction augmentant avec la distance entre les quarks par la « liberté asymptotique »[3]

A.5 Un proton comme trois quarks

Que se passe-t-il si on essaye de casser un proton ou un neutron pour voir de quoi il est fait ? La situation change complètement : l'énergie à fournir pour casser un de ces

nucléons en morceaux n'est pas négligeable quand on la compare à son énergie de repos. En fait, cette énergie est si élevée qu'elle donne lieu à la création de nouvelles particules, de sorte que, contrairement au cas de l'atome ou du noyau, les morceaux que l'on ramasse après la collision ne sont pas les mêmes d'une collision à l'autre.

Difficile dans tout ça de faire le tri entre les composants éventuels du nucléon qui a été brisé et les nombreuses particules qui ont été créées.

Mais alors, comment savoir de quoi est constitué un proton ? cela nécessite une analyse détaillée des caractéristiques (masses, charges, énergies, etc.) des particules produites dans diverses collisions permettant de le briser. Par exemple, des études ont démontré que le proton est en fait un assemblage de quarks, d'antiquarks et de gluons (Fig A.1).

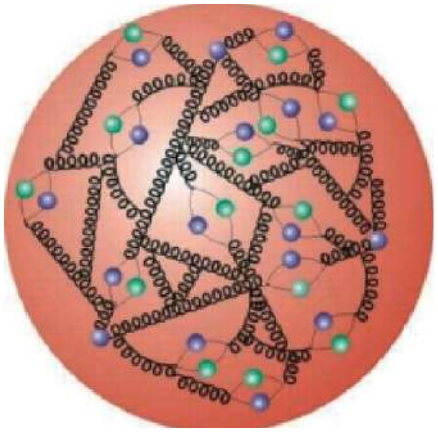


Fig. A.1: La mer du proton, un ensemble de paires quark-antiquark en interaction permanente avec des gluons.

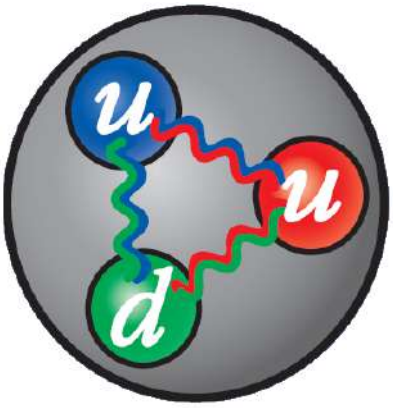


Fig. A.2: Les quarks de valence du proton, avec des gluons représentés sous forme de ressort. Tels de la colle, ils assurent la cohésion du proton en étant les médiateurs de l'interaction forte entre les quarks.

On est loin du cas simple de l'atome ou du noyau, où les constituants étaient facilement libérés lors d'un choc. De plus, dans ce cas, les masses - et donc les énergies de repos - des constituants sont très petites devant celle de l'objet composite. La majeure partie de l'énergie de repos de ce dernier est donc due à l'énergie de liaison : les constituants d'un proton interagissent fortement les uns avec les autres, par le biais d'une interaction qualifiée fort ! On comprend alors pourquoi l'énergie à fournir pour briser notre proton est

si élevée. Dans une telle situation, nous perdons certains de nos repères, puisque les propriétés d'un objet composite peuvent s'avérer assez éloignées de celle de ses constituants.

la différence essentielle entre le cas du proton et ceux de l'atome ou du noyau est due à la nature de l'interaction qui lie les constituants de ces objets.*L'interaction forte entre quarks, qui assure la cohésion du proton, possède la propriété particulière d'être confinante* : la force entre deux quarks augmente avec la distance qui les sépare.

Ni l'interaction électromagnétique, qui assure la cohésion de l'atome, ni l'interaction forte entre nucléons, qui lie ces derniers au sein du noyau atomique, ne partagent cette propriété. C'est pourquoi le proton, ou tout autre assemblage de quarks, est un objet composite bien différent de ceux auxquels nous sommes habitués [6].

A.6 L'électron

Mais au fait, nous avons cassé l'atome, puis son noyau. Que peut-on dire de l'autre constituant de base de l'atome initial : *l'électron* ? Est-il, lui aussi, un objet composite ? Ou bien est-il une particule élémentaire ? Pour répondre à cette question, il faut d'abord comprendre la différence entre les deux. En physique classique, la notion de particule élémentaire est définie par opposition à celle d'objet composite : c'est un objet insécable, qu'on ne peut ni briser, ni faire disparaître dans aucune réaction. La relativité restreinte vient modifier cette image simple car elle rend possibles certaines réactions où deux particules disparaissent en combinant leurs énergies de repos pour créer de nouvelles particules. On parle de réactions d'annihilation. Par exemple, on peut bombarder notre électron avec un positron et le faire disparaître par annihilation, mais sans pour autant le briser.

Existe-t-il un moyen de faire disparaître l'électron dans une réaction qui ne soit pas une annihilation ? Oui ! On peut par exemple le bombarder avec un antimuon pour obtenir un neutrino électronique et un antineutrino muonique. Mais alors, doit-on en conclure que l'électron est composite ? Non ! L'analyse de cette réaction montre que l'électron n'a pas été brisé (ni l'antimuon d'ailleurs), mais a plutôt été **converti** en neutrino électronique (et l'antimuon en antineutrino muonique). L'électron est bien une particule élémentaire [6].

B

Annexe

B.1 La chambre à brouillard, ou chambre de Wilson

C.T.R. Wilson (1869-1959) était passionné par l'étude du brouillard, fréquent dans son Écosse natale, et par tous les phénomènes induits par la présence de gouttelettes d'eau en suspension dans l'atmosphère. Cette vapeur d'eau a la propriété de se condenser - c'est-à-dire de devenir liquide - au contact d'une surface : c'est la formation de buée, bien connue des automobilistes et des plongeurs. Il établit qu'un phénomène similaire se produit lorsqu'une particule chargée traverse de la vapeur d'eau placée dans les bonnes conditions de température et de pression obtenues en procédant à une diminution brutale de la pression du gaz. Des gouttes d'eau se forment alors sur le passage de la particule, ce qui permet de visualiser sa trajectoire. On pouvait ainsi photographier les événements intéressants pour les étudier ensuite en détails. C.T.R. Wilson reçut le prix Nobel de physique pour son invention en 1927, alors que tous les laboratoires spécialisés en physique nucléaire possédaient au moins un exemplaire de sa « chambre à brouillard ». Un inconvénient majeur de la chambre de Wilson était son cycle utile limité : chaque prise de clichés nécessitait une série d'actions mécaniques amenant l'appareil à son point de fonctionnement. En 1936, Alexander Langsdorf inventa la « chambre à diffusion », opérationnelle en permanence. Basée sur une technologie légèrement différente, le bas de cette chambre doit être refroidi en dessous de 0° C et la vapeur d'eau est remplacée par de l'alcool.

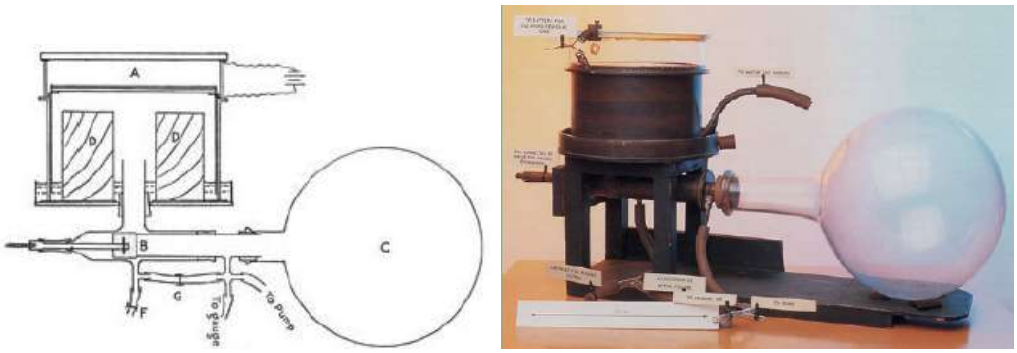


Fig. B.1: La chambre de Wilson

la Chambre de Wilson conservée au musée du laboratoire Cavendish à Cambridge (Angleterre). Sur la gauche de l'image, la chambre à brouillard proprement dite est le cylindre de verre (A) dont les parois sont opaques pour offrir un arrière-plan sombre aux photographies. Le fond de la chambre est fixé à un piston de cuivre qui coulisse verticalement. L'ensemble est placé dans une enceinte dont le fond est rempli d'eau afin de saturer l'atmosphère d'humidité. Lors des phases de détente, une valve est ouverte entre le piston et le globe de verre transparent (à droite de l'image) où règne un vide poussé. L'air se précipite alors dans le globe (C), ce qui abaisse le piston et provoque la détente, c'est-à-dire l'expansion, du gaz souhaitée. .

B.2 La chambre à bulles

La chambre à bulles est basée sur le même principe que son ancêtre, la chambre à brouillard. Une cuve est remplie d'un liquide dense maintenu juste en dessous de son point d'ébullition. Lors du passage de particules, un piston est brutalement abaissé. Cette détente soudaine place le liquide dans un état thermodynamique instable. Les particules incidentes déposent de l'énergie sur leur passage.

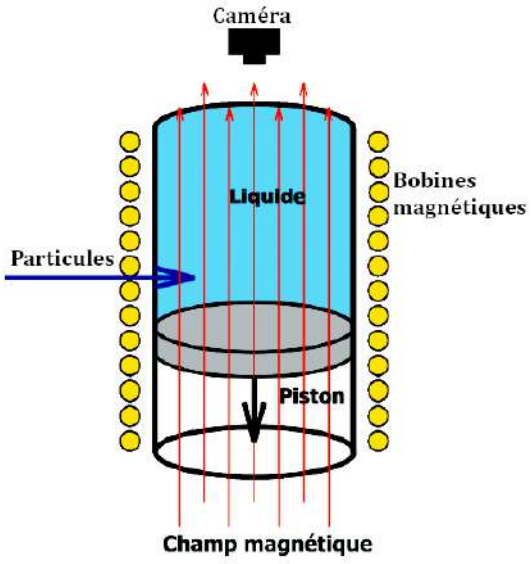


Fig. B.2: Principe de La chambre à bulles

Le liquide se met alors àbouillir le long de leur trajectoire qui est ainsi mise en évidence par un chapelet de bulles. La chambre est plongée dans un champ magnétique intense qui courbe les traces chargées et permet de mesurer l'énergie des particules.

L'hydrogène était le milieuactif idéal pour ce type de détecteur, car son noyau formé d'un seul proton donnait lieu à des interactions simples avec les particules du faisceau incident. Mais la difficulté résidait dans la température où il devient liquide : -253 degrés Celsius ! En quelques années, la technologie fit des progrès remarquables : dès 1959, Berkeley avait une chambre à bulles à hydrogène liquide de 72 pouces (environ 180 cm) de diamètre et celle de Brookhaven atteignit les 80 pouces en 1963. Dans les années 70, les chambres à bulles furent remplacées par des détecteurs plus performants, les chambres à étincelles puis les chambres à fils[6].

B.3 La découverte des rayons cosmiques

Les rayons cosmiques furent découverts par hasard en remarquant qu'un bruit parasite affectait tous les détecteurs d'ionisation - laquelle est produite par le passage de particules chargées - et ce quelles que soient les précautions prises pour leur isolation, indiquant l'existence d'une radiation extrêmement pénétrante d'origine inconnue.

En 1907, le père Théodore Wulf mit au point un nouveau détecteur permettant de rechercher l'origine de ce mystérieux rayonnement en dehors des laboratoires. En réalisant des mesures au sommet de la Tour Eiffel, il constata que le taux de radiation était réduit de deux tiers par rapport au niveau du sol, signe que la fraction émise par la Terre avait disparu, absorbée par l'atmosphère. Cependant, le taux n'était pas nul, indiquant qu'une partie de ce rayonnement provenait de l'espace. Pour le confirmer, Viktor Franz Hess effectua une série de vols en ballon à haute altitude à partir de 1911. Le 12 août 1912, il atteignit une altitude de 5350 mètres. Il démontra que, si le taux du mystérieux rayonnement continuait de diminuer jusqu'à une altitude de 1500 mètres, il se mettait ensuite à augmenter considérablement, jusqu'à atteindre, à une altitude de 5000 mètres, une valeur deux fois plus importante qu'au niveau du sol. Il conclut à l'existence « d'une source extra-terrestre de radiation pénétrante ». Cette interprétation demanda encore quelques années avant d'être acceptée par l'ensemble de la communauté scientifique ; en 1926, Robert Millikan - auteur de la première mesure du rapport entre la charge et la masse de l'électron - baptisa ce rayonnement « rayons cosmiques ». Viktor F. Hess partagea le prix Nobel de physique 1936 avec Carl Anderson, découvreur quelques années auparavant du positron, la première particule d'antimatière. Pour lui rendre hommage, l'expérience HESS porte aujourd'hui son nom : située dans le désert de Namibie elle étudie les photons de haute énergie provenant de l'espace.

B.4 Lieux et collaborations de la physique des particules

On prend ici quelques lieux, collaborations et groupes de la physique des particules :

Centre Européen de Recherche Nucléaire

Le CERN est l'un des plus grands centres de la physique des particules au monde. Il est situé à la frontière franco-suisse, à quelques kilomètres de Genève. C'est au CERN que se trouvait le grand collisionneur électron-positron (LEP) qui a maintenant laissé place au grand collisionneur de Hadrons (LHC). Il sera le plus puissant des accélérateurs. On trouve notamment au CERN, l'expérience COMPASS (COmmon Muon Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy) attachée au SPS (Super Proton Synchrotron) [9].

Deutsches Elektronen Synchrotron

DESY est le plus grand centre de physique des particules en Allemagne, il est situé à Hambourg. On y trouve l'accélérateur HERA, Hadron Elektron Ring Anlage, dans lequel on a les détecteurs ZEUS, H1, HERA-B et HERMES [9].

Fermi National Accelerator Laboratory

Souvent appelé le Fermilab, ce laboratoire de la physique des particules situé près de Chicago doit son nom à Enrico Fermi. On y trouve le tévatron qui est l'un des synchrotrons les plus puissants au monde où l'on réalise des collisions $p\bar{p}$. CDF, Collider Detector at Fermilab, D0 experiment, SELEX sont des collaborations associées au tévatron. FOCUS est également situé au Fermilab [9].

Gesellschaft für SchwerIonenforschung

Plus connu sous le nom de GSI, il s'agit du centre de recherche sur les ions lourds situé à Darmstadt en Allemagne. On y a récemment inauguré une nouvelle structure avec l'accélérateur FAIR (Facility of Antiproton and Ion Research). On trouve au GSI le détecteur HADES [9].

High Energy Accelerator Research Organisation

Il se situe au Japon (dans la ville de Tsukuba). On y trouve le KEKB B-factory [9].

Jefferson LAB

Le Thomas Jefferson National Accelerator Facility est situé dans l'état de Virginie (USA). Son accélérateur principal est CEBAF (Continuous Electron Beam Accelerator Facility) [9].

Standford Linear Accelerator Center

Plus communément appelé suivant ses initiales, SLAC. On y trouve notamment le PEPPII B-factory. C'est à Standford que se trouve l'expérience/ groupe BABAR [1] qui est une collaboration internationale [9].

1. L'origine du nom vient de la création de paire $b\bar{b}$.

Notations utilisées

q	quark
$\bar{q}$	antiquark
p	proton
e	électron
π	méson (pi) : le pion
μ	méson (mu)
Δ	hadron (Delta)
Λ	la particule (Lambda)
Ξ	la particule (Xi)
K	Le Kaon
Σ	Le Sigma
Ω	Le Omega
Q	la charge électrique
I	isospin (nombre quantique)
I_z, I_3	projection de l'isospin
C	Le nombre quantique (charme)
B	Le nombre quantique (bottomness)
T	Le nombre quantique (topness)
B	Le nombre baryonique (nombre quantique)
S	L'étrangeté (nombre quantique)
QCD	Quantum ChromoDynamics ou la chromodynamique quantique
CQM	Modèle en quarks constituants
CERN	Centre europien de recherche nucléaire
LHC	Large hadron collider

Bibliographie

[1] http ://www.techno-science.net. ix

[2] Bernard DIU : Remarques sur la distinction entre particules élémentaires et particules composées. *Annales de l'IHP section A tome1 no 2 p 147-232*, © Gauthier-Villars 1964. ix

[3] S. Descotes-Genon F. Fulda-Quenzer M.-P. Gacoin L. Iconomidou-Fayard H. Kérec G. Le Meur P. Roudeau J.-A. Scarpaci M.-H. Schune J. Serreau A. Stocchi. N. Arnaud, M.-A. Bizouard : Numéro 1 : De l'atome au noyau. *ELEMENTAIRE Revue d'information scientifique paraissant deux fois par an, publiée par : Élémentaire, LAL, Bât. 200, BP 34, 91898 Orsay Cedex*, 2005. ix, 31

[4] Johann Collot : Classification des particules subatomiques propriétés des interactions fondamentales, (UJF Grenoble/ U. de Savoie) 2006-2007. 3

[5] S. Descotes-Genon F. Fulda-Quenzer M.-P. Gacoin L. Iconomidou-Fayard H. Kérec G. Le Meur P. Roudeau J.-A. Scarpaci M.-H. Schune J. Serreau A. Stocchi. N. Arnaud, M.-A. Bizouard : Numéro 5 : Les neutrinos. *ELEMENTAIRE Revue d'information scientifique paraissant deux fois par an, publiée par : Élémentaire, LAL, Bât. 200, BP 34, 91898 Orsay Cedex*, Solstice d'hiver 2006. 6

[6] S. Descotes-Genon F. Fulda-Quenzer M.-P. Gacoin L. Iconomidou-Fayard H. Kérec G. Le Meur P. Roudeau J.-A. Scarpaci M.-H. Schune J. Serreau A. Stocchi. N. Arnaud, M.-A. Bizouard : Numéro 4 : La couleur des particules. *ELEMENTAIRE Revue d'information scientifique paraissant deux fois par an, publiée par : Élémentaire, LAL, Bât. 200, BP 34, 91898 Orsay Cedex*, Solstice d'hiver 2006. 10, 11, 16, 18, 25, 33, 36

[7] Luc Louys : Interactions fondamentales et particules élémentaires. 13, 14, 15, 16

[8] Shu LI : *Mesure de la production W^+W^- dans les collisions proton-proton à $\sqrt{s} = 7 TeV$ avec le détecteur ATLAS au LHC.* Thèse de doctorat, l'Université d'Aix-Marseille et University of Science and Technology of China, version 1- 19 Fév 2013. 17

[9] Gilles Colin : Les hadrons exotiques. Rapport technique, Université de Liège - Faculté des sciences, Année académique 2007-2008. 18, 19, 26, 37, 38

[10] A W HENDRY et D B LICHTENBERG : *The quark model.* Physics Department, Indiana University,USA, Printed in Great Britain, ©1978 The Institute of Physics. 20, 22

[11] L.Marleau : *Introduction à la physique des particules.* Département de Physique Université Laval,Québec Canad, 1998-2000. 25, 26

[12] UCL Lockman Dany et Nuttens Claude : *Une incursion dans le monde des particules.* Centre de Physique de Particules et Phénoménologie (CP3) de la faculté des sciences de l'UCL, Mars 2010. 30

[13] http ://www.universcience.fr. 31