

# **Interactions fondamentales et particules élémentaires**

Luc Louys

## Table des matières

Table des matières .....	2
1. Introduction.....	3
2. Les éléments de base - Rappel des unités .....	4
2.1. Équivalence masse - énergie.....	4
2.2. Dualité onde - corpuscule.....	5
1) La lumière onde.....	5
2) La lumière corpuscule .....	5
3. Les quatre interactions fondamentales .....	6
3.1. La 1 <sup>re</sup> interaction : la force de gravitation.....	6
3.2. La 2 <sup>e</sup> interaction : la force électromagnétique.....	6
3.3. La 3 <sup>e</sup> interaction : la force nucléaire forte .....	8
3.4. La 4 <sup>e</sup> interaction : la force nucléaire faible.....	8
4. L'intensité des quatre forces .....	10
5. La propagation des interactions - Leurs messagers.....	11
5.1. Propagation sous forme d'onde .....	11
5.2. Les particules messagères .....	12
1) La force électromagnétique .....	12
2) La gravitation.....	12
3) L'interaction forte.....	12
4) L'interaction faible .....	13
6. Les relations d'incertitude de Heisenberg.....	14
6.1. Première relation d'incertitude (position - vitesse).....	14
6.2. Deuxième relation d'incertitude (énergie - temps).....	15
7. Les particules élémentaires .....	17
7.1. Introduction .....	17
7.2. Classifications des particules .....	17
1) Classification historique ou classification par masse.....	17
2) Classification par sensibilité aux interactions .....	18
3) Classification des hadrons par produits de désintégration.....	19
4) Classification des hadrons par vitesse de désintégration .....	19
5) Classification des hadrons par « isospin ».....	19
6) Classification des hadrons en octets (eightfold way).....	20
8. La structure des hadrons .....	21
1) Les mésons (1 quark et 1 antiquark).....	22
2) Les baryons (3 quarks) .....	23
3) La particule charmée « c ».....	24
4) Les derniers quarks et les derniers leptons.....	25
9. La chromodynamique quantique .....	27
10. Vers la grande unification.....	29
11. Tableaux récapitulatifs.....	32
11.1. Quelques constantes fondamentales .....	32
11.2. Les quatre interactions fondamentales.....	32
11.3. Classement des particules élémentaires et des particules d'interactions .....	33
12. Bibliographie.....	35

# 1. Introduction

Lorsqu'on aborde l'étude de la structure de la matière et de l'univers, on se réfère à trois théories fondamentales qui ont vu le jour au début du XX<sup>e</sup> 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 ( $E = m \cdot c^2$ ). 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) 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 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, on en est encore loin !

## 2. Les éléments de base - Rappel des unités

### 2.1. Équivalence masse - énergie

On ne peut se passer de la célèbre relation d'équivalence masse - énergie due à Einstein :

$$E = m \cdot c^2$$

où, dans le Système International d'unités (SI) que nous utiliserons systématiquement par la suite (sauf avis contraire), la masse  $m$  s'exprime en kg et la célérité de la lumière  $c$  en m/s ( $c = 299\,792\,458$  m/s). L'énergie est alors exprimée en

$$\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} = \text{J (joule)}$$

Rappelons que :

- le **newton** (N) est l'unité SI de force. Un newton est la force communiquant une accélération de  $1 \text{ m/s}^2$  à une masse de  $1 \text{ kg}$  ( $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \times 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ) ;

- le **joule** (J) est l'unité SI de travail, d'énergie ou de quantité de chaleur. Un joule est le travail d'une force d'un newton déplaçant son point d'application d'un mètre dans son propre sens ( $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \times 1 \text{ m}$ ).

Toutefois, parler en kg ou en J lorsque l'on traite de masses extrêmement petites (particules élémentaires comme un nucléon, un électron, ...) n'est guère commode. Dans ce cas, on a pris l'habitude d'exprimer la masse à l'aide d'une unité d'énergie équivalente beaucoup plus petite et mieux adaptée, *l'électronvolt*. Cette unité ne fait pas partie du SI ;

- l'**électronvolt** (eV) est une unité d'énergie. Elle est égale à l'énergie acquise par un électron soumis à une différence de potentiel de  $1 \text{ volt}$  (V) ;

- le **coulomb** (C) est l'unité SI de quantité de charge électrique. C'est la quantité d'électricité à fournir en une seconde pour produire un courant d'une intensité de  $1 \text{ ampère}$  (A). La charge électrique élémentaire  $e$  (celle de l'électron, en valeur absolue) vaut  $1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$ .

Dès lors, l'énergie acquise par une particule chargée étant égale au produit de sa charge électrique (en coulomb) par la différence de potentiel à laquelle elle est soumise (en volt), on peut comparer l'électronvolt au joule ( $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$ ).

Remarque : un ampère représente un nombre considérable d'électrons circulant dans un conducteur ; un courant d'une intensité de  $1,602 \text{ A}$  est produit par  $10^{19}$  électrons traversant la section de ce conducteur en  $1 \text{ s}$ .

L'électronvolt est donc l'équivalent d'une masse extrêmement petite ( $E = 1 \text{ eV} \Leftrightarrow m = 1,78 \times 10^{-36} \text{ kg}$ ). C'est la raison pour laquelle on aura, la plupart du temps, recours à des multiples de l'électronvolt : le kiloélectronvolt (keV ou  $10^3 \text{ eV}$ ), le mégaélectronvolt (MeV ou  $10^6 \text{ eV}$ ), le gigaélectronvolt (GeV ou  $10^9 \text{ eV}$ ) et le téraélectronvolt (TeV ou  $10^{12} \text{ eV}$ ).

Remarque : on espère que le futur accélérateur de particules du C.E.R.N. à Genève, le L.H.C. (*Large Hadron Collider*), pourra atteindre une énergie de  $9 \text{ TeV}$  vers 2004.

Exprimée dans cette unité, la masse du proton vaut  $938 \text{ MeV}$  (valeur plus aisée à manipuler que  $1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ). Celle de l'électron vaut  $0,511 \text{ MeV}$  ou  $0,91 \times 10^{-30} \text{ kg}$  (il s'agit,

comme dans tous les cas, de masse au repos !). Ce dernier nombre mérite d'être rapproché d'une autre masse fameuse, celle du Soleil, soit  $2 \times 10^{30}$  kg !

## 2.2. Dualité onde - corpuscule

### 1) La lumière onde

Une onde lumineuse (électromagnétique, en général) est caractérisée par la fréquence de vibration des champs électrique et magnétique qui la constituent ainsi que par la vitesse à laquelle elle se propage. Ses caractéristiques sont donc :

- la *fréquence*  $\nu$  de l'onde qui représente le nombre d'oscillations des champs par seconde. La fréquence s'exprime en hertz ( $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ ) Par exemple, nous aurons des ondes radio en F.M. entre 88 et 100 MHz ;
- la *vitesse de propagation*  $c$  de l'onde électromagnétique qui, dans le vide, vaut approximativement 300 000 000 m/s.
- La *longueur d'onde*  $\lambda$ , déduite des deux autres grandeurs, s'exprime, elle, en m.

Ces 3 grandeurs sont liées par la relation  $\lambda = \frac{c}{\nu}$ .

### 2) La lumière corpuscule

Pour interpréter l'effet photoélectrique, Einstein a montré que la lumière doit être considérée comme constituée de petits grains, les **photons**. La lumière se présente donc sous deux aspects : c'est la *dualité onde - corpuscule*.

De même, pour comprendre les états stationnaires d'un électron sur une orbitale atomique, il est nécessaire d'associer à l'électron, considéré généralement comme corpuscule, une onde. La longueur d'onde associée est donnée par

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

où  $v$  est la vitesse de la particule.

L'énergie  $E$  de la particule et la fréquence  $\nu$  de l'onde associée sont liées par la relation

$$E = h \cdot \nu$$

où  $h$  est la constante de Planck valant  $6,626 \times 10^{-34}$  J·s. Ce nombre donne le coefficient de proportionnalité entre l'énergie d'un photon et sa fréquence. Cette constante a les dimensions d'une « action » et est aussi appelée « quantum d'action ».

On peut ainsi calculer l'énergie associée à un photon.

Exemple : quelle énergie l'électron perd-il (ou émet-il) lorsqu'il redescend de la 3<sup>e</sup> couche à la 2<sup>e</sup> couche électronique de l'atome d'hydrogène ? Cette perte d'énergie se traduit par l'émission d'un photon (émission de la raie  $H_\alpha$ ). La longueur d'onde de cette raie étant de 656,3 nm, soit  $656,3 \times 10^{-9}$  m, l'énergie du photon vaut

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6,626 \times 10^{-34} \times 2,998 \times 10^8}{656,3 \times 10^{-9}} = 3,027 \times 10^{-19} \text{ eV} \approx 2 \text{ eV}$$

Ces faibles quantités d'énergie sont celles nécessaires pour ioniser les atomes, donc pour « électriser » les corps.

### 3. Les quatre interactions fondamentales

C'est « la bande des quatre » qui régit l'univers ! Quatre interactions. Quatre forces. Voyons-les dans l'ordre chronologique de leur découverte.

#### 3.1. La 1<sup>re</sup> 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 :

$$F = G \frac{m \cdot m'}{r^2}$$

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

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 ci-dessus).

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.

#### 3.2. La 2<sup>e</sup> 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  $Q$  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) :

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{Q \cdot Q'}{r^2}$$

où  $F$  s'exprime en N. La grandeur  $\epsilon$  porte le nom de *permittivité 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 :

$$F_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q \cdot Q'}{r^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{1 \times 1}{1} = 9 \times 10^9 \text{ N}$$

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  $\epsilon_{r(\text{relative})} = \frac{\epsilon_{(\text{milieu})}}{\epsilon_{0(\text{vide})}}$ . Dans le cas de

l'eau,  $\epsilon_r = 80$  et la force dans l'eau vaut simplement  $F_0 / \epsilon_r$ .

En magnétisme, on trouve un coefficient de même type que la permittivité électrique : la *perméabilité magnétique absolue*  $\mu$  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  $\ell$ , séparés d'une distance  $r$ , dans lesquels circulent les courants d'intensités  $I_1$  et  $I_2$  : on a  $F = \mu \cdot \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot \ell}{2\pi r}$ .

$$F = \mu \cdot \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot \ell}{2\pi r}$$

Remarques :

1. Les relations caractérisant la gravitation et la force électrique se ressemblent étrangement. Dès le XIX<sup>e</sup> 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 complexes que nous n'aborderons pas ici) : en associant  $\epsilon_0$  et  $\mu_0$  ( $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$  et  $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ A}^2 \cdot \text{s}^2 / (\text{m}^2 \cdot \text{N})$ ), 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 ( $\epsilon_0 \mu_0 = 1/c^2$ ). 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.

2. En 1897, Joseph Thomson interprète correctement la nature des rayons cathodiques : ce sont des *électrons* (voir à ce sujet un article intéressant relatant les circonstances de la découverte de l'électron : *La Recherche*, novembre 1997). Pour lui, les atomes sont constitués de « billes », des sphères dures formées d'éléments positifs et négatifs.

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* (par Rutherford en 1911) par des particules  $\alpha$  (noyaux d'hélium  $\text{He}^{++}$ ). La majorité de ces particules traversent la feuille d'or ; quelques-unes seulement rebondissent sur les atomes (en fait les noyaux) d'or. La proportion des noyaux  $\alpha$  subissant un rebond par rapport aux noyaux traversant la feuille d'or a permis d'estimer la dimension des noyaux atomiques (quelques  $10^{-15} \text{ m}$ ), donc très petite par rapport à celle des atomes (quelques  $10^{-10} \text{ m}$ ).

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.

3. 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  $0,0529 \text{ nm}$  ou  $0,0529 \times 10^{-9} \text{ m}$ , que  $m_{p^+} = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ,  $m_{e^-} = 0,911 \times 10^{-30} \text{ kg}$ , que  $|Q_{e^-}|$

=  $Q_{p^+} = e = 1,602 \times 10^{-19}$  C et que  $G = 6,672 \times 10^{-11}$  et  $1/(4\pi\epsilon_0) = 9 \times 10^9$ , 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 :

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{0,83 \times 10^{-7}}{036 \times 10^{-46}} \approx 2,3 \times 10^{39}$$

### 3.3. La 3<sup>e</sup> interaction : la force nucléaire forte

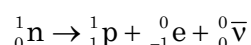
Si les deux premières interactions permettent de comprendre la stabilité des atomes, elles ne permettent pas, par contre, de comprendre celle des noyaux. S'ils contiennent plus d'un proton, la force de gravitation est insuffisante pour compenser la force de répulsion électrique entre charges positives.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

### 3.4. La 4<sup>e</sup> interaction : la force nucléaire faible

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



où  ${}_0^0\bar{\nu}$  est un antineutrino.

Chaque fois que l'interaction faible agit, il apparaît 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  ${}_1^1\text{p} \rightarrow {}_0^1\text{n} + {}_1^0\text{e} + {}_0^0\nu$  où  ${}_1^0\text{e}$  est un antiélectron ou *positon*.

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

Remarque : un mot à propos de la dénomination ambiguë d'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'antimatière qui aurait les mêmes propriétés physico-chimiques que le nôtre. Un antihydrogène est constitué d'un  $p^-$  et d'un  $e^+$ . La spectroscopie de l'antihydrogène apparaîtra exactement identique à celle de l'hydrogène. Un changement orbital électronique, par exemple un saut de la 3<sup>e</sup> orbite sur la 2<sup>e</sup> fait apparaître une raie  $H_\alpha$  identique dans les deux spectres.

## 4. L'intensité des quatre forces

Essayons de classer les quatre forces selon leur intensité. Il faut 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  $\hbar \cdot c = 3,16 \times 10^{-26} \text{ N} \cdot \text{m}^2$  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*, où  $F_g \cdot r^2 = G \cdot m \cdot m'$  ( $F_g \cdot r^2$  s'exprime comme  $\hbar \cdot c$  en  $\text{N} \cdot \text{m}^2$ ) avec  $m = m' = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ , la constante de couplage vaut

$$\frac{G \cdot m \cdot m'}{\hbar \cdot c} = 6 \times 10^{-39}$$

(ce nombre est sans unité) ;

2. pour la *force électrique*, où  $F_e \cdot r^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot Q \cdot Q'$  avec  $Q = Q' = e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$ , la constante de couplage vaut

$$\frac{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot e \cdot e}{\hbar \cdot c} = \frac{1}{137} = \alpha .$$

Remarque : en spectroscopie, une raie spectrale, lorsque l'atome est soumis à certaines conditions physiques particulières, se divise en raies serrées. Cette constante  $\alpha$  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

$$\frac{F \cdot F}{\hbar \cdot c} \approx 1 ;$$

4. pour la *force nucléaire faible*, où  $f$  représente la « charge » nucléaire faible, la constante de couplage vaut

$$\frac{f \cdot f}{\hbar \cdot c} \approx 10^{-14} .$$

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

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

## 5. La propagation des interactions - Leurs messagers

### 5.1. Propagation sous forme d'onde

Les interactions se propagent comme un train d'ondes à une vitesse finie. La notion d'effet instantané n'a plus cours aujourd'hui. Einstein a, en effet, montré qu'aucun signal ne peut se déplacer plus vite que la lumière.

La notion de *champ* a remplacé la notion de force qui agirait instantanément entre deux particules, à cause de leur masse, de leur charge électrique,... Une particule crée, à cause de sa masse, de sa charge électrique,..., une influence sur l'espace qui l'environne. Cette influence gravitationnelle, électrique,... est caractérisée par un champ de pesanteur, un champ électrique,... Si on place une deuxième particule dans le champ créé par la première, il apparaît une force gravitationnelle, électrique,...

En chaque point de l'espace entourant une masse, une charge électrique,... existe la potentialité de développer une force si on place à cet endroit une deuxième masse, une deuxième charge électrique,... Le champ préexiste à la force !

Si la masse, la charge électrique,... (qui crée le champ) bouge, par exemple, autour de sa position initiale, cette perturbation entraînera une vibration qui sera ressentie par la deuxième masse, la deuxième charge,... au bout d'un certain temps et sera ressentie comme un « message » provenant de la première particule.

Dans le cas d'un champ de pesanteur ou d'un champ électrique, la grandeur du champ en un point est inversement proportionnelle au carré de la distance séparant le point de la source du champ.

Ces champs peuvent être définis mathématiquement comme dérivant d'un *potentiel* (symbole  $U$ ). Dans le cas du champ gravifique ou du champ électrique, le potentiel en un point situé à la distance  $r$  de la source est proportionnel à  $1/r$  ( $U \propto \frac{1}{r}$ ).  $U$  est donc nul à l'infini.

Remarque : Si nous dérivons  $\frac{1}{r}$  par rapport à  $r$ , nous obtenons  $-\frac{1}{r^2}$ . La force (ou le champ) dérive bien du potentiel.

Dans le cas des deux autres interactions, vu leur faible portée, l'expression mathématique du potentiel a une structure très différente :  $U(r) \propto \frac{e^{-r/r_0}}{r}$ , où  $r_0$  représente la portée

de l'interaction et  $e$  est la base des logarithmes népériens. C'est à cause de cette exponentielle décroissante que les champs fort et faible décroissent tellement rapidement. Le physicien japonais Hideki Yukawa avait, dès 1935, proposé une relation de ce type. C'est la raison pour laquelle ce potentiel porte le nom de « potentiel de Yukawa ».

Remarque : le potentiel des quatre interactions peut d'ailleurs se ramener à cette forme. En effet, on voit que si  $r_0 = \infty$ ,  $e^{-r/r_0} = 1$  et le potentiel se ramène à l'expression en  $1/r$ .

Mais si  $r_0 \neq \infty$ , nous avons :

- pour la force forte  $r_0 \approx 10 \times 10^{-15}$  m,
- pour la force faible  $r_0 \approx 10 \times 10^{-18}$  m.

## 5.2. Les particules messagères

Les interactions électromagnétiques ont été expliquées comme résultant de la propagation d'une onde se déplaçant à la vitesse  $c$ , dans le vide.

Cependant, il est apparu que, lors de l'interaction entre lumière et matière, les phénomènes observés ne peuvent être expliqués par l'aspect ondulatoire (cf. effet photoélectrique). Le message électromagnétique se manifeste dans ce cas sous forme d'une particule (le photon) qui transporterait une certaine quantité d'énergie (un grain) à la vitesse de la lumière.

La mécanique quantique, née au début du XX<sup>e</sup> siècle, considère les deux explications comme complémentaires. Le photon et le train d'ondes électromagnétiques seraient les manifestations du message échangé entre l'émetteur et le récepteur.

La physique quantique a étendu ce modèle aux quatre interactions étudiées.

### 1) La force électromagnétique

La particule messagère est le *photon*  $\gamma$  ;

- vitesse de propagation (dans le vide) =  $c$  ;
- portée =  $\infty$  ;
- masse du messenger = 0.

L'aspect ondulatoire des photons est l'onde électromagnétique.

### 2) La gravitation

La particule messagère est le *graviton*  $G$  ;

- vitesse de propagation =  $c$  ;
- portée =  $\infty$  ;
- masse du graviton = 0.

Remarque : il est à noter que le graviton est encore, à ce jour, une particule hypothétique.

L'aspect ondulatoire des gravitons sont les ondes gravitationnelles, tant recherchées par les astronomes contemporains.

### 3) L'interaction forte

Quelle est la particule messagère ? Rappelons que Yukawa estimait la portée de l'interaction forte à  $10 \times 10^{-15}$  m ; on peut donc estimer la masse du messenger grâce à la relation

$\lambda = \frac{h}{m \cdot c}$  ; en effet,  $\lambda$ , la longueur d'onde associée à la particule, a des dimensions de

l'ordre de la portée de l'interaction ( $10 \times 10^{-15}$  m) et connaissant  $h$  et  $c$ , nous avons :

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot c} = 10 \times 10^{-15} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{m \times 3 \times 10^8} \rightarrow m = 2 \times 10^{-28} \text{ kg} \approx \frac{1}{9} m_p,$$

soit environ 200 fois la masse de l'électron.

Remarque : deux ans après cette prédiction de Yukawa, on découvre une particule correspondant à cette masse, le méson  $\mu^-$ . Il s'avérera plus tard que ce n'était pas la bonne :  $\mu^-$  n'est pas, en réalité, un méson, mais une particule de même type que l'électron, soit un lepton et donc un *fermion* (ce ne peut donc être une particule messagère).

On pense aujourd'hui que les messagers de l'interaction forte entre nucléons sont les *pions* qui se présentent sous trois formes :  $\pi^0$ ,  $\pi^-$  et  $\pi^+$  (270 fois plus massifs que

l'électron, avec spin entier comme pour toute particule messagère, qui est, de ce fait, un boson). Ce sont vraiment des mésons.

Mais on suppose que les pions ne sont rien d'autre qu'un résidu d'interaction dû aux réels messagers de l'interaction forte : les *gluons*  $g$ .

Arrêtons-nous un instant pour rappeler quelques mots de vocabulaire :

- le **spin** d'une particule est une propriété quantique qui décrit son moment cinétique intrinsèque. Cette propriété se mesure en multiple de  $h / 2\pi = \hbar$  ;

- les particules de spin demi-entier sont des **fermions** (ils constituent la matière proprement dite). Cette famille comprend les particules fondamentales : **quarks** et **leptons** ainsi que leurs antiparticules ;

- les particules de spin entier sont des **bosons** (ils constituent notamment les particules messagères des interactions) ;

- les **mésons** constituent une famille de particules, composées d'un quark et d'un anti-quark. Ils transportent la force nucléaire forte entre les nucléons d'un noyau. Les trois pions en sont les membres les plus légers. Les mésons sont des **hadrons** de spin entier (bosons) ;

- les **gluons** sont des particules d'échange de la force nucléaire forte entre quarks. Ce sont des particules de spin entier (bosons).

Toutes ces notions seront revues, en détail, au paragraphe 7 (les particules élémentaires).

#### 4) L'interaction faible

Les particules messagères sont au nombre de trois ; ce sont les bosons intermédiaires  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z^0$ .

Puisque sa portée est de l'ordre de  $10 \times 10^{-18}$  m, la masse de ces messagers vaut :

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot c} = 10 \times 10^{-18} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{m \times 3 \times 10^8} \rightarrow m = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{10 \times 10^{-18} \times 3 \times 10^8} = 2,2 \times 10^{-25} \text{ kg}.$$

Il s'agit d'une masse colossale, une centaine de fois la masse du proton ! Ils ont été mis en évidence en 1983 au CERN par C. Rubbia et son équipe.

Il est à noter que l'interaction faible et l'interaction électromagnétique sont très proches dans leur comportement. Elles seraient des manifestations d'une force commune appelée « électrofaible ». L'unification entre ces deux forces est réalisée à des températures supérieures à  $10^{15}$  K.

Remarque : des ondes sont associées aux différents messagers. On devrait donc pouvoir les observer. Imaginons deux gigantesques sphères contenant, l'une, un grand nombre de charges électriques positives et, l'autre, un grand nombre de charges négatives. L'interaction attractive entre les deux sphères s'opérera-t-elle par un échange de photons observables ? Malheureusement pour nous, non. Nous ne pouvons espérer nous éclairer grâce à l'échange de photons entre les deux sphères. Lorsque des particules sont impliquées dans une interaction, elles ne sont pas matérialisées. *Toutes ces particules sont des messagers virtuels.*

« Virtuel » ? Voilà un terme peu aisé à comprendre. Lors d'une interaction entre deux particules, il y a échange d'une troisième particule, caractéristique de l'interaction. Comme la particule d'échange ne peut être détectée directement, on dit qu'elle est *virtuelle*. Ces processus ont la particularité d'échapper aux lois de conservation classiques. Ainsi, l'énergie, en physique quantique, peut ne pas être conservée pendant des durées extrêmement brèves.

## 6. 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 ».

### 6.1. Première relation d'incertitude (position - vitesse)

Nous souhaitons mesurer la longueur d'un objet, dans notre monde macroscopique. Nous prenons une règle et mesurons une longueur  $L_1$  avec une imprécision  $\Delta L_1$ . Nous exécutons un grand nombre de fois cette mesure ( $L_2, L_3, L_4, \dots$  etc.) et finalement arrivons à connaître la véritable longueur de l'objet avec une imprécision  $\Delta L = 0$ . Nos multiples opérations de mesurage ne perturbent en rien l'objet.

Ce n'est pas du tout la même chose lorsque nous intervenons dans le monde microscopique.

Werner Heisenberg, plutôt théoricien, parlera de « principe d'incertitude ». Niels Bohr, expérimentateur, penseur, parlera de « principe de complémentarité ». Réunis, ces deux principes forment ce qu'on appellera par la suite « l'interprétation de Copenhague » (longtemps controversée par Einstein).

Comment peut-on détecter la présence d'un électron ? Peut-on le « voir » ? Pour cela, il faut agir avec des objets *avant le même ordre de dimension* (des photons, par exemple). Mais cette opération de mesure pose un gros problème : il y a *interférence* entre l'objet mesuré et l'objet mesureur. On intervient directement sur l'électron ; la mesure elle-même modifie l'objet de la mesure !

Que peut-on dire de l'électron dont nous souhaitons connaître simultanément la position  $x$  et la vitesse  $v$  ou plutôt la *quantité de mouvement*  $p = m \cdot v$  ( $p$  est souvent appelé, à tort, *impulsion*) ?

La physique quantique nous montre qu'il n'est pas possible de connaître  $x$  et  $p$  simultanément, avec une infinie précision. Si on mesure une position  $x$ , on perdra de l'information sur  $p$  et *vice-versa*. L'imprécision ou l'incertitude sur  $x$  et  $p$  est notée  $\Delta x$  et  $\Delta p$  et, en se rappelant que  $h = 6,626 \times 10^{-34}$  J·s, nous avons la relation suivante :

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h.$$

Ce qui signifie que si nous mesurons avec une précision extrême la position de l'électron ( $\Delta x = 0$ ), nous aurons  $\Delta p \rightarrow \infty$  et perdrons toute information sur la quantité de mouvement (donc la vitesse) de l'électron. Si, par contre, nous connaissons exactement la vitesse de l'électron, nous ne connaissons plus sa position. En conclusion, si  $\Delta x = 0$ , nous aurons  $\Delta p \rightarrow \infty$  et réciproquement si  $\Delta p = 0$ , nous aurons  $\Delta x \rightarrow \infty$ .

Remarquons que si  $h$  était égale à 0, nous pourrions mesurer simultanément la position et la quantité de mouvement d'une particule puisque dans cette hypothèse  $\Delta x$  et  $\Delta p$  pourraient être égaux simultanément à 0. *Mais cela est impossible puisque la valeur de  $h$ , même très petite, n'est pas nulle.*

Examinons, dans notre monde macroscopique, une pomme de 200 g environ ; admettons que nous connaissions sa position avec une imprécision de  $\Delta x = 10^{-8}$  m. Quel est alors le minimum de l'imprécision concernant sa vitesse ?

$$\Delta v \geq \frac{h}{\Delta x \cdot m} \approx 10^{-25} \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Une telle imprécision sur la vitesse est totalement inaccessible à nos instruments de mesure. Ce qui signifie que, pour nous, pour des objets comparables à notre taille, le principe d'incertitude est sans intérêt.

Par contre, pour un proton, il n'en va plus de même ; supposons que l'imprécision sur sa position soit de l'ordre de grandeur d'un atome simple, soit de  $\Delta x = 10^{-10}$  m. Quelle est l'imprécision minimale sur sa vitesse ? Comme  $m_p \approx 1,67 \times 10^{-27}$  kg

$$\Delta v \geq \frac{h}{\Delta x \cdot m_p} \approx 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

L'imprécision est de l'ordre du... km/s. C'est tout à fait différent.

À la suite de ce que nous venons de voir, on peut se demander si cela a un sens de vouloir mesurer la vitesse et la position d'un électron, simultanément. *L'électron n'a pas une vitesse et une position, à un instant donné.* Les deux grandeurs sont complémentaires, nous dit Bohr.

Nous avons du mal à interpréter ce qui se passe réellement aux échelles subatomiques. C'est toute la difficulté de compréhension de la physique quantique...

Remarque : cette relation d'incertitude est directement liée au phénomène de diffraction valable tant pour les ondes électromagnétiques que pour les particules comme les électrons. Par exemple, si nous voulons grossir de manière trop considérable une préparation microscopique éclairée en lumière blanche ( $\lambda = 0,55 \mu\text{m}$ ), pour en obtenir des détails plus petits que cette longueur d'onde, cela ne fonctionne pas à cause de la diffraction. Il faudra utiliser une longueur d'onde plus petite, ce qui nécessite l'emploi du microscope électronique (en jouant sur l'aspect ondulatoire des électrons). Les astronomes connaissent bien ce phénomène : pouvoir de résolution et dimension de la figure de diffraction fournie par l'instrument sont étroitement liés.

## 6.2. Deuxième relation d'incertitude (énergie - temps)

Deux autres variables sont liées de la même manière ; ce sont l'énergie et le temps. On a :

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h.$$

On peut interpréter  $\Delta t$  comme étant la durée pendant laquelle l'appareil de mesure interfère avec la particule dont on mesure l'énergie. Si l'interaction pouvait être de durée nulle, la précision de la mesure de l'énergie devient elle aussi nulle car  $\Delta E$  deviendrait infinie. On n'a aucune information sur la valeur de l'énergie. En d'autres termes, le principe de conservation de l'énergie peut être violé de  $\Delta E$  pendant une durée  $\Delta t$  telle que  $\Delta E \cdot \Delta t \approx h$ . C'est ce constat qui est à la base du concept des particules virtuelles.

Étant une forme d'énergie, la masse d'une particule ( $E = m \cdot c^2$ ) est donc soumise au principe d'incertitude :  $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$ . Si on mesure la masse d'une particule en une durée  $\Delta t$ , l'imprécision sur  $m$  vaut :  $\Delta m \geq \frac{h}{c^2 \cdot \Delta t}$ . Si  $\Delta t$  est suffisamment petit, l'imprécision sur la

masse peut être suffisamment grande pour que, pendant cette durée  $\Delta t$ , on ne puisse dire s'il existe une seule particule ou un ensemble de particules de masse totale  $m + \Delta m$  en

un point de l'espace. La particule originelle « fluctue » en deux particules ; la particule supplémentaire est virtuelle.

Exemple : quelle doit être la valeur de  $\Delta t$ , pour qu'un proton puisse faire apparaître un proton virtuel ?

$\Delta m = m_p = 1,67 \times 10^{-27}$  kg et donc

$$\Delta t \geq \frac{h}{c^2 \cdot \Delta m} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{(3 \times 10^8)^2 \times 1,67 \times 10^{-27}} \approx 5 \times 10^{-24} \text{ s},$$

ce qui signifie que, pendant  $5 \times 10^{-24}$  s, on est incapable de dire si on a affaire à 1 ou 2 protons.

Imaginons que la vitesse du proton corresponde à celle de la lumière. Quelle serait, dans ce cas, la distance  $d$  parcourue par le proton virtuel pendant cette durée ?

$$d = c \cdot \Delta t = 3 \times 10^8 \times 5 \times 10^{-24} \approx 10^{-15} \text{ m}.$$

Ce proton virtuel pourrait ainsi parcourir une distance maximale de  $10^{-15}$  m, soit une distance égale à sa propre dimension. Si on a deux particules proches, elles peuvent échanger la particule virtuelle, pourvu que leur distance soit inférieure à celle de vol de la particule virtuelle sans violation de la conservation de l'énergie.

Si la masse de la particule virtuelle est plus petite que celle du proton, elle pourra parcourir une distance plus grande sans être aperçue ; pour une particule de masse 10 fois plus faible,  $\Delta t$  est 10 fois plus grand, soit  $5 \times 10^{-23}$  s, et la distance parcourue sera de quelques fois  $10^{-15}$  m, ce qui est la portée de l'interaction forte dans les noyaux atomiques.

En conclusion, en  $10^{-23}$  s, une particule pourrait passer d'un proton à son voisin sans que l'on puisse s'en rendre compte.  $10^{-23}$  s est la durée de l'interaction forte. Pendant cette durée, on peut créer des particules qui ont une masse égale à 1/10 de la masse du proton. Yukawa était arrivé à cette conclusion en 1935 : il doit exister une particule d'échange ayant une masse de l'ordre de 1/10 de celle du proton.

Quelle était cette particule qui devait avoir environ  $m_p/10 \approx 200 m_e$  ?

On cherche et on croit la trouver en la « personne » du méson  $\mu^-$ . Pour des raisons déjà évoquées plus haut, ce n'est pas la bonne. Il faut encore attendre une dizaine d'années pour que l'on mette en évidence les pions qui, dans leur forme virtuelle, servent de particules d'échange de l'interaction forte entre nucléons.

## 7. Les particules élémentaires

### 7.1. Introduction

La première particule, plus élémentaire que les atomes, à être mise en évidence est l'électron. En 1897, J. J. Thomson comprend que le rayonnement cathodique est constitué d'électrons. Ensuite, il faut attendre les années 1910 pour découvrir le proton et les années 1930 pour découvrir le neutron.

Mais ces particules sont-elles fondamentales et sont-elles stables ? Affirmatif, pensait-on à l'époque, pour l'électron et pour le proton. Négatif pour le neutron ; lorsqu'il est isolé (c'est-à-dire non confiné dans un noyau), le neutron se désintègre rapidement (vie moyenne de 920 s) en  $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$  où  $\bar{\nu}_e$  est l'antineutrino électronique.

Lorsque Yukawa a cru que la particule qui servait d'échange entre le  $p^+$  et le  $n^0$  était le muon  $\mu^-$  (voir plus haut), on s'est demandé si ce  $\mu^-$ , lui-même, était stable. Ce n'est pas le cas ; il se désintègre en  $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \bar{\nu}_\mu$ .

Si  $e^-$  est considéré aujourd'hui comme élémentaire, ce n'est plus le cas pour  $p^+$ . Le proton est composé de *quarks*. Alors, existe-t-il finalement des particules élémentaires et, si oui, quelles sont-elles ? C'est l'histoire des poupées russes : plus on en ouvre, plus on en découvre... Il faut remettre la réponse à plus tard !

Citons Michel Spiro, chef du service de physique des particules au C.E.A. de Saclay : « Peu de physiciens pensent sérieusement aujourd'hui que les quarks sont les constituants définitivement insécables de la matière » (*Pour la Science*, avril 1996).

Remarques :

1. Il ne faut pas confondre demi-vie (durée nécessaire pour que la moitié d'un grand nombre de particules instables de même type se soit désintégrée) et vie moyenne (durée nécessaire pour qu'il ne reste que  $N/e$  des  $N$  particules présentes initialement, où  $e$  est la base des logarithmes népériens ;  $e = 2,718\dots$ ). Nous nous référons ici à la *vie moyenne*. Ce qui signifie que, si nous avons un très grand nombre  $N$  de neutrons, il en restera  $N/e$  après 920 s.
2. Il est à noter que, dans la théorie des supercordes, les vraies particules élémentaires sont les supercordes (encore une autre histoire...).

### 7.2. Classifications des particules

#### 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 *mésos* (mesos = milieu). Rappelons que le  $\mu^-$ , bien que de masse comprise entre celle de l'électron et celle du proton ( $m_\mu \approx 210 m_e$ , avec  $m_e = 0,511 \text{ MeV}$ ), n'est pas un méson, au sens actuel du terme ; les premiers réels mésons découverts constituent le triplet de mésons  $\pi$  :
  - $\pi^+$  et  $\pi^-$ , de masse  $\approx 273 m_e$ , de vie moyenne  $\approx 10^{-8}$  s, se désintègrent en  $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$  ;

-  $\pi^0$ , de masse  $\approx 265 m_e$ , de vie moyenne  $\approx 10^{-16}$  s, se désintègre en  $\pi^0 \rightarrow 2 \gamma$ .

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

- En 1947, découverte d'une nouvelle particule, neutre, le  $\Lambda^0$ , instable. Elle a une vie moyenne de  $2,6 \times 10^{-10}$  s et se désintègre en  $\Lambda^0 \rightarrow p^+ + \pi^-$ . C'est la première fois que l'on met en évidence une particule qui se désintègre en un proton (stable)  $\rightarrow$  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  $\approx 1\,000 m_e$ ), eux aussi « étranges », qui vont par paires :

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

- C'est ensuite le tour de quatre  $\Delta$ :  $\Delta^{++}$   $\Delta^+$   $\Delta^0$   $\Delta^-$
- En 1953 :  $\Sigma^+$   $\Sigma^0$   $\Sigma^-$
- En 1954 :  $\Xi^0$   $\Xi^-$

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 cinématique 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, c'était la « soupe » !

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.

Remarque : sauf mention particulière, on ne fera pas, dans la suite, de distinction entre particule et antiparticule.

## 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 *mésos* (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 les plus importantes d'entre elles.

### 3) Classification des hadrons par produits de désintégration

Les particules  $p^+$ ,  $e^-$ ,  $\nu_e$ , leurs antiparticules et  $\gamma$  sont stables. Toutes les autres sont instables et se désintègrent, *in fine*, en  $p^+$ ,  $e^-$ ,  $\nu_e$ , leurs antiparticules et  $\gamma$ .

Cela semble cohérent :

- les mésons se désintègrent toujours en leptons  $e^+$ ,  $e^-$ ,  $\nu_e$ ,  $\bar{\nu}_e$  et en photons ;
- les baryons se désintègrent inévitablement en  $p^+$  (ou  $p^-$ ) + mésons (rappelons-nous  $\Lambda^0 \rightarrow p^+ + \pi^-$ ). 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 ; on dit qu'il y a *conservation du nombre baryonique* ; dans l'exemple ci-dessus, on a  $\Lambda^0 (B = 1) \rightarrow p^+ (B = 1) + \pi^- (B = 0)$ . Un nombre conservé au cours d'une désintégration porte le nom de *nombre quantique* (cf. la charge électrique).

### 4) Classification des hadrons par vitesse de désintégration

La vie moyenne des hadrons (mésons et baryons) est courte. Une durée de  $10^{-23}$  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  $\Lambda^0$ , 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  $\Xi^-$  la valeur  $S = -2$  car  $\Xi^-$  se désintègre d'abord en  $\Lambda^0 + \pi^-$  avec une vie moyenne de  $10^{-10}$  s et  $\Lambda^0$  se désintègre ensuite en  $p^+ + \pi^-$  avec une vie moyenne de  $10^{-10}$  s.

### 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  $\pi$  (de masses semblables)
- 3  $\Sigma$  (de masses semblables)
- 4  $\Lambda$  (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 2 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  $\pi$  et du  $\Sigma$ ).

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  $\Delta$ ).

Il existe une *relation remarquable* entre les nombres quantiques  $I$ ,  $B$  et  $S$  que nous venons de voir. Cette relation est la suivante :

$$Q = I_z + \frac{B}{2} + \frac{S}{2}$$

où  $Q$  est la charge électrique 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  $Q = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{0}{2} = 0.$

## 6) Classification des hadrons en octets (eightfold way)

Ce sont ces 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,... 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.

## 8. La structure des hadrons

Au début des années 1970, les physiciens des particules supposent l'existence de 3 quarks et 3 antiquarks, grâce auxquels ils peuvent expliquer la structure des différents hadrons connus à l'époque ; ce sont :

u (up)  
d (down) s (strange)

et leurs antiparticules.

À la même époque, on connaît également 4 leptons (à multiplier par deux pour tenir compte des antiparticules) :

$e^-$	$\nu_e$	$e^-$	$\bar{\nu}_e$
$\mu^-$	$\nu_\mu$	$\mu^-$	$\bar{\nu}_\mu$

S'il existe une symétrie (les physiciens adorent cela) entre leptons et hadrons, *une pièce du puzzle, un quatrième quark, semble manquer.*

On sait que les baryons possèdent un spin demi-entier (ce sont des fermions) et une charge électrique entière (positive, nulle ou négative). Quant aux mésons, ils possèdent un spin nul ou entier (ce sont des bosons) et une charge entière (positive, nulle ou négative). Pour expliquer leur structure à l'aide des quarks et antiquarks, il faut que ces derniers, tous de spin 1/2, possèdent une charge électrique fractionnaire :

charge de u = +2/3  
charge de d = -1/3  
charge de s = -1/3,

le signe de la charge électrique étant opposé pour leur antiparticule.

Aucune particule n'existant librement avec une charge fractionnaire, il faut donc « imaginer » les assemblages possibles de quarks donnant une charge entière ou nulle. C'est en examinant les différentes possibilités d'associations qu'on découvre qu'il ne peut exister que deux grandes catégories de hadrons :

- les baryons, formés de trois quarks (q q q), qui possèdent un spin demi-entier,
- les mésons, formés d'un quark et d'un antiquark (q  $\bar{q}$ ), qui ont un spin entier ou nul.

Les baryons, composés de trois quarks (q q q), peuvent avoir les spins suivants :

$+1/2 + 1/2 - 1/2 = +1/2$   
 $+1/2 + 1/2 + 1/2 = +3/2$

Les mésons composés d'un quark et d'un antiquark peuvent avoir un spin de valeur 1 ou 0 ( $+1/2 + 1/2$  ou  $+1/2 - 1/2$ ).

Les « résonances » sont des particules à très courtes durées de vie ( $10^{-23}$  s ; on ne connaît pas de phénomènes plus brefs dans la nature) qui ne sont rien d'autre que des particules de niveau énergétique plus élevé, de spin plus élevé et de masses plus importantes. On parle de *résonance mésonique* et de *résonance baryonique*. Grâce aux accélérateurs, les physiciens ont découvert des centaines de résonances.

Les quarks sont très liés entre eux par interaction forte, grâce aux *gluons* (c'est le *confinement des quarks*). Si on essaye, par exemple, de séparer le quark q de l'antiquark  $\bar{q}$

constituant un méson, on casse ce dernier, non pas en un quark  $q$  et un antiquark  $\bar{q}$ , mais en deux mésons (cf. le cas d'un aimant).

Nous savons que si  $e^+$  et  $e^-$  se rencontrent (matière, antimatière), les deux particules s'annihilent et deviennent pure énergie (sous forme de deux photons). Mais alors, comment deux particules de types  $q$  et  $\bar{q}$  peuvent-elles coexister ? Parce que le quark et l'antiquark *ne sont pas de même type* ( $u\bar{d}$ , par exemple). C'est ainsi que  $\pi^-$  et  $\pi^+$  mettront  $10^{-8}$  s avant de se désintégrer tandis que  $\pi^0$  se désintégrera en deux photons après  $10^{-16}$  s seulement parce que constitué d'un mélange de  $u\bar{u}$ ,  $d\bar{d}$ ,  $s\bar{s}$ .

À partir des éléments qui précèdent, il est possible d'établir un tableau général de présentation des différents hadrons constitués de deux ou de trois quarks.

## 1) Les mésons (1 quark et 1 antiquark)

### Les particules de spin = 0

$S = +1$		$u\bar{s} (+1)$ $K^+$		$d\bar{s} (0)$ $K^0$	
$S = 0$	$u\bar{d} (+1)$ $\pi^+$	$u\bar{u} (0)$ $\eta^0$	$d\bar{d} (0)$ $\pi^0$	$s\bar{s} (0)$ $\eta^0$	$\bar{u}d (-1)$ $\pi^-$
$S = -1$		$\bar{d}s (0)$ $\bar{K}^0$		$\bar{u}s (-1)$ $K^-$	

### Les particules de spin = 1

$S = +1$		$u\bar{s} (+1)$ $K^{*+}$		$d\bar{s} (0)$ $K^{*0}$	
$S = 0$	$u\bar{d} (+1)$ $\rho^+$	$u\bar{u} (0)$ $\omega^0$	$d\bar{d} (0)$ $\rho^0$	$s\bar{s} (0)$ $\phi^0$	$\bar{u}d (-1)$ $\rho^-$
$S = -1$		$\bar{d}s (0)$ $\bar{K}^{*0}$		$\bar{u}s (-1)$ $K^{*-}$	

Voilà donc deux beaux « nonets ». Nous rappelons que, dans le cas présent, nous n'avons pas affaire aux particules de matière dont nous sommes faits. Ces mésons interviennent comme particules d'échanges, comme messagers, de même que tous les bosons. Le méson  $\pi^\pm$ , par exemple, est échangé entre le  $p^+$  et le  $n^0$  pour assurer la stabilité des noyaux atomiques.

Les particules ne sont pas étranges si  $S = 0$ . Elles le sont si  $S = +1$  ou  $-1$ .

Remarquons que les particules de charges électriques égales se situent sur les diagonales  $+1, +1 - 0, 0, 0 - -1, -1$  (indiquées entre parenthèses).

## 2) Les baryons (3 quarks)

### Les particules de spin = 1/2

$S = 0$		ddu (0) $n^0$		duu (+1) $p^+$
$S = -1$	sdd (-1) $\Sigma^-$		sud (0) $\Sigma^0 \Lambda^0$	suu (+1) $\Sigma^+$
$S = -2$		ssd (-1) $\Xi^-$		ssu (0) $\Xi^+$

### Les particules de spin = 3/2

$S = 0$	ddd (-1) $\Delta^-$	ddu (0) $\Delta^0$	duu (+1) $\Delta^+$	uuu(+2) $\Delta^{++}$
$S = -1$	sdd (-1) $\Sigma^{*-}$		sud (0) $\Sigma^{*0}$	suu (+1) $\Sigma^{*+}$
$S = -2$		ssd (-1) $\Xi^{*-}$		ssu (0) $\Xi^{*0}$
$S = -3$			sss (-1) $\Omega^-$	

Avec le spin  $1/2$ , les particules ddd, uuu et sss n'existent pas et le diagramme formé à partir des 8 baryons restants ressemble fort à celui, en nonet, des mésons : c'est *l'octet des baryons de spin  $1/2$*  (soit seulement 2 particules au « centre » de l'octet au lieu de 3 dans le nonet des mésons).

Avec le spin  $3/2$ , on obtient le *décuplet des baryons de spin  $3/2$* .

Les particules ne sont pas étranges si  $S = 0$ . Elles le sont si  $S = -1, -2$  ou  $-3$ .

Comme dans le cas des mésons, les particules de charges électriques égales se situent sur les diagonales  $(-1) -1 -1 (-1) / 0 0 0 / +1 +1 / (+2)$ .

La lecture des tableaux précédents appelle quelques commentaires...

La particule  $\Omega^-$  (sss), inconnue à l'époque de l'établissement de ce dernier diagramme, mais prédite par lui en 1961, fut découverte en 1964.

Les baryons « centraux », de spin  $1/2$ ,  $\Sigma^0$  et  $\Lambda^0$ , sont formés tous deux des mêmes quarks et ont la même étrangeté ( $S = -1$ ). Comment les distinguer l'un de l'autre ? La réponse tient dans les orientations des spins des 3 quarks :  $\Sigma^0$  a les spins orientés  $u\uparrow d\uparrow s\downarrow$  et  $\Lambda^0$  a les spins orientés  $u\uparrow d\downarrow s\uparrow$ .

En ce qui concerne les 3 particules ddd et uuu et sss de spin  $+3/2$ , on comprend mal comment il est possible de les obtenir. En effet, en vertu du principe d'exclusion de Pauli, applicable à tous les fermions, donc aussi aux quarks, une même entité ne peut contenir deux particules identiques dans le même état quantique. Quelle est donc le nombre quantique qui les fait différer ? Un autre nombre quantique autorise l'existence de telles particules : c'est la couleur. Ce nouveau nombre quantique sera étudié dans le paragraphe intitulé « La chromodynamique quantique ».

Chaque quark (up, down, strange,... et nous verrons ci-dessous les quarks charm, beauty et top) se voit attribuer une « valeur » qui le distingue des autres quarks. Ce nombre quantique porte le nom de *saveur*. Il y a donc 6 saveurs de quarks.

La saveur caractérise la « charge » qui permet de préciser la façon dont les quarks répondent à l'interaction nucléaire faible, responsable notamment de la radioactivité  $\beta$ , par laquelle le neutron se désintègre en un proton, un électron et un antineutrino.

***La saveur est à l'interaction faible ce que la charge électrique est à l'interaction électromagnétique, la couleur à l'interaction forte et la masse à l'interaction gravitationnelle.***

L'interaction faible peut changer la saveur d'un quark : elle transforme un quark u en un quark d (lors, précisément, de la désintégration  $\beta$  dont nous venons de parler) ou un quark c (charm) en un quark s,...

Mais il est temps de revenir à l'histoire... L'existence d'autres quarks s'impose !

### 3) La particule charmée « c »

Nous sommes en 1974. Les « nonets mésoniques » sont connus. Avec leurs quarks u, d et s les tableaux semblent cohérents. Il ne reste, en tout cas, plus de place pour un intrus éventuel.

Et pourtant... voilà que deux laboratoires, travaillant indépendamment l'un de l'autre, identifient un *nouveau méson*. Un des laboratoires l'appellera J et l'autre  $\Psi$ . Il conservera cette double appellation de  $J/\Psi$  (prononcez « jipsi »). Ce méson de spin 1 est constitué à l'aide d'un 4<sup>e</sup> quark, le quark c (pour charm) qui possède son antiquark  $\bar{c}$ . Voilà donc la « *pièce qui semble manquer* » dont nous parlions au début du paragraphe 8.

La symétrie hadrons/leptons est, enfin, établie (du moins le croyait-on...) :

$e^-$	$\nu_e$	$u$	$d$
$\mu^-$	$\nu_\mu$	$c$	$s$

Cependant le charme du méson  $J/\Psi$  reste caché. Il est, en effet, constitué du quark  $c$  (caractérisé par un nouveau nombre quantique, le charme,  $C = +1$ ) et de l'antiquark  $\bar{c}$  (pour lequel  $C = -1$ ). Le *nombre quantique de charme* pour le  $J/\Psi$  vaut donc 0 ( $C = 0$ ). Cette nouvelle particule n'est donc pas pourvue de charme !

On postule l'existence de mésons « charmés » de spin 0 ou 1, de charme 1 ou  $-1$ . Effectivement, les accélérateurs ont permis d'identifier la particule  $c\bar{u}$  appelée  $D^0$  [c (spin  $+1/2$ ) et  $\bar{u}$  (spin  $-1/2$ ) = spin 0]. Appliquant ce raisonnement, on découvrira plus tard encore d'autres particules D charmées et de spin 1 (notamment un  $D^*$  plus lourd).

Pourquoi ne pas poursuivre l'investigation en considérant des associations de quarks comme  $c\bar{s}$  ? Aujourd'hui, ce méson  $c\bar{s}$  a été mis en évidence. Il s'agit du  $D_s^+$ , méson étrange charmé !

#### 4) Les derniers quarks et les derniers leptons

Il est évident qu'avec le quark  $c$ , on peut construire bon nombre de nouveaux baryons.

L'histoire ne s'arrête pas là. Les progrès technologiques permettent d'injecter de plus en plus d'énergie dans les accélérateurs (et qui dit énergie dit masse !). En 1977, on assiste à un nouveau bouleversement : la découverte d'un 5<sup>e</sup> quark, le quark beauty  $b$ , que l'on appelle plutôt aujourd'hui (et c'est moins heureux !) le bottom. Il faut ajouter son antiparticule  $\bar{b}$ , bien évidemment.

Simultanément, un 3<sup>e</sup> lepton est découvert : le lepton tau  $\tau$  et son antiparticule  $\bar{\tau}$  avec leur neutrino associé  $\nu_\tau$  et  $\bar{\nu}_\tau$ .

*Nous avons ainsi, au total,  $2 \times 6$  leptons.*

Dès cet instant, le physicien des particules pense à l'existence d'une symétrie leptons - quarks : il doit exister un 6<sup>e</sup> quark ! On lui donne le nom de quark truth  $t$  que l'on appelle aujourd'hui le top. Il faudra longtemps pour mettre ce quark, très massif, en évidence (1995).

*Nous avons ainsi, au total,  $2 \times 6$  quarks.*

Au train où allaient les choses, on s'est demandé, à l'époque, s'il n'y avait pas une 4<sup>e</sup>, voire une 5<sup>e</sup> famille ? Pour des raisons astrophysiques, il semble que non. Finalement, il n'y aurait que trois familles de quarks. On serait arrivé au bout de nos peines !

Au laboratoire, on constate que lorsqu'une particule possède l'étrangeté

$S = \pm 1$  sa désintégration est lente (vie moyenne de  $\approx 10^{-10}$  s),  
 $S = \pm 2$  sa désintégration est deux fois plus lente,  
 et  $S = \pm 3$  sa désintégration est trois fois plus lente.

Ce qui précède a permis d'arriver aux conclusions suivantes :

- la désintégration est très lente lorsque l'on passe d'une famille à une autre ;
- par contre, au sein d'une même famille ou lorsqu'on passe simplement d'un spin  $3/2$  vers un spin  $1/2$ , la désintégration est rapide.

On est aujourd'hui en mesure de prévoir les vies moyennes.

Avant de revenir aux notions exposées au début du cours pour retrouver le rôle joué par les interactions au sein des particules, établissons une brève synthèse de ce qui vient d'être vu.

### 1. La matière est constituée de fermions (de spin 1/2 entier).

Les fermions se divisent en 2 groupes :

- 1.1. Les leptons qui sont au nombre de 6 :
- |          |            |           |
|----------|------------|-----------|
| e        | $\nu_e$    | (stables) |
| $\mu^-$  | $\nu_\mu$  |           |
| $\tau^-$ | $\nu_\tau$ |           |

+ leurs antiparticules ( $e^+$ , ...).

Comment, dans ce cas, peut-on distinguer  $\nu_e$  et  $\bar{\nu}_e$  qui ont tous deux le même spin et la même masse ? La réponse se situe au niveau du *signe* de leur spin :  $\nu_e$  a un spin positif (+1/2) et  $\bar{\nu}_e$  a un spin négatif (-1/2).

### 1.2. Les quarks qui sont également au nombre de 6 :

- Les saveurs de ces 6 quarks sont :
- |   |   |           |
|---|---|-----------|
| u | d | (stables) |
| c | s |           |
| t | b |           |

+ leurs 6 antiparticules ( $\bar{u}$ , ...).

Ainsi donc, le physicien des particules est heureux ! Il a obtenu une symétrie presque magique dans la représentation des particules constituant la matière. Pensez donc : toute la matière serait construite à partir de 24 particules et antiparticules.

Rappelons aussi que, à part le changement de signe de la charge électrique et de quelques autres nombres quantiques, il n'y a guère de différence entre un monde de matière et d'antimatière. Peut-être existe-t-il, quelque part, un ou des univers d'antimatière ?

### 2. Les particules d'interaction sont les bosons (de spin entier ou nul).

2.1. Interaction gravitationnelle : le graviton G de spin = 2, de masse = 0.

2.2. Interaction faible : les bosons intermédiaires  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  de spin = 1, de masse = 81 GeV pour les  $W^+$  et  $W^-$  et de masse = 91 GeV pour le  $Z^0$ .

2.3. Interaction électromagnétique : le photon  $\gamma$  de spin = 1, de masse = 0.

Remarque : Le Modèle standard, on l'a vu, a unifié ces deux dernières interactions pour en faire « l'interaction électrofaible ». Selon cette théorie, les bosons  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  et  $\gamma$  constitueraient 4 aspects d'une même particule.

2.4. Interaction forte : les mésons  $\pi^0$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^+$  de spin = 0 et  $\rho^0$ ,  $\rho^-$ ,  $\rho^+$  de spin = 1.

L'interaction forte est la seule interaction pour laquelle les bosons semblent constitués par des quarks, les mésons (1 quark et 1 antiquark).

Mais si l'on pénètre plus profondément dans la matière, au sein même des baryons, on constate que les messagers de l'interaction forte entre quarks sont des *gluons*. Il y a 8 *gluons* g de spin = 1 et de masse = 0. Ils devraient, de ce fait, avoir une portée infinie ! Or, ce n'est pas le cas !

Toutefois, rappelons-nous que la portée de l'interaction électromagnétique est théoriquement, elle aussi, de portée infinie, mais qu'un « effet d'écran » se manifeste dès qu'une charge électrique apparaît (rôle des particules virtuelles). Un effet écran semblable existerait de la même manière avec les gluons (mer de gluons) dont l'influence ne dépasserait pas, en fait, les  $10^{-15}$  m, c'est-à-dire la portée des mésons  $\pi$ .

## 9. La chromodynamique quantique

Reprenons ce qui a été dit plus haut à propos des particules  $\Delta$  et  $\Omega$  :

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

Selon le principe d'exclusion de Pauli, il n'est pas possible que ces particules puissent exister, d'où la nécessité d'envisager une propriété supplémentaire de la matière, un nouveau nombre quantique, qui permettrait de différencier les trois quarks. C'est ce qui a donné l'idée de couleur, charge de l'interaction forte, liée elle-même au concept du confinement des quarks.

Expliquons tout d'abord cette notion de confinement : il ne semble pas possible d'isoler un quark ; on ne peut, par exemple, extraire un quark d'un proton. Si on ajoutait toute l'énergie nécessaire pour y arriver, on créerait une nouvelle particule (un méson) au moment de « l'arrachage ». Il n'est donc pas possible de « voir » un quark. Il semble toujours devoir être confiné.

Rappelons que dans le cas du méson  $J/\Psi$  ( $c\bar{c}$ ), le charme n'est pas apparent puisque le nombre quantique de charme +1 pour  $c$  est neutralisé par celui valant -1 pour  $\bar{c}$ . Pour avoir une particule réellement charmée, il faut, par exemple, un méson de type  $c\bar{u}$  ou  $\bar{c}u$ .

Il en va de même pour la couleur : puisqu'il n'est pas possible d'isoler un quark, il est impossible de voir sa couleur. Un baryon n'apparaît pas coloré ; il apparaît « blanc » ou incolore. C'est ce concept de « blanc », de nombre quantique caché, qui a amené le physicien à parler de couleur. Un baryon contient 3 quarks ; chaque quark possède une des trois couleurs fondamentales : bleu, rouge ou vert (pour rappel : bleu + rouge + vert = blanc). Ceci est valable tant pour les particules composées de trois quarks que pour les antiparticules constituées de trois antiquarks.

Qu'en est-il alors pour les mésons constitués seulement d'un quark et d'un antiquark ? Seraient-ils, eux, colorés ? Malheureusement non : si  $q$  possède une couleur,  $\bar{q}$  possède l'*anticouleur* ; on obtient ainsi un méson incolore.

Les quarks, tout comme leur couleur, restent donc cachés.

***Les gluons sont les messagers, les échangeurs, les transporteurs de la charge de couleur entre les quarks.***

Le gluon transporte une charge de couleur et, simultanément, une charge d'anticouleur. Prenons un exemple pour comprendre comment s'effectue l'échange de couleur entre quarks : considérons un gluon ( $g_{B\bar{R}}$ ) transportant une charge bleue (B) et une charge anti-rouge ( $\bar{R}$ ) et quittant un quark bleu ; le quark, que vient de quitter le gluon en question, devient rouge (R). Le quark rouge voisin absorbe le  $g_{B\bar{R}}$  et devient bleu. Le quark vert le reste.

On peut expliquer ce qui se passe pour un baryon, constitué de trois quarks, de la manière suivante :

$$\begin{array}{ccc}
 \text{B} & \rightarrow & \text{R} \\
 & \downarrow & \\
 & \mathfrak{g}_{\text{B}\bar{\text{R}}} & \\
 & \downarrow & \\
 \text{R} & \rightarrow & \text{B} \\
 \text{V} & \rightarrow & \text{V}
 \end{array}$$

Il y a ainsi 9 gluons — transporteurs de couleur — qui sont :

$$\begin{array}{ccc}
 \mathfrak{g}_{\text{B}\bar{\text{B}}} & \mathfrak{g}_{\text{R}\bar{\text{R}}} & \mathfrak{g}_{\text{V}\bar{\text{V}}} \\
 \mathfrak{g}_{\text{B}\bar{\text{R}}} & \mathfrak{g}_{\text{R}\bar{\text{B}}} & \mathfrak{g}_{\text{V}\bar{\text{R}}} \\
 \mathfrak{g}_{\text{B}\bar{\text{V}}} & \mathfrak{g}_{\text{R}\bar{\text{V}}} & \mathfrak{g}_{\text{V}\bar{\text{B}}}
 \end{array}$$

Mais les trois premiers d'entre eux (qui possèdent une couleur et son anticouleur) ne sont pas indépendants. On a donc seulement 8 gluons indépendants.

La stabilité d'un baryon (proton, neutron...) provient de l'échange constant de gluons entre ses quarks constitutifs.

Pour les mésons ( $q\bar{q}$ ), on a, par exemple :

$$\begin{array}{ccc}
 \text{B} & \rightarrow & \text{R} \\
 & \downarrow & \\
 & \mathfrak{g}_{\text{B}\bar{\text{R}}} & \\
 & \downarrow & \\
 \bar{\text{B}} & \rightarrow & \bar{\text{R}}
 \end{array}$$

Au départ,  $\text{B} + \bar{\text{B}} = \text{blanc}$  ; le gluon  $\mathfrak{g}_{\text{B}\bar{\text{R}}}$ , en quittant B, lui enlève sa couleur B et ce quark devient R ; ce gluon est absorbé par le quark  $\bar{\text{B}}$  qui devient de ce fait  $\bar{\text{R}}$  ; le méson  $\text{B} + \bar{\text{B}}$  est devenu  $\text{R} + \bar{\text{R}} = \text{blanc}$ .

En conclusion, les quarks des mésons s'échangent également des gluons, ce qui assure leur stabilité.

Ce processus d'échange de gluons colorés et anticolorés porte le nom, nous l'avons déjà vu, de *chromodynamique quantique*.

## 10. Vers la grande unification...

Le messenger de l'interaction électromagnétique entre charges électriques est le photon  $\gamma$ . Ce messenger ne transporte pas de charge électrique (il est électriquement neutre).

Les bosons intermédiaires ( $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z^0$ ) ne transportent pas la charge d'interaction faible (la saveur).

Le graviton  $G$  ne transporte pas, non plus, la charge gravitationnelle, c'est-à-dire la masse.

Par contre, les gluons *transportent réellement* la charge de l'interaction forte, la couleur. Les seuls bosons vraiment « messagers » sont les gluons.

L'interaction faible est assurée par les bosons intermédiaires. Elle est la responsable de la désintégration du neutron en proton (avec production d'un électron et d'un antineutrino) :

$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e.$$

On peut aussi écrire cette désintégration de la manière suivante :

$$\begin{Bmatrix} u \\ d \\ d \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{Bmatrix} u \\ u \\ d \end{Bmatrix} + W^+ \quad \text{et} \quad W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$$

On n'a pas le sentiment qu'il y a un message. Or, si on regarde ce genre de réaction d'un peu plus près et si on la compare avec les trois autres interactions, on découvre « certaines similitudes ».

Richard Feynman a représenté les 4 interactions de la manière suivante (les graphes qui suivent portent le nom de « *diagrammes de Feynman* ») :

### 1. Interaction gravitationnelle

Un graviton est envoyé d'une masse ( $m_1$ ) à l'autre ( $m_2$ ).



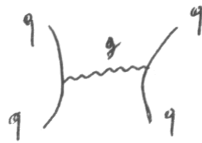
### 2. Interaction électromagnétique

Deux électrons se frôlent, un photon  $\gamma$  est envoyé d'un électron à l'autre.



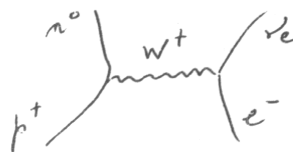
### 3. Interaction nucléaire forte

Un gluon permet l'échange de couleur entre quarks.



### 4. Interaction nucléaire faible

Un boson intermédiaire permet l'échange de saveur de quarks.



Ce qui permet de dire que si

$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$$

on peut écrire également

$$p^+ + e^- \rightarrow n^0 + \nu_e$$

ou

$$n^0 + \nu_e \rightarrow p^+ + e^-$$

En conclusion, on s'aperçoit que les 4 interactions ont « la même tête ». On comprend, dès lors que, depuis des siècles, les physiciens essayent « d'unifier » les forces de la nature : Newton décrit, à l'aide d'une théorie unique, les mouvements terrestres et célestes ; Coulomb se rend compte que la force électrique a la même allure que la force gravitationnelle ; Maxwell unifie électricité, magnétisme et optique ; Einstein entremêle, dans un concept unique, l'espace et le temps. Il unifie également les concepts de masse et d'énergie. Einstein, aussi, rêve d'une « loi unique ».

C'est ainsi qu'est née, dans la foulée, l'idée de *Théorie de la Grande Unification* (G.U.T. en anglais).

À ce jour, une seule unification a pu se résoudre sur le plan théorique : l'unification de l'interaction faible et de l'interaction électromagnétique. C'est ce qu'on appelle l'interaction « électrofaible » (Glashow, Salam et Weinberg - 1979).

On est sur la voie de la résolution de l'unification de l'interaction électrofaible avec l'interaction nucléaire forte. C'est la théorie de la *grande unification*. Cette unification serait réalisée à des températures voisines de  $10^{28}$  K ( $10^{16}$  GeV).

Quant à l'unification de ces trois interactions avec la quatrième, la force de gravitation, on est encore loin du compte. Pour reconstituer ce « royaume de la gravitation quantique », il faudrait atteindre une énergie colossale. On cite le chiffre de...  $10^{22}$  GeV !

Il n'est pas possible de dire aujourd'hui si l'homme parviendra un jour à vérifier expérimentalement cette dernière théorie, dans laquelle chacune des forces fondamentales apparaîtrait comme une facette d'une force unique. Cette théorie est parfois appelée « Théorie du Tout ».

Un des aspects importants à résoudre dans ce problème est de savoir si *les constantes de couplage* ont toujours été vraiment constantes. Or, il semble que non. Elles varieraient avec le niveau de l'énergie. Ainsi, aujourd'hui, les constantes de couplage sont très différentes les unes des autres, la densité d'énergie (ou la température) de l'univers étant très basse. Mais si on augmente cette densité d'énergie, il semble que les constantes de couplage tendent toutes vers une même valeur. Si on parvenait à atteindre un niveau de  $10^{16}$  GeV, on pense que les trois constantes des interactions électromagnétique, faible et forte auraient une valeur identique. On est loin de ce chiffre avec les pauvres  $10^4$  GeV (10 TeV) que l'on atteint, au mieux, dans les accélérateurs actuels.

Ceci permet de supposer que, au moment du Big Bang, le niveau d'énergie était tel qu'il n'y avait pas de distinction entre les 4 interactions. Mais se pose alors un gros problème. Si ce que prédit la théorie est vrai, il ne devrait plus, non plus, y avoir de *distinction entre leptons et baryons* ! Or, rappelons-nous que, dans les désintégrations telles que  $\Lambda^0 \rightarrow p^+ + \pi^-$  ou  $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$ , *le nombre baryonique est toujours conservé*.

S'il n'y a plus de distinction, toutes les particules, à ces intenses niveaux d'énergie, devraient normalement se désintégrer *y compris le proton*. Conclusion : si la théorie est vraie, il faudrait pouvoir démontrer que le  $p^+$  est très légèrement instable. On estime que, dans ce cas, la vie moyenne d'un proton est d'au moins  $10^{30}$  ans (rappelons-nous que l'âge de l'univers est de l'ordre de  $10^{10}$  ans !). Pour pouvoir vérifier cette éventuelle instabilité, il faut prendre un très grand nombre de protons pour espérer en voir se désintégrer un seul. Dit autrement, il faut constituer une masse d'au moins  $10^{30}$  protons pour espérer observer la désintégration de 1 proton en 1 an. Et si on a cette chance, en quoi ce proton se désintégrera-t-il ? Voici le diagramme de Feynman de cette plausible désintégration :



X et Y seraient les nouvelles particules d'échange, de nouveaux bosons intermédiaires, de l'hypothétique force provenant de la grande unification. Leur masse serait supérieure à  $10^{15}$  GeV/c<sup>2</sup>. X et Y peuvent entraîner la transformation d'un quark en lepton et *vice versa*. X et Y seraient responsables de l'instabilité du proton qui ne devrait sa très longue vie qu'à leur importante masse.

On a réalisé cette expérience. Aucun signal n'a été trouvé. On est arrivé à la conclusion qu'il faudrait au moins  $10^{31}$  à  $10^{32}$  ans *pour espérer observer un quark de ce proton se désintégrer en lepton*. Autant dire que ces chiffres nous dépassent et sont très hypothétiques.

## 11. Tableaux récapitulatifs

### 11.1. Quelques constantes fondamentales

Symbole	Description	Valeur en unités SI
$c$	Vitesse de la lumière dans le vide	299 792 458
$h$	Constante de Planck	$6,626\ 075\ 5 \times 10^{-34}$
$G$	Constante de gravitation ( $F = G \cdot m_1 \cdot m_2 / r^2$ )	$6,672\ 59 \times 10^{-11}$
$\mu_0$	Perméabilité magnétique du vide	$4\pi \cdot 10^{-7}$
$e$	Charge électrique élémentaire (charge de l'électron et du proton)	$1,602\ 177\ 33 \times 10^{-19}$
$m_e$	Masse de l'électron	$9,109\ 389\ 7 \times 10^{-31}$
$m_p$	Masse du proton	$1,672\ 623\ 1 \times 10^{-27}$
$m_n$	Masse du neutron	$1,674\ 928\ 6 \times 10^{-27}$

Remarque : ce dernier tableau présente une liste des constantes fondamentales les plus importantes, avec leurs valeurs en unités du Système International, où les masses sont exprimées en kilogrammes, les distances en mètres, les durées en secondes, les intensités de courant en ampères,... (Source : *Ciel et Espace* - novembre 1997.)

### 11.2. Les quatre interactions fondamentales

	Force de gravitation	Force électro-magnétique	Force forte	Force faible
<b>Expression du potentiel</b>	$U_r \propto \frac{1}{r}$	$U_r \propto \frac{1}{r}$	$U_r \propto \frac{e^{-r/\lambda_0}}{r}$	$U_r \propto \frac{e^{-r/\lambda_0}}{r}$
<b>Constante de couplage</b>	$\approx 6 \times 10^{-39}$	$\approx \frac{1}{137} \approx 10^{-2}$	$\approx 1$	$\approx 10^{-14}$
<b>Portée</b>	$\infty$	$\infty$	$10^{-15}$ m	$10^{-18}$ m
<b>Particule messagère</b>	graviton G (pas mis en évidence)	photon $\gamma$	pions $\pi^+$ $\pi^-$ $\pi^0$ gluons g	bosons intermédiaires $W^+$ , $W^-$ , $Z^0$
<b>Masse des messagers</b>	0	0	$2 \times 10^{-28}$ kg $\approx m_p / 9$	$2,2 \times 10^{-25}$ kg $\approx 100 m_p$

### 11.3. Classement des particules élémentaires et des particules d'interactions

Fermions de spin $\frac{1}{2}$  (constituants de la matière)	LEPTONS $2 \times 6$	$e^-, \mu^-, \tau^-$ et $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$	$e^+, \mu^+, \tau^+$ et $\bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau$
	QUARKS $2 \times 6$	$u, c, t$ et $d, s, b$	$\bar{u}, \bar{c}, \bar{t}$ et $\bar{d}, \bar{s}, \bar{b}$
Bosons de spin entier  (particules d'interactions)	GLUONS $g$ de spin 1 8 gluons messagers de l'interaction forte		
	BOSONS INTERMÉDIAIRES $W^+, W^-, Z^0$ de spin 1 particules messagères de l'interaction faible		
	PHOTON $\gamma$ de spin 1 particule messagère de l'interaction électromagnétique		
	GRAVITON $G$ (hypothétique) de spin 2 particule messagère de l'interaction gravitationnelle		

## Les fermions

	LEPTONS		QUARKS	
matière actuelle	électron $e$ $q = -1$ $m_e = 0,511 \text{ MeV}$ (1897)	neutrino électronique $\nu_e$ $q = 0$ $m = 0 m_e$ 1956	up $u$ $q = +2/3$ $m = 587 m_e$ (1960)	down $d$ $q = -1/3$ $m = 587 m_e$ (1960)
matière dans les accélérateurs, dans les rayons cosmiques, et dans les instants qui suivent le Big Bang	muon $\mu^-$ $q = -1$ $m = 207 m_e$ (1937)	neutrino muonique $\nu_\mu$ $q = 0$ $m = 0 m_e$ 1956	charm $c$ $q = +2/3$ $m = 2\,935 m_e$ (1975)	strange $s$ $q = -1/3$ $m = 978 m_e$ (1947)
	tau $\tau^-$ $q = -1$ $m = 3\,327 m_e$ (1975)	neutrino tauonique $\nu_\tau$ $q = 0$ $m = 0 m_e$ 1956	top $t$ $q = +2/3$ $m = 342\,500 m_e$ (1994)	bottom $b$ $q = -1/3$ $m = 8\,806 m_e$ (1977)

## Les hadrons

Les *baryons* sont constitués d'une association de trois quarks  $qqq$ . Ce sont, avec les leptons, les constituants de la matière proprement dite. Exemples :  $p$ ,  $n$ .

Les *mésons* sont constitués d'une association d'un quark et d'un antiquark  $q\bar{q}$ . Ils interviennent comme particules d'interactions. Exemples :  $\pi$ ,  $\rho$ ,  $K$ ,  $J/\Psi$ .

## 12. Bibliographie

- *From atoms to quarks* - J. S. Trefil - Scribners éd. - 1980.
- *La Matière - Espace - Temps* - Gilles Cohen-Tannoudji et Michel Spiro - Fayard éd. - 1986.
- *L'univers quantique* - Heinz Pagels - InterEditions éd. - 1985.
- *La matière première* - M. Crozon - Le Seuil éd.- ?
- *La grande Unification - Vers une théorie des forces fondamentales* - Abdus Salam – Le Seuil éd. - 1991.
- *Les constantes universelles* - Gilles Cohen-Tannoudji - Hachette éd. - 1991.
- Quatre articles de la revue néerlandaise *Zenit* - A. Achterberg - octobre, novembre, décembre 1987 et janvier 1988.
- « La chromodynamique quantique » (article) - *La Recherche* n° 123 - juin 1981.
- « La découverte du quark top » (article) - Tony Liss et Paul Tipton – *Pour la Science* - octobre 1997.
- « Twilight time for the fifth force ? » (article) - C.M.Will - *Sky and Telescope* - novembre 1990.
- « La supersymétrie » (article) - *La Recherche* n° 197 - mars 1988.
- « Les constantes font la loi » (article) - Marc Seguin - *Ciel et Espace* - novembre 1997.
- « Accélérateurs et unification » (article) - John Morgan - *Pour la Science* - avril 1994.