

LES PARTICULES ELEMENTAIRES ET LES INTERACTIONS FONDAMENTALES

Le Modèle Standard

UE CULTURE

Patrick Vieillefosse

Novembre 2005

1. INTRODUCTION

La matière est constituée d'atomes dont la taille (le rayon) est de l'ordre de 10^{-10} m = 1 Å.

Un atome est constitué d'un noyau et de Z électrons. La taille du noyau est de l'ordre de 10^{-15} m = 1 fm (femtomètre) = 1 fermi. Il est chargé positivement. Les Z électrons e^- (ou e) sont chargés négativement et sont donc attirés par le noyau par la force électrique de Coulomb. La charge d'un électron est $-e$ (<0), où $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C est appelée charge élémentaire. Dans la suite nous prendrons e comme unité de charge.

Un noyau est constitué de Z protons (p), portant chacun une charge $+1$, et de $A-Z$ neutrons (n), portant chacun une charge nulle. L'interaction électrique entre protons est répulsive. Aussi la cohésion du noyau est assurée par une autre interaction : l'interaction forte qui lie indifféremment les nucléons p ou n .

Un nucléon p ou n est constitué de 3 quarks, choisis parmi les deux saveurs (sortes) de quarks : up (u) portant une charge électrique $+2/3$, et down (d) portant une charge $-1/3$. Le proton est composé des 3 quarks uud et le neutron des 3 quarks udd . Il est facile de vérifier que cela donne bien les valeurs de leurs charges respectives $+1$ et 0 .

Une autre particule, le neutrino ν_e (W.Pauli 1930) est produite dans la désintégration β . Bien que cette particule soit produite en très grande quantité dans le Soleil, donnant sur terre un flux de particules impressionnant de 65 milliards de particules par cm^2 et par s, elle est très difficile à détecter, car elle interagit très peu (interaction faible uniquement).

e^- , ν_e , u et d forment la première famille (ou génération) de particules élémentaires et sont les constituants de toute la matière ordinaire. Il existe 2 autres familles de particules similaires ; ces particules sont produites dans les accélérateurs. Ceci donne au total $3 \cdot 4 = 12$ particules élémentaires. Pourquoi 3 familles ? Existes-ils d'autres familles ou d'autres particules ? Ces questions sont actuellement sans réponse.

En plus de ces 12 particules élémentaires, il existe 12 antiparticules. Dirac a prévu l'existence d'un anti-électron ou positon ou positron (e^+ ou \bar{e}) en 1928 ; celui-ci a été observé en 1932. De façon générale, à une particule a il correspond une antiparticule \bar{a} , de même masse que a , mais dont toutes les charges sont inversées. Dans « toutes les charges » nous incluons la charge électrique, la charge forte, les nombres baryoniques et leptoniques etc. Ainsi une paire $a \bar{a}$ est de l'énergie pure et ne participe pas aux lois de conservation sauf celle de l'énergie, toutes les charges de la paire étant nulles.

L'existence des antiparticules est intimement liée aux symétries P (inversion spatiale : les 3 coordonnées x, y et z sont simultanément changées de signes) et T (changement du sens du temps : t est changé en $-t$). Les équations de la physique sont invariantes lorsqu'on effectue simultanément les 3 opérations P , T et C la conjugaison de charges qui transforme les particules en leurs antiparticules ; c'est à dire que $CPT = 1$. Dans certains cas il y a invariance dans chacune de ces 3 transformations. Ainsi l'équation du mouvement d'une charge q dans

un champ électrique \vec{E} : $m d\vec{v}/dt = q \vec{E}$, est invariante dans chacune des 3 opérations P (qui change \vec{v} et \vec{E} de signe), C (qui change q et \vec{E} de signe) et T (qui change \vec{v} et t de signe). Ainsi une antiparticule \bar{a} apparaît comme une particule a dans un espace à symétrie inversée et avec un temps qui s'écoule en sens inverse.

2. LES 12 PARTICULES ELEMENTAIRES

Les particules élémentaires sont réparties en deux grandes catégories les LEPTONS et les QUARKS : les leptons n'ont pas d'interaction forte et les quarks ont des interactions fortes.

Toutes les particules élémentaires chargées ont des interactions électro-magnétiques (EM). Donc seuls les neutrinos ne sont pas concernés par cette interaction. Enfin les interactions faible et gravitationnelle concernent toutes les particules.

génération	LEPTONS		QUARKS	
	$q = -1$	$q = 0$	$q = 2/3$	$q = -1/3$
1	électron e^- 511 keV	neutrino électronique ν_e < 0.1 eV	up u 5 MeV	down d 9 MeV
2	muon μ^- 106 MeV	neutrino muonique ν_μ < 0.25 MeV	charm c 1.25 GeV	strange s 175 MeV
3	tau τ^- 1.78 GeV	neutrino tauique ν_τ < 35 MeV	top t ~ 200 GeV	bottom (beauty) b 4.5 GeV

q est la charge électrique exprimée en charge élémentaire, $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C.

La masse des particules est donnée par la valeur de mc^2 en électron-volt (eV), c est la vitesse de la lumière $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

Pour les antiparticules le tableau est analogue, les masses sont identiques, mais les charges électriques sont changées de signe : +1 pour les leptons chargés, - 2/3 et +1/3 pour les quarks.

LES INTERACTIONS FONDAMENTALES

interaction	particules concernées	intensité à basse énergie	portée	temps caractéristique	particules échangées	charge	masse : mc^2
électro-magnétique	toutes part. chargées	10^{-2}	longue	10^{-18} à 10^{-15} s	photon γ	0	0
faible	toutes	10^{-13}	10^{-18} m	10^{-6} à 10^{-2} s	W^+ et W^- Z	+ 1 et - 1 0	81 GeV 92 GeV
forte	quarks	1	confinement*	10^{-23} s	8 gluons g	0	0
gravitation	toutes	10^{-38}	longue		graviton ?		

* la séparation de 2 quarks 'colorés' est impossible car l'interaction devient trop forte ; la séparation n'est possible qu'entre particules composées 'blanches', baryons ($q_1q_2q_3$) ou mésons ($q_1\bar{q}_2$), l'interaction est alors à courte portée $\sim 10^{-15}$ m.

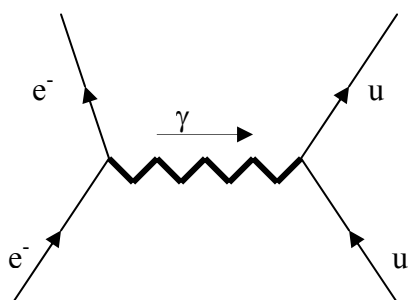
3. L'INTERACTION ELECTRO-MAGNETIQUE (EM)

Cette interaction concerne toutes les particules *élémentaires* portant une charge électrique, donc toutes sauf les neutrinos. Le neutron a des interactions EM (n a un moment magnétique comme un petit aimant) car il est composé de 3 quarks chargés et il n'est pas une particule élémentaire.

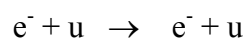
Son intensité est environ 1/100 de celle de l'interaction forte à basse énergie. A haute énergie les différentes interactions semblent se rejoindre dans une même interaction (cf plus loin).

Sa portée est qualifiée de longue, car l'énergie d'interaction de 2 charges décroît lentement (en $1/r$) avec leur distance r .

L'interaction EM est considérée comme résultant de l'échange d'une particule, le photon (γ) non chargé et de masse nulle. L'interaction EM conserve les particules, c'est à dire que l'on a les mêmes particules avant et après l'interaction. On représente l'interaction par un diagramme avec les particules entrantes et sortantes, et la particule échangée :



représente l'interaction ou la réaction



Les temps caractéristiques de l'interaction EM sont compris entre 10^{-18} et 10^{-15} s. Par exemple le méson π^0 se désintègre en 2 photons : $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ avec une durée de vie de 10^{-16} s. π^0 est un 'mélange quantique' d $\bar{d} + u$ \bar{u} , ce qui veut dire que π^0 est constitué soit d'une paire $d\bar{d}$, soit d'une paire $u\bar{u}$, avec une égale probabilité et toute paire $a\bar{a}$ peut se transformer en

photons, que a soit d ou u. La transformation en un seul photon est interdite par la conservation de la quantité de mouvement.

4. L'INTERACTION FAIBLE

Elle concerne toutes les particules élémentaires ; c'est la seule interaction pour les neutrinos, si l'on met de côté bien sûr la gravitation.

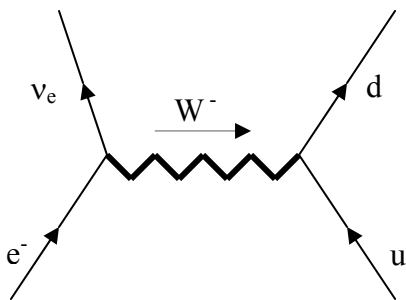
Son intensité est très faible, de l'ordre de 10^{-13} à basse énergie, d'où son nom.

Sa portée est très petite aussi, de l'ordre de 10^{-18} m = 10^{-3} fm.

Il existe deux types d'interaction faible : l'interaction faible à *courant chargé* résultant de l'échange de particules chargées W^+ et W^- , portant des charges respectives +1 et -1 et l'interaction faible à *courant neutre* résultant de l'échange de Z neutre. La masse de ces particules W ou Z est assez importante de l'ordre de 100 GeV, ce qui est directement relié à la courte portée de l'interaction.

A L'INTERACTION FAIBLE A COURANT CHARGE (IFCC)

La charge électrique d'un système isolé est conservée, c'est-à-dire que si au départ le système a une charge Q, à la fin il aura aussi une charge Q (conservation globale). En fait la conservation de la charge électrique est plus forte que globale, elle est aussi locale : dans un volume V quelconque, la variation de la charge électrique pendant un temps donné est égale à la somme des charges qui sont rentrées moins la somme des charges qui sont sorties de V pendant l'intervalle de temps. Si une interaction de 2 particules a et b résulte de l'échange d'un W^- , la charge électrique doit être conservée dans chaque demi réaction, à l'émission et à l'absorption du W^- , on aura donc obligatoirement changement de la nature (saveur) des 2 particules : $a \rightarrow W^- + c$, $b + W^- \rightarrow d$, pour la réaction (interaction) globale $a + b \rightarrow c + d$, avec pour les charges électriques $q_c = q_a + 1$ et $q_d = q_b - 1$. Conclusion : dans l'IFCC il y a 2 changements de saveur. Voici un exemple :



$$e^- + u \rightarrow \nu_e + d$$

c'est la réaction 'observée' :

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

où l'on passe du proton (uud) au neutron (udd) par transformation d'un u en d

Les changements de saveur autorisés sont les suivants :

$$e^- \leftrightarrow \nu_e, \mu^- \leftrightarrow \nu_\mu, \tau^- \leftrightarrow \nu_\tau$$

quark de charge $2/3 \rightarrow$ n'importe quel quark de charge $-1/3$, par exemple $u \rightarrow d, s$ ou b

quark de charge $-1/3 \rightarrow$ n'importe quel quark de charge $2/3$, par exemple $d \rightarrow u, c$ ou t

les changements sont identiques pour les antiparticules, par exemple $e^+ \leftrightarrow \bar{\nu}_e$ ou

$$\bar{u} \rightarrow \bar{d}, \bar{s} \text{ ou } \bar{b}$$

aucune transition des particules vers les antiparticules, ou l'inverse, aucune transition des leptons vers les quarks ou l'inverse.

Il faut noter que d'autres lois de conservation viennent s'ajouter à ces règles (par exemple l'énergie, le moment cinétique,...). Cela peut empêcher une réaction, correspondant à des changements de saveur autorisés, de se produire.

On déduit de ces changements de saveur des lois de conservation qui sont très importantes :

Dans les règles précédentes il apparaît que le nombre de leptons de la première famille (e^- ou ν_e) et que le nombre d'antileptons de cette même famille (e^+ ou $\bar{\nu}_e$) sont séparément conservés. Mais il faut tenir compte de la possibilité d'annihilation d'une particule avec sa propre antiparticule par interaction EM. Ainsi ce qui est toujours conservé, c'est la différence entre le nombre de leptons et le nombre d'antileptons de cette famille, car ce nombre ne varie pas dans l'opération d'annihilation. Il en est de même pour les leptons des autres familles.

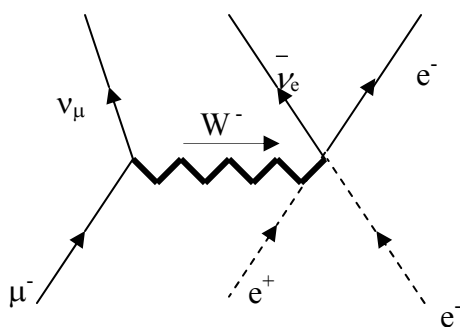
Pour les quarks, puisque l'on peut transiter d'un quark d'une famille à un quark d'une autre famille, le bilan est fait uniquement pour l'ensemble des 3 familles et non plus pour chaque famille. Pour des raisons historiques, on introduit un facteur $1/3$, de façon à avoir $+1$ pour un baryon composé de 3 quarks tel que le proton ou le neutron. On introduit donc 4 nombres :

Le nombre leptonique électronique $l_e = (\text{nombre de leptons} - \text{nombre d'antileptons})$ de la 1^{ère} famille. Les nombres leptonique muonique l_μ , et leptonique tauique l_τ sont définis de la même façon pour respectivement les familles 2 et 3. Enfin le nombre baryonique $B = (\text{nombre de quarks} - \text{nombre d'antiquarks})/3$. Comme toutes les interactions autres que l'IFCC conservent les particules avec leurs saveurs, ces 4 nombres sont conservés strictement.

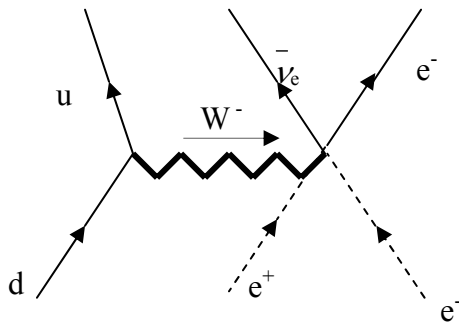
QUESTION : Si l'Univers primitif était composé de matière et d'antimatière en quantités égales, les nombres leptoniques et baryoniques étaient nuls. L'Univers actuel paraît ne contenir pratiquement que de la matière donnant des nombres leptoniques et baryoniques largement positifs. Comment concilier cela avec la conservation de ces nombres ?

Donnons quelques exemples :

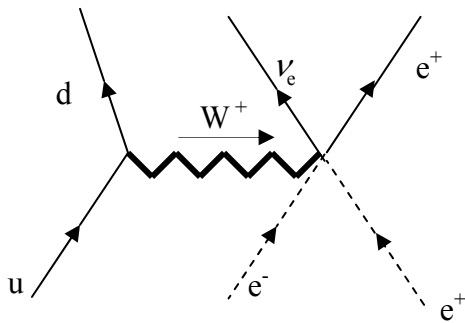
Ex1 : désintégration du muon en électron. La réaction $\mu^- \rightarrow e^-$ est interdite, le μ^- ne peut que transiter vers ν_μ , c'est le premier changement de saveur, avec émission d'un W^- . Le deuxième changement de saveur peut être vu de la façon suivante : on considère une paire $e^+ e^-$, pour absorber le W^- le seul changement de saveur possible est la transition de e^+ vers $\bar{\nu}_e$, l'électron restant demeurant inchangé. On a donc la réaction $\mu^- \rightarrow \nu_\mu + \bar{\nu}_e + e^-$



Ex2 : radioactivité β^- . Il se produit dans certains noyaux la réaction de transformation d'un neutron en proton : $n \rightarrow p + \bar{\nu}_e + e^-$; cette réaction se produit spontanément pour un neutron libre au bout d'un temps d'environ 12 min. En terme de quarks, il s'agit de la transformation d'un quark d en quark u (1^{er} changement de saveur) associé au 2^{ème} changement de saveur leptonique $W^- \rightarrow \bar{\nu}_e + e^-$ comme dans l'exemple précédent.



Ex3 : fusion dans les étoiles. Il s'agit de passer de 4 protons à l'hélium 4 ; pour cela il faut transformer 2 des 4 protons en neutrons. Transformer un proton en neutron revient à transformer un quark u en d, c'est le premier changement de saveur avec émission d'un W^+ . Le deuxième changement de saveur est la transformation d'un e^- , d'une paire $e^- e^+$, en ν_e .



Soit au total la réaction $u \rightarrow d + e^+ + \nu_e$, ou encore en rajoutant $u + d$ dans les deux membres, $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$. Cette réaction, telle que, ne peut pas se produire à cause de la conservation de l'énergie. En rajoutant un proton dans chaque membre, on a $p + p \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$, où le proton et le neutron du membre de droite sont liés dans le deutérium, ce qui rend cette réaction possible d'un point de vue énergétique avec libération de 0.42 MeV. Cette réaction est la réaction fondamentale dans une étoile. Comme l'interaction faible est à très courte portée les deux protons doivent vraiment se 'rentrer dedans', et comme ils se repoussent fortement à cause de la répulsion électrique, ils doivent avoir une énergie cinétique suffisamment élevée. Ainsi les réactions de fusion dans une étoile ne peuvent démarrer que si la température est assez élevée (environ 10^7 K) ce qui nécessite une masse totale d'hydrogène suffisante. De toute façon, cette réaction reste difficile et l'étoile mettra beaucoup de temps à 'brûler' son hydrogène (environ 10^{10} ans). Les réactions suivantes, faisant intervenir les interactions fortes et EM, sont beaucoup plus faciles : $p + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$, puis enfin ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p + p$. Au total la fusion de 4 protons en ${}^4\text{He}$ libère 26.7 MeV. Malheureusement pour nous la 1^{ère} réaction (2 protons \rightarrow Deutérium) est trop difficile à faire sur terre et la fusion contrôlée est envisagée sous la forme Deutérium + Tritium (projet ITER).

B. L'INTERACTION FAIBLE A COURANT NEUTRE

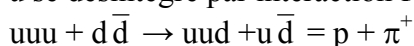
Echange de Z neutre, pas de changement de saveur, analogue à l'interaction EM.

5. L'INTERACTION FORTE

Elle concerne les quarks pas les leptons.

Son intensité est 1 à basse énergie (100 fois plus que celle de l'interaction EM).

L'interaction forte est **forte** et se fait rapidement, par exemple le baryon Δ^{++} , composé de 3 quarks u se désintègre par interaction forte comme ceci :



où l'on a ajouté une paire $d\bar{d}$ dans le premier membre. Le temps de vie τ du Δ^{++} est de l'ordre de 10^{-23} s, ce qui donne une distance parcourue maximum $c\tau$ de l'ordre de 10^{-15} m (c est la vitesse de la lumière) !

Le couplage entre les quarks et le champ fort ne dépend pas de leurs saveurs. Cette propriété essentielle a été énoncée par Heisenberg en 1933 sous la forme : proton et neutron ont des propriétés identiques vis-à-vis de l'interaction forte. Ceci peut être considéré comme le point de départ de la 'théorie' des interactions fortes.

Ce couplage se fait par la **charge forte** ou **couleur**, équivalent de la charge électrique dans l'interaction EM (Greenberg 1964). La couleur est une grandeur additive, conservée comme la charge électrique. Le terme 'couleur' n'est pas très heureux, cette 'couleur' n'a rien à voir avec la couleur au sens commun, par exemple celle de la lumière.

La grosse différence avec la charge électrique est que ce n'est pas **un** nombre réel mais **deux** nombres réels ($\in \mathbb{R}^2$).

Il y a 3 couleurs possibles pour les quarks : $(1/2, 1/3)$, $(-1/2, 1/3)$ et $(0, -2/3)$. Les 3 anticouleurs des antiquarks sont les opposées : $(-1/2, -1/3)$, $(1/2, -1/3)$ et $(0, 2/3)$.

La particule échangée lors de l'interaction : c'est un des 8 **gluons g**, de masse 0, de charge électrique 0, mais portant une charge forte. L'interaction forte ne change pas la saveur, mais change la couleur des quarks. Il n'y a pas de couplage du champ fort avec une particule de charge forte nulle (par exemple un lepton). Par contre, les gluons, qui sont 'colorés', interagissent entre eux, et c'est une différence essentielle avec le cas EM, où les photons ne portent pas de charge électrique et donc n'interagissent pas entre eux.

Il résulte de cette interaction entre gluons que l'interaction entre quarks est qualitativement très différente des autres interactions. L'interaction croît avec la distance de séparation (l'énergie potentielle croît approximativement comme r), de sorte qu'il est impossible de séparer 2 quarks. On parle de **confinement** des quarks. Inversement, l'interaction devient petite à courte distance. Dans un proton, les 3 quarks sont presque libres !

Pour avoir une particule, composée de quarks, qui soit libre, il faut que la charge forte de l'ensemble soit nulle. Les seuls assemblages possibles sont les deux suivants :

→ 3 quarks $q_1 q_2 q_3$ identiques ou différents, portant chacun une des 3 couleurs (la somme des 3 couleurs est bien nulle), ce sont les **baryons** tels que p ou n,

→ une paire $q_1 \bar{q}_2$, portant respectivement une couleur et l'anticouleur correspondante (la somme d'une couleur et de son anticouleur est bien nulle), ce sont les **mésons** tels que les π ou les K.

Entre les particules composées précédentes de charge forte globale nulle, il reste une interaction, beaucoup plus petite qu'entre particules colorées et surtout qui décroît fortement

avec la distance de séparation au-delà de 1 fm. C'est ce qui se passe entre les nucléons dans un noyau atomique.

QUELQUES BARYONS ET MESONS

BARYONS		MESONS	
p	uud	π^+	$u\bar{d}$
n	udd	π^0	$u\bar{u} + d\bar{d}$
Σ^+	uus	π^-	$\bar{u}d$
Σ^0	uds	K^+	$u\bar{s}$
Σ^-	dds	K^0	$d\bar{s}$
Λ^0	uds	K^-	$\bar{u}s$
Ξ^0	uss	η^0	$u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s}$
Ξ^-	dss	B_d^0	$\bar{b}d$
Δ^{++}	uuu	B_s^0	$\bar{b}s$
Δ^+	uud	B^+	$\bar{b}u$
Δ^0	udd		
Δ^-	ddd		
Ω^-	sss		

Remarque 1 : p et Δ^+ sont composés des mêmes quarks, mais ce sont deux particules différentes car l'assemblage est différent dans les deux cas ; les deux baryons ont par exemple des moments cinétiques propres (spins) différents et des masses différentes.

Remarque 2 : pour le méson π^0 , $u\bar{u} + d\bar{d}$ a une signification quantique. Cela veut dire que l'on a ou bien une paire $u\bar{u}$, ou bien une paire $d\bar{d}$, avec des probabilités identiques.

6. RECAPITULATIF DES LOIS DE CONSERVATION

Pour un système isolé, sont conservés l'énergie, la quantité de mouvement et le moment cinétique. Dans le bilan d'énergie il faut tenir compte de l'énergie propre $E = mc^2$ d'une particule de masse m (c = vitesse de la lumière) ; dans un référentiel où la particule est en mouvement, l'énergie est $E = mc^2 + E_C$ où E_C est l'énergie cinétique.

Ces lois de conservation interdisent un certain nombre de réaction. Par exemple la réaction $a \rightarrow b$, où a et b sont 2 particules différentes, est interdite (pourquoi ?). De même la réaction $a + \bar{a} \rightarrow \gamma$ est interdite, car dans le référentiel où la quantité de mouvement totale de a et \bar{a} est nulle, le photon γ aurait une quantité de mouvement nulle et donc aussi une énergie nulle, il n'existerait donc pas. La bonne réaction est $a + \bar{a} \rightarrow \gamma + \gamma$.

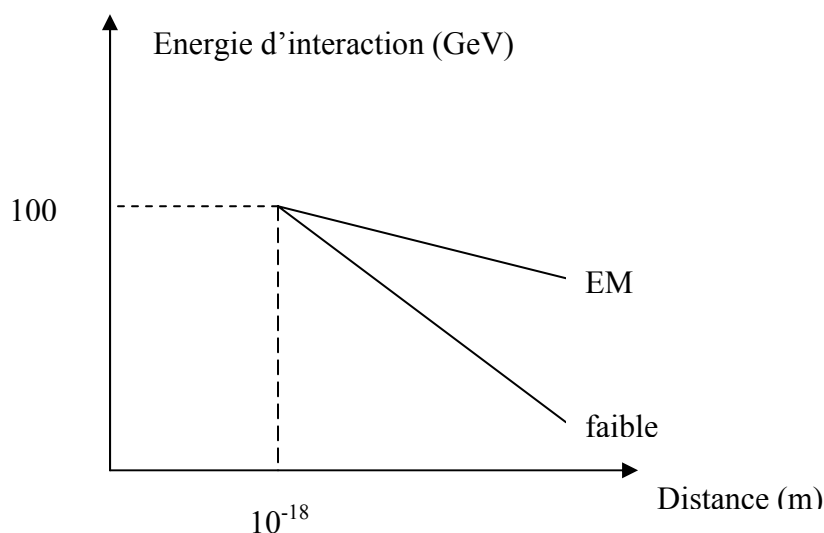
La charge électrique d'un système isolé est conservée. La conservation est en fait plus forte : elle est locale. Quel que soit un volume V (aussi petit que l'on veut), la variation de la charge du volume entre deux instants est égale à la somme des charges qui sont rentrées dans V – la somme des charges qui sont sorties de V, entre les deux instants. Idem pour la charge forte ou couleur.

Sont conservés, les nombres de leptons de chaque famille et le nombre de quarks (toutes familles confondues). On compte ici +1 pour les particules et -1 pour les

antiparticules. Le nombre baryonique est défini comme $1/3$ de ce nombre de quarks, et est strictement conservé (à ce jour !). Les baryons contribuent par $+1$ à ce nombre, les antibaryons par -1 , et les mésons par 0 (pourquoi ?). Le nombre de mésons n'est pas conservé ! Exemple : $p + p \rightarrow p + p + \pi^0$.

7. UNIFICATION DES INTERACTIONS

La force (intensité) des interactions dépend de l'énergie des particules qui interagissent ou de leur distance d'approche. Pour des distances supérieures à 10^{-18} m l'interaction faible est beaucoup plus petite que l'interaction EM. Pour des distances plus petites, l'interaction faible croît fortement et devient comparable à l'interaction EM. On a le schéma qualitatif suivant:

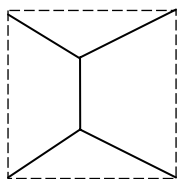


Une illustration de cette convergence des deux interactions EM et faible, est la réaction $e^+ + e^- \rightarrow W^+ + W^-$, qui peut se faire par les deux processus $e^+ + e^- \rightarrow \gamma \rightarrow W^+ + W^-$ (EM) et $e^+ + e^- \rightarrow Z \rightarrow W^+ + W^-$ (faible). Chacun des deux processus pris séparément est divergent à haute énergie, mais l'ensemble des deux est bien fini comme il se doit. Ceci montre qu'il y a une relation étroite entre ces deux interactions.

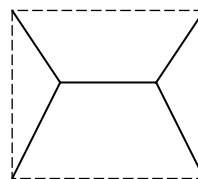
Une théorie unifiée des interactions EM et faible a été établie par Glashow, Salam et Weinberg (1967). La séparation en deux interactions distinctes à basse énergie est interprétée comme résultant de l'interaction avec un autre champ (un $5^{\text{ème}}$) appelé champ de Higgs, et d'un mécanisme de brisure de symétrie. Une particule, associée à ce nouveau champ, est prévue, avec une masse ≥ 120 GeV. Elle est appelée boson de Higgs (H) et est activement recherchée en particulier au LHC à Genève. C'est la seule particule du Modèle Standard qui n'ait pas été encore observée.

Quelques mots sur la brisure de symétrie. Typiquement une brisure de symétrie se produit quand on recherche un minimum dans un problème présentant une certaine symétrie. La solution de ce problème de minimum n'a pas forcément la symétrie initiale. L'opération de symétrie perdue, se retrouve dans le fait qu'il y a plusieurs solutions qui se transforment l'une dans l'autre dans cette symétrie.

Exemple : 4 villes sont situées aux sommets d'un carré de côté a . On cherche la route la plus courte permettant de relier ces 4 villes. Il y a deux solutions :



(a)

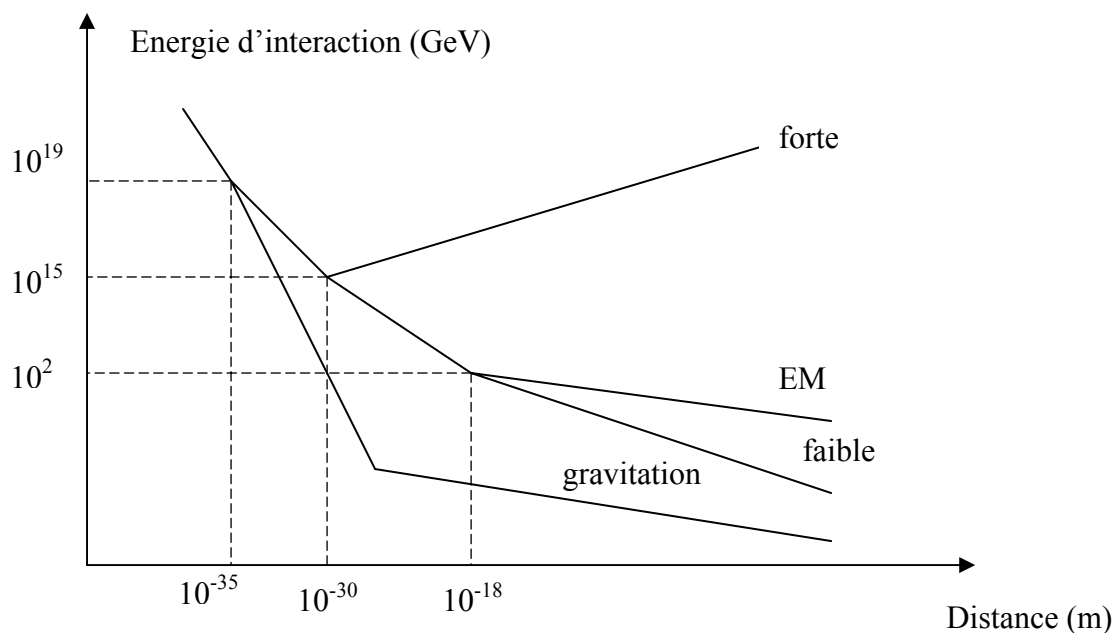


(b)

Ces deux solutions ont la longueur $L = (1 + \sqrt{3}) a$ (faire le calcul !). La symétrie par rapport aux diagonales du carré a été perdue. Mais ces deux solutions se correspondent précisément dans la symétrie par rapport à une des diagonales.

Ici il s'agit du minimum de l'énergie du champ électro-faible. Les symétries sont les symétries de jauge intimement liées aux conservations locales des charges associées aux interactions.

Maintenant l'unification avec les interactions forte et gravitationnelle est envisagée de façon très spéculative suivant le schéma suivant :



La physique à 10^{15} GeV et 10^{-30} m est loin d'être explorée. Il y aura peut-être des surprises ! Les théories recherchant la symétrie initiale, qui a été brisée, sont dites Super-Symétriques (SUSY). Un lien avec l'évolution de l'Univers est envisagé. La prédiction la plus spectaculaire de ces théories est la désintégration du proton en leptons, conduisant à la non-conservation du nombre baryonique et à l'instabilité de la matière ordinaire. Le temps de vie du proton ($\sim 10^{30}$ ans) comparé à l'âge de l'Univers ($\sim 10^{10}$ ans) ne doit pas trop nous inquiéter ! Une autre approche est la théorie des cordes.

8. DOCUMENTS

De nombreux documents sur ce sujet sont disponibles sur internet. Avec Google, rechercher 'Quarks' ou 'Leptons' ou 'Modèle Standard'. Privilégier les sites universitaires (Universités, CEA, IN2P3, CERN, SLAC...) ou les pages d'associations (Wikipédia, Futura-Sciences, Sciences.ch...). 'Modèle Standard' renvoie aussi au Modèle Standard de la Cosmologie (évolution de l'Univers depuis le Big Bang). Il y a aussi les articles de vulgarisation dans les journaux tels que *Pour La Science* ou *La Recherche*. Avec Google vous trouverez les sites de ces journaux pour rechercher les numéros où il y a des articles sur ce sujet. Les articles ne sont pas disponibles sur internet, il faut chercher les journaux en bibliothèque.

9. PRECISIONS

J'ai volontairement évité de parler de certaines choses :

- spins, fermions et bosons
- charge faible (isospin faible)
- invariance de jauge et groupes associés
- les neutrinos libres qui ont une masse définie sont 3 neutrinos notés ν_1 , ν_2 et ν_3 . Les neutrinos, qui sont obtenus par changement de saveur des leptons chargés dans l'interaction faible, ν_e , ν_μ et ν_τ sont des combinaisons linéaires des 3 premiers. Il n'y a plus conservation que d'un seul nombre leptonique pour l'ensemble des 3 familles. Ces propriétés découlent de l'expérience sur les neutrinos solaires.
- l'addition des couleurs est un peu subtile. Une couleur (0,0) n'est pas suffisante pour avoir une particule neutre. Dans un méson, l'état de couleur nulle est $1 \bar{1} + 2 \bar{2} + 3 \bar{3}$, superposition des 3 paires possibles couleur-anticouleur associée. Il est difficile de comprendre ces résultats sans se plonger dans le groupe SU(3) de symétrie des couleurs.
- les interactions EM et forte conservent séparément chacune des 3 symétries C, P et T. L'interaction faible viole de façon importante la conservation de C et P et de façon faible la conservation du produit CP (le produit CPT étant bien conservé). Ces propriétés sont étudiées dans les expériences BABAR (de B- \bar{B}) et Belle, réalisées respectivement au CERN et au Japon.