

Les particules élémentaires et des particules d'interactions

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.

1. La première interaction : la force de gravitation

Les trois principes de la dynamique (principe d'inertie, principe fondamental $\mathbf{m} \cdot \mathbf{a} = \mathbf{F}$, 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 :

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

Où $\mathbf{F}$ s'exprime en N,

$\mathbf{m}$ et $\mathbf{m}'$ en kg,

$\mathbf{r}$ la distance séparant les deux masses, en m.

$\mathbf{G}$ la constante de gravitation universelle, dite de Cavendish, vaut $6,672 \cdot 10^{-11}$ (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 ($\mathbf{F}$ 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. (Sujet non maîtrisé jusqu'à présent).

2. La deuxième 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 $\mathbf{Q}$ et $\mathbf{Q}'$ (exprimées en C), au repos, séparées par une distance $\mathbf{r}$ (en m) ; on a la relation suivante (établie par Charles Coulomb en 1780) :

$$\mathbf{F} = \mathbf{K} \frac{\mathbf{Q} \cdot \mathbf{Q}'}{\mathbf{r}^2} \quad \text{avec} \quad \mathbf{K} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \quad \mathbf{F} = \mathbf{K} \frac{\mathbf{Q} \cdot \mathbf{Q}'}{\mathbf{r}^2} \quad \text{avec} \quad \mathbf{K} = \frac{1}{4\pi\epsilon}$$

où $\mathbf{F}$ s'exprime en N. La grandeur ϵ porte le nom de permittivité électrique absolue et dépend du milieu dans lequel sont placées les deux charges électriques.

Contrairement à la gravitation, 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 :

$$\mathbf{F} = \mathbf{K} \frac{\mathbf{Q} \cdot \mathbf{Q}'}{\mathbf{r}^2} = 9 \cdot 10^9 \times \frac{1 \times 1}{1} = 9 \cdot 10^9 \text{N}$$

Remarque : l'indice 0 de la permittivité 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 (milieu)

$$\epsilon_{r(\text{relative})} = \frac{\epsilon_{(\text{milieu})}}{\epsilon_{0(\text{vide})}}$$

Dans le cas de l'eau, $\epsilon_r = 80$ et la force dans l'eau vaut simplement F_0 / ϵ_r .

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

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

Calculons les deux forces en question : la force électrique vaut $0,83 \cdot 10^{-7}$ N et la force gravitationnelle $0,36 \cdot 10^{-46}$ N. On peut constater que la force électrique est beaucoup plus importante que la force de gravitation ; leur rapport vaut :

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{0,83 \cdot 10^{-7}}{0,36 \cdot 10^{-46}} = 2,3 \cdot 10^{39}$$

3. La 3^e interaction : la force nucléaire forte

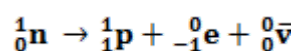
Si les deux premières interactions permettent de comprendre la stabilité des atomes, elles ne permettent pas, par contre, de comprendre celle des noyaux. S'ils contiennent plus d'un proton, la force de gravitation est insuffisante pour compenser la force de répulsion électrique entre charges positives. Une autre force, beaucoup plus forte que la force électrostatique répulsive doit être introduite. Sans cette nouvelle force, on ne comprend pas comment deux protons ou même un proton et un neutron ou encore deux neutrons tiennent aussi solidement ensemble, la seule force de gravitation ne pouvant y suffire.

Nous n'aurons certainement plus ici une relation en $1/r^2$. Cette force n'a, en effet, qu'une courte portée. La « portée » décrit la façon dont l'influence des forces se fait sentir au voisinage de leur source. En observant le comportement radioactif (découvert dès 1896) de certains isotopes du radium, du polonium etc., Rutherford pense à cette interaction forte à faible portée : l'éjection naturelle de particules α implique que la portée de cette interaction n'est pas suffisante pour maintenir la cohésion de ces gros noyaux.

On sait aujourd'hui que la portée de l'interaction forte ne dépasse pas « quelques fois » la dimension du proton (soit 10^{-15} m = 1 fermi ou 1 femto mètre). Au-delà de quelques fois 10^{-15} m, la force forte s'annule. La force nucléaire forte cimente les nucléons dans les noyaux. Elle associe les quarks 3 par 3 à l'intérieur des nucléons et donne naissance à l'énergie nucléaire.

4. La 4^e interaction : la force nucléaire faible

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



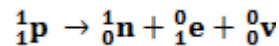
${}^0_0\bar{\nu} {}^0_0\bar{\nu}$ est un antineutrino.

Chaque fois que l'interaction faible agit, il apparaît des leptons, ici l'électron (e) et l'antineutrino $\bar{\nu}$.

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 :



${}^0_1\text{e} {}^0_1\text{e}$ 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 anti-hydrogène est constitué d'un p^- et d'un e^+ . La spectroscopie de l'anti-hydrogène apparaîtra exactement identique à celle de l'hydrogène. Un changement orbital électronique, par exemple un saut de la 3^e orbite sur la 2^e fait apparaître une raie H α identique dans les deux spectres.

5. 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

$$\frac{h \cdot c}{2\pi} = 3,16 \cdot 10^{-26} \text{N} \cdot \text{m}^2$$

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 en $\text{N} \cdot \text{m}^2$) avec $m = m' = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg, la constante de couplage vaut :

$$\frac{G \cdot m \cdot m'}{\frac{h \cdot c}{2\pi}} = 6 \cdot 10^{-39}$$

2. pour la *force électrique*, où

$$F_e \cdot r^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot Q \cdot Q' \text{ avec } Q = Q' = e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Avec $Q = Q' = e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, la constante de couplage vaut :

$$\frac{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot e \cdot e}{\frac{h \cdot c}{2\pi}} = \frac{1}{137} = \alpha$$

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

Pour la force nucléaire forte, où F représente la « charge » nucléaire forte, la constante de couplage vaut :

$$\frac{F \cdot F}{\frac{h \cdot c}{2\pi}} = 1$$

Pour la *force nucléaire faible*, où f représente la « charge » nucléaire faible, la constante de couplage vaut :

$$\frac{f \cdot f}{\frac{h \cdot c}{2\pi}} \approx 10^{-14}$$

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

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

6. La propagation des interactions - Leurs messagers

6.1. 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 gravitationnel ou du champ électrique, le potentiel en un point situé à

la distance r de la source est proportionnel à $\frac{1}{r}$ ($U \propto \frac{1}{r}$) 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 : $U(r) \propto (\exp^{-\frac{r-r_0}{r_0}})/r$, où r_0 représente la portée de l'interaction et $\exp$ 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 ».

6.2. 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.

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^e 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.

● La force électromagnétique

La particule messagère est le photon γ ;

- vitesse de propagation (dans le vide) = c ;

- portée = ∞ ;

→ Masse du messenger = 0.

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

● La gravitation

La particule messagère est le graviton G ;

- vitesse de propagation = c ;

- portée = ∞ ;

→ 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.

● L'interaction forte

Quelle est la particule messagère ? Rappelons que Yukawa estimait la portée de l'interaction forte à 10.10^{-15} m ; on peut donc estimer la masse du messenger grâce à la relation:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot c}$$

En effet, λ , la longueur d'onde associée à la particule, a des dimensions de l'ordre de la portée de l'interaction (10.10^{-15} m) et connaissant h et c , nous avons :

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot c} = 10.10^{-15} ; \quad m = 2.10^{-28} \text{ kg} \approx \frac{1}{9} m_p$$

soit environ 200 fois la masse de l'électron.

Remarque :

On pense aujourd'hui que les messagers de l'interaction forte entre nucléons sont les pions qui se présentent sous trois formes : π^0 , π^- et π^+ (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 $\frac{h}{2\pi}$;

- 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 antiquark.

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).

● 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 10.10^{-18} m, la masse de ces messagers vaut :

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot c} = 10.10^{-18} ; \quad m = 2.2.10^{-25} \text{ kg}$$

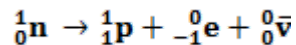
Il s'agit d'une masse colossale, une centaine de fois la masse du proton ! Ils ont été mis en évidence en 1983 au CERN (centre européen de recherche nucléaire) de Genève.

7. Les particules élémentaires

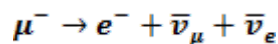
7.1. Introduction

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



Lorsque Yukawa a cru que la particule qui servait d'échange entre le p^+ et le n^0 était le muon μ^- on s'est demandé si ce μ^- , lui-même, était stable. Ce n'est pas le cas ; il se désintègre en



Si e^- est considéré aujourd'hui comme élémentaire, ce n'est plus le cas pour p^+ . Le proton est composé de quarks.

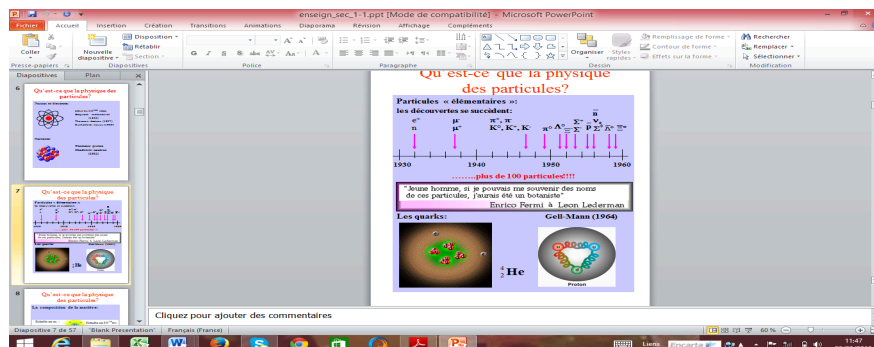
Les quarks de la matière ordinaire

Saveur	Masse (GeV/C ²)	Charge électrique
U up	0,005	+2/3
U down	0,01	-1/3

Unité de masse $1 \text{ GeV}/c^2 = 1,78265 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

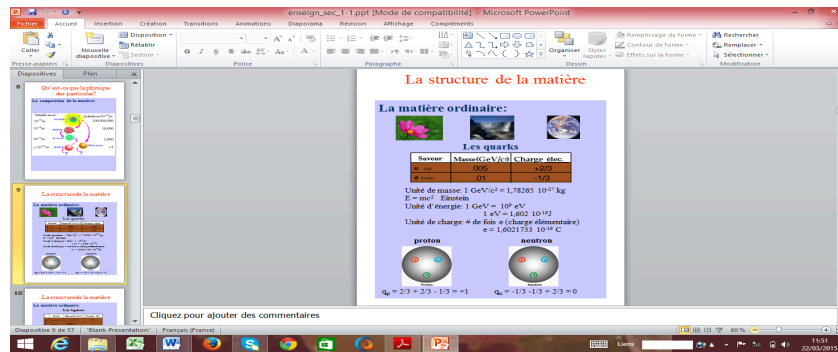
Unité d'énergie $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$

$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$



Un proton contient trois quarks du type (uud)

Un neutron contient trois quarks (ddu)



Les quarks de la matière cosmique ou artificielle

Savour	Masse (GeV/C ²)	Charge électrique
U up	0,005	+2/3
U down	0,01	-1/3
ccharm	1,5	+2/3
S strange	0,2	-1/3
ttop	180	+2/3
bbottom	4,7	-1/3

7.2. Classifications des particules

✓ Classification historique ou classification par masse

- L'électron e^- (à cause de sa faible masse) est un lepton (leptos = léger) ;
- Le proton p^+ et le neutron n^0 ont une masse semblable. Ce sont, vu leur masse importante, des baryons (baros = lourd) ;
- Les « poids moyens » sont les mésons (mesos = milieu). Rappelons que le μ^- , 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 π :

- π^+ et π^- , de masse $\approx 273 m_e$, de vie moyenne $\approx 10^{-8} \text{ s}$, se désintègrent en

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$$

- π^0 , de masse $\approx 265 m_e$, de vie moyenne $\approx 10^{-16} \text{ s}$, se désintègre en

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$$

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

- En 1947, découverte d'une nouvelle particule, neutre, l'hypéron Λ_0 , instable. Elle a une vie moyenne de $2,6 \cdot 10^{-10} \text{ s}$ 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).

✓ 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.

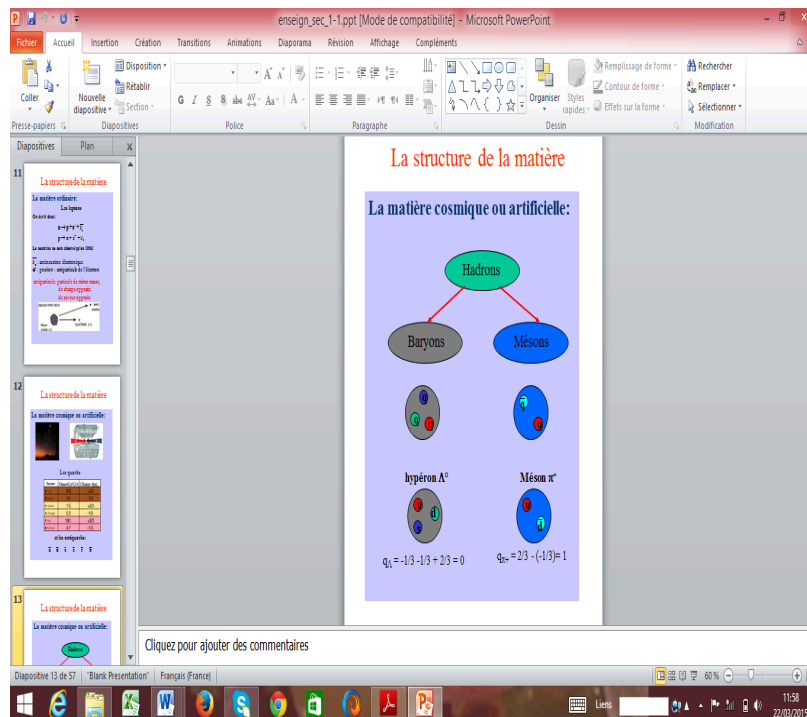
Les hadrons se décomposent en deux catégories :

- les *mésos* (de spin entier : 0,1,...),
- les *baryons* (de spin demi-entier : 1/2, 3/2,...).

Mais le nombre des hadrons des deux types découverts au fil du temps devint tel que d'autres classifications s'imposèrent. Citons les plus importantes d'entre elles.

Les leptons de la matière ordinaire

	Saveur	Masse (GeV/C ²)	Charge électrique
ν_e	neutrino	$<7.10^{-9}$	0
e^-	électron	0,000511	-1



Les quarks de la matière cosmique ou artificielle

	Saveur	Masse (GeV/C ²)	Charge électrique
ν_e	neutrino	$<7.10^{-9}$	0
e^-	électron	0,000511	-1
ν_μ	neutrino μ	0, 0003	0
μ^-	muon	0,106	-1
ν_τ	neutrino τ	0,03	0
τ^-	tau	1,7771	-1

8. Vers la grande unification...

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

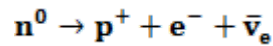
Les bosons intermédiaires (W^+ , W^- et Z^0) ne transportent pas la charge d'interaction faible (la saveur).

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)



8.1. Interaction gravitationnelle

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



8.2. Interaction électromagnétique

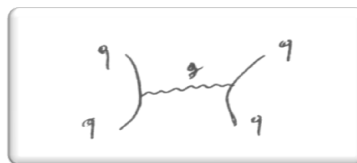
Deux électrons se frôlent, d'un électron à l'autre.

un photon γ est envoyé



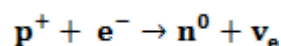
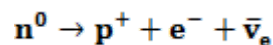
8.3. Interaction nucléaire forte

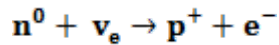
Un gluon permet l'échange de couleur entre quarks.



8.4. Interaction nucléaire faible

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





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).

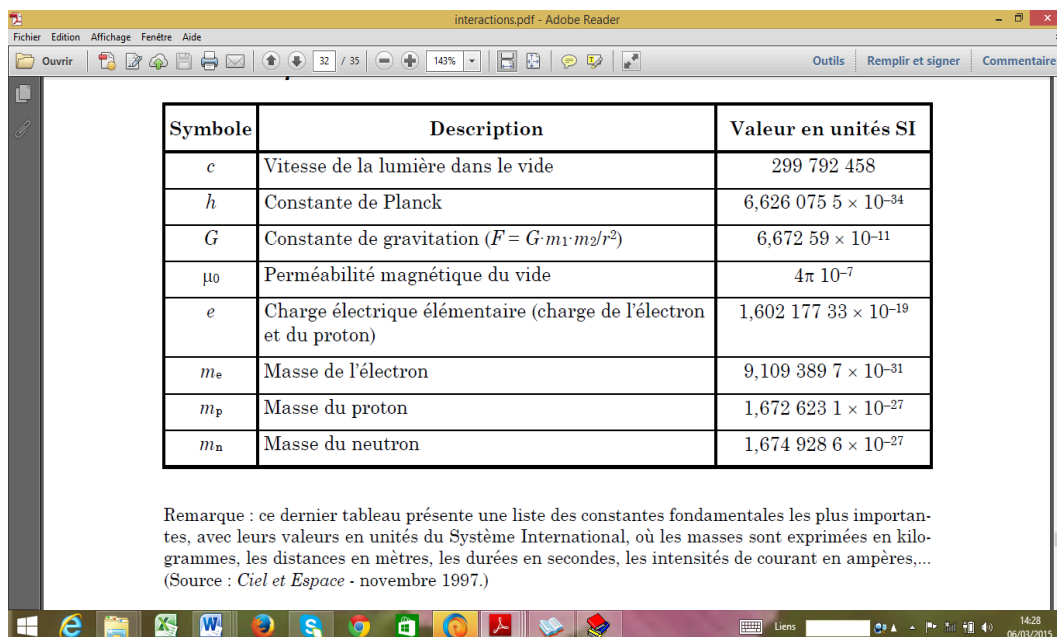
On est sur la voie de la résolution de l'unification de l'interaction électrofaible avec l'interaction nucléaire forte. C'est la théorie de la *grande unification*. Cette unification serait réalisée à des températures voisines de 1028 K (10^{16} GeV).

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 ».

Tableaux récapitulatifs

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 ($F = G \cdot m_1 \cdot m_2 / r^2$)	$6,672\,59 \times 10^{-11}$
μ_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.)

2. Les quatre interactions fondamentales

(Source : Ciel et Espace - novembre 1997.)

11.2. Les quatre interactions fondamentales

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

3. Classement des particules élémentaires et des particules d'interactions

Fermions de spin $\frac{1}{2}$ (constituants de la matière)	LEPTONS 2×6	e^-, μ^-, τ^- et $\bar{e}^+, \bar{\mu}^+, \bar{\tau}^+$ ν_e, ν_μ, ν_τ $\bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau$
	QUARKS 2×6	u, c, t et d, s, b $\bar{u}, \bar{c}, \bar{t}$ $\bar{d}, \bar{s}, \bar{b}$
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 γ de spin 1 particule messagère de l'interaction électromagnétique	
	GRAVITON G (hypothétique) de spin 2 particule messagère de l'interaction gravitationnelle	

Les fermions

Année Universitaire 2016-2017.... Master Physique.....DER.PCENSup.....Par M. T. CAMARA Page 13