
Zoologie des particules

i. Bref historique

Les savants ont toujours essayé d'appréhender la complexité de la nature en recherchant ses constituants élémentaires leur permettant, par association de plus en plus complexe de ces constituants, d'expliquer l'ensemble des objets existants dans l'univers. ARISTOTE, dès le IV^e siècle avant notre ère, avait réduit l'ensemble de ce qui constitue l'univers en cinq éléments : quatre éléments étaient à la base de ce qui constituait le monde sub-lunaire (la terre, l'eau, l'air et le feu) et un cinquième élément (l'éther) qui constituait le monde supra-lunaire.

Au XIX^e siècle, la théorie que défendait ARISTOTE était obsolète et l'on se dirigeait vers la notion d'atome comme constituant élémentaire de l'Univers. Un scientifique russe, D. MENDELEIEV (1834-1907) classa les éléments connus à l'époque dans un tableau selon des critères physico-chimiques, il en classa environ une soixantaine. L'idée d'atome ne faisait pas encore l'unanimité dans la communauté scientifique à cette époque. Cette idée s'imposera petit à petit tout au long du XIX^e siècle – et sera définitivement mise en évidence en 1905 par A. EINSTEIN avec la description qu'il donna du mouvement brownien. Ces atomes, classés par MENDELEIEV, étaient environ 80 au début du XX^e siècle. Mais sont-ils réellement élémentaires ?

Dès 1897, J. J. THOMSON (1856-1940) découvrit l'électron qui est une particule de charge électrique négative et proposa dès 1904 un premier modèle de l'atome : le modèle du plumpudding où l'électron est un composant de l'atome.

Dès 1911, E. RUTHERFORD (1871-1937), voulant valider le modèle théorique proposé par THOMSON, déduisit des résultats expérimentaux de son équipe – notamment GEIGER et MARDSEN – la faiblesse du modèle du plumpudding et en proposa un nouveau : l'atome est constitué d'un noyau chargé positivement et, autour de ce noyau, tournent des électrons tournant autour comme des planètes autour du Soleil.

Le proton, constituant de charge électrique positive du noyau, fut mis en évidence par le même RUTHERFORD en 1919, puis le neutron, deuxième constituant du noyau mais n'ayant pas de charge électrique, en 1932 par J. CHADWICK (1891-1974). Pour résumer, en 1932, les particules élémentaires étaient le proton et le neutron constituant le noyau et des électrons tournant autour, l'ensemble constituant l'atome.

À partir des années 30 commença une course aux hautes énergies – qui n'est d'ailleurs pas finie aujourd'hui avec le LHC – pour découvrir des particules de plus en plus énergétiques. Les progrès techniques au niveau des appareils de détection pour l'étude des rayons cosmiques puis des produits des collisions dans les accélérateurs de particules ainsi que les avancées théoriques avec l'avènement de la mécanique quantique entraînèrent des découvertes toujours plus nombreuses de particules et l'élaboration de théories toujours plus audacieuses ; voici les principales dates ayant marqué la physique des particules des années 30 à nos jours :

1932 : mise en évidence du positon, prévu par DIRAC (1902-1984) en 1928, par ANDERSON (1905-1991)

1933-1934 : théorie de la désintégration β de FERMI (1901-1954)

1936 : découverte du muon par ANDERSON

1946-1950 : théorie quantique de l'électromagnétisme (QED) (FEYNMAN (1918-1988), SCHWINGER (1918-1994) et TOMONAGA (1906-1979))

1956 : LEE (né en 1926) et YANG (né en 1922) suggèrent que la force faible peut engendrer une violation de la parité

1960-1970 : Découverte de centaines de particules « élémentaires » : ρ , ω , K^* , Σ , Ξ ...

- 1962** : Découverte des deux neutrinos ν_μ et ν_e
- 1964** : Existence des quarks* u , d et s (postulée par GELL-MANN (né en 1929) et ZWEIG (né en 1937))
- 1964** : Deux nouveaux quarks, c et s , sont suggérés pour expliquer la multitude de particules détectées
- 1967** : GLASHOW (né en 1932), SALAM (1926-1996) et WEINBERG (né en 1933) proposent un schéma d'unification des forces électromagnétiques et faibles. Prédiction de l'existence du boson de HIGGS et des bosons lourds Z^0 et W^\pm , des dizaines de fois plus massifs que les particules élémentaires connues à ce jour
- 1973** : Énoncé de la théorie des interactions fortes entre particules colorées (QCD). Prédiction de l'existence des gluons*
- 1978** : Découverte d'un cinquième quark, le bottom b , au Fermilab
- 1983** : Découverte du Z^0 et du W^\pm au CERN
- 1995** : Découverte d'un sixième quark, le top t , au Fermilab
- 1998** : Preuve de l'existence de neutrinos de masse non nulle au Super-Kamiokande

Différentes théories vont se succéder et se compléter pour classer et expliquer l'ensemble de ces particules découvertes. À partir des années 60, avec les collisionneurs de particules de plus en plus performants, le nombre de nouvelles particules découvertes va exploser pour arriver à un nombre de constituants élémentaires d'environ 200 dès la fin des années 60 ! Cela fait beaucoup plus que le nombre d'atomes et ne satisfaisait pas les physiciens théoriciens : c'était beaucoup trop complexe. Pour remédier à cela et tenter de rendre le nombre de particules élémentaires plus réduit, de nouvelles théories vont voir le jour qui tiennent compte à la fois du côté relativiste des phénomènes et du caractère quantique du comportement des particules : ce sont des théories de jauge*. L'ensemble de ces théories, basées sur une même approche mathématique – la théorie quantique des champs –, constitue le Modèle Standard* qui sera peu à peu complété pour être aujourd'hui considéré comme le modèle le plus précis, le plus testé et admis par la très grande majorité de la communauté scientifique. D'ailleurs les dernières particules découvertes dans les années 80 et 90 – bosons intermédiaires W^\pm et Z^0 en 1983 et les quarks – avaient été prévues par le Modèle Standard et constituèrent un triomphe pour celui-ci. Aujourd'hui, le LHC tente de mettre en évidence la dernière particule annoncée par le Modèle Standard, le boson de HIGGS.

ii. Le Modèle Standard

Les particules élémentaires du Modèle Standard

Les particules élémentaires constituant le Modèle Standard sont divisées en deux groupes : les bosons et les fermions. Les fermions – séparés en deux familles : les leptons* et les quarks – sont à proprement parler les particules de matière et les bosons sont les vecteurs¹ des interactions fondamentales. En effet, dans le Modèle Standard, une interaction entre deux fermions se fait par l'intermédiaire d'un boson vecteur.

Le terme de « particule élémentaire » ne veut pas dire stable. En effet, à part le proton et l'électron, toutes les autres particules se désintègrent avec des temps de vie plus ou moins importants. Une particule est dite « élémentaire » lorsque celle-ci peut-être traitée comme un point mathématique qui n'a pas de structure interne.

FERMIONS				
	LEPTONS		QUARKS	
1 ^{ère} famille	électron (e^-)	neutrino électron (ν_e)	down (d)	up (u)

¹ On parle de boson de vecteur.

2 ^{ème} famille	muon (μ^-)	neutrino muon (ν_μ)	strange (s)	charm (c)
3 ^{ème} famille	tau* (τ)	neutrino tau (ν_τ)	bottom (b)	top (t)

Les particules constituant la matière usuelle sont les quarks *Up* et *Down* qui forment les protons et les neutrons (le proton est constitué de deux *Up* et un *Down* et le neutron de deux *Down* et un *Up*) et l'électron. Toutes les autres particules sont : soit obtenues par détection de particules cosmiques (ou ses reliquats : le muon est un exemple), soit formées artificiellement dans un accélérateur de particules et détectées ensuite. À chacune de ces particules est associée une antiparticule* de charge opposée².

Leptons

Les leptons sont sensibles à l'interaction électromagnétique et à l'interaction faible mais pas à l'interaction forte. Les leptons portent une charge électrique $-e$ ou sont neutres.

Particule	Charge (en e)	Masse (en MeV/c^2)
électron (e^-)	-1	0,51
muon (μ^-)	-1	106
tau (τ^-)	-1	1777

Chacun des trois leptons décrit ci-dessus définit une des trois familles constituant les leptons. Pour simplifier, le muon et le tau sont des copies des électrons en plus lourds. Les physiciens n'expliquent pas pour le moment pourquoi les leptons sont divisés en trois familles.

À chacune de ces trois particules est associé un neutrino. On a longtemps pensé que les neutrinos n'avaient pas de masse, mais des preuves récentes montrent que ce n'est pas le cas. Comme les électrons, muons et taus, les trois types de neutrinos ont des masses qui augmentent lorsque l'on passe d'une famille à l'autre. Ils sont électriquement neutres et ne sont donc pas sensibles à l'interaction électromagnétique : ils ne sont sensibles qu'à l'interaction faible.

À chaque lepton, correspond un anti-lepton. Les particules correspondant à l'électron, au muon et au tau ont une charge de $+1e$ mais ils ont la même masse : on note l'anti-électron e^+ , l'anti-muon μ^+ et l'anti-tau τ^+ . En physique des particules, on note souvent les antiparticules avec une barre; ainsi, à une particule p , on associe une antiparticule \bar{p} .

Quarks

Les quarks sont des particules chargées électriquement et donc sont sensibles à l'interaction électromagnétique, ils sont aussi sensibles à l'interaction faible et à l'interaction forte.

Les quarks n'existent pas à l'état libre mais sous forme d'assemblage de quarks qui sont appelés hadrons*³. Les hadrons sont de deux types :

- les mésons*, composés d'un quark et d'un anti-quark : Π^+ ($u\bar{d}$), Π^- ($d\bar{u}$), Π^0 ($u\bar{u}$).
- les baryons*, composés de trois quarks : le proton (uud) et le neutron (ddu)

² Ainsi que tous ses autres nombres quantiques.

³ Seul le quark top existe à l'état libre car il se désintègre avant de pouvoir former un hadron. Il est donc le seul quark dont on peut étudier les propriétés précisément.

Tout comme les leptons, les quarks forment trois familles. Un membre de la famille porte la charge électrique $+2/3$ et l'autre la charge $-1/3$. Les familles sont donc (u,d), (s,c) et (t,b) et avec chacune de ces familles, la masse augmente.

	Quark	Charge électrique (e)	Masse (MeV/c ²)
1 ^{ère} génération	Up (u)	$+2/3$	2,55
	Down (d)	$-1/3$	5,04
2 ^{nde} génération	Charm (c)	$+2/3$	$1,27 \cdot 10^3$
	Strange (s)	$-1/3$	105
3 ^{ème} génération	Top (t)	$+2/3$	$173,1 \cdot 10^3$
	Bottom (b)	$-1/3$	$4,20 \cdot 10^3$

iii. Les interactions fondamentales

On considère aujourd'hui, dans le Modèle Standard, trois interactions : l'interaction électromagnétique, l'interaction faible et l'interaction forte.

Type	Intensité de la force	Particule de champ (boson vecteur)	Domaine d'application
Interaction nucléaire forte	~ 1	8 Gluons (sans masse)	Noyau atomique
Interaction électromagnétique	$\sim 10^{-3}$	Photons (sans masse)	Électromagnétisme Atome
Interaction nucléaire faible	$\sim 10^{-5}$	Bosons Z^0 , W^+ , W^- (particules lourdes)	Radioactivité β Désintégration

Ces interactions, à l'exception de la gravitation, sont décrites par des théories quantiques des champs qui leur sont propres. Le Modèle Standard est en fait l'ensemble de ces théories des champs. Chaque interaction se fait par l'échange d'une particule appelée boson de jauge⁴. Pour chaque interaction, il existe un champ : le boson de jauge est le quantum de ce champ⁵.

⁴ Les bosons sont de spin entier. Les bosons de jauge pour l'interaction électromagnétique, l'interaction faible et l'interaction forte ont un spin 1.

⁵ Le nombre de bosons de jauge existant pour chaque champ est donné par le nombre de générateur du groupe unitaire permettant de décrire l'interaction étudiée. Le groupe est déterminé en fonction des symétries qu'a l'interaction.

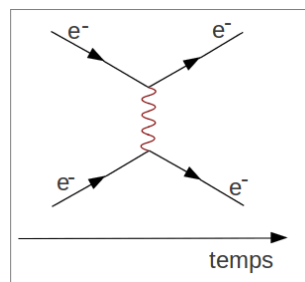
La gravitation résiste pour le moment à tous les essais de quantification et n'est donc pas incluse dans le Modèle Standard. Certaines expériences recherchent la particule de champ correspondante (le graviton).

L'interaction électromagnétique – Electrodynamique quantique*

La théorie décrivant l'interaction électromagnétique est appelée électrodynamique quantique. C'est une théorie quantique dans le sens où il y a une quantification du champ électromagnétique : les particules chargées interagissent par échange de quanta du champ, le photon. C'est aussi une théorie relativiste car elle prend en compte le temps de propagation des interactions c'est-à-dire du boson vecteur qui est ici le photon.

Le photon⁶ est une particule qui n'a pas de masse et est noté γ . Cette théorie mise au point par R. FEYNMAN (1918-1988), S.I. TOMONAGA (1906-1979) et J. SCHWINGER (1918-1994) (Prix Nobel en 1965 pour les trois) dans les années 40 va servir de modèle pour les autres théories de champ rendant compte des autres interactions).

On peut représenter une interaction de manière simple et commode avec un diagramme de FEYNMAN⁷. Ci-dessous, on représente l'interaction entre deux électrons qui s'échangent un photon virtuel (on parle de photon virtuel car il ne peut pas être détecté).



Exemple de diagramme de Feynman pour l'interaction entre deux électrons échangeant un photon virtuel.

L'interaction forte – Chromodynamique quantique*

L'interaction forte est une interaction à courte distance entre les quarks par l'intermédiaire des gluons⁸ qui sont les bosons vecteurs de cette interaction. L'interaction forte permet d'expliquer comment les neutrons et les protons forment le noyau de l'atome. Cette théorie datant de 1964 est l'oeuvre de M. GELL-MANN (né en 1929).

Pour expliquer l'interaction forte, il a été nécessaire d'utiliser un nouveau type de charge, la charge de couleur* – c'est la raison pour laquelle cette théorie est appelée chromodynamique quantique –. Chaque quark a une charge de couleur : rouge (R), vert (V) ou bleu (B) et les anti-quarks ont une des couleurs complémentaires : complémentaire du rouge (\bar{R}), complémentaire du vert (\bar{V}) ou complémentaire du bleu (\bar{B}).

⁶ Le groupe de symétrie du champ électromagnétique est le groupe de symétrie unitaire, U(1). Ce groupe de symétrie compte un seul générateur et donc explique pourquoi il y a un seul boson de jauge: le photon.

⁷ Ils permettent également le calcul rapide de grandeurs physiques comme la section efficace*.

⁸ Le groupe de symétrie décrivant l'interaction forte est le groupe SU(3) qui a 8 générateurs donc il existe 8 bosons différents pour décrire cette interaction.

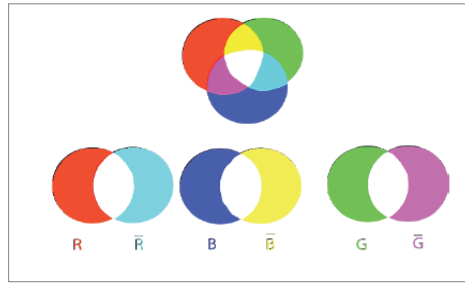
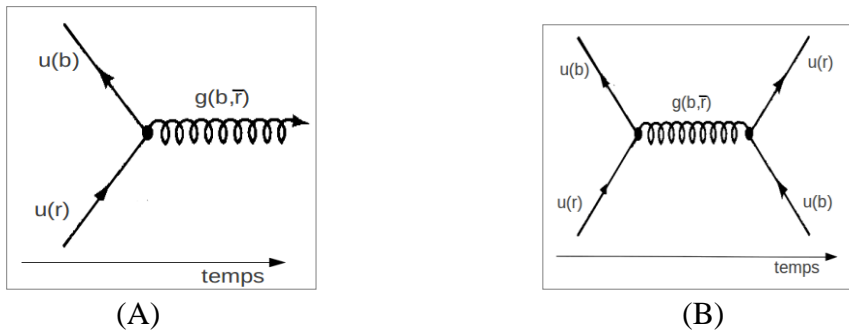


Diagramme de composition des couleurs. Crédit : CERN.

Une particule stable doit être blanche, c'est-à-dire composée soit des trois couleurs R, V, B (cas des nucléons), soit d'une couleur et de sa complémentaire (cas des mésons) : ainsi pour un proton, on peut avoir $u(R)u(V)d(B)$, $u(B)u(R)d(V)$ ou $u(V)u(B)d(R)$ et pour un méson pi Π^+ , on peut avoir $u(R)\bar{d}(\bar{R})$, $u(V)\bar{d}(\bar{V})$ ou $u(B)\bar{d}(\bar{B})$. Les gluons qui sont les bosons vecteurs de la charge de couleur de masse nulle sont au nombre de 8, ils sont donc les quanta du champ de couleur et sont eux-mêmes porteurs de la charge de couleur donc ils peuvent interagir entre eux ce qui n'est pas le cas des autres bosons de jauge.

On peut représenter cette interaction par un diagramme de FEYNMAN:



Exemple de diagramme de Feynman pour l'interaction forte : processus élémentaire (A) et interaction entre deux quarks up (B)

Tout comme il y a conservation de la charge électrique dans l'interaction électrofaible, il y a ici conservation de la charge de couleur. On constate sur le diagramme de FEYNMAN que l'on peut lire : le quark q de couleur bleu B échange un gluon de couleur $B\bar{R}$ avec un quark de couleur rouge R . Ainsi au bilan, on a :

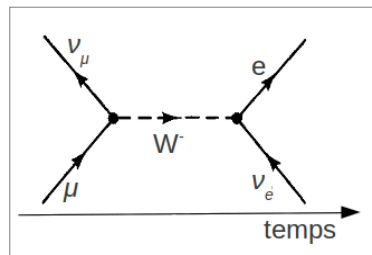
$$B \text{ (quark bleu)} = B \text{ (gluon)} + \bar{R} \text{ (gluon)} + R \text{ (quark rouge)} = B \text{ (quark rouge qui devient bleu)}.$$

L'interaction faible

L'interaction faible est aussi une interaction à très courte portée ($\sim 10^{-15}$ m) et est responsable des désintégrations nucléaires. La théorie expliquant ces phénomènes a été mise au point en 1961 par S. GLASHOW (né en 1932) et trouvera sa justification expérimentale par la découverte des bosons vecteurs de cette interaction, les bosons intermédiaires⁹ W^\pm et Z^0 en 1983. Ce sont trois bosons qui ont la caractéristique d'être très lourds (environ 80,3 GeV pour les W et 91,2 GeV pour le Z^0 soit environ la masse d'un atome d'argent) alors que les autres bosons vecteurs sont de masse nulle (photons et gluons). De plus, ils ont une charge électrique pour les W^\pm (charge positive de +1 pour W^+ et charge négative de -1 pour W^- par contre Z^0 est neutre électriquement). Le boson de HIGGS a été introduit pour expliquer le caractère massif de ces bosons ainsi que celui des quarks et de leptons.

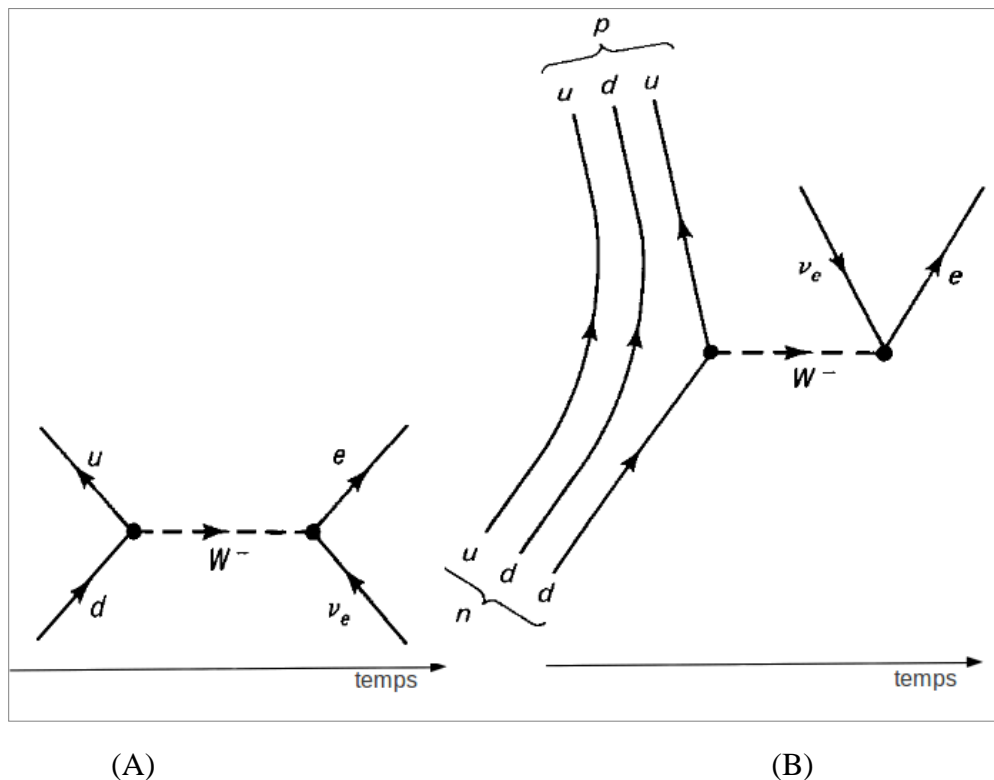
⁹ Le groupe de symétrie de l'interaction faible est $SU(2)$ et a trois générateurs ce qui explique le fait qu'il y ait trois bosons de jauge.

On peut représenter sur un diagramme de FEYNMAN l'interaction faible pour les leptons.



Exemple de diagramme de Feynman pour l'interaction faible avec échange de boson W^- .

Les quarks sont eux aussi sensibles à l'interaction faible.



Exemple de diagramme de Feynman pour l'interaction faible impliquant les quarks : processus entre deux quarks (A), diagramme expliquant la radioactivité β (B).

L'interaction faible et électromagnétique ont été unifiées en une seule théorie appelée interaction électrofaible.

Portée d'une interaction

C'est la masse du boson de jauge qui permet de définir l'ordre de grandeur de la portée d'une interaction. On peut aisément estimer cet ordre de grandeur en utilisant le principe d'incertitude de HEISENBERG :

$$\Delta E \Delta t \sim \hbar$$

La quantité d'énergie nécessaire pour pouvoir échanger un boson de jauge est donnée par la relation d'EINSTEIN :

$$\Delta E = mc^2$$

En utilisant maintenant le principe d'incertitude nous pouvons déterminer le temps pendant lequel ce boson peut exister :

$$\Delta t \sim \frac{\hbar}{\Delta E} = \frac{\hbar}{mc^2}$$

La relativité restreinte prédit que rien ne peut se déplacer à une vitesse supérieure à celle de la lumière, c . On peut ainsi utiliser la vitesse de la lumière comme limite maximale de déplacement de notre boson de jauge et ainsi estimer la distance qu'elle peut parcourir pendant le temps Δt de son existence :

$$\begin{aligned} \text{Vitesse} &= \frac{\text{distance}}{\text{temps}} \\ \Rightarrow \Delta x &= c\Delta t = \frac{c\hbar}{mc^2} = \frac{\hbar}{mc} \end{aligned}$$

Cela nous donne la portée de l'interaction. On peut voir que si $m \rightarrow 0$ alors $\Delta x \rightarrow \infty$ on en déduit que l'interaction électromagnétique est de portée infinie. Par contre, du fait de la masse importante des bosons de jauge de l'interaction faible, la portée va être très faible: pour les bosons W de masse $80 \text{ GeV}/c^2$, on a bien une portée de l'ordre de 10^{-15} m . Ce qui explique alors pourquoi l'interaction faible ne se manifeste qu'à l'échelle du noyau¹⁰.

Bibliographie

- M. Crozon, *L'univers des particules*, Points Sciences, Seuil, 1999
R. Zitoun, *Introduction à la physique des particules*, 2eme édition, Dunod, 2004;
W. S. C. Williams, *Nuclear and Particle Physics*, Clarendon Press, Oxford, 1991

¹⁰ Cet argument n'est pas valable pour les gluons de l'interaction forte. Malgré leur masse de zéro, la portée de l'interaction forte est très faible à cause du concept de confinement due à la propriété de la charge de couleur.