

La Physique des Particules

David London

Université de Montréal

PHY1111

PDF: <http://www.lps.umontreal.ca/~london/london.html>

But de la physique des particules: décrire toutes les particules de l'univers, ainsi que les forces avec lesquelles elles interagissent, avec une seule théorie mathématique.

- Forces fondamentales
- Particules
- Progrès vers notre but: le modèle standard
- Au-delà du modèle standard

Forces Fondamentales

1. L'électromagnétisme:

$$F = \frac{kQ_1 Q_2}{r^2} .$$

Due à l'échange de photons. $m_\gamma = 0 \implies$ portée infinie. Le photon couple à la charge électrique \implies une particule chargée ressent la force électromagnétique; les particules neutres (e.g., neutrons) ne la ressentent pas.

2. La gravité:

$$F = \frac{Gm_1 m_2}{r^2} ,$$

où $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N (m/kg)}^2$. Sa portée est infinie. Porteur: le graviton (hypothétique), de masse nulle.

3. La force forte (ou nucléaire): tient ensemble les noyaux, tient les quarks à l'intérieur du proton et du neutron, responsable de la bombe atomique ☹. Due à l'échange de gluons. Les gluons couplent à *la couleur* \implies une particule qui possède la couleur ressent la force forte. $m_g = 0$, mais la portée de la force forte est finie (microscopique). Dû au fait que

$$F \sim C_1 C_2 r$$

\implies on ne peut pas séparer des particules liées par la force forte (confinement). Tout ce qu'on observe est neutre en couleur.

4. La force faible: responsable de la radioactivité, certaines désintégrations (e.g., la désintégration β : $n \rightarrow pe^- \bar{\nu}_e$). Due à l'échange des bosons W^\pm et Z^0 , qui sont très massifs*: $M_W \simeq 80 \text{ GeV}$, $M_Z \simeq 91 \text{ GeV} \implies$ portée finie (microscopique). Les bosons W^\pm et Z^0 couplent à *l'isospin faible* \implies seules les particules qui possèdent l'isospin faible ressentent la force faible.

*Remarque: en physique des particules, on utilise la convention $c = 1$. Avec ceci, les masses sont données en unités d'énergie et non énergie/ c^2 .

La puissance des forces varie avec l'échelle d'énergie à laquelle les expériences sont faites. À basse énergie [$\lesssim 1 \text{ GeV}$ (m_{proton})], on a

$$\alpha_S : \alpha_{\text{em}} : \alpha_W : \alpha_{\text{grav}} = 1 : \frac{1}{137} : 10^{-6} : 10^{-39} .$$

\implies la gravité est complètement négligeable. (Je n'en parlerai plus.)

Particules

∃ 2 types de particules de matière: (i) leptons (sans couleur), (ii) quarks (avec couleur) \implies les quarks ressentent la force forte, mais pas les leptons.

Leptons: (i) $Q_{\text{em}} = -1$: e^- , μ^- , τ^- , (ii) $Q_{\text{em}} = 0$: ν_e , ν_μ , ν_τ . Leptons chargés:

$$m_e = 0.511 \text{ MeV} , \quad m_\mu = 106 \text{ MeV} , \quad m_\tau = 1.78 \text{ GeV} .$$

Les masses des neutrinos sont très petites: $m_{\nu_i} < 1 \text{ eV}$.

Quarks: $Q_{\text{em}} = \frac{2}{3}$: u , c , t , (ii) $Q_{\text{em}} = -\frac{1}{3}$: d , s , b . Pas de quarks libres (confinement), ils forment des *hadrons*. Deux types: (i) mésons ($q\bar{q}'$), (ii) baryons ($qq'q''$). Exemples de baryons: proton = uud ($Q_{\text{em}} = +1$), neutron = udd ($Q_{\text{em}} = 0$). Exemples de mésons: $\pi^+ = u\bar{d}$ ($Q_{\text{em}} = +1$), $K^0 = s\bar{d}$ ($Q_{\text{em}} = 0$).

Comme il n'y a pas de quarks libres, on ne peut pas mesurer leurs masses avec précision:

$$m_u = 2.3_{-0.5}^{+0.7} \text{ MeV} , \quad m_d = 4.8_{-0.3}^{+0.5} \text{ MeV} , \quad m_s = 95 \pm 5 \text{ MeV} , \\ m_c = 1.275 \pm 0.025 \text{ GeV} , \quad m_b = 4.18 \pm 0.03 \text{ GeV} .$$

Exception: le quark t se désintègre avant de former un méson:

$$m_t = 173.07 \pm 0.52 \pm 0.72 \text{ GeV} .$$

“La force électromagnétique est due à l'échange de photons” \implies Q_1 émet un photon, absorbé par $Q_2 \implies$ crée la force de Coulomb. Également, il y a un *couplage* entre le photon et toute particule ayant une charge électrique.

“une particule chargée ressent la force électromagnétique” \implies comme le photon n'a pas de charge, il n'y a pas de couplage entre photons.

“La force forte ... est due à l'échange de gluons. Les gluons couplent à la *couleur*”. Les quarks possèdent de la couleur et ressentent la force forte. En fait, il y a trois couleurs (mettons bleu, rouge, vert) \implies il y a une interaction forte entre q_{bleu} et $q_{rouge} \implies$ le gluon échangé doit être “bleu-rouge”. Mais comme les gluons possèdent de la couleur eux-mêmes, il y a un couplage entre gluons.

Aussi, on a dit qu'il y a 6 types de quarks: u, c, t, d, s, b . En fait, ces quarks viennent chacun en 3 couleurs.

“La force faible ... est due à l'échange des bosons W^\pm et Z^0 , qui couplent à l'isospin faible \implies seules les particules qui possèdent l'isospin faible ressentent la force faible.” En fait, le W^\pm et Z^0 possèdent de l'isospin faible eux-mêmes \implies il y a un couplage entre eux ($W^+W^-Z^0$).

La force faible entre leptons et entre quarks est due à l'échange d'un $W^\pm \implies$ les deux particules doivent avoir $\Delta Q_{em} = 1$. Leptons: (ν_e, e^-) , (ν_μ, μ^-) , (ν_τ, τ^-) . Quarks: (u, d) , (c, s) , (t, b) . E.g., $n \rightarrow pe^- \bar{\nu}_e$: $d \rightarrow uW^{-*}(\rightarrow e^- \bar{\nu}_e)$.

La première génération (ou famille) de particules contient (u, d, ν_e, e^-) , la deuxième (c, s, ν_μ, μ^-) , la troisième (t, b, ν_τ, τ^-) . La deuxième génération est comme la première, mais avec des masses plus élevées, la troisième génération est pareille. Pourquoi trois générations? Nous ne savons pas (mais on aimerait trouver une explication).

Les particules ont un moment angulaire intrinsèque: le spin S , qui prend des valeurs entières ou demi-entières. Leptons et quarks: fermions, $S = \frac{1}{2}$.

Mécanique Quantique: le spin est quantifié selon un axe. E.g., pour $S = \frac{1}{2}$, $S_z = \pm\frac{1}{2}$. Si la direction du mouvement est \hat{z} , le spin est soit parallèle à \hat{z} (“droitier” = RH) ou antiparallèle à \hat{z} (“gaucher” = LH). On appelle LH/RH l’hélicité d’une particule.

Expérience: les interactions électromagnétique et forte implique les deux hélicités, mais l’interaction faible n’implique que les composantes LH des particules. C’est-à-dire, les particules LH ont un isospin faible I_{3W} non-nul, mais les particules RH ont $I_{3W} = 0$. Pourquoi? Nous ne savons pas (mais on aimerait trouver une explication).

Au-delà de la mécanique classique: la relativité restreinte, la mécanique quantique. Combiner ces deux derniers sujets \implies la théorie des champs.

La théorie des champs + l'électromagnétisme \implies l'Électrodynamique Quantique (QED). Dans la QED, la force électromagnétique est due à l'échange d'un seul boson de spin 1, le photon.

La force forte: décrite par la Chromodynamique Quantique (QCD): 3 couleurs, force due à l'échange de 8 bosons de spin 1, les gluons.

Pour la force faible, j'ai dit qu'elle est due à l'échange de 3 bosons de spin 1, W^\pm et Z^0 . Mais remarque: au milieu du 20^{ième} siècle, on connaissait les "courants chargés" (W^\pm), mais pas les "courants neutres" (Z^0).

Résumé

∃ trois forces importantes (la gravité est complètement négligeable):
l'électromagnétisme (QED), la force forte (QCD) et la force faible.

Leptons:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L, \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L, \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L, \quad e_R, \quad \mu_R, \quad \tau_R.$$

Quarks:

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L, \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L, \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L, \quad u_R, \quad d_R, \quad c_R, \quad s_R, \quad t_R, \quad b_R.$$

Les quarks viennent en trois couleurs.

Le Modèle Standard

Il y a plus de 100 ans, il y avait 2 forces: l'électricité et le magnétisme. On a pu les unifier, grâce à une symétrie entre elles (équations de Maxwell, relativité restreinte \implies symétrie de Lorentz). Dans les années soixante et soixante-dix, une théorie a été proposée pour unifier les forces électromagnétique et faible en une force *électrofaible*.

À basse énergie, les forces sont très différentes: $m_\gamma = 0$ vs. $M_W \simeq 80$ GeV. Idée: à haute énergie, il y a une symétrie qui relie les forces: à cette échelle, $m_\gamma = M_W = 0$. Lorsque l'échelle d'énergie descend, la symétrie est brisée et le W acquiert une masse.

Début de l'univers: le Big Bang a libéré une quantité énorme d'énergie \implies l'univers était très chaud et toutes les collisions étaient extrêmement énergiques. Avec le temps, l'univers s'est refroidi \implies l'échelle d'énergie des collisions diminuait. Au-dessus de "l'échelle faible", il y a une force électrofaible. En dessous de cette échelle, la symétrie est brisée et il y a deux forces, électromagnétique et faible.

Le modèle qui unifie les forces électromagnétique et faible prédit que, en plus du W^\pm de masse $M_W \simeq 80$ GeV, il devrait y avoir un boson neutre Z^0 , de masse $M_Z \simeq 91$ GeV. En 1983, le Z^0 a été découvert au CERN via $e^+e^- \rightarrow Z^0$ (réel) $\rightarrow f\bar{f}$. Ce modèle est le Modèle Standard (MS) de la physique des particules. Il a fait plusieurs prédictions, presque toutes ont été vérifiées.

Dans le MS, pour briser la symétrie entre les forces électromagnétique et faible et pour donner des masses au W et au Z (et aux fermions), il faut une nouvelle particule, le boson de Higgs. Pendant longtemps, c'était le seul morceau manquant du MS. Mais le boson de Higgs a (finalement) été découvert en 2012, avec une masse de 125 GeV.

Au-delà du Modèle Standard

Il n'y a aucun doute que le MS est correct. Cependant, il y a plusieurs raisons de croire qu'il n'est pas complet (comme les lois de Newton):

- un grand nombre de paramètres arbitraires (masses, etc.),
- des questions sans réponse: pourquoi 3 générations?, Q_{em} , pourquoi est-il quantifié?, l'interaction faible, pourquoi LH?, etc.,
- les 3 forces ne sont pas unifiées, la gravité n'est pas touchée,
- le problème de la hiérarchie,
- la violation CP,
- la matière sombre.

Il doit y avoir de la physique au-delà du MS – la “nouvelle physique”.

En physique des particules, le but ultime est de trouver la théorie qui unifie toutes les forces et décrit toutes les particules de l'univers. À cette fin, presque toute la recherche dans ce domaine – expérimentale et théorique – vise la découverte de la nouvelle physique.

Recherche théorique: *grosso modo*, il y a deux types – phénoménologique et formelle. Au département de physique, on fait les deux:

- David London: la phénoménologie des interactions faibles, la violation CP dans des désintégrations des mésons B , la physique du quark top et du Higgs, les particules exotiques, la physique au-delà du Modèle Standard à l'aide des lagrangiens efficaces.
- Richard MacKenzie: théorie quantique des champs et applications en physique des particules, cosmologie et physique de la matière condensée. Méthodes semi-classiques, topologie en théorie des champs, solitons, instantons. Informatique quantique.
- Manu Paranjape: théorie quantique des champs, gravitation, effet tunnel et l'intégral de chemin de Feynman, systèmes de spin quantiques en matière condensée, particules de statistiques fractionnaires.