

Le modèle standard

[Qu'est-ce que le modèle standard ?](#)

[Quelles sont les particules élémentaires ?](#)

[Un peu d'histoire...](#)

[QED ou comment agissent les photons ?](#)

[QCD ou comment agissent les gluons ?](#)

[Comment agissent les \$W^+\$, \$W^-\$ et \$Z^0\$?](#)

[Qu'est-ce que le boson de Higgs ?](#) **Nouveau**

[Qu'y a-t-il au-delà du modèle standard ?](#)

[Pour en savoir plus...](#) **Nouveau**

[Retour à l'accueil](#)



Qu'est-ce que le modèle standard ?

Le **modèle standard de la physique des particules** (en abrégé "modèle standard") est la théorie actuelle qui permet d'expliquer **tous les phénomènes observables à l'échelle des particules**. Le modèle standard englobe donc toutes les **particules connues** ainsi que les **trois interactions** ayant un effet à l'échelle des particules : l'[interaction électromagnétique](#), l'[interaction forte](#) et l'[interaction faible](#). Le modèle standard permet donc d'expliquer **tous les phénomènes naturels** sauf la [gravitation](#) qui, pour l'instant, résiste aux théoriciens pour une théorie quantique...

Le modèle standard est une **théorie de champs quantique**, c'est donc une théorie à la fois **quantique et relativiste**.

Le modèle standard contient **deux interactions distinctes** : l'interaction forte expliquée par [QCD](#) et l'interaction [électrofaible](#) qui est une unification de l'interaction faible et de l'électromagnétisme, dont la théorie ([QED](#)) est incluse dans cette interaction. Ces interactions sont expliquées par l'échange de [bosons de jauge](#) (les vecteurs de cette interaction) entre [fermions](#) élémentaires.

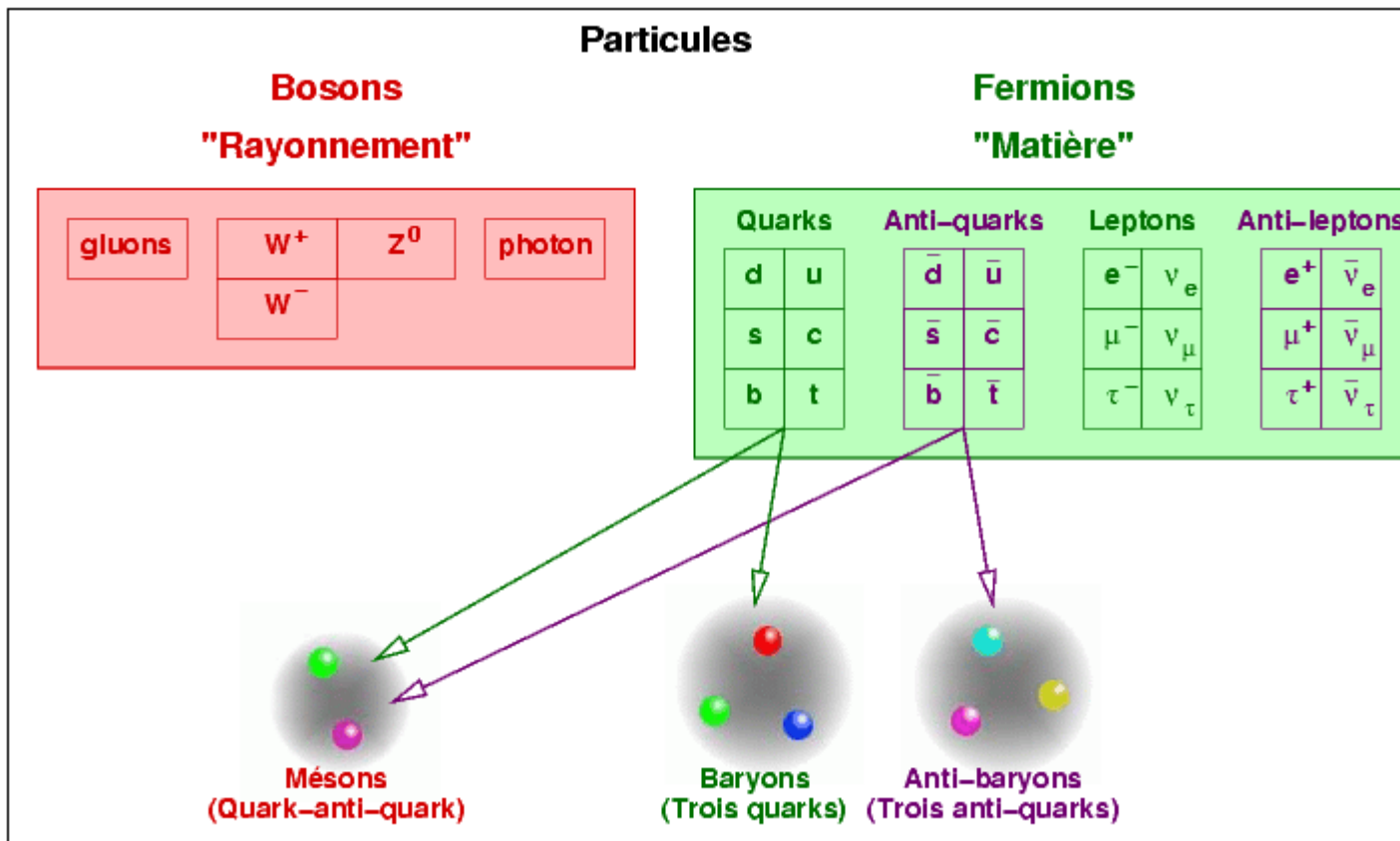
Le modèle standard prédit aussi l'existence du [boson de Higgs](#), particule qui permet de donner une **masse** aux autres particules de la théorie. Cette particule n'a pas encore été découverte.



Quelles sont les particules élémentaires ?

Les **particules élémentaires** du modèle standard sont au nombre de 24 :

- 12 **bosons** de **spin** 1 qui sont les **particules de "rayonnement"** et qui sont les vecteurs des différentes interactions :
 - 8 **gluons** qui transmettent l'**interaction forte**,
 - les **W⁺** et **W⁻** qui transmettent l'**interaction faible**,
 - le **Z⁰** qui transmet une forme de l'interaction faible provenant de l'interaction **électrofaible**,
 - le **photon** qui transmet l'**interaction électromagnétique**.
- 12 **fermions** de **spin** 1/2 qui sont les **particules de "matière"**, séparées en deux catégories :
 - 6 **quarks** et leurs **anti-quarks**, qui forment des particules composites : les **hadrons**,
 - 6 **leptons** et leurs **anti-leptons**.



Un peu d'histoire...

Le modèle standard est le fruit de plus de quarante années de recherche théorique et expérimentale. Le point de départ est [QED](#), achevée entre [1948 et 1949](#), qui est la théorie quantique et relativiste de l'interaction électromagnétique. En [1954](#), C. N. Yang et R. Mills généralisent QED en développant les théories de champs de jauge, outil indispensable pour l'élaboration du modèle standard et, en particulier, la première tentative d'unification des interactions faible et électromagnétique en une théorie [électrofaible](#) par S. L. Glashow en [1961](#).

Le problème principal de la théorie électrofaible de Glashow est que les particules qu'elle décrit sont sans masse, ce qui est en désaccord avec la réalité. En [1967](#), S. Weinberg et A. Salam modifient ce modèle en y incorporant le boson de [Higgs](#) qui permet de donner une masse aux particules de la théorie.

Finalement, en [1970](#), S. L. Glashow, J. Iliopoulos et L. Maiani intègrent les quarks à la théorie électrofaible en prédisant l'existence du quatrième quark, le charme. Quelques années plus tard, [QCD](#) est ajoutée à la théorie électrofaible pour expliquer l'interaction forte : le modèle standard est achevé.

Une des principales prédictions de la théorie électrofaible est l'existence de l'interaction faible par courant neutre, découverte quelques années plus tard, en [1973](#), ce qui confirme de manière éclatante ce modèle. L'autre prédiction très importante est l'existence des bosons de jauge [W](#) et [Z⁰](#) responsables des interactions faibles. Leur découverte en [1983](#) couronne le succès du modèle standard qui reste pour le moment la seule théorie valable.



QED ou comment agissent les photons

Dans l'[électrodynamique quantique \(QED\)](#), l'[interaction électromagnétique](#) est expliquée comme l'échange de [photons](#) entre [fermions](#) élémentaires possédant une **charge électrique**. Le photon est donc le **vecteur de l'interaction électromagnétique**. Le photon n'ayant pas lui-même de charge électrique (il est neutre), les particules qui échangent des photons conservent leur charge électrique inchangée après l'échange. La **masse du photon** étant nulle, la portée de l'interaction électromagnétique est **infinie**.

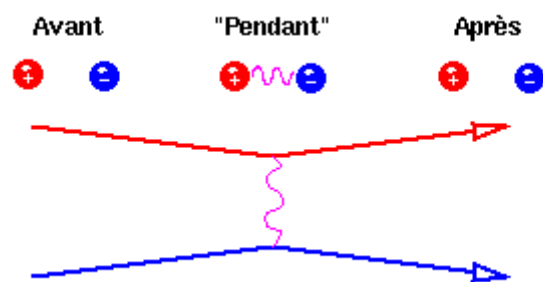


Schéma d'échange d'un photon (en magenta) entre deux fermions de charges électriques opposées (en rouge et bleu). Le temps va de la gauche vers la droite.

Le [neutrino](#) n'ayant pas de charge électrique, c'est le seul fermion élémentaire qui n'est pas sensible à l'interaction électromagnétique.



QCD ou comment agissent les gluons

?

Dans la **chromodynamique quantique (QCD)**, l'**interaction forte** est expliquée comme l'**échange de gluons** entre **fermions** élémentaires possédant une **charge de couleur**. Les gluons sont donc les **vecteurs de l'interaction forte**. Il existe 8 gluons de charges de couleur différentes (des combinaisons d'une couleur et d'une anti-couleur).

Seuls les **quarks** possèdent une charge de couleur, les **leptons** sont donc **neutres** vis à vis de l'interaction forte, ils n'y sont donc pas sensibles. La charge de couleur peut prendre trois "valeurs" : elle peut être **rouge**, **verte** ou **bleue** (ces couleurs n'ont rien à voir avec les couleurs visibles, c'est simplement une façon poétique de nommer une notion n'ayant pas d'équivalent à notre échelle).

Les gluons possèdent eux-mêmes une charge couleur. Ainsi, lors d'un échange de gluon entre quarks, les quarks **échangent leurs couleurs respectives**.

La **masse des gluons** est nulle, mais comme ils portent une charge de couleur et donc peuvent interagir entre eux, la portée de l'interaction forte n'est pas infinie, elle est **de l'ordre de 10^{-15} m**, elle est donc très courte ! Le comportement de l'interaction forte est ainsi assez bizarre : plus les quarks sont **éloignés**, plus leur interaction est **forte**... A la limite où ils sont infiniment proches, ils n'interagissent plus du tout, c'est ce qu'on appelle la **liberté asymptotique**. Cette caractéristique est à l'origine du **confinement** des quarks à l'intérieur des hadrons : **les quarks ne peuvent pas être libres**.

Les particules directement observables sont donc les **hadrons**, c'est à dire des états liés de plusieurs quarks. Ces hadrons doivent être "**blancs**", c'est à dire avoir une **charge de couleur nulle**. Ainsi, on peut avoir :

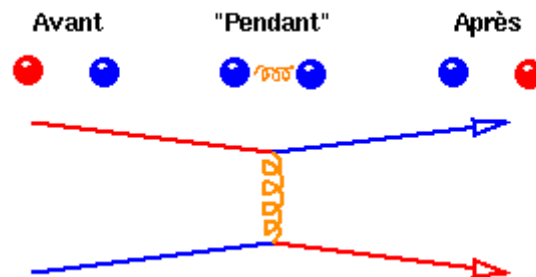
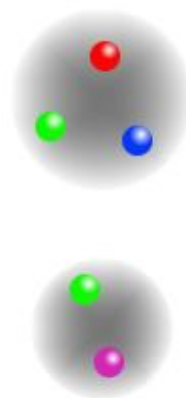


Schéma d'échange d'un gluon (en orange) entre deux quarks de charges de couleur différentes. L'échange du gluon permet aux deux quarks d'échanger leurs couleurs. Le temps va de la gauche vers la droite.

- des **baryons**, qui contiennent **trois quarks** : un rouge, un vert et un bleu, le total est donc le blanc (et aussi les anti-baryons avec un anti-quark anti-rouge, un anti-vert et un anti-bleu),
- des **mésons** qui contiennent **un quark** d'une couleur (rouge, vert ou bleu) et **un anti-quark** de l'anti-couleur correspondante, le total étant aussi l'absence de couleur.



Comment agissent les W^+ , W^- et Z^0 ?

Dans la **théorie électrofaible**, l'**interaction faible** présente deux aspects :

- l'interaction faible par **courants chargés** où les **vecteurs** de l'interaction sont les W^+ et W^- ,
- l'interaction faible par **courant neutre** où le **vecteur** de l'interaction est le Z^0 .

Ces deux formes de l'interaction faible agissent entre **tous les fermions élémentaires**, en particulier c'est la seule interaction à laquelle est sensible le **neutrino**.

La **masse des W et du Z^0** est très élevée (80 GeV pour les W et 91 GeV pour le Z^0 , soit presque cent fois plus qu'un proton), la portée de l'interaction faible est donc très courte, de l'ordre de $10^{-18}m$!

Les W ont une **charge électrique** non nulle, ce qui signifie que lors de l'échange d'un W, les fermions changent de charge électrique, ils changent donc aussi de **saveur** (on appelle la "saveur" d'un fermion sa nature : électron, neutrino, quark u, quark d, etc...). Ainsi, la **radio-activité beta** d'un neutron est expliquée par l'**émission d'un W^- par un quark d** du neutron, qui change donc alors de saveur et devient un **quark u**, puis le W^- se **matérialise en un électron et un anti-neutrino électronique**.

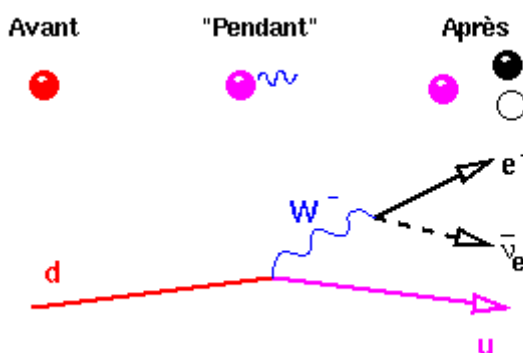


Schéma de désintégration d'un quark d (en rouge) en un quark u (en magenta) avec émission d'un W^- (en bleu) qui se matérialise en un électron (en noir) et un anti-neutrino électronique (en blanc). Le temps va de la gauche vers la droite.

Le Z^0 n'a pas de charge électrique, il n'y a donc **pas de changement de saveur** lors d'une interaction faible par courant neutre. En fait, l'interaction faible par courant neutre est assez similaire à l'échange d'un photon. En règle générale, si deux fermions peuvent échanger un

photon, ils peuvent aussi échanger un Z^0 . Par contre, un neutrino peut échanger un Z^0 avec une autre particule mais pas un photon.



Qu'est-ce que le boson de Higgs ?

Dans la première version du modèle standard, toutes les particules décrites (matière et rayonnement) devaient être de **masse nulle**. Il est évident que cela posait un problème puisque de nombreuses particules connues ont des masses non nulles mesurées expérimentalement.

Les théoriciens ont alors eu l'idée d'ajouter au modèle une nouvelle interaction de nature un peu différente des deux (forte et électrofaible) autres et une nouvelle particule de spin 0: le **boson de Higgs**. Les interactions entre les fermions élémentaires de masse nulle et le boson de Higgs **donnent alors une masse** à ces fermions, correspondant donc à la réalité telle qu'elle est observée.

Le modèle standard dans sa forme actuelle fait donc une double prédiction:

- l'existence d'une nouvelle particule de spin 0, le boson de Higgs,
- l'existence d'une **cinquième interaction fondamentale** dont le médiateur est le boson de Higgs.

La recherche expérimentale actuelle en physique des particules est donc orientée particulièrement vers la vérification de cette double prédiction, en particulier avec le futur accélérateur du CERN, le LHC. A noter que son prédécesseur, le LEP, a peut-être déjà observé quelques bosons de Higgs en [2000](#), mais le nombre de candidats était insuffisant pour être sûr que ce n'était pas une simple fluctuation statistique...



Qu'y a-t-il au-delà du modèle standard ?


Malgré les grands succès du modèle standard et bien qu'il n'ait jusqu'à présent jamais été mis en échec, le modèle standard n'est pas la théorie ultime de la physique. La raison principale est l'**absence de la gravitation** dans la théorie. Ensuite, le modèle standard est incapable d'expliquer l'**existence des trois familles de fermions**, ni de prédire leurs masses. Enfin, il semble naturel de tenter d'**unifier toutes les interactions**, ce qui a partiellement été fait avec la théorie électrofaible, en une seule interaction universelle (c'est ce qu'on appelle les théories de grande unification).

Ainsi, la recherche continue pour tenter de percer les mystères de la matière, sur le plan expérimental comme sur le plan théorique...



Pour en savoir plus...

Si vous voulez en savoir plus sur la recherche du boson de Higgs au LHC, vous pouvez consulter le site suivant:

-  [L'expérience ATLAS](#) (film en français de 18 minutes).

Si vous voulez en savoir plus sur le CERN et le LHC, vous pouvez consulter le site suivant:

-  [CERN](#).

Si vous voulez en savoir plus sur le modèle standard et les théories au-delà de ce modèle, vous pouvez consulter le site suivant:

-  [E-doc sur les forces](#).

© [David Calvet](#)

Dernière modification : 11 décembre 2002.

<http://voyage.in2p3.fr/standard.html>