

La physique des particules en express

Le tableau ci-contre est un résumé du modèle standard, cette théorie qui décrit mathématiquement les composants élémentaires de la matière et les interactions qui les régissent. Élaboré dans les années 1960 et 1970, il s'appuie, d'une part, sur la physique quantique, qui décrit le comportement de la matière à très petite échelle, et, d'autre part, sur la théorie de la relativité d'Einstein, qui rend compte des situations dans lesquelles les vitesses des corps sont proches de celle de la lumière. Tous ces composants prennent le nom de « particules », un terme difficile à définir car il défie l'intuition : ce n'est pas une bille miniature, puisqu'elle n'a pas de dimension spatiale mesurable. En physique quantique, une particule est toujours associée à un champ qui est non matériel. Elle est même l'excitation de ce champ, comme une vague est l'excitation de la mer.

LES 12 PARTICULES...

6

Elles composent la matière telle que nous la connaissons et prennent le nom de **fermions**. On distingue six quarks et six leptons.

> **les quarks** : leurs six espèces sont surnommées « saveurs ». Chacun des noms de saveurs est historique et n'a aucune signification physique (par exemple, le quark *top* n'est pas au-dessus des autres). En se regroupant, ils forment des particules composites tels que les protons et neutrons (voir page 8).
> **les leptons** : ils ne s'assemblent qu'exceptionnellement. On peut les étudier seuls, contrairement aux quarks, qui sont toujours groupés.

Chaque fermion est identifiable par trois caractères :

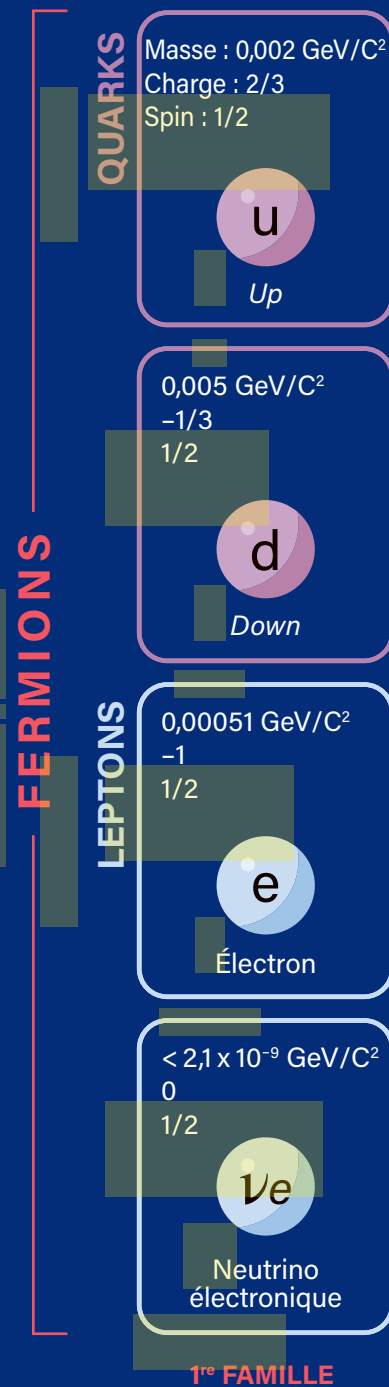
> **sa masse** : à cette échelle, on choisit de l'exprimer en énergie du fait de l'équivalence démontrée par Albert Einstein entre masse

et énergie ($E=mc^2$). L'unité ici est le gigaélectronvolt divisé par la vitesse de la lumière au carré.

> **sa charge électrique** : positive ou négative (exprimée en sous-multiple de la charge élémentaire e , égale à la valeur absolue de la charge de l'électron). Un fermion sans charge est électriquement neutre.

> **son spin** : caractère quantique qui ne peut être comparé à rien de connu à notre échelle. Il est responsable d'une partie des propriétés magnétiques à l'échelle subatomique. Les fermions ont un spin demi-entier ($1/2$).

Les quarks portent aussi une « charge de couleur », non mentionnée sur le tableau et qui est à l'interaction forte ce que la charge électrique positive ou négative est à la force électromagnétique (voir page 8). Un quark peut avoir trois couleurs, appelées par convention « rouge », « bleu » et « vert ».



... ET LEURS ANTIPARTICULES

À toute particule est associée une antiparticule : par exemple, pour l'électron, c'est le positron (ou antiélectron). La masse est la même,

le spin aussi ; la charge électrique est opposée. Chaque antiquark a aussi une « anticouleur » correspondante : antirouge, antibleu et antivert.

Les 3 familles

En lisant le tableau verticalement, les fermions peuvent être regroupés en trois familles de même structure :

- deux quarks, électriquement chargés
- un lepton électriquement chargé
- un neutrino électriquement neutre

> 1^{re} famille



Elle rassemble les particules stables à l'origine de la matière dite « ordinaire ».

> 2^e famille



> 3^e famille



Les 2^e et 3^e familles sont plus lourdes, instables (la durée de vie de ces particules est inférieure à 10^{-10} s) et se trouvent difficilement dans notre environnement. On peut les produire dans un collisionneur. Elles sont aussi présentes dans les rayons cosmiques ou étaient présentes dans les premiers temps de l'Univers.

© Barbara Aulicino

7

$1,3 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$  <i>Charm</i>	$173 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$  <i>Top</i>
$0,1 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$  <i>Strange</i>	$4,2 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$  <i>Bottom</i>
$0,106 \text{ GeV}/c^2$ -1 $1/2$  <i>Muon</i>	$1,78 \text{ GeV}/c^2$ -1 $1/2$  <i>Tau</i>
$< 2,1 \times 10^{-9} \text{ GeV}/c^2$ 0 $1/2$  <i>Neutrino muonique</i>	$< 2,1 \times 10^{-9} \text{ GeV}/c^2$ 0 $1/2$  <i>Neutrino tauique</i>
2^e FAMILLE	3^e FAMILLE

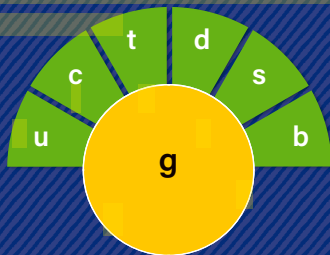
Les 3 interactions fondamentales

Deux particules interagissent en échangeant en permanence d'autres particules, les bosons médiateurs (ou vecteurs), qui véhiculent l'interaction fondamentale associée. D'après le modèle standard, ces interactions, aussi appelées « forces », sont au nombre de trois.

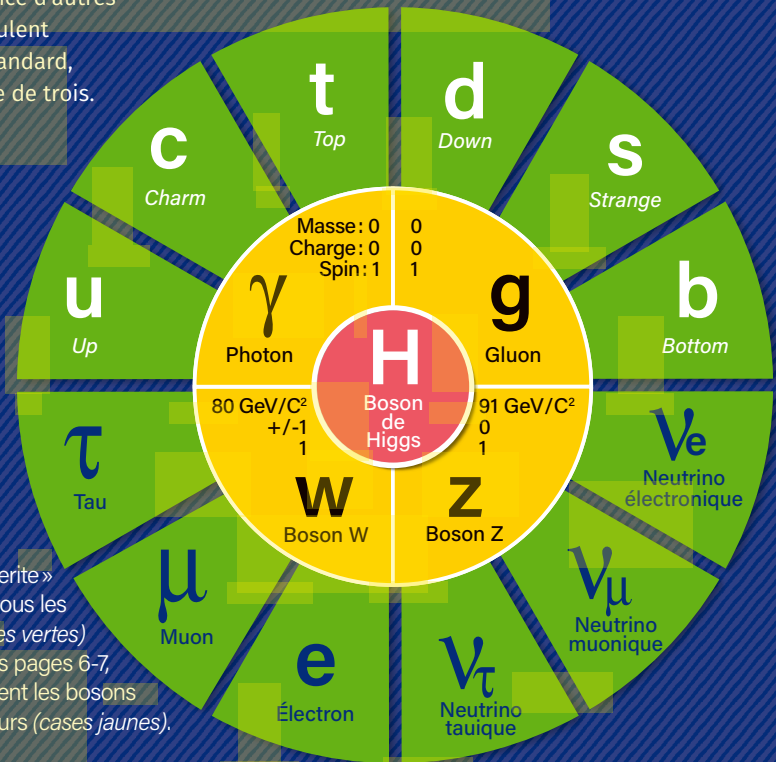
1) Interaction forte

En agissant sur les quarks contenus dans les protons et les neutrons, elle contrebalance la répulsion électromagnétique entre protons et explique la stabilité des noyaux atomiques.

- > Responsable: les gluons
- > Portée: 10^{-15} m
- > 6 fermions, tous des quarks, y sont sensibles.



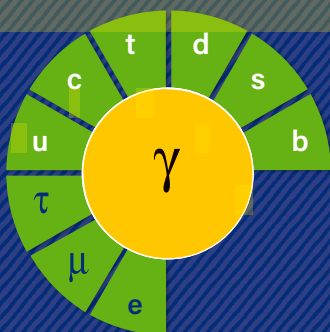
Cette « marguerite » reprend tous les fermions (cases vertes) du tableau des pages 6-7, auxquels s'ajoutent les bosons médiateurs (cases jaunes).



2) Interaction électromagnétique

La seule connue par l'expérience quotidienne et étudiée par la physique « classique ».

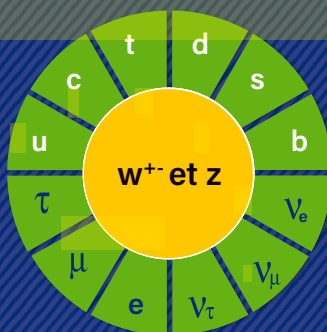
- > Responsable: le photon
- > Portée: infinie
- > 9 fermions y sont sensibles.



3) Interaction faible

Elle gouverne en particulier les désintégrations de type bêta des particules élémentaires et des noyaux.

- > Responsable: les bosons W^+ , W^- et Z
- > Portée: 10^{-17} m
- > tous les fermions y sont sensibles.



Et le boson de Higgs?

C'est un boson d'un type nouveau (boson scalaire) car son spin a pour valeur 0 (au lieu de 1 pour les autres bosons).

Il fournit une masse aux particules élémentaires. Les particules interagissent directement avec le champ de Higgs; le boson de Higgs est une manifestation de ce champ.



Les trois interactions se combinent dans le Soleil

> L'interaction faible gouverne la lente combustion des étoiles en régulant la fusion des protons.

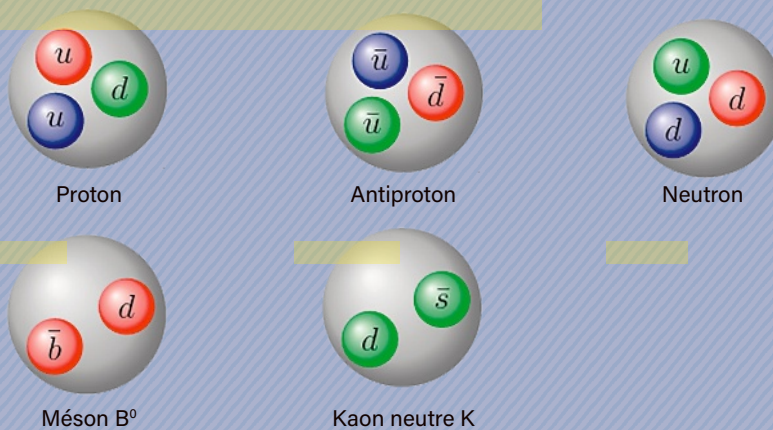
> L'interaction forte est à l'œuvre dans les chaînes de réactions nucléaires qui suivent et qui produisent d'autres noyaux plus lourds ou plus complexes.

> L'interaction électromagnétique permet la transformation en chaleur et lumière (énergie électromagnétique) de l'énergie créée dans les réactions nucléaires.

La gravité, non expliquée par le modèle standard, est la quatrième interaction essentielle à la bonne marche du Soleil. Elle permet d'atteindre des densités d'hydrogène assez fortes pour combattre la répulsion entre protons.



Les hadrons entrent en scène



Ni les quarks ni les antiquarks (marqués d'une barre au-dessus de la lettre correspondante) n'existent à l'état libre, car l'interaction forte les lie en permanence dans des particules composites, donc non élémentaires, appelées « hadrons ».

De nombreuses combinaisons sont possibles au sein de deux catégories principales :

> **baryon**: 3 quarks. Exemples: proton, neutron, antiproton...

> **méson**: 1 quark + 1 antiquark. Exemples: méson B^0 , pion, kaon... (voir l'article page 72).

Les particules hypothétiques qui ne sont pas dans le modèle standard... mais que vous trouverez dans ce numéro !

- > Axion (page 36)
- > Neutrino stérile (page 26)
- > Leptoquark (page 72)
- > Boson W' et Z' (page 72)
- > Neutralino (page 110)

Voir où le modèle standard craque pour aller au-delà

10

Nathalie Besson

est physicienne
des particules au CEA-Saclay
(DRF/Irfu/DPhP).



À force d'éliminer tous ses concurrents, le modèle standard est resté seul en course : c'est pour cela qu'il est standard

Modèle standard : pourriez-vous définir de quoi il s'agit ?

Quand on souhaite comprendre quelque chose, par exemple le Système solaire, on fait un modèle, c'est-à-dire une «maquette», avec tout ce que l'on sait du système étudié (les orbites, les satellites, etc.) et les lois qui s'y appliquent (ici, la gravitation suffit). Cela permet de faire des prédictions théoriques : par exemple, la position de Vénus demain soir à 22h33. Pour savoir si mon modèle est juste, je compare avec l'expérience et, demain soir, à 22h33, j'irai regarder au télescope où se trouve Vénus. C'est cela un modèle : une représentation essentiellement théorique, à un moment donné, qui pourrait être en bois pour le Système solaire, mais qui, en physique des particules, sera formulée en langage mathématique, sous forme d'une grosse équation nommée «lagrangien». Pourquoi standard ? À force d'éliminer tous ses concurrents, ce modèle est resté seul en course à coller à l'expérience. «Standard» signifie qu'il l'a emporté sur tous les autres, en évoluant pour intégrer toutes les découvertes. Prenez le muon, «cousin» massif de l'électron : on l'attendait si peu que le physicien américain Isidor Isaac Rabi, Prix Nobel en 1944, aurait dit de lui : «Qui a commandé ça ?» Il a fallu ajuster le modèle au muon. *A contrario*, un modèle peut nous dire où chercher. L'équation de Paul Dirac, «ancêtre» du modèle standard, visait

juste à décrire, de manière quantique et relativiste, un électron libre. Et il se trouve qu'elle a prédit l'antélectron, observé quelques années plus tard ! La même chose est arrivée avec le boson de Higgs.

Parlons-en. Cette particule, la dernière du modèle standard à avoir été observée, a-t-elle une place à part ?

Dans les années 1980, quand on a mesuré que les bosons W et Z, vecteurs de l'interaction faible (voir les Repères, page 6), avaient une masse non nulle, le lagrangien a nécessité une

adaptation. La réponse fut le mécanisme de Brout-Englert-Higgs, extraordinairement élégant, qui expliquait comment les bosons pouvaient être massifs alors que le modèle, dans sa version précédente, le leur interdisait. Ce mécanisme prédisait dès les années 1960 l'existence d'un nouveau boson dit «de Higgs». On l'a cherché, et on a fini par mettre la main dessus en 2012 (toujours ces allers-retours entre l'expérience et la théorie!). Pourquoi tout ce temps? Les «sections efficaces» de production du boson de Higgs sont extraordinairement petites, ce qui signifie qu'en produire est très rare, même au LHC (le grand collisionneur de hadrons du Cern), et la théorie ne prédisait pas sa masse, finalement mesurée à 125 GeV. On avait éliminé des grands pans de masse possibles, mais les zones à étudier restaient très larges : avec une autre masse, il aurait été encore plus dur à observer. Historiquement, il a donc cette place à part d'avoir été le dernier, comme un couronnement. Maintenant, je n'aime pas les délires : «Waouh, c'est la particule de Dieu!» Retirez n'importe quelle particule, et tout s'effondre : j'aimerais bien savoir à quoi ressemble un modèle standard sans l'électron!

Y a-t-il, chez les physiciens des particules, un désir de «torpiller» le modèle standard?

Juste pour le plaisir? Non! Ce n'est pas parce qu'Einstein a mis en place les équations de la relativité générale qu'on a «torpillé» Newton. Si je jette mon stylo à travers la pièce, ce qui va arriver est parfaitement décrit par

la physique newtonienne. L'édifice «modèle standard» est indétrônable, tout ce qu'il décrit l'est avec une précision époustouflante. En revanche, il laisse des questions ouvertes, et, pour un chercheur, une question ouverte... ça démange! Il ne s'agit donc pas de «torpiller» le modèle, mais d'aller au-delà. Vraiment. On attend surtout de voir où il craque, car, pour l'instant, on manque d'indications pour savoir dans quelle direction chercher. On voudrait bien qu'il nous donne un petit indice, du genre : il faut aller à plus haute énergie, ou bien chercher dans tel sous-système de particules.

La gravitation est l'une des quatre grandes forces, mais on ne voit aucun graviton dans le modèle standard. Est-ce une carence?

On n'a jamais réussi à quantifier la gravitation, c'est-à-dire la rendre compatible avec la physique quantique, au même titre que les trois autres interactions fondamentales que sont les interactions électromagnétique, forte et faible : on ne sait pas la faire entrer dans le modèle avec le même formalisme (le lagrangien). Si c'était possible, il y aurait en effet une particule de la gravitation qui serait le graviton. Il y a donc un mur théorique. Maintenant, si je prends deux quarks up côte à côte, distants de 10^{-18} mètre, et que j'affecte la valeur 1 à l'intensité électromagnétique qui les repousse, alors l'interaction faible entre eux sera d'intensité 0,8, l'interaction forte de 25, et l'interaction gravitationnelle, qui existe aussi, de... 10^{-41} ! C'est indiscernable. En résumé, ça nous gêne intellectuellement,