

L'AUTEUR



Don LINCOLN est directeur de recherche au Fermilab, près de Chicago [États-Unis].

Il a travaillé sur les expériences des collisionneurs *Tevatron* au Fermilab, et LHC, au CERN.

deux sortes de particules fondamentales de matière – les quarks et les leptons – plutôt qu'une seule ?

C'est une autre énigme qui a, depuis longtemps, attiré mon attention et celle de nombreux autres physiciens. Le modèle standard considère les quarks et les leptons comme ponctuels et indivisibles. Pourtant, de nombreux indices suggèrent que ces particules pourraient en fait être composées d'éléments encore plus petits. Cela permettrait d'expliquer que certaines particules ont des propriétés communes. Nous présente-

rons un modèle de sous-structure pour les quarks et les leptons ainsi que les recherches expérimentales qui tentent de confirmer cette hypothèse. Une telle découverte pourrait s'accompagner de phénomènes que nous n'avions jusqu'à présent pas anticipés et nous forcerait à revoir en profondeur notre vision du monde microscopique.

Afin d'étudier la physique des particules et les problèmes du modèle standard, les physiciens doivent sonder la matière à des échelles toujours plus petites. Pour y parvenir, ils ont construit des accélérateurs où les particules se percutent à des vitesses proches de celle de la lumière. En effet, plus l'énergie de la collision est élevée, plus il est possible de faire émerger des détails fins dans la structure de la matière. Depuis la mise en évidence des quarks, dans les années 1970, il nous manque les outils qui nous permettraient de regarder à l'intérieur des quarks. Mais aujourd'hui, le grand collisionneur de hadrons du CERN (le LHC, pour *Large Hadron Collider*) près de Genève pourrait être à la hauteur de la tâche. Le LHC a d'ailleurs fait ses preuves en révélant, en juillet 2012, les premières traces du boson de Higgs, la dernière particule non observée du modèle standard.

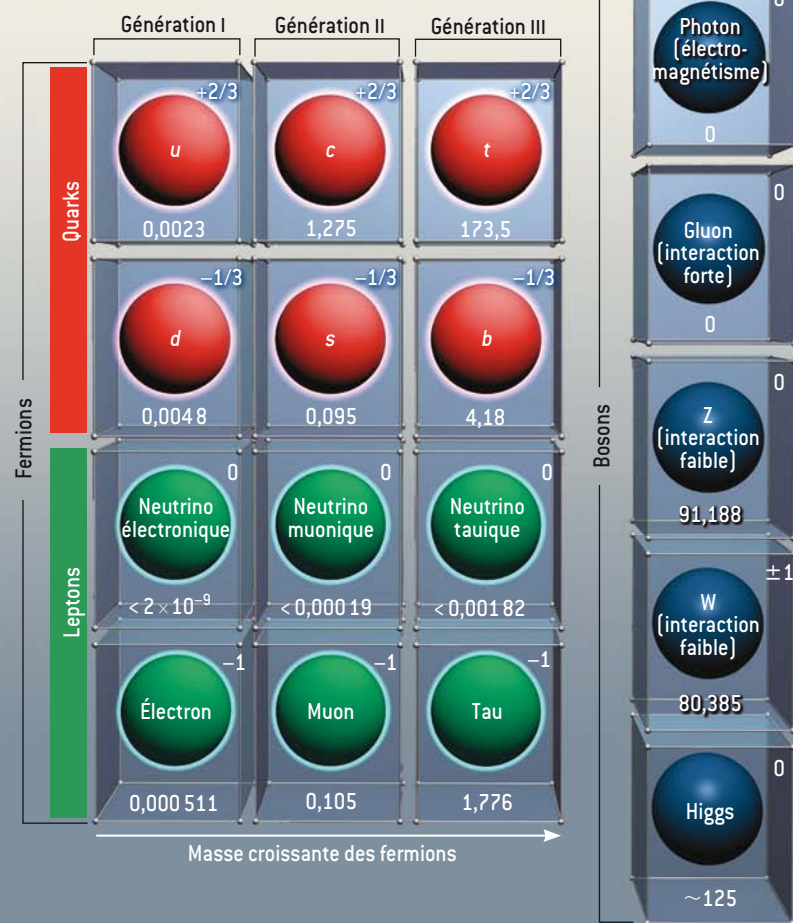
Le fossé des générations

Les premiers signes d'une structure interne aux quarks et aux leptons ont émergé des recherches sur une autre question (sans réponse à ce jour) concernant le nombre de quarks et de leptons découverts. Les protons et les neutrons sont constitués de deux types de quarks, les quarks *u* (ou *up*) et *d* (ou *down*). La charge électrique de ces derniers vaut, respectivement, $+2/3$ et $-1/3$, celle du proton étant l'unité. Au fil des années, d'autres types de quarks ont été décelés. Les quarks *s* (pour *strange*, étrange) et *b* (*bottom*) sont de même charge que le quark *d*, mais ils sont plus lourds. De la même façon, les quarks *c* (*charm*) et *t* (*top*) sont deux versions lourdes du quark *u*. Les quatre quarks les plus lourds sont instables et se désintègrent en quelques fractions de seconde pour donner les deux plus légers.

L'électron a lui aussi des cousins lourds instables, le muon et le tau, de même charge que lui. Et pour compléter l'inventaire des particules de matière connues, il faut ajouter les trois versions du neutrino, toutes de masse très faible et électriquement neutres.

LES PARTICULES DU MODÈLE STANDARD

Le modèle standard de la physique des particules est la théorie qui décrit les particules fondamentales ainsi que leurs interactions. Il comprend deux sortes de particules : les constituants de la matière (les quarks et les leptons) sont des fermions (particules de spin $1/2$), et les particules médiatrices des interactions fondamentales sont des bosons (particules de spin entier). Le modèle standard présente trois générations de fermions de masse croissante. Les fermions d'une même ligne présentent des propriétés similaires.



Melcolm Goodwin

La structure des particules dans la théorie des préons

Les physiciens ont proposé divers modèles pour les préons, constituants hypothétiques des quarks et des autres particules du modèle standard. Ci-dessous est présenté le système proposé en 1979 par l'Israélien Haim Harari et par l'Américain Michael Shupe. Il postule l'existence de deux types de préons – chacun avec l'antiparticule associée –, qui pourraient composer à la fois les particules de matière (les quarks et les leptons, qui sont des fermions) et les particules médiatrices de force (des bosons).

Particules de matière (fermions)

Les deux préons de ce modèle peuvent être représentés par + et 0. Le + a une charge égale à 1/3 de celle du proton, et le 0 a une charge nulle. Chacun a son antiparticule, de charge opposée : – (de charge –1/3) et $\bar{0}$ (de charge nulle). Dans le modèle de H. Harari et M. Shupe, les quarks et les leptons sont chacun composés de trois préons.

CHARGE	CONTENU EN PRÉONS	PARTICULE
+1	+ + +	Antiélectron
+2/3	+ + 0	Quark u
+1/3	+ 0 0	Antiquark $\bar{d}$
0	0 0 0 $\bar{0} \bar{0} \bar{0}$	Neutrino électronique Antineutrino électronique
–1/3	– $\bar{0} \bar{0}$	Quark d
–2/3	– – $\bar{0}$	Antiquark $\bar{u}$
–1	– – –	Électron

Particules médiatrices de force (bosons)

Regroupés par deux et par six, les préons peuvent également décrire les bosons vecteurs, dont l'échange régit les interactions subatomiques : l'électromagnétisme (photon), l'interaction forte (gluon) et l'interaction faible (bosons W^+ , W^- et Z). La composition des gluons, particules qui véhiculent l'interaction forte, est un peu plus compliquée et n'apparaît pas ici.

CHARGE	CONTENU EN PRÉONS	PARTICULE
+1	+ + + 0 0 0	Boson W^+
–1	– – – $\bar{0} \bar{0} \bar{0}$	Boson W^-
0	0 0 0 $\bar{0} \bar{0} \bar{0}$ + + + – – – + + – – 0 $\bar{0}$ + – 0 $\bar{0} \bar{0} \bar{0}$	Boson Z (quatre versions)
0	+ –	Photon

Cette abondance a naturellement conduit les physiciens à se poser la question suivante : étant donné que le quark u , le quark d et l'électron sont les seules particules de matière nécessaires pour construire l'Univers, pourquoi ont-ils autant de cousins ? C'est un peu cette interrogation qu'exprime la célèbre réflexion du prix Nobel de physique Isidor Rabi lorsqu'il apprit la découverte du muon en 1936-1937 : « Qui a commandé cela ? »

En rangeant ces particules dans un tableau en fonction de leurs caractéristiques (voir l'encadré page ci-contre), les physiciens ont vu émerger un phénomène semblable à celui du tableau périodique des éléments chimiques. Dans ce dernier, le fait que certains éléments partagent des propriétés indique qu'ils possèdent une sous-structure ayant des traits communs. Celle-ci est liée au nombre d'électrons autour du noyau atomique. Elle rend compte des propriétés communes des éléments d'une même colonne ou d'une même ligne du tableau périodique.

Le tableau des quarks et des leptons comporte trois colonnes nommées générations (la question de la multiplicité des particules est souvent nommée « problème des générations »). La première, tout à gauche, inclut les quarks u et d ainsi que l'électron et le neutrino électronique, c'est-à-dire tout ce

qui est nécessaire pour expliquer l'Univers qui nous est familier. La deuxième génération contient les versions un peu plus massives des mêmes particules ; la troisième génération comprend les particules les plus lourdes.

Le modèle standard traite les quarks et les leptons comme des particules ponctuelles, dépourvues de structure interne. Mais la répétition des propriétés d'une génération à l'autre, comme pour les éléments chimiques, laisse penser que les quarks et les leptons ont une structure sous-jacente.

Des indices d'une sous-structure

Une autre observation, faite à l'aube du XX^e siècle et qui pourrait avoir une pertinence pour la recherche d'une structure interne aux quarks, est la découverte de la radioactivité. On sait aujourd'hui que lors d'un tel processus, un proton peut se transformer en neutron ou réciproquement. Cette transmutation correspond au changement d'un quark, constituant du proton ou du neutron, en un autre : un quark u devient un quark d ou inversement. Cette transformation s'effectue par l'intermédiaire de l'interaction faible, qui peut aussi transmuter les leptons (bien que les quarks ne puissent pas être changés en

leptons, ni l'inverse). La métamorphose des quarks et des leptons pourrait être un signe supplémentaire de l'existence de détails plus fins au sein de ces particules.

Forts de ces observations, les physiciens théoriciens ont proposé de nombreux modèles de sous-structures pour les quarks et les leptons. Le terme générique de « préon » s'est imposé pour désigner leurs constituants.

Pour illustrer ces modèles, prenons une version simple proposée en 1979 indépendamment par l'Israélien Haim Harari et l'Américain Michael Shupe, et ultérieurement étendue par H. Harari et son étudiant Nathan Seiberg, tous deux à l'Institut Weizmann en Israël (voir l'encadré ci-dessus). Ils ont proposé l'existence de deux sortes de préons, l'un de charge électrique +1/3, l'autre de charge nulle. Chacun de ces préons a un homologue, une antiparticule, de charge opposée : –1/3 et 0, respectivement. Ces préons sont des fermions, des particules de matière. Chaque quark ou lepton est une combinaison de trois préons. Deux préons de charge +1/3 et un de charge nulle, par exemple, constituent un quark u , alors que l'antiquark $\bar{u}$ est formé de deux préons de charge –1/3 et d'un de charge nulle. Les bosons vecteurs de force, quant à eux, sont des combinaisons de deux ou six préons. Le boson W^+ , porteur de l'interaction faible qui agit à