

2012

Le boson de Higgs

Aux origines de la masse des particules

Le 4 juillet 2012, les porte-parole des expériences du Cern annonçaient la découverte exceptionnelle – et longtemps espérée – d'une particule, le boson de Higgs, un acteur crucial dans la théorie des interactions fondamentales.

Ou plutôt, le boson de Brout-Englert-Higgs, devrait-on dire... La particule devenue célèbre sous le nom de « boson de Higgs » a été mise en évidence au Cern, près de Genève, au terme de plusieurs dizaines d'années d'une quête menée par de nombreux physiciens. On dit souvent que ce boson est à l'origine de la masse, au moins en partie, mais de quoi s'agit-il plus précisément ?

Les physiciens des particules cherchent à identifier les constituants fondamentaux de la matière, et aussi à comprendre les forces qui agissent sur eux, les lois qui les gouvernent et les régularités – des symétries – caractérisant ces lois. Aujourd'hui, le modèle standard de la physique des particules rassemble ces éléments dans un cadre théorique dont la cohérence nécessite le boson de Higgs. Ce modèle décrit comment un petit nombre de particules élémentaires (quarks, électron, neutrinos...) sont soumises à trois interactions fondamentales. L'interaction électromagnétique de deux particules chargées s'interprète comme le résultat de l'échange d'un autre type de particules, les photons. L'« interaction forte » lie les quarks très solidement pour former les protons et les neutrons, et maintient ceux-ci dans les noyaux atomiques. L'« interaction faible » est capable de changer la nature

d'une particule et est responsable, par exemple, de la désintégration du neutron en un proton (avec l'émission d'un électron et d'un antineutrino). À l'échelle subatomique, la quatrième force fondamentale, la gravitation, est extrêmement faible par rapport aux autres interactions, et le modèle standard ne la prend pas en compte.

LES SYMÉTRIES, LE LANGAGE DES PARTICULES

Dans les années 1940, la reformulation de l'électromagnétisme dans un cadre quantique, l'électrodynamique quantique (QED), a préfiguré les principes qui régissent le modèle standard. Les équations décrivant cette interaction obéissent à certaines symétries, et on peut y procéder à des transformations mathématiques particulières, des « transformations de jauge », sans modifier les grandeurs observables telles que le champ électrique et le champ magnétique. L'invariance vis-à-vis des transformations de jauge est essentielle pour la cohérence de la théorie électromagnétique au niveau quantique, notamment pour tenir compte des échanges de plusieurs photons entre particules chargées. Elle est reliée par des théorèmes généraux à la loi de conservation de la charge électrique, et au fait que le photon est de masse nulle, dont il résulte que la force électromagnétique est de longue portée.

L'AUTEUR



PIERRE FAYET
directeur
de recherche
au CNRS, Laboratoire
de physique théorique
de l'École normale
supérieure, à Paris

BIBLIOGRAPHIE

Collaboration ATLAS,
**Observation of a new
particle in the search for
the Standard Model Higgs
boson [...]**, *Phys. Lett. B*,
vol. 716, pp. 1-29, 2012.

Collaboration CMS,
**Observation of a new
boson at a mass of 125 GeV
[...]**, *Phys. Lett. B*, vol. 716,
pp. 30-61, 2012.

Le succès de la description de la QED a conduit les physiciens à rechercher une théorie analogue pour les interactions faible et forte. C'est ainsi que s'est construit, dans la période 1960-1973, le modèle standard de la physique des particules. Celui-ci repose notamment sur une symétrie de jauge dite électrofaible, qui relie les interactions faible et électromagnétique. L'interaction forte, elle, repose sur une autre symétrie de jauge et est décrite par l'échange de gluons entre les quarks.

L'interaction faible a une portée très courte, de l'ordre de 10^{-18} mètre, mille fois moins que la taille d'un proton. Les lois de la physique quantique imposent alors que les particules médiatrices de cette force, les bosons intermédiaires W^+ , W^- et Z prédits par le modèle, aient une masse importante. Le premier signe de l'existence du boson Z a été la mise en évidence du courant neutre faible associé par l'expérience *Gargamelle* au Cern, en 1973. La présence des bosons intermédiaires W et Z a ensuite été confirmée de façon spectaculaire en 1983 (voir l'article Les bosons w et Z mis en évidence, page 34). Ces succès ont donné aux physiciens une grande confiance dans la pertinence du modèle standard, au moins dans ses aspects essentiels.

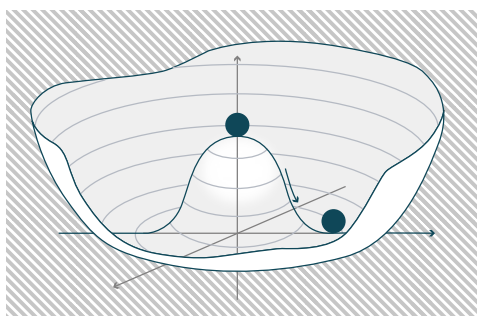
LE DILEMME DES BOSONS MASSIFS

Il restait cependant en suspens une question centrale. Les symétries de jauge assurant la cohérence de la théorie auraient dû exiger que les bosons W et Z soient de masse nulle, ce qui ne pouvait pas être le cas. Pour résoudre cette contradiction, Steven Weinberg, en 1967, a fait appel à un mécanisme imaginé trois ans plus tôt par Robert Brout, François Englert et Peter Higgs. Cette idée repose sur un champ dit scalaire, le champ de Higgs, dont les quatre composantes sont reliées par la symétrie électrofaible. Ce champ induit une brisure spontanée de la symétrie électrofaible (voir l'encadré ci-contre), qui permet à l'interaction faible de se différencier de l'interaction électromagnétique et de devenir une force à très courte portée. Trois des composantes du champ de Higgs se métamorphosent alors : elles disparaissent tout en conférant une masse aux bosons W^+ , W^- et Z . Chaque particule en interaction avec le champ de Higgs acquiert aussi une masse, d'autant plus élevée qu'elle interagit fortement avec ce champ.

Mais quid de la quatrième composante ? Si elle est bien présente, elle doit décrire une nouvelle sorte de particules, le boson de Brout-Englert-Higgs, un peu comme le champ électromagnétique décrit le photon. C'est cette particule essentielle à la cohérence du modèle

LE MÉCANISME DE HIGGS POUR BRISER LA SYMÉTRIE

L'ingrédient fondamental du mécanisme de Brout-Englert-Higgs, qui donne leur masse aux bosons intermédiaires W^+ , W^- et Z , est un champ scalaire : le champ de Higgs. Un champ scalaire est un objet mathématique qui associe une valeur à tout point de l'espace et à chaque instant, à l'instar d'une carte des températures. Le champ de Higgs est universel, présent partout dans l'Univers.



standard que les expériences *Atlas* et *CMS* ont détectée en 2012, au grand collisionneur LHC du Cern. L'existence de cette particule de 125 gigaélectronvolts (plus de 100 fois la masse d'un proton) a ainsi confirmé la pertinence du mécanisme de brisure de la symétrie électrofaible utilisé dans le modèle standard.

Tous les problèmes ne sont pas résolus pour autant. Notamment, l'origine des très petites masses des neutrinos, la nature de la matière noire et celle de l'énergie sombre (qui représentent 95 % du contenu de l'Univers) restent à élucider. L'existence du champ de Higgs, et de son boson associé, s'accompagne aussi de nombreuses questions. De fait, c'est seulement dans le cadre des théories supersymétriques que l'introduction de champs scalaires fondamentaux devient naturelle. Ces théories d'extension du modèle standard, développées à partir des années 1970, prévoient que toutes les particules connues soient associées à des « superpartenaires » plus lourds, actuellement inconnus, qui font l'objet de recherches intenses au LHC. ■

Les équations de la théorie présentent certaines symétries. C'est notamment le cas du potentiel scalaire qui indique l'énergie potentielle du champ de Higgs en fonction de la valeur de ce champ. La forme du potentiel, souvent qualifiée de chapeau mexicain (ci-dessous), fait que la position centrale, pour laquelle la valeur du champ est nulle (correspondant au sommet du chapeau) est une position d'équilibre instable, car l'énergie n'y est pas minimale. Le champ évolue donc spontanément vers une valeur d'équilibre non nulle, qui correspond à une valeur minimale du potentiel. Si l'expression du potentiel est symétrique, ce n'est pas le cas des positions d'équilibre possibles du champ ; toutes sont équivalentes, mais aucune ne présente la symétrie initiale du potentiel. On parle de brisure spontanée de symétrie.

Cette brisure a d'importantes conséquences. L'interaction électrofaible se transforme en deux forces distinctes : l'interaction électromagnétique et l'interaction faible. La première est véhiculée par le photon, de masse nulle, et la seconde est transmise par les bosons intermédiaires W^+ , W^- et Z , qui acquièrent une masse. Les particules qui composent la matière (quarks, électron, etc.) acquièrent aussi une masse en interagissant avec le champ de Higgs : plus le couplage est élevé, plus la masse est importante.