

L'influence de Y. Nambu sur la physique a été notable. Il a appliqué ses idées aux aimants, aux cristaux et aux supraconducteurs ainsi qu'à la théorie des particules élémentaires. Dans le cadre de cette dernière, la brisure spontanée de symétrie fait apparaître une particule inattendue. Il s'agit d'un boson. Ce terme vient du nom du physicien indien Satyendra Nath Bose, qui a étudié le comportement statistique de ces particules qui ne suivent pas le principe d'exclusion de Pauli. Les photons, les pions et les kaons sont des exemples de bosons. L'autre classe de particules, qui inclut l'électron, le proton et le neutrino, constitue les fermions (en hommage à Fermi).

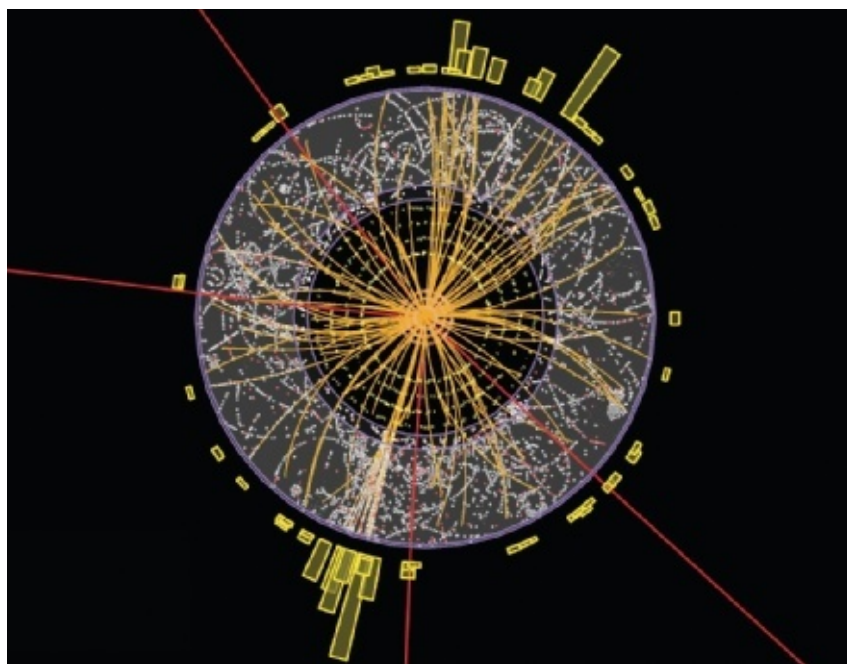
La particule du modèle de Y. Nambu est un boson de masse nulle. Mais on ne connaissait aucun boson de masse nulle, à part le photon. Au départ, on pensait que cela pourrait être un artefact du modèle ; mais, en 1961, le physicien d'origine britannique Jeffrey Goldstone trouva un autre modèle avec de telles particules, maintenant nommées bosons de Nambu-Goldstone.

En 1964, les physiciens belges Robert Brout et François Englert, d'une part, et le Britannique Peter Higgs, d'autre part, ont mis en évidence l'importance de la brisure spontanée de symétrie en physique des particules. P. Higgs donna l'exemple d'un modèle avec des bosons et un « photon » sans masse qui interagissent. Cette théorie présentait une symétrie apparente qui se brise spontanément. On montre alors que, dans ce modèle, le photon, dépourvu de masse, en acquiert une, et la théorie s'enrichit d'un boson supplémentaire de masse non nulle, le boson de Higgs.

La clef du modèle : le boson de Higgs

Le mécanisme de Englert-Brout-Higgs a eu un rôle crucial dans la construction du modèle standard de la physique des particules, qui décrit les trois interactions fondamentales autres que la gravitation : l'interaction forte, qui tient les quarks confinés par l'échange de gluons, l'interaction électromagnétique, qui s'exerce par l'échange de photons, et l'interaction faible, responsable de réactions telles que la désintégration bêta.

Pour comprendre l'importance du mécanisme de Englert-Brout-Higgs, il faut se pencher sur les travaux qui ont conduit à la description de l'interaction faible.



4. RECONSTITUTION SUR ORDINATEUR d'une collision proton-proton au sein du détecteur ATLAS, au CERN. Dans ce choc, de nombreuses particules sont produites. Certaines ont une durée de vie trop courte pour être détectées par les instruments. Pour d'autres, il est possible de déterminer leur trajectoire.

En 1933, Fermi avait modélisé l'interaction faible par une force de portée nulle, ce qui signifie que les particules impliquées devaient être en contact pour interagir. La théorie expliquait beaucoup de choses, mais son comportement à haute énergie n'était pas correct. Les physiciens supposèrent alors que l'interaction faible devait se faire par l'échange de bosons très lourds.

Vers 1967, les travaux de plusieurs théoriciens, en particulier les Américains Sheldon Glashow et Steven Weinberg et le Pakistanais Abdus Salam, ont convergé vers une théorie décrivant de façon unifiée l'interaction faible et la force électromagnétique. Dans cette théorie dite électrofaible, l'interaction faible est véhiculée par deux particules chargées nommées bosons W (pour *weak*, faible) et une neutre, le boson Z.

Cependant, il n'était pas possible d'attribuer explicitement une masse aux bosons W et Z sans violer certains principes de symétrie de la théorie. En 1967, S. Weinberg et, indépendamment, A. Salam ont su appliquer le mécanisme de Englert-Brout-Higgs à la théorie électrofaible. On part d'une situation symétrique où le photon et les bosons de l'interaction faible n'ont pas de masse. Par brisure spontanée de la symétrie, les bosons W et Z acquièrent une masse, mais pas le photon. Le boson de Higgs, issu de la brisure de symétrie, acquiert aussi une masse. La théorie a été depuis

confirmée, en particulier avec la mise en évidence en 1983, au CERN, des bosons W et Z avec une masse d'environ 80 et 91 fois celle du proton. Malgré ce succès, le boson de Higgs manquait à l'appel.

La recherche de cette particule a nécessité la construction de collisionneurs gigantesques. Trois accélérateurs ont participé à cette traque, le LEP (*Large Electron-Positron collider*), puis le LHC (*Large Hadron Collider* ou Grand collisionneur de hadrons), au CERN, et le *Tevatron* au Fermilab, près de Chicago. Le LEP, en service de 1989 à 2000, n'a pas détecté le boson de Higgs, mais a fourni une limite inférieure à sa masse, de l'ordre de 114 gigaélectronvolts. Le *Tevatron*, qui a fonctionné jusqu'en septembre 2011, a amélioré les contraintes sur la masse et a détecté un début de signal qui a été confirmé au LHC. Le 4 juillet 2012, les porte-parole des expériences du LHC, inauguré en 2009, ont annoncé la découverte d'un nouveau boson avec une masse d'environ 125 gigaélectronvolts. Cette particule est très probablement le boson de Higgs.

Cinquante ans auront ainsi été nécessaires pour confirmer pleinement la théorie électrofaible. Mais les physiciens ne s'arrêtent pas en si bon chemin pour comprendre les interactions fondamentales. De nouvelles questions se posent, de nouvelles expériences sont à imaginer pour de nouvelles découvertes. ■

Le boson de Higgs, et après ?

John Ellis

La découverte d'une nouvelle particule a été annoncée en juillet 2012 au CERN. Il s'agit probablement du boson de Higgs. Il reste aux physiciens non seulement à le vérifier, mais aussi à s'attaquer aux nombreuses questions associées à cette particule.

La découverte au CERN d'une nouvelle particule, début juillet, est un événement important pour les physiciens des particules. Cette particule est-elle le « boson de Higgs », dont l'existence a été postulée dans les années 1960 ? Les physiciens doivent en déterminer les propriétés pour s'assurer qu'elles correspondent bien à celles attendues du boson de Higgs. Si c'est bien le cas, cette découverte marquera le plein succès du modèle standard de la physique des particules. Mais elle ne sera pas un point final. Le boson de Higgs soulève en effet de nombreuses questions théoriques qui soulignent les limites du modèle standard et la nécessité de rechercher des signes d'une théorie plus fondamentale.

Le modèle standard de la physique des particules décrit toute la matière visible de l'Univers à partir d'un nombre limité de particules élémentaires, qui sont des fermions (des particules de spin – ou moment cinétique intrinsèque – demi-entier, dans les unités atomiques) : les quarks qui forment les protons et les neutrons des noyaux atomiques, les élec-

trons et ses deux versions plus lourdes (le muon et le tau), ainsi que trois neutrinos. Mise à part la gravitation, non prise en compte par le modèle standard, on distingue trois interactions fondamentales entre ces particules : la force électromagnétique, l'interaction forte, qui assure la cohésion des noyaux, et l'interaction faible, responsable notamment de la radioactivité bêta. Les équations les plus simples du modèle standard ne font pas de réelle distinction entre les particules de matière, ce qui suggère qu'elles devraient toutes être de masse nulle. Or aucune ne vérifie cette propriété, toutes ont une masse. Cela n'est pas sans importance : les atomes ne pourraient pas exister si les électrons avaient une masse nulle, car ils pourraient s'en échapper à la vitesse de la lumière.

Le modèle standard contient aussi des bosons (particules de spin entier) qui correspondent aux particules véhiculant les interactions fondamentales. Le plus connu est le photon, dont l'échange entre deux particules chargées est responsable de la force électromagnétique. Comme le photon est de masse nulle, l'interaction élec-

tromagnétique a une portée infinie. Ce n'est pas le cas de l'interaction faible, qui a une portée limitée, de l'ordre de 10^{-18} mètre. Cette courte portée est liée au fait que les trois particules véhiculant cette interaction, les bosons W^+ , W^- et Z , ont une masse élevée, d'environ 80 et 91 gigaélectronvolts (GeV), soit une masse équivalente à celle de noyaux de taille moyenne. Les bosons W et Z ont une masse si importante qu'il a fallu attendre 1983 pour les découvrir au CERN, alors que le photon est connu depuis les travaux d'Albert Einstein sur l'effet photoélectrique, en 1905.

À l'origine des masses

Comment expliquer que les bosons W et Z ont une masse élevée tandis que le photon est de masse nulle ? Et d'où vient la masse des particules de matière ? En attribuant explicitement et de façon *ad hoc* une masse aux particules dans les équations, on obtenait une théorie incohérente et des prédictions absurdes. Vers 1964, les physiciens belges François Englert et Robert