

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-

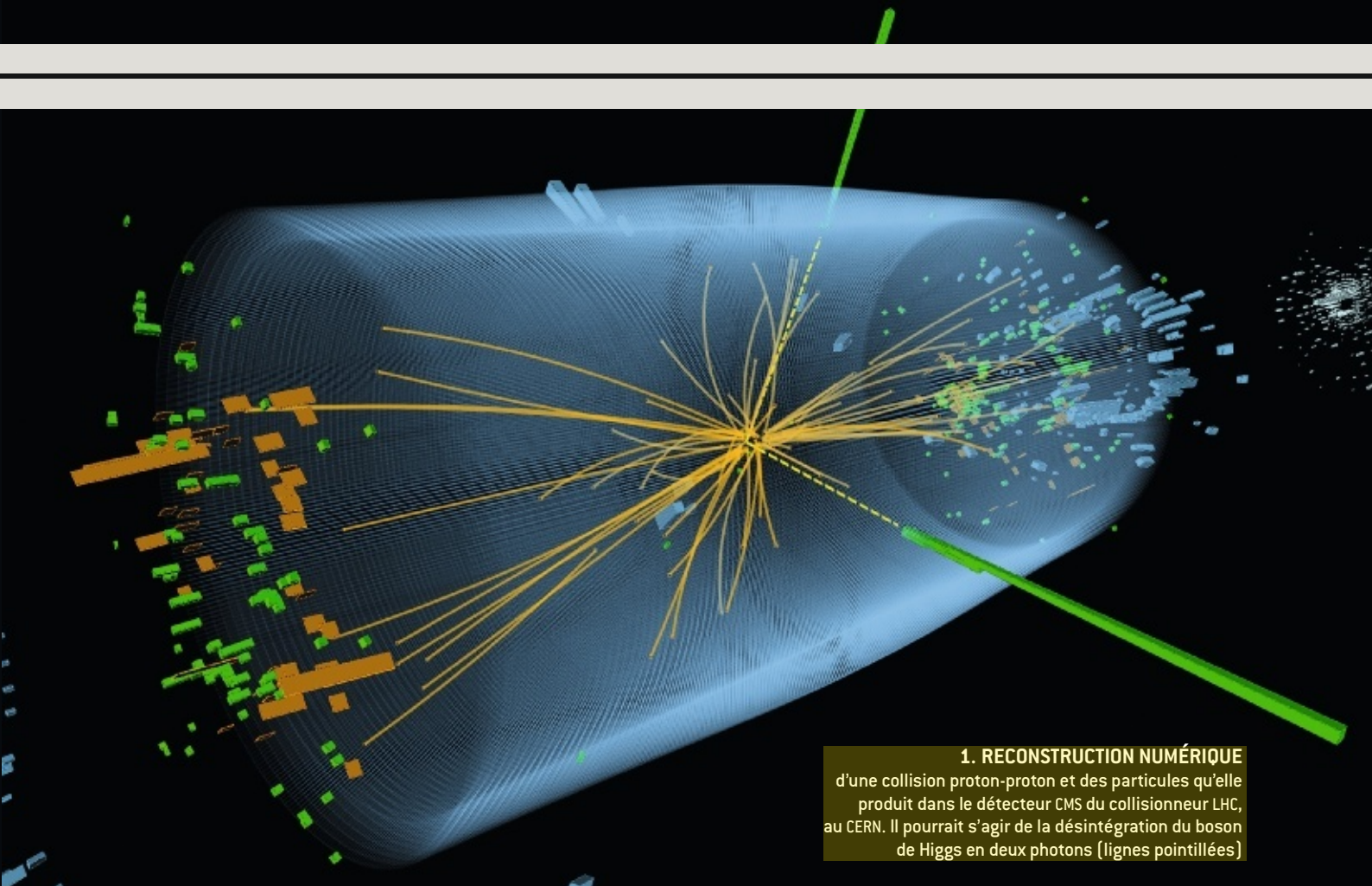
trons et ses deux versions plus lourdes (le muon et le tau), ainsi que trois neutrinos. Mise à part la gravitation, non prise en compte par le modèle standard, on distingue trois interactions fondamentales entre ces particules : la force électromagnétique, l'interaction forte, qui assure la cohésion 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



1. RECONSTRUCTION NUMÉRIQUE

d'une collision proton-proton et des particules qu'elle produit dans le détecteur CMS du collisionneur LHC, au CERN. Il pourrait s'agir de la désintégration du boson de Higgs en deux photons (lignes pointillées)

Brout, et, indépendamment, le physicien britannique Peter Higgs proposèrent un mécanisme qui évitait les incohérences. Cette solution est celle adoptée dans le modèle standard.

Selon le mécanisme de Englert-Brout-Higgs, la propriété que nous mesurons comme étant la « masse » d'une particule est le résultat d'une interaction permanente de la particule avec un champ présent partout dans l'Univers. Certaines particules, telles le W et le Z, interagissent plus intensément avec ce champ universel, ce qui leur confère une masse élevée, tandis que d'autres, comme le photon, n'interagissent pas du tout avec le champ et gardent donc une masse nulle (voir l'encadré page 33).

Le mécanisme de Englert-Brout-Higgs, dans sa version élémentaire, est le modèle théorique le plus simple capable de rendre compte de la différence de masse entre le photon et les bosons W et Z, ainsi que des masses des autres particules. Il existe cependant d'autres théories qui tentent de résoudre le problème de la masse. Par exemple, l'Univers pourrait

contenir des dimensions spatiales supplémentaires, compactes et imperceptibles à notre échelle; les particules n'auraient pas toutes le même comportement dans ces dimensions, ce qui leur conférerait des masses différentes.

L'existence du champ de Englert-Brout-Higgs sera prouvée si l'on découvre la particule associée à ce champ (dans la théorie quantique, toute particule élémentaire est un quantum d'un certain champ). Sa présence dans la théorie fut soulignée en 1964 par P. Higgs, d'où son nom de boson de Higgs. Dans la théorie la plus simple, celle du modèle standard, il n'y a qu'un seul boson de Higgs; mais d'autres théories n'y font pas du tout appel ou, au contraire, en nécessitent plusieurs. Seule l'expérience permettra de départager ces différentes pistes.

Quelques articles publiés au début des années 1970 examinaient la possibilité de produire et détecter le boson de Higgs dans un collisionneur de particules. La première étude systématique a été proposée par Mary Gaillard, Dimitri Nanopoulos et moi en 1975. Nous discussions

L'ESSENTIEL

- La nouvelle particule observée au CERN est une particule de spin entier et sa masse est d'environ 125 GeV. Il faut s'assurer qu'elle a bien les propriétés du boson de Higgs.
- Le boson de Higgs est une particule de spin nul, ses couplages aux autres particules sont proportionnels à leur masse et il peut se coupler à lui-même.
- L'étude de la nouvelle particule donnera peut-être des indices sur la physique au-delà du modèle standard et sur la nature de la matière noire.