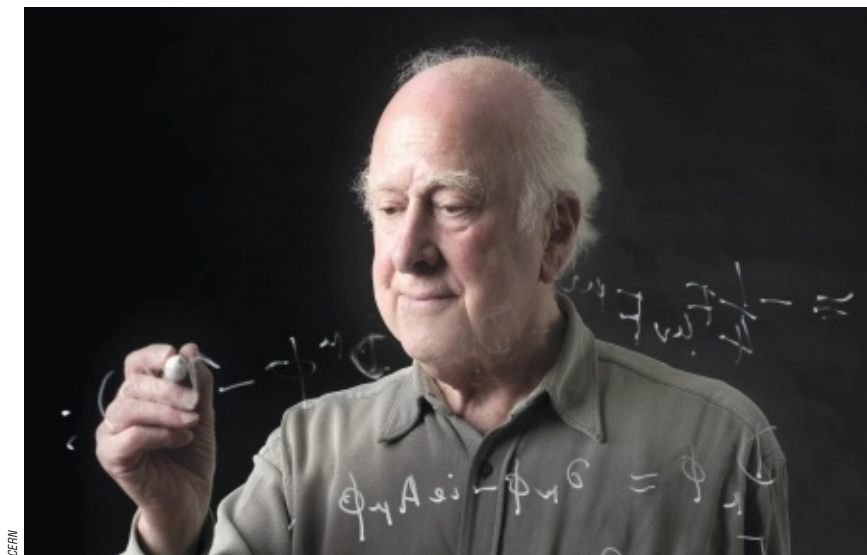




CERN

2. LE PHYSICIEN BRITANNIQUE PETER HIGGS a développé, en même temps que les Belges Robert Brout et François Englert, un mécanisme qui permet de donner une masse aux particules. P. Higgs est le premier à avoir prévu l'existence d'une particule associée à ce mécanisme, et cette particule porte désormais son nom.

L'AUTEUR



John ELLIS est professeur de physique théorique au King's College de Londres

et chercheur au CERN à Genève.

BIBLIOGRAPHIE

The ATLAS collaboration, Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC, soumis à *Physics Letters B*, <http://arxiv.org/abs/1207.7214>

The CMS collaboration, Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC, soumis à *Physics Letters B*, <http://arxiv.org/abs/1207.7235>

C. Quigg, Le Higgs et autres quêtes du LHC, *Dossier Pour la Science*, n° 62, janvier-mars 2009.

notamment de la production de bosons de Higgs à partir de bosons W et Z et de leur désintégration en deux photons ou en particules de masses non nulles.

Les premiers programmes de recherche du boson de Higgs ont démarré au LEP, l'accélérateur d'électrons et positrons (antiparticules de l'électron) du CERN, entre 1989 et 2000. Le boson de Higgs n'a pas été découvert dans ces expériences, mais ces dernières ont permis de conclure que sa masse devait être supérieure à 114 GeV. Les travaux au collisionneur *Tevatron*, au Fermilab, près de Chicago, ont, eux, exclu un intervalle de masses autour de 160 GeV. Parallèlement, des mesures précises de l'interaction électrofaible – une description unifiée de l'électromagnétisme et de l'interaction faible – au LEP, au *Tevatron* et dans d'autres expériences ont indiqué que la masse du boson de Higgs se trouvait avec une bonne probabilité entre les deux zones exclues.

La recherche du boson de Higgs est l'une des priorités du programme expérimental du LHC (*Large Hadron Collider*), le grand collisionneur proton-proton et successeur du LEP au CERN. Les physiciens ont optimisé la conception des détecteurs ATLAS (*A Toroidal LHC ApparatuS*) et CMS (*Compact Muon Solenoid*) pour mettre en évidence cette particule. Après le démarrage du LHC en 2009, les premiers signes d'une particule de type boson de Higgs ont été détectés à la fin de l'année 2011. L'accumulation de données expérimentales supplémentaires a permis d'annoncer le

4 juillet 2012 la découverte d'une particule d'une masse d'environ 125 GeV, qui pourrait être le boson de Higgs.

Sa durée de vie étant trop courte, le boson de Higgs ne peut pas être décelé directement par les détecteurs. Il se désintègre rapidement en d'autres particules qui, elles, peuvent être détectées par les appareils de mesure : en particulier, la désintégration en deux photons, en paires de bosons Z ou W, ou encore en paires quark-antiquark *b*. Les expériences ATLAS et CMS ont recueilli des signaux forts de désintégrations d'une nouvelle particule en photons et en bosons Z. Par ailleurs, les détecteurs DØ et CDF du *Tevatron* ont obtenu quelques signaux venant de la désintégration en paires quark-antiquark *b*.

Ces données suffisent pour affirmer aujourd'hui qu'une particule différente de celles connues a été découverte. L'étude de son spin indique qu'elle prend une valeur entière ; il s'agit donc d'un boson. Cependant, nous savons déjà que le spin de cette particule diffère de celui du photon et du boson W ou Z, qui ont un spin égal à un. Son spin vaut soit zéro, comme le prédit la théorie de Englert-Brout-Higgs, soit deux. Vérifier que le spin est bien nul fait partie des priorités. Pour ce faire, il faut par exemple mesurer la distribution angulaire des photons et des autres particules produites par la désintégration de la nouvelle particule. Ce type d'études nécessite plus de données, mais devrait être possible dès la fin de l'année 2012.

Sonder les propriétés du boson de Higgs

Une autre propriété du boson de Higgs qu'il faudra étudier est son couplage aux autres particules, c'est-à-dire l'intensité de l'interaction directe du boson de Higgs avec chacune d'elles. La théorie indique que, parce qu'il confère leur masse aux particules, son couplage avec une particule dotée d'une masse doit être proportionnel à cette dernière. Certaines informations sur les couplages peuvent être obtenues directement par l'étude des canaux de désintégration en Z, en W, en paires de quarks *b* ou en paires de taus. D'autres sont obtenues indirectement à partir de la désintégration en photons : ce processus fait apparaître des quarks *t* intermédiaires couplés au boson de Higgs, d'une part, et aux photons, d'autre part. Dans un article récent, j'ai montré avec

Tevong You, de l'Imperial College à Londres, que les couplages de la nouvelle particule ressemblent approximativement à ceux du boson de Higgs. Des données plus nombreuses permettront de vérifier leur dépendance vis-à-vis des masses avec une précision de dix pour cent.

Une troisième propriété clef est le couplage du boson de Higgs avec lui-même. Dans le cadre du modèle standard, le boson de Higgs a des couplages trilineaire et quadrilineaire (correspondant, dans les diagrammes, à des interactions entre trois ou quatre bosons de Higgs connectés en un point). La mesure du couplage quadrilineaire semble très difficile. En revanche, si le LHC produit assez de collisions, on observera peut-être des paires de bosons de Higgs issues d'un processus où la particule intermédiaire est un boson de Higgs, auquel cas le couplage trilineaire pourra être estimé.

En même temps que ces mesures des propriétés de la nouvelle particule seront réalisées, le modèle le plus simple du mécanisme de Englert-Brout-Higgs sera comparé à des modèles alternatifs, et les données expérimentales permettront d'éliminer certains scénarios.

Il y a de bonnes raisons de penser que le modèle le plus simple, où il n'y a qu'un seul boson de Higgs, ne peut expliquer complètement la question de l'origine de la masse des particules. Dans le cadre du modèle standard, si la masse du boson de Higgs est réellement inférieure à 127 GeV, le champ de Higgs ne serait pas aujourd'hui dans son état de plus basse énergie. Il serait dans un état instable et pourrait basculer à tout instant vers un niveau d'énergie plus bas (voir la figure 3). Les lois de la physique changeraient brusquement et l'Univers tel que nous le connaissons cesserait d'exister. Certes, l'Univers pourrait subsister dans cet état instable durant un temps très supérieur à l'âge actuel de l'Univers. Cette instabilité serait cependant le signe d'une théorie incomplète.

Une autre difficulté est celle de la masse du boson de Higgs. Dans le modèle standard, c'est un paramètre libre, que nous pourrions fixer à 125 GeV (si la particule découverte au LHC est bien le boson de Higgs). Cependant, il faut prendre en compte des corrections dues à des processus quantiques qui, mathématiquement, rendent cette masse infinie. Il est possible d'absorber ces corrections infinies en

imposant *in fine* la valeur expérimentale de la masse, mais cela ne peut se faire qu'au prix de réglages très fins des paramètres du modèle standard. Une alternative évitant ce genre d'ajustements, qui paraissent artificiels, serait préférable.

Une façon de contourner ce problème de la masse du boson de Higgs est de supposer qu'il ne s'agit pas d'une particule élémentaire, mais d'un objet composite, ayant des constituants internes – de la même façon que le proton est composé

de trois quarks ou que le méson π est composé d'un quark et d'un antiquark. Dans les théories de la supraconductivité et de l'interaction forte, des brisures spontanées de symétrie analogues à celle en jeu dans le mécanisme de Englert-Brout-Higgs naissent de champs composites, et de nombreux théoriciens se disent que cela pourrait être le cas dans le modèle standard. Si aucun scénario complet et satisfaisant n'a pu être construit dans ce cadre, il existe des modèles partiels permettant

DES PARTICULES DE MASSES DIFFÉRENTES

Le mécanisme de Englert-Brout-Higgs confère une masse non nulle aux bosons W et Z et à toutes les particules du modèle standard. Les particules n'ont pas toutes la même masse, car elles se couplent différemment au champ de Englert-Brout-Higgs. Plus une particule interagit avec ce champ, plus son inertie est grande, ce qui revient à dire que sa masse est élevée. Ce mécanisme peut être comparé à la résistance au mouvement que subit une personne qui traverse un champ de neige.



Une skieuse aux skis bien fartés glisse vite sur la neige, comme si sa masse était très faible, à l'image du photon qui n'interagit pas avec le champ de Englert-Brout-Higgs.



Avec des raquettes, la progression est plus lente. Cette situation illustre celle d'une particule qui interagit légèrement avec le champ de Englert-Brout-Higgs, à l'instar de l'électron.



Un randonneur avec ses chaussures s'enfonce dans la neige. Il interagit beaucoup avec la neige et progresse alors lentement, comme s'il était très lourd. Cela illustre le cas des bosons W et Z, qui se couplent fortement au champ de Englert-Brout-Higgs.

Bruno Vacaro

La découverte du boson de Higgs

L'annonce de la découverte d'une nouvelle particule, le 4 juillet 2012 au CERN, est l'épilogue d'un processus complexe. Pour comprendre comment les physiciens des particules ont mis en évidence cette particule, qui semble être le boson de Higgs prévu par les théoriciens, revenons sur les différentes étapes de ce projet.

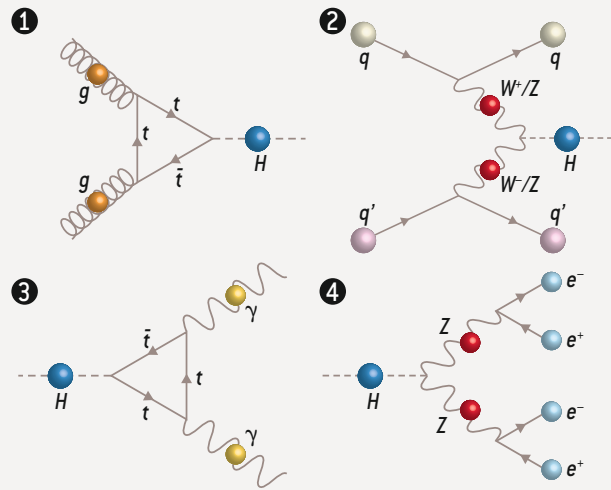
Il faut, avant tout, produire cette particule dans un environnement contrôlé : un collisionneur de particules. Plus la particule recherchée a une masse importante, plus l'énergie de la collision doit être élevée. Le boson de Higgs peut être produit par différents processus, ou modes : la fusion de deux gluons (les bosons véhiculant l'interaction forte), ou la fusion de deux bosons W^+ et W^- ou deux bosons Z (véhiculant l'interaction faible) (voir les diagrammes ① et ②).

Comme la théorie ne donne pas précisément la masse du boson de Higgs, il est nécessaire de fournir beaucoup d'énergie pour garantir sa production. Le LHC (*Large Hadron Collider* ou Grand collisionneur de hadrons) fonctionne à une énergie de huit téraélectronvolts par collision proton-proton. La totalité de l'énergie n'entre pas dans la réaction de production du boson de Higgs, car seul un élément de chaque proton (un quark ou un gluon) interagit, et il ne transporte qu'une fraction de l'énergie totale. La production d'un boson de Higgs lors de ces collisions est un événement rare : en moyenne, une fois tous les 65 milliards de collisions. Le LHC produit 20 millions de collisions par seconde, ce qui permet de créer suffi-

samment de bosons de Higgs, ainsi que d'autres processus également étudiés. La quantité de données étant gigantesque, un système rapide et automatisé utilise les informations brutes des détecteurs pour effectuer une présélection des événements intéressants, réduisant leur nombre à environ 300 par seconde.

Le boson de Higgs, particule instable, a une durée de vie si courte qu'il n'est pas directement détectable. Il se désintègre en d'autres particules pour produire, par exemple, deux photons ou quatre leptons (voir les diagrammes ③ et ④). Le rôle des détecteurs est d'enregistrer les caractéristiques des particules produites.

Un détecteur tel que celui de l'expérience ATLAS est constitué de plusieurs couches concentriques. La couche la plus proche de la collision, baignant dans un fort champ magnétique de deux teslas, sert à mesurer les points de passage des particules chargées afin de reconstruire leur trajectoire, ce qui permet de calculer leur impulsion et leur charge électrique. Ensuite, des calorimètres stoppent la plupart des particules et mesurent leur énergie. Le premier calorimètre est dédié à la mesure de l'énergie des électrons et des photons, le deuxième est spécifique aux hadrons. Les muons, qui interagissent peu, atteignent les détecteurs les plus externes. Les neutrinos, qui traversent l'ensemble des détecteurs sans interagir, se traduisent par un déficit dans le bilan d'énergie. En combinant les informations des différents détecteurs, on peut ainsi reconstituer tous les produits de la collision.



Le boson de Higgs (H) peut être produit par l'un ou l'autre des deux processus suivants : la fusion de gluons (g) avec une boucle de quarks t virtuelle ① et la fusion de deux bosons W^+ et W^- (ou deux bosons Z) émis par des quarks ②. Il peut se désintégrer, par exemple, en deux photons (γ) ③ ou en deux paires de leptons, ici deux paires électron-positron ④.

L'étude des désintégrations du boson de Higgs, en deux photons par exemple, est complexe, car d'autres processus bien connus produisent les mêmes états finals et dans des quantités bien plus importantes ; on parle de bruit de fond, par opposition au signal (les processus où intervient le boson de Higgs).

Une analyse fine des propriétés des particules produites permet de séparer le signal du bruit de fond. Il faut d'abord modéliser les collisions avec les processus du signal et ceux du bruit de fond, ainsi que les interactions des particules avec le détecteur. L'étude de ces simulations permet de mettre en évidence les critères de sélection qui serviront à d'isoler le signal du bruit de fond. Pour s'assurer que les simulations reproduisent bien ce qui se passe dans le détecteur, une étape de comparaison entre les données et la simulation est effectuée sur des processus bien connus, où le boson de Higgs n'intervient pas. Ce test permet de vérifier que les effets du détecteur sont bien simulés et que les processus physiques sont bien compris. Cette étape peut prendre des semaines, voire des années.

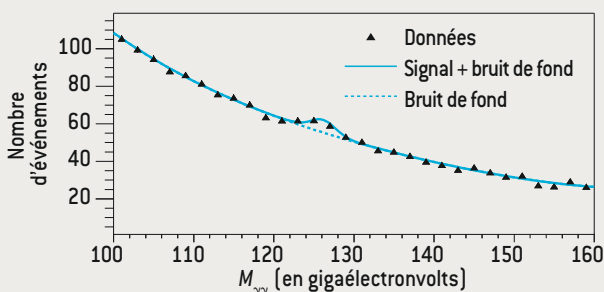
On peut ensuite étudier les processus où le signal correspondant au boson de Higgs pourrait se manifester.

C'est le cas, par exemple, de l'étude des signaux à deux photons : leurs caractéristiques permettent de calculer la masse de la particule qui leur a donné naissance. On obtient, en fonction de cette masse, une distribution statistique des événements, où le bruit de fond est reconnaissable grâce à sa forme d'exponentielle décroissante, alors que le signal apparaît comme une bosse au-dessus du bruit de fond (voir la figure en bas et à gauche).

À cause du faible nombre d'événements, nos yeux ne décèlent pas toujours un signal. On utilise des méthodes statistiques, dont l'une des indicateurs est la probabilité que le bruit de fond produise un excès ressemblant au signal. Si cette probabilité est inférieure à une chance sur trois millions (correspondant à cinq écarts-types d'une distribution gaussienne), on peut considérer qu'on a découvert un signal. C'est ce que les équipes du CERN ont obtenu. Cette particule, avec une masse de l'ordre de 125 gigaélectronvolts, ressemble au boson de Higgs recherché. Comme l'explique John Ellis, un long travail reste à faire pour mesurer les propriétés de cette nouvelle particule.

Fabien Tarrade

ATLAS – CERN
Université de Carleton, Canada



La distribution des événements obtenue par l'expérience ATLAS en fonction de la masse $M_{\gamma\gamma}$, calculée *a posteriori* et dont provient la paire de photons détectés, a une forme caractéristique. Le bruit de fond décroît de façon exponentielle, tandis que la bosse, centrée sur environ 125 gigaélectronvolts, correspondrait au signal du boson de Higgs.