

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.

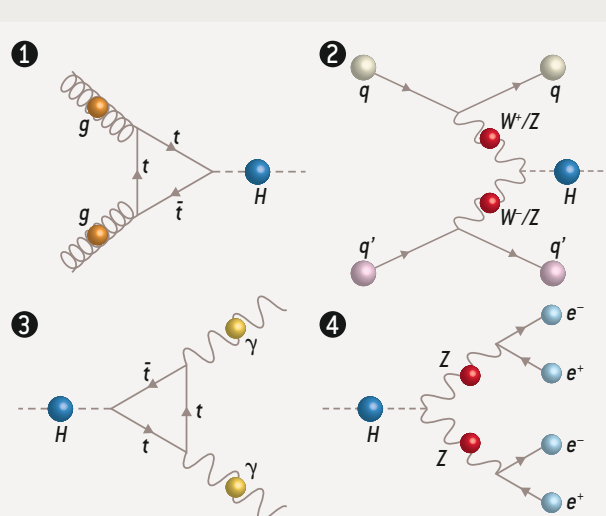
Il faut, avant tout, produire cette particule dans un environnement contrôlé : un collisionneur de particules. Plus la particule recherchée a une masse importante, plus l'énergie de la collision doit être élevée. Le boson de Higgs peut être produit par différents processus, ou modes : la fusion de deux 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).

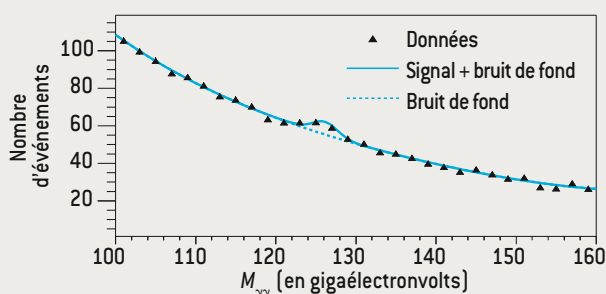
Une analyse fine des propriétés des particules produites permet de séparer le signal du bruit de fond. Il faut d'abord modéliser les collisions avec les processus du signal et ceux du bruit de fond, ainsi que les interactions des particules avec le détecteur. L'étude de ces simulations permet de mettre 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.

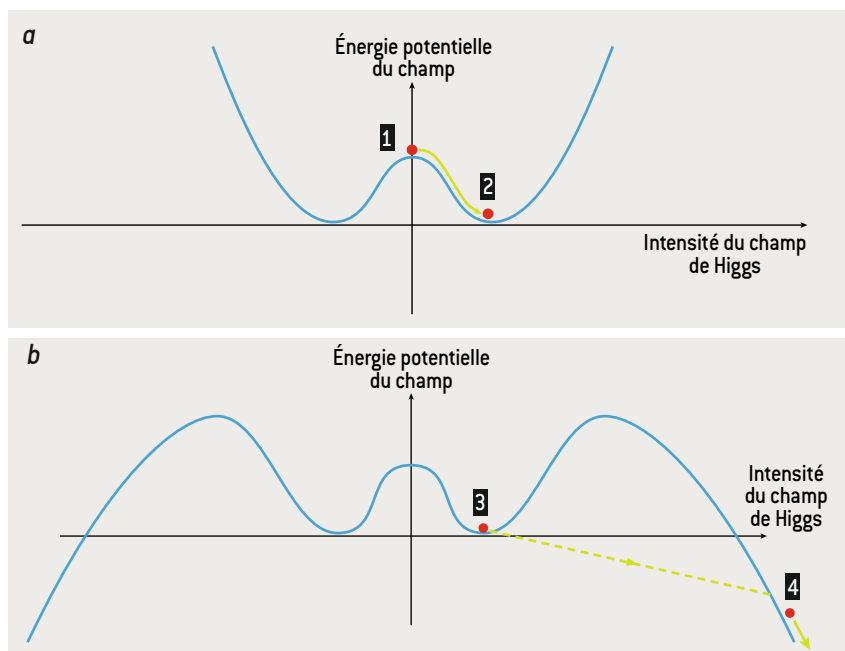
de calculer les couplages du boson de Higgs aux autres particules. Comme ces couplages diffèrent de ceux du modèle standard, les données du LHC devraient mettre à l'épreuve ces scénarios et en exclure certains.

Si, au contraire, le boson de Higgs est bien une particule élémentaire, de nombreux théoriciens pensent qu'il devra être intégré à un cadre plus vaste que le modèle standard, telle la supersymétrie. Dans cette théorie, chaque particule du modèle standard aurait un partenaire ayant des propriétés semblables, à l'exception du spin. Les corrections sur la masse du boson de Higgs dues aux particules supersymétriques compenseraient alors celles des particules du modèle standard. La masse du boson de Higgs ne deviendrait pas infinie. Qui plus est, dans l'hypothèse de la supersymétrie, l'état actuel de l'Univers serait stable et la masse du boson de Higgs serait inférieure à 130 GeV, comme observé.

Un ou plusieurs bosons de Higgs ?

En fait, la théorie de la supersymétrie prévoit non pas un, mais cinq bosons de Higgs, dont le moins lourd aurait un comportement légèrement différent de celui du boson de Higgs du modèle standard. La chasse est donc ouverte pour trouver ces autres bosons de Higgs et mesurer des signes caractéristiques de la supersymétrie dans la production et la désintégration du boson qui a été découvert.

En plus d'étudier de près la nouvelle particule et chercher d'autres bosons de Higgs, les physiciens du LHC traquent des signes directs de la production de particules supersymétriques. Dans de nombreux modèles, la particule supersymétrique la plus légère est électriquement neutre, interagit faiblement avec les autres particules et est stable. Elle aurait été produite dans les premiers instants de l'Univers et serait présente en grandes quantités aujourd'hui sous la forme de matière noire. L'existence de cette dernière a été postulée par les astrophysiciens et les cosmologistes pour expliquer de nombreuses observations. Au LHC, les particules supersymétriques seraient détectées sous la forme d'événements dans lesquels une partie de l'énergie et de la quantité de mouvement de la collision serait manquante, car emportée par les



3. LE MÉCANISME DE BRISURE DE SYMÉTRIE proposé par F. Englert, R. Brout et P. Higgs suppose que les équations de la théorie vérifient une certaine symétrie, mais pas les solutions des équations. On peut représenter de façon simplifiée le potentiel supposé du champ de Higgs en fonction de l'intensité du champ (a, courbe bleue). Une intensité nulle du champ (1) correspond à une solution symétrique, mais pas à l'état de plus basse énergie : cette solution est donc instable. On a alors une transition spontanée vers une position stable (2 par exemple), mais qui n'est plus symétrique. Le champ a alors une intensité non nulle, ce qui est à l'origine de la masse des particules. Pour un boson de Higgs de masse inférieure à 127 GeV, si on inclut des corrections quantiques, l'équation du potentiel est modifiée (b). La position (3) n'est plus celle de plus basse énergie. Par effet tunnel, le champ pourrait passer en position (4) et son intensité continuer à croître sans limite, ce qui modifierait profondément la physique de l'Univers.

particules de matière noire. De tels signaux n'ont pas encore été observés assez fréquemment pour être attribués à des processus en dehors du modèle standard. Les chances d'observer de tels événements augmenteront à partir de 2015, quand le LHC fonctionnera avec une énergie de collision plus importante (14 téraélectronvolts au lieu de 8 actuellement).

Le boson de Higgs pourrait nous éclairer sur d'autres questions encore en physique des particules et en cosmologie. Dans le modèle du Big Bang, matière et antimatière auraient été produites dans des proportions égales, mais se seraient annihilées en produisant des photons. Si ce scénario est correct, toute la matière et l'antimatière devraient avoir disparu. Dans ce cas, pourquoi l'Univers contient-il de la matière et pas du tout d'antimatière ? Cela pourrait s'expliquer par une asymétrie de comportement entre la matière et l'antimatière, qui serait responsable d'un léger excès de matière et qui aurait donc survécu à l'annihilation. Le modèle standard présente une telle asymétrie, mais elle

est insuffisante. La supersymétrie et divers modèles contiennent d'autres sources d'asymétrie susceptibles d'expliquer la disparition de l'antimatière. Ces asymétries supplémentaires pourraient apparaître directement ou indirectement dans les propriétés du boson de Higgs.

Si la nouvelle particule découverte au LHC est bien le boson de Higgs, elle complètera notre description de la matière visible de l'Univers et des processus qui ont régi le Big Bang après le premier milliardième de seconde. Comme nous l'avons vu, le boson de Higgs pourrait être lié à la matière noire et avoir joué un rôle dans la production de la matière dans l'Univers. C'est cependant une particule très différente de toutes celles que nous connaissons, et elle pose presque autant de questions qu'elle n'apporte de réponses. Son existence même et la valeur de sa masse suggèrent que le modèle standard ne peut être le fin mot de l'histoire, et que le LHC pourrait nous révéler des pans d'une nouvelle physique. La quête se poursuit. ■