

A-t-on trouvé le boson de Higgs ?

Jean Manfroid

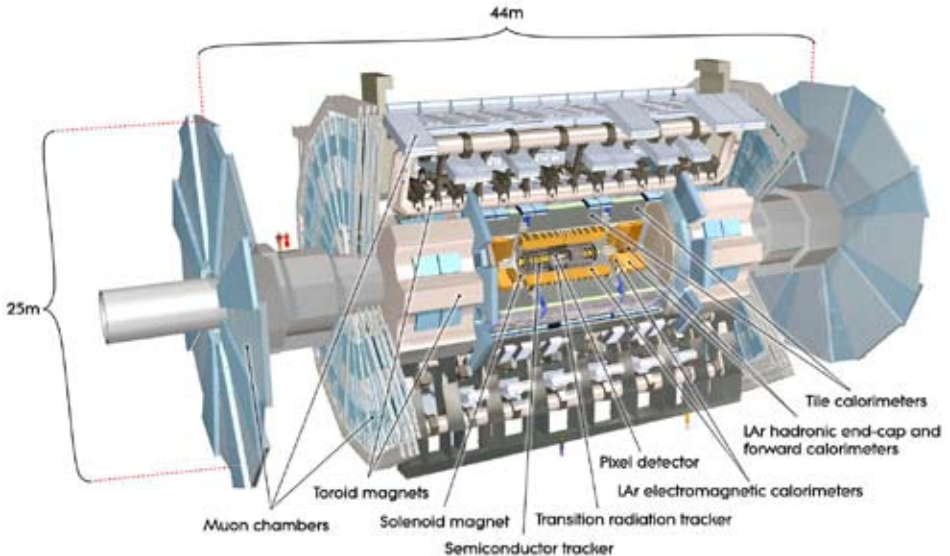
Alors que l'on parle très rarement des avancées en physique fondamentale, la presse a fait ses choux gras de la découverte possible du boson de Higgs, tout cela parce que cette particule avait été dénommée « Particule de Dieu » par le prix Nobel Leon M. Lederman dans son ouvrage de 1993 avec Dick Teresi, « The God Particle : If the Universe Is the Answer, What Is the Question? ». Ce titre provocateur avait été plus ou moins imposé par l'éditeur. Les auteurs auraient plutôt penché pour la « Goddamn Particle » mais ils n'ont pas reculé devant un titre accrocheur et la perspective de meilleures ventes. Le boson de Higgs est un élément aussi insaisissable qu'essentiel pour la compréhension de la structure de la matière, et son importance, conjuguée à son intangibilité, peuvent en justifier une espèce de divinisation. C'est donc Dieu qui a

prévalu et le nom a été régulièrement utilisé depuis.

Les particules élémentaires peuvent se diviser en deux groupes, les bosons et les fermions selon certaines propriétés de symétrie (encadré). La particule décelée au CERN fait partie de la première catégorie.

Proposés par Higgs et cinq autres physiciens (dont deux belges) dans le cadre du modèle standard, le champ de Higgs et la particule associée sont responsables de la masse de toutes choses. Sans cela les structures de l'univers n'auraient pu se développer, les galaxies n'auraient pu se condenser, ni les étoiles se former. L'univers aurait une organisation, ou une désorganisation, tout autre et nous ne

Vue générée par ordinateur du détecteur ATLAS (© CERN)



Le terme de boson provient du nom du physicien indien Bose qui a montré en 1920 que les photons suivaient une « statistique » – c'est-à-dire une loi de probabilité décrivant la répartition des particules entre différents niveaux d'énergie - différente de celle de Maxwell-Boltzmann qui régit la distribution des particules en mécanique classique, par exemple dans un gaz parfait. Une caractéristique des bosons est qu'ils peuvent occuper en grand nombre un même état quantique. Les photons peuvent ainsi s'accumuler sur un même niveau dans un laser. Cette statistique a été généralisée un peu plus tard par Einstein pour les atomes et elle porte depuis le nom de statistique de Bose-Einstein.

Les fermions quant à eux obéissent à la statistique de Fermi-Dirac établie en 1926. Au contraire des bosons, un état quantique donné ne peut être occupé que par un seul fermion. Les électrons dans un solide peuvent être considérés comme un gaz suivant la statistique de Fermi-Dirac.

Si l'on comparait les niveaux quantiques aux gradins d'un amphithéâtre, une multitude de bosons pourraient se rassembler entièrement près de la scène au premier rang, tandis que les fermions devraient s'égrener un par rang.

Lorsque les phénomènes quantiques deviennent négligeables, à haute température par exemple, ces deux statistiques rejoignent celle de Maxwell-Boltzmann.

La distinction entre fermions et bosons est liée à une propriété quantique particuliè-

re, n'ayant pas d'équivalent macroscopique – le spin – bien qu'on l'ait initialement reliée à une rotation (d'où le nom anglais).

Les fermions sont les particules à spin demi-entier (c'est-à-dire $1/2$, $3/2$, $5/2$, ...) : l'électron, le muon, le neutrino et les quarks sont des fermions. Les bosons ont des valeurs entières du spin.

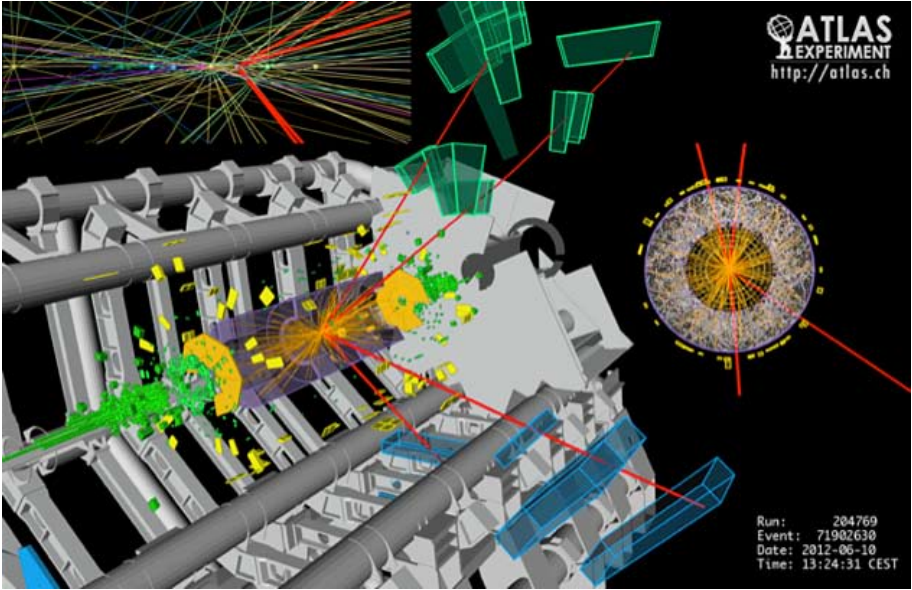
Le spin des particules composites comme les noyaux atomiques ou les atomes résulte de la combinaison des spins des particules élémentaires qui les composent. Ainsi, l'atome d'hélium 4 (deux neutrons, deux protons, deux électrons) est un boson, alors que l'hélium 3 (un seul neutron) est un fermion, ce qui donne à ces deux isotopes du même élément des propriétés différentes à basse température.

Les bosons élémentaires connus actuellement régissent les interactions fondamentales (électromagnétique, faible et forte). Ainsi le photon est associé au champ électromagnétique. Un boson supplémentaire, le fameux Higgs, est prévu par la théorie des particules élémentaires (le « modèle standard »). Il est associé à un champ – que l'on appelle sans surprise le champ de Higgs – qui remplit tout l'espace et dont une caractéristique est de donner la masse aux particules qui interagissent avec lui. Les photons n'interagissent pas avec le champ de Higgs et n'ont pas de masse. Les particules de faible masse comme les neutrinos interagissent peu, et celles de grande masse comme certains quarks interagissent fortement.

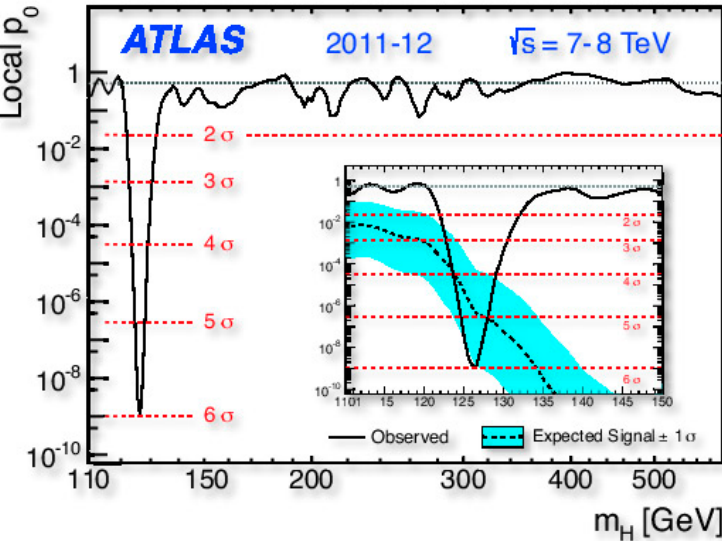
serions pas là pour en discuter. La découverte du boson, et donc la vérification expérimentale de l'hypothèse de Higgs et de ses collègues, est clairement d'une importance fondamentale pour comprendre la nature de l'univers. Rassurés sur ce point, les physiciens pourront maintenant passer à d'autres étapes, invalider certaines variantes du modèle, en proposer de nouvelles, chercher si le boson est unique ou existe en différents types, une hypothèse que le

LHC (Large Hadron Collider) devrait pouvoir vérifier dans l'avenir.

Mais revenons à la découverte du LHC. C'était un peu le secret de Polichinelle car tout le monde s'y attendait. En 2011 lors de la présentation de résultats préliminaires au Centre européen de recherche nucléaire (CERN), les physiciens reconnaissaient que les courbes montraient un petit excès d'événements qui étaient peut être le signe de la présence du



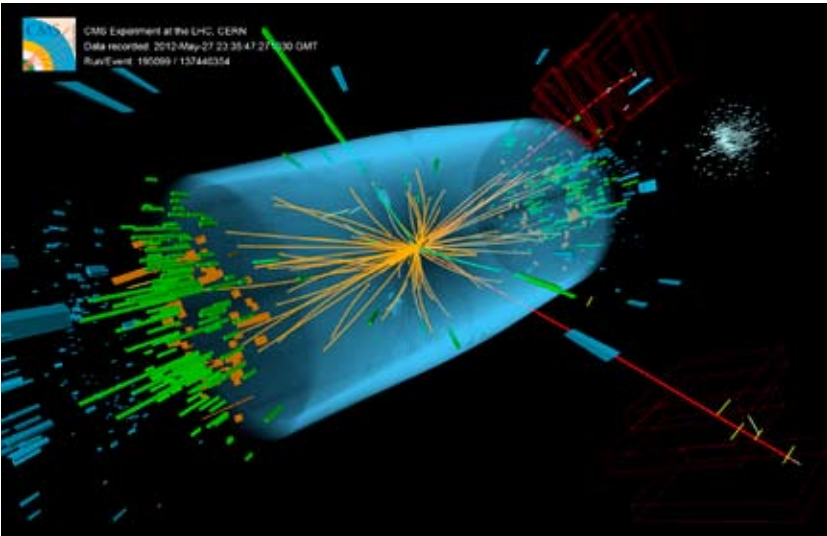
Possible désintégration d'un boson de Higgs en quatre muons enregistrée dans ATLAS (© CERN)



Résultat d'une analyse statistique de la recherche du Higgs dans les données ATLAS.

La probabilité qu'un événement autre ressemble aux données à $m_H = 126$ GeV est d'une chance sur 600 millions. Cela correspond à la détection à 5,9 sigmas d'une nouvelle particule. Le graphe montre l'absence de signal pour d'autres valeurs de la masse.

En incrustation, la comparaison des données et de la théorie montre que l'observation à $m_H = 126$ GeV est en accord avec le boson de Higgs du modèle standard. (© CERN)



Possible désintégration d'un boson de Higgs en quatre muons enregistrée dans CMS
(© CERN)

riences donnent à nouveau la même chose ne laissait guère de doutes sur les conclusions. D'autant que, rapidement, l'équipe d'ATLAS remontait

Higgs, sans pouvoir exclure qu'il s'agissait de simples fluctuations statistiques. Les deux grosses expériences ATLAS et CMS, étudiant indépendamment les événements produits dans le LHC, montraient le même phénomène ce qui était encourageant.

Ces données permettaient déjà de conclure que si le Higgs existait son énergie (sa masse) devait être comprise quelque-part entre 115 et 130 GeV¹, ce qui était compatible avec le modèle standard et excluait quelques variantes de la théorie.

Le 4 juillet venait l'annonce officielle du CERN : les expériences ATLAS et CMS confirmaient l'existence d'une particule d'énergie, 126 GeV. Le signal était décrit fiable à un niveau de 5 sigmas, ce qui pour les scientifiques veut dire qu'il n'y a qu'une chance sur plusieurs millions qu'il s'agisse d'une coïncidence. Ce serait aussi étrange que de réaliser vingt fois le même résultat dans un jeu de pile ou face. Le fait que les deux expé-

leur niveau de confiance à pratiquement 6 sigmas (cf figure page ci-contre).

Les caractéristiques de cette particule sont tout à fait compatibles avec celles du boson de Higgs tant attendu. C'est le plus lourd de tous les bosons connus : les bosons W et Z intervenant dans l'interaction faible font 80 et 91 GeV respectivement. Pour fixer les idées, les nucléons, protons et neutrons, pèsent seulement 1 GeV et les électrons encore 2 000 fois moins.

Mais l'habit ne fait pas le moine. Que cette particule présente la plupart des traits du boson de Higgs ne signifie pas qu'il s'agit nécessairement de lui. Il faudra attendre de nouvelles données pour qu'une étude plus exhaustive puisse mieux en cerner les propriétés. Le LHC n'est pas encore au maximum de sa puissance, il fera bientôt mieux.

Déjà des scientifiques pensent voir quelques anomalies dans les désintégrations du boson. Ainsi une désintégration en deux photons paraît anormalement fréquente. S'il s'agit non pas de la particule de Dieu mais de quelque-chose de plus exotique ce serait peut-être un pas vers la compréhension de la face cachée de l'univers, ces 96 % qui nous restent invisibles.

¹ 1 GeV (Gigaélectron-volt) = 10⁹ eV (électron-volt) – un électron-volt est l'énergie cinétique d'un électron accéléré par une différence de potentiel d'un volt et vaut 1,610⁻¹⁹ joule (J). En vertu de l'équivalence masse-énergie décrite par la relation d'Einstein, un électron-volt correspond à une masse de 1,78 10⁻³⁶ kg.