

à la une

PHYSIQUE
DES PARTICULES

À la recherche du boson de Higgs...

Le boson de Higgs... Jamais particule n'aura été si farouchement recherchée. Jugez un peu : sa traque, qui dure depuis plus de quarante ans, est le premier objectif du LHC¹, le plus puissant accélérateur de particules que l'homme ait construit. C'est que le boson de Higgs, « inventé » en 1964 par l'Écossais Peter Higgs et les Belges François Englert et Robert Brout, est l'une des toutes dernières pièces manquantes du Modèle standard, cette théorie physique qui décrit à la fois les constituants ultimes de la matière et les forces qui les relient. Ne pas le trouver provoquerait un véritable séisme dans le monde de la physique des particules. De là à la remettre entièrement en question ? Pas si sûr... Quelques physiciens ont



Tunnel du LHC, long de 27 km et enfoui à 100 mètres sous la frontière franco-suisse, où seront accélérées à la vitesse de la lumière des milliers de particules.

Pièce manquante du Modèle standard, le boson de Higgs est très attendu au tournant des collisions qui seront provoquées au sein du LHC. | Et s'il n'existait pas ? | Des physiciens envisagent déjà des théories se passant de lui. |

décidé de ne pas attendre une hypothétique chasse infructueuse et ont mis au point des théories qui peuvent se passer du fameux boson. Christophe Grojean, chercheur au Service de physique théorique (SPHT) du CEA à Saclay, et actuellement en détachement au Cern², est de ceux-là :

« Des progrès théoriques significatifs, ces dernières années, ont conduit à la construction de modèles dans lesquels le boson de Higgs n'est plus une **particule élémentaire**

mais une **particule composite**. Certains modèles s'en affranchissent même complètement. » Et sa théorie d'une cinquième dimension a, tout comme d'autres, l'avantage de ne pas remettre en cause

les acquis du Modèle standard...

Cela vaut mieux, car le Modèle standard est un peu le livre de recettes de Mère nature. On y trouve des ingrédients (les particules élémentaires), la manière >>>

PARTICULE COMPOSITE

Assemblage de quelques particules élémentaires. Par exemple, le proton, constitué de quarks, est une particule composite.

PARTICULE ÉLÉMENTAIRE
Constituant fondamental et indivisible de la matière, de la lumière et des forces.

NOTES : 1. Large hadron collider (grand collisionneur de hadrons) 2. Organisation européenne pour la recherche nucléaire.



masse des particules

pas du tout
un peu
beaucoup
à la folie

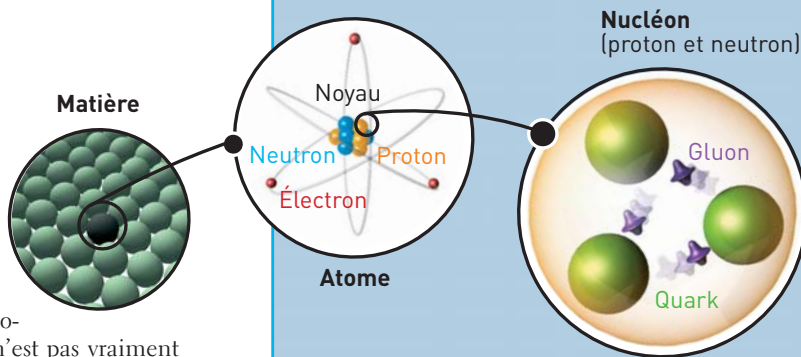


>>> de les mélanger (les interactions) pour obtenir finalement un bon petit plat, rien moins que l'Univers. Ce livre a été édifié petit à petit, à mesure que les scientifiques découvraient ce dont était composée la matière et la façon dont les forces gouvernaient le monde. Vingt-quatre particules élémentaires ont été répertoriées (25, en comptant le boson de Higgs, pour le moment introuvable) et classées en deux grandes familles (voir tableau page 7) : les fermions et les bosons de jauge. Douze fermions constituent la matière. Il s'agit notamment des électrons, des neutrinos et des quarks. Les bosons de jauge, eux, s'échangent entre les fermions et « portent » les quatre forces fondamentales (électromagnétique, interaction forte, interaction faible et gravitation). Le photon, constituant de la lumière, est responsable de l'interaction électromagnétique, à l'œuvre dans les liaisons chimiques, l'électricité, le magnétisme... Les gluons, au nombre de huit, servent

de « colle extraforte » entre les quarks lorsqu'ils s'assemblent pour former les protons et les neutrons; en véhiculant l'interaction forte, ils assurent par exemple la cohésion du noyau des atomes. Trois autres bosons de jauge, W^+ , W^- et Z^0 , transmettent l'interaction faible

CMS, en cours d'assemblage, est l'un des détecteurs de particules d'expériences qui seront menées au Cern.





à laquelle toutes les particules sont sensibles et qui est à l'origine d'une forme particulière de radio-activité. Enfin, le graviton, qui n'est pas vraiment considéré comme une particule, véhiculerait la gravitation, mais personne n'a pu l'observer à ce jour (sans que cela remette en cause les fondements théoriques du Modèle standard).

Que vient faire le boson de Higgs dans tout ça ? Son existence a été postulée en 1964 pour expliquer une observation expérimentale particulièrement troublante pour les physiciens : W^+ , W^- et Z^0 , responsables de l'interaction faible, ont une masse. *A priori*, rien de surprenant ; pratiquement toutes les particules sont massives. Pourquoi ces trois-là ne le seraient-elles pas ? Simplement parce que cela viole le principe de symétrie de jauge. Un principe qui exige que les particules véhiculant trois des quatre forces fondamentales (électromagnétique, forte et faible) soient de masse nulle. Il en va ainsi du photon et du gluon. Seuls W^+ , W^- et Z^0 dérogent à la règle ; ils sont même particulièrement lourds, près de cent fois plus qu'un proton !













LA BRISURE SPONTANÉE DE SYMÉTRIE

Mais, en ce cas, comment ces trois bosons de jauge sont-ils devenus obèses ? Peter Higgs, de son côté, François Englert et Robert Brout, de leur, ont trouvé la solution. Ils ont invoqué un mécanisme assez connu en physique, et même en mathématiques : la brisure spontanée de symétrie... Kézako ? Une métaphore est proposée par Étienne Klein, du Laboratoire de recherches sur les sciences de la matière du CEA à Saclay, qui vient d'entreprendre avec plusieurs physiciens une étude épistémologique de la théorie de Higgs. « *Imaginez une bille placée sur le cul d'une bouteille, à l'intérieur de celle-ci. Cet état-là est symétrique. Cependant, la bille aura tôt fait de rouler au fond de la bouteille, sur le côté. Et l'état final n'est plus symétrique. Ce système tend naturellement vers une brisure spontanée de symétrie.* » Les physiciens ont démontré que cette brisure aurait conféré une masse à W^+ , W^- et Z^0 , qui en étaient initialement dépourvus. Elle aurait alors laissé des traces sous la forme d'une particule additionnelle : le boson de Higgs. Boson qui permit dans la foulée d'expliquer les masses de toutes les autres particules du Modèle standard : « *C'était un peu la cerise sur le gâteau*, indique Philippe Brax du SPhT. *Les physiciens de l'époque ont découvert que le boson de Higgs était partout, qu'il constituait un "champ" avec lequel les autres particules* >>>

Tableau des particules élémentaires du Modèle standard

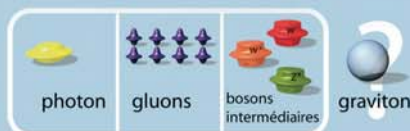
Fermions

Constituants de la matière, au nombre de 12.

électrons	neutrinos	quarks	
 électron	 neutrino électron	 bas	 haut
 muon	 neutrino muon	 étrange	 charme
 tau	 neutrino tau	 beauté	 vérité

Bosons de jauge

Vecteurs des 4 forces fondamentales, au nombre de 12.



Boson de Higgs

Responsable de la masse de toutes les particules ?





à la une

>>> *interagissaient plus ou moins fortement, et que cette interaction n'était autre que leur masse. »*

En somme, plus une particule interagit avec le boson de Higgs, plus elle est lourde. Imaginez-vous entrant dans une salle emplies d'amis célébrant votre anniversaire. Vous n'avez qu'une hâte : manger une part du gâteau posé sur le buffet, au fond de la salle. Mais alors que vous avancez, tout le monde souhaite vous parler. Plus vous serez sollicité et plus il vous sera difficile de l'atteindre. En fait, vous vous sentirez de plus en plus lourd ! Il en va de même pour les particules,

plus ou moins « sollicitées » par les bosons de Higgs. Cette nouvelle théorie, pour le moins séduisante car particulièrement efficace, a donc vite emporté tous les suffrages. Reste à observer ce fameux boson. Une tâche plutôt ardue dans la mesure où il n'est visible qu'à des énergies assez élevées, impossibles à atteindre avec les machines courantes. Le LHC doit donc y remédier (*voir ci-dessous encadré « La traque du Higgs au LHC »*). À moins que... le Higgs n'existe pas. Car si cette théorie fonctionne bien, elle n'est pas exempte de faiblesses. Un seul exemple : par nature, le boson

La traque du Higgs au LHC

Comment les scientifiques ont-ils prévu de coincer le boson de Higgs ? Comment, en effet, capturer cette particule, dont l'énergie est théoriquement comprise entre 115 et 140 GeV et qui, comme d'autres particules massives, n'existe que quelques nanosecondes avant de se désintégrer... Pour produire des particules aussi lourdes, il faut beaucoup d'énergie. Depuis une vingtaine d'années, plus de 1500 physiciens (dont ceux du CEA) de 150 instituts à travers le monde travaillent à la conception d'un gigantesque accélérateur de particules, le LHC, dont la mise en service est prévue dès le printemps 2008 au Cern. Il consiste en un immense anneau de 27 km de circonférence (installé à 100 mètres de profondeur sous le Plateau de Genève à la frontière franco-suisse) dans lequel deux jets de protons seront lancés l'un contre l'autre à la vitesse de la lumière. La rencontre de ces faisceaux de particules doit provoquer pas moins de 40 millions de collisions par seconde, donnant naissance à autant

Première interconnexion entre deux aimants du LHC en 2005. Il en faudra 1700, nécessitant 123 000 opérations de soudure et d'assemblage, pour réaliser le collisionneur.

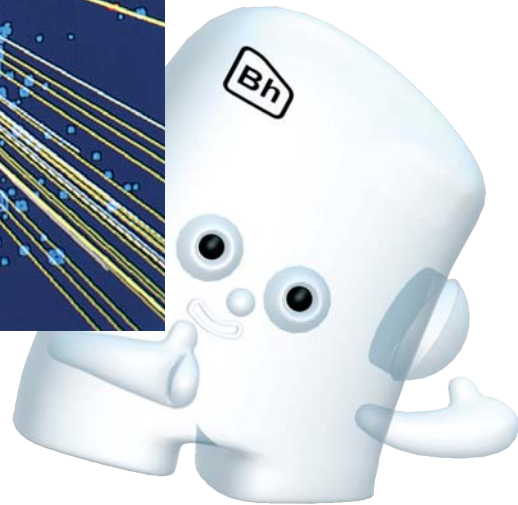


© Cern

de particules. C'est parmi elles que de très puissants détecteurs chercheront la « signature » du boson de Higgs, lui-même ne pouvant être détecté directement car trop éphémère. Il faudra alors rechercher des paires de quarks particuliers (beauté, anti-beauté), des paires de photons ou encore des ensembles de quatre particules (électrons et/ou muons), comme autant de témoins de l'existence du « Higgs »...



Simulation de la désintégration du boson de Higgs lors de la collision d'une paire de protons de très haute énergie.



de Higgs se doit de posséder un **spin** nul. Or aucune autre particule élémentaire n'a une telle caractéristique. « *C'est plutôt une propriété des particules composites* », observe Christophe Grojean. Et ce n'est pas la seule bizarrerie liée au boson de Higgs. De là à envisager un autre mécanisme pouvant expliquer la masse de W^+ , W^- et Z^0 et de toutes les autres particules par la même occasion, il n'y a qu'un pas... Que Christophe Grojean et plusieurs de ses confrères³ n'ont pas hésité à franchir. Exit le boson de Higgs, bienvenue à... la cinquième dimension !

On le sait, l'univers est doté de quatre dimensions : trois pour l'espace et une pour le temps. « *Nous proposons l'existence d'une cinquième dimension compacte*, explique Christophe Grojean. *Voyez ça comme une autoroute : vue du ciel, il ne s'agit que d'une ligne à une dimension, mais les voitures, elles, circulent dans*

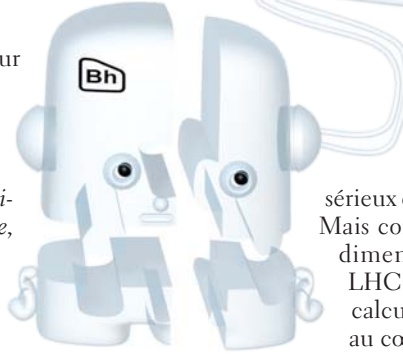
deux dimensions, vers l'avant et latéralement pour doubler. De la même façon, s'il existe une cinquième dimension, les particules se déplacent le long de celle-ci alors que nous n'en voyons que quatre. » Et selon la théorie de la relativité restreinte d'Einstein et sa formule $E = mc^2$, un déplacement, donc une énergie, équivaut à une masse : le mouvement d'une particule dans cette cinquième dimension se traduirait donc par une masse dans nos quatre dimensions. « *Pour être plus précis, c'est la façon dont chaque particule se comporte sur les bords de cette cinquième dimension qui détermine ce qui apparaît comme sa masse dans les quatre dimensions* », indique Christophe Grojean. Autant de valeurs différentes de masse que de comportements, car la particule peut être >>>

NOTE : 3. Csaba Csaki, de l'université Cornell, Hitoshi Murayama, de l'université Berkeley, John Terning, de l'université de Californie Davis et Luigi Pilo, de l'université d'Aquila.



Élémentaire... ou composite,
mon cher Watson !

>>> « absorbée » ou rebondir sur le bord de cette cinquième dimension. « *Suivant le principe général de la mécanique quantique, ces comportements mènent à une quantification du spectre de masse, c'est-à-dire à des valeurs fixes* », poursuit le chercheur. Les masses observées de W^+ , W^- et Z^0 correspondraient ainsi aux valeurs de plus basse énergie. Quant aux énergies plus hautes, elles pourraient traduire des particules qui ont les mêmes caractéristiques que les trois bosons de jauge (spin, charge électrique...), mais plus lourdes. Cette



cinquième dimension, dotée d'une géométrie très particulière (hyperbolique), permettrait même d'expliquer les masses de toutes les particules connues. De quoi donner un sérieux coup de vieux à ce cher boson de Higgs ! Mais comment démontrer l'existence de cette dimension supplémentaire ? Là encore, le LHC pourrait apporter la réponse. Selon les calculs des physiciens, les énergies atteintes au cœur de l'accélérateur devraient être suffisantes pour observer les fameux bosons lourds identiques aux W et Z .

Ainsi, le LHC, développé pour observer le boson de Higgs, pourrait bien placer celui-ci au rang de douce rêverie de physiciens...

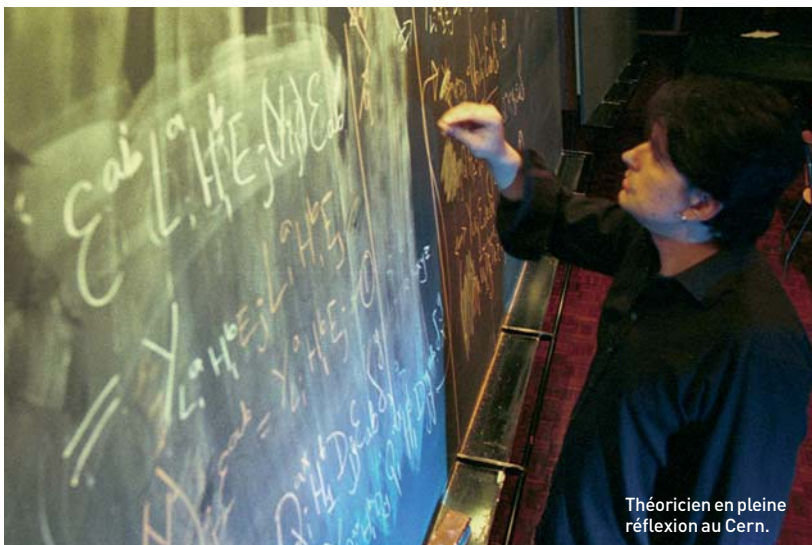
I CÉDRIC LONGIN I

Susy, la supersymétrie



Les physiciens sont conscients que le mécanisme de Higgs a ses faiblesses et qu'il a été établi de manière *ad hoc*. De fait, le Modèle standard se borne à décrire le « comment » sans vraiment résoudre le « pourquoi ». Une théorie plus formelle a donc été développée. Appelée supersymétrie (ou Susy), elle postule l'existence d'une myriade de particules miroirs de celles du Modèle standard. À chaque fermion (boson) connu correspond un boson (fermion)

supersymétrique : au photon un photino, à l'électron un sélectron, aux quarks des squarks et au Higgs un, et même plusieurs, higgsinos. Eh oui ! Dans cette théorie, il n'y aurait pas un, mais cinq bosons de Higgs. Si cette théorie se révèle exacte, il sera possible d'observer ces nouvelles particules au LHC.



Théoricien en pleine réflexion au Cern.

