

Communication de Monsieur Robert Mainard



Séance du 27 mars 2015



Le Boson de Higgs

Introduction

1. Les interactions fondamentales

Avant d'aborder immédiatement la question du boson "dit de **Higgs**" il convient de rappeler très succinctement quelques résultats acquis par les physiciens depuis, à peu près, un siècle.

La physique moderne est régie par une théorie appelée "**le modèle standard de la physique**" basé mathématiquement sur la relativité et la mécanique quantique. On sait qu'en dernière analyse la matière, qu'elle soit inerte ou vivante, est constituée de particules.

On appelle particule un objet élémentaire de très faible dimension et totalement dépourvu de structure interne.

Une première grande classe de particules rassemble les *fermions* qui sont les constituants réels de la matière.

Ces particules présentent des propriétés spécifiques, en particulier elles obéissent à une statistique : celle de *Fermi-Dirac*.

Ces particules sont soumises, par ailleurs, aux quatre forces fondamentales (ou champs) de la physique qui sont :

Les interactions nucléaires fortes

Les interactions nucléaires faibles

Les interactions électromagnétiques

L'interaction gravifique, importante à notre échelle et à l'échelle cosmique est parfaitement négligeable au niveau de ces particules.

Les fermions sont soumis à ces actions par l'intermédiaire d'une autre classe de particules d'intermédiation qu'on appelle aussi les **bosons de jauge** qui obéissent à une autre statistique celle de *Bose-Einstein*.

On a donc le schéma suivant :

Interactions fondamentales bosons fermions

Les interactions entre ces particules sont théoriquement décrites à l'aide de ce qu'on appelle des **groupes de symétrie** dans le cadre plus général de la Mécanique quantique.

Dans ce cadre ces deux classes de particules présentent des comportements différents.

Par exemple deux fermions ne peuvent pas posséder le même état quantique (*Principe d'exclusion de Pauli*) ce qui n'est pas le cas pour deux bosons (*condensation de Bose-Einstein : cas du laser*)

On séparera pour la commodité les fermions et les bosons qui sont des particules élémentaires de celles qui sont des particules composites.

2. Particules élémentaires

A. Les fermions

Parmi les fermions on distingue d'abord les *quarks* qui sont au nombre de 6.

Ces particules qui sont les plus petites connues à ce jour ont été mises en évidence, la première fois, par l'américain **Murray Gell-Mann** en 1964, lequel a reçu le prix Nobel de 1969 avec **Ne'eman**. Le dernier des quarks, le *Top quark*, a été découvert en 1964.

Le nom de quark vient d'un roman de James Joyce "*Three quarks for mister Mark*".

Un **quark** est défini par sa masse, sa charge électrique et deux indices quantiques l'un qu'on appelle le *spin* qui rend compte de l'état magnétique de la particule et l'autre la *couleur* (bleu, vert, rouge) qui n'a rien à voir avec la couleur réelle dans le cadre de ce qu'on appelle la *chromodynamique*.

A chaque quark correspond un *antiquark* de même masse, de charge électrique opposée et de couleur également opposée (par exemple on aura des quarks *antibleus*).

Leurs principales caractéristiques sont données dans le tableau suivant :

Masse	Charge électrique	Spin	
<i>Quark Up U :</i>	$23 \text{ MeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$
<i>Quark Charm C :</i>	$1,275 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$
<i>Quark Top T :</i>	$173,07 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$
<i>Quark Down D :</i>	$4,8 \text{ MeV}/c^2$	$- 1/3$	$1/2$
<i>Quark Strange S :</i>	$95 \text{ MeV}/c^2$	$- 1/3$	$1/2$
<i>Quark Bottom B :</i>	$4,18 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$

Nous allons essayer de montrer comment ces particules de base se sont combinées pour constituer la matière qu'elle soit minérale, organique ou vivante.

Rappelons que l'unité de charge électrique est celle de l'électron qui vaut : $1,6 \cdot 10^{-19}$ (exp-32) Coulomb et que nous prendrons pour unité.

On distingue encore parmi *les fermions*, une autre classe de particules, dont certaines sont très connues. Ce sont les *Leptons* : (le mot vient du grec et signifie léger) parmi lesquels on distingue :

L'Electron (e-), le positron (e+) les muons (+ et -), les tauons (+ et-) et les neutrinos.

B. Les bosons

Dans cette deuxième grande classe de particules on distingue :

Les **gluons (g)** au nombre de 8. Ces particules transmettent l'interaction forte permettant de fixer les quarks.

Le **Photon** qui est la particule médiatrice de l'interaction électromagnétique.

Les **Bosons W+, W- et Z°** qui transmettent l'interaction faible (désintégration radioactive).

Le boson de **Higgs** qui fera l'objet essentiel de cet article.

Toutes ces particules sont définies et repérées comme nous l'avons déjà signalé par les paramètres évoqués précédemment (masse, charge électrique, etc)

3. Particules composites

Parmi ces particules, appelées **Hadrons**, on notera en premier lieu le *proton* et le *neutron* qui sont des *nucléons* sur lesquels nous aurons l'occasion de revenir.

Les *Baryons* qui sont des fermions

Les *Mésons* qui sont des bosons

Nous allons essayer de montrer comment ces particules de base se sont combinées pour constituer la matière qu'elle soit minérale, organique ou vivante... Nous précisons le rôle essentiel des bosons, particules transmettrices des forces fondamentales.

A. Constitution des baryons et des mésons :

Nous n'évoquerons que le proton et le neutron.

Le **proton** est constitué par deux quarks *u* et un quark *d*, les quarks étant liés deux à deux par un gluon. Ces trois quarks sont appelés « **quarks de valence** ». En plus de ces quarks de valence, la mécanique quantique prédit qu'un grand nombre de « particules virtuelles » vont constamment apparaître et disparaître : des gluons ainsi des paires de quarks-antiquarks. C'est l'énergie contenue dans ces particules virtuelles qui explique pourquoi les protons sont beaucoup plus lourds que l'ensemble des quarks qui leur confèrent leur identité. Le décompte précis du nombre des particules virtuelles est difficile car ce nombre dépend des conditions d'observation (nous sommes en Mécanique Quantique). Nous avons essayé de représenter de telles particules sur la figure sans avoir la prétention de pouvoir donner une représentation fidèle de la réalité.

Le neutron, quant à lui, est constitué par deux quarks *d* et un quark *u*, les quarks étant, là aussi comme dans le cas du proton, liés deux à deux par un gluon (voir la Figure 1).

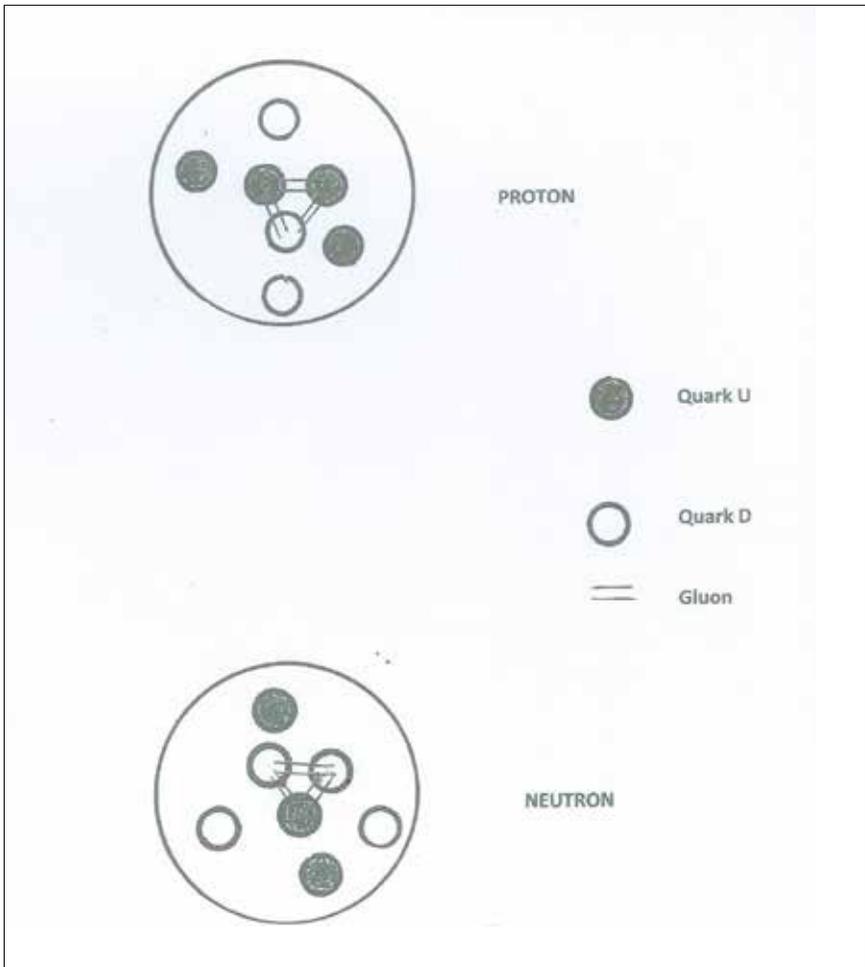


Figure 1.

B. Quelques exemples d'atomes :

A titre d'exemple, sur la figure 2, nous donnons le schéma de quelques atomes simples.

C'est un effet dérivé de la force forte (ou interaction forte) qui est responsable de la cohésion des nucléons (protons et neutrons) au sein du noyau de l'atome. On l'appelle *force nucléaire*. Un effet dérivé de celle-ci assure la cohésion du noyau. On l'appelle *liaison nucléaire*.

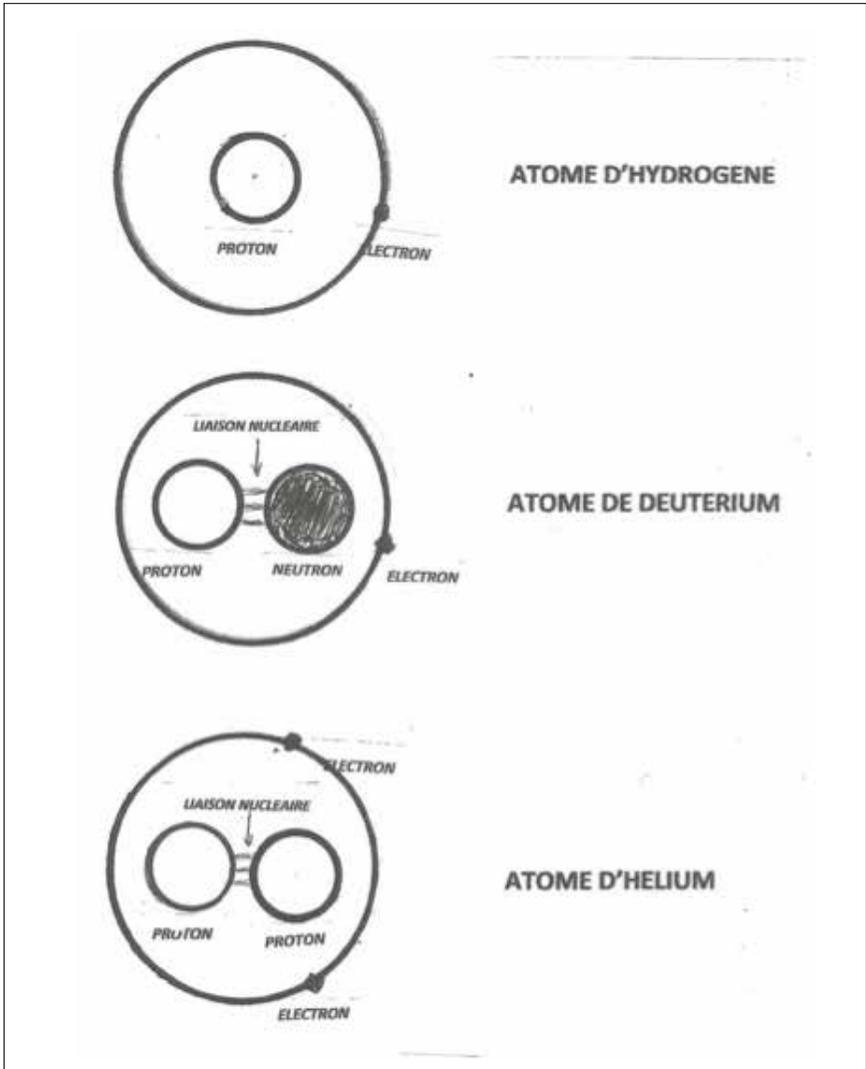


Figure 2.

Travaux théoriques

Après ces quelques informations sur le modèle standard de la physique des particules et la distinction faite entre les fermions et les bosons nous allons essayer de montrer ce qui préoccupait les physiciens ces dernières années. Certes le modèle standard permettait d'expliquer très correctement tous les phénomènes se produisant à l'échelle atomique ou nucléaire notamment les réactions nucléaires. En particulier tout ce qui concerne le point de vue énergétique trouvait une explication dans ce cadre. Il en allait de même pour les réactions à l'origine de l'énergie solaire (cycle de Bethe) .

Mais cependant une grave lacune demeurait : **Les équations qui émergeaient des différents calculs impliquaient que la masse de toutes les particules étaient nulles ou plus exactement s'accommodaient d'une masse nulle.**

Or on sait, de par l'observation la plus commune, que les masses ne sont pas nulles et diffèrent d'un corps à un autre et, en particulier, d'une particule à une autre. Les masses des différentes particules ont d'ailleurs été calculées par divers processus expérimentaux.

Il semblait donc que la théorie ne rendait pas compte de l'observation. Or il est admis que lorsqu'une théorie ne tient plus compte de l'expérience elle est erronée. Il est alors nécessaire d'en créer une nouvelle ou d'examiner et de corriger ce qui peut-être avait été mal compris ou mal interprété dans la théorie antérieure.

Au milieu du siècle dernier les physiciens étaient partagés. D'aucuns voulaient effectivement mettre en chantier une théorie nouvelle alors que d'autres pensaient qu'il était possible de trouver une explication dans le cadre du « **modèle standard** ».

Il convient de préciser aussi que le modèle standard ne fournit pas d'explication en ce qui concerne la gravité. Il en est de même pour la matière sombre et l'énergie noire qui interviennent au niveau cosmique.

La physique a souvent pour habitude de revisiter certaines notions que l'on pouvait considérer comme bien établies et d'en transformer complètement l'idée que l'on pouvait préalablement s'en faire. La masse est de celles-ci.

C'est Newton qui le premier s'est intéressé à la notion de masse et a fait la distinction entre *masse* et *poinds*. D'une manière classique la masse d'une particule, d'un corps est considérée comme une propriété intrinsèque de cet objet. *La masse mesure la quantité de matière que possède un corps.*

Mais cet aspect est quelque peu imprécis et pour tout dire rudimentaire. La masse est une grandeur à la fois mesurable (gramme, kilogramme, etc.) et mesurante. On distingue d'abord *la masse inertielle* qui rend compte de la difficulté à mettre un corps en mouvement ou à modifier son mouvement. On peut donc affirmer que l'inertie d'un corps est mesurée aussi par sa masse

On distingue aussi *la masse grave*. Quand une particule se trouve dans un champ de pesanteur, elle va « tomber » en couplant sa masse grave au champ de pesanteur, ce qui se traduit par un *poids* et quand on choisit bien le système d'unités, la masse inertielle et la masse grave ont la même valeur. De ce fait, le poids d'un corps est lié à la gravité. Ainsi il ne sera pas le même sur terre ou sur la lune ou dans l'espace.

En 1905 un jeune expert de l'office des Brevets de Berne qui s'appelait **Albert Einstein** reprenait et complétait les travaux de plusieurs physiciens, ceux de **Kant** de **Lorentz** et en particulier de **Poincaré** lequel avait démontré la constance de la vitesse de la lumière dans tous les référentiels inertiels. Ses travaux avaient amené **Einstein** à écrire dans le cadre de la relativité restreinte qu'il venait d'établir la célèbre relation reliant la masse à l'énergie

$$E=mc^2$$

Ce qu'on peut écrire :

$$m= E/c^2$$

Et on peut donc affirmer alors que la masse représente l'énergie totale contenue dans un corps à un coefficient constant près. D'après cette théorie la vitesse de la lumière c , constante, joue un rôle central.

Un certain nombre de scientifiques, à l'examen des problèmes posés au niveau de la masse des particules dans le modèle standard se sont interrogés, alors, sur cette notion de masse, se demandant si celle-ci qui apparaissait comme une propriété essentielle de la matière, disons une *propriété primaire*, n'en était pas en réalité, une *propriété secondaire*.

Dans cette nouvelle conception la masse d'une particule résulte, en réalité, de *l'interaction* de celle-ci avec le « vide quantique » qui, en réalité n'a rien du vide, mais est le réceptacle d'un champ qui a partout, en chaque point de l'espace, la même valeur.

Il y a donc couplage entre la particule et ce champ ce qui détermine ce qu'on appelle la masse. La masse n'est plus alors associée à une quantité de matière ou de substance *mais provient d'une interaction de l'objet que l'on étudie, a priori sans masse, avec le vide ou plutôt le champ qui occupe le vide.* Le couplage n'est, évidemment, pas le même pour toutes les particules. Plus ce couplage est important plus évidemment la masse est grande.

A ce champ que l'on appelle le *champ de Higgs* doivent être associées des particules, des quantas : *les bosons de Higgs* par analogie avec ce qui existe pour les autres forces existantes que nous avons évoquées précédemment.

Nous avons eu l'occasion de bien montrer quel était le rôle essentiel que jouaient les bosons en tant que particules d'intermédiation des différentes forces qui interviennent en physique. Les théoriciens qui avaient publié leurs travaux dans les années 60 avaient eu cette idée absolument remarquable, en rappelant que les interactions nucléaires ou électromagnétiques étant transmises par des bosons on pouvait alors postuler l'existence d'un dispositif identique intervenant dans la création de ce qu'on appelle la masse.

Ces chercheurs fondaient leurs travaux sur ce qu'on appelle en physique des particules, mais pas seulement dans ce domaine particulier de la physique, *la brisure de symétrie*. Celle-ci apparaît dans le domaine qui nous intéresse, lorsque, sous certaines conditions à définir, quelques propriétés de la matière ne semblent pas respecter les équations qui régissent habituellement le mouvement des particules.

On dit alors que ces propriétés ne répondent pas aux mêmes symétries. Toutefois cette incohérence apparente ne signifie pas que les équations sont erronées. Mais cette notion de brisure spontanée de symétrie joue un rôle important dans ce qui nous intéresse ici : la physique des particules.

On peut noter que trois groupes de chercheurs, à partir des années 62 ont publié des travaux, presque simultanément, sur ce thème avec dans l'ordre chronologique :

François Englert et Robert Brout : "Broken symmetry and the mass of gauge vectors mesons" Physical Review letters Vol 13 N° 9 31 Août 1964 P 321 321

Peter W. Higgs : "Broken symmetries and the mass of gauge bosons" Physical Review Letters Vol 13 1964 19 Octobre 1964, pp508 509

Gérald S. Guralnik Carl, Hagen R., Thomas W.B. Kibble. "Global conservation laws and massless particles" Physical Review Vol 20 16 Novembre 1964+

Vérification expérimentale

1. Le « Large Hadrons collider »

En physique, comme en science en général, c'est l'expérience qui, en définitive, a toujours raison et particulièrement en physique qui est, avant tout, une science expérimentale. Le cimetière des Sciences est jonché des tombes de théories magnifiques qui n'ont pas résisté à la confrontation avec l'expérience. Il fallait donc que cette hypothèse théorique de l'existence des bosons fût vérifiée par l'expérience ce qui exigeait la mise en œuvre de moyens considérables. Ce fût le LHC (**large hadrons collider**).

Considéré comme la plus grande machine jamais élaborée par l'homme ce LHC a été construit à 100 mètres sous terre, partie en France et Partie en Suisse, sa circonférence atteignant les 27 kilomètres. Dans cette machine on fait circuler des *protons* sur deux trajectoires différentes (les tubes-faisceaux) sur lesquelles ces particules se déplacent en sens inverse de façon à ce que les deux faisceaux puissent entrer en collision en certains endroits où sont disposés des détecteurs. De forts électro-aimants alimentés par des enroulements supraconducteurs refroidis à l'hélium (-269 °C) créent des champs magnétiques intenses agissant sur les faisceaux afin de les maintenir l'un et l'autre sur une trajectoire circulaire. Ce dispositif est très complexe donc fragile et, au début de son fonctionnement, en 2008, a dû faire face à un certain nombre d'incidents relativement sérieux.

Il faut d'ailleurs signaler, au passage, que des ressortissants de 70 pays y travaillent en parfaite harmonie ce qui a fait dire à un théoricien américain :

“ Si les nations unies pouvaient se comporter comme le CERN, le monde s'en porterait mieux”.

Tous les pays officiellement membres du CERN sont européens, ils sont au nombre d'une vingtaine. Un certain nombre de pays sont membres observateurs comme les USA, l'Inde, le Japon, la Russie et la Turquie tout en participant activement aux travaux.

Ainsi sur les 6000 chercheurs on dénombre, par exemple, un millier de physiciens américains.

2. Quelques aspects du fonctionnement

Les faisceaux de protons sont maintenus sur leur *trajectoire* circulaire par des champs magnétiques intenses produits par des *électro-aimants* alimentés par des circuits *supraconducteurs*. Ces champs agissent périodiquement à chaque passage du faisceau pour augmenter la vitesse des particules. Cette action se poursuivra jusqu'à ce que les faisceaux atteignent une vitesse proche de celle de la lumière (à quelques % près) et qu'ils parcourent, alors, le circuit de 27 kms environ 11 000 fois par seconde.

Il est évident qu'on ne pourra jamais "voir" le *boson de Higgs* avec le LHC ; il a, en effet, une très courte durée de vie (10 puissance moins 22 seconde) et il est donc difficile à capturer directement.

On ne pourra donc trouver que les traces d'un *boson de Higgs* à partir des particules produites lors de sa désintégration. Il faudra donc avoir une bonne idée des particules que nous nous attendons à obtenir lors de cette désintégration et c'est là un travail préalable qui échoit surtout aux théoriciens.

Les expérimentateurs font donc entrer les protons en collision et observent les produits issus de cette collision. On peut considérer chaque *proton* comme un sac contenant des *quarks*, des *antiquarks* et des *gluons* (des "partons" au sens de Feynman) qui circulent dans le tube à une vitesse proche de celle de la lumière. Un tel sac, à cette vitesse, se contracte, d'après la relativité, le long de la direction du mouvement et adopte la forme d'une "crêpe" (voir la figure 3). Dans la collision des deux telles crêpes c'est en fait un *parton* d'un *proton* qui interagit avec un parton de l'autre. Il est difficile de connaître la quantité d'énergie impliquée dans une collision car on ignore quels *partons* sont entrés en collision. En réalité c'est là que tout commence par l'interprétation des résultats expérimentaux.

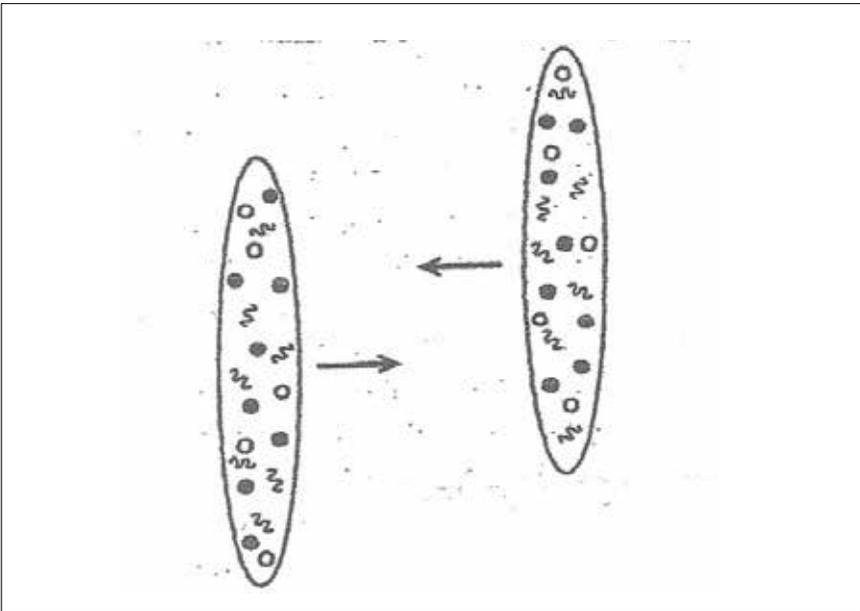


Figure 3. Schéma de deux protons se dirigeant l'un vers l'autre dans l'accélérateur avant leur collision.

Il existe sur le parcours des particules de nombreux appareils de détection ayant des missions diverses. Nous n'évoquerons que ceux qui interviennent dans la détection de Higgs. *Ils sont situés en des points opposés du circuit circulaire.* Ce sont :

La station *ATLAS* ce qui signifie "A torroïdal LHC Apparatus" (c'est-à-dire un appareil torroïdal du LHC).

La station *CMS* ce qui signifie "A compact Muon Solenoid" (C'est-à-dire un solénoïde compact à Muon).

Ces appareils sont énormes et complexes. L'ensemble de l'installation et des instruments pèse plusieurs milliers de tonnes et s'étend sur des distances de l'ordre d'une dizaine de mètres. Chaque station est servie par une équipe de 3000 physiciens. Les deux équipes travaillent en collaboration ce qui n'exclut pas, d'ailleurs, une certaine rivalité.

Comme il est impossible de distinguer directement un éventuel *boson de Higgs*, on ne disposera pour éventuellement constater son existence que des produits de sa désintégration, voire des produits de désintégration des produits de sa désintégration. On peut mesurer la complexité des problèmes que les physiciens ont eu à résoudre.

Chaque faisceau transporte quatre cents paquets de cent milliards de protons circulant vingt millions de fois par seconde. Chaque paquet rencontre un paquet venant en sens opposé et à chacune de ces rencontres une vingtaine *d'interactions* se produisent. A chaque collision apparait une giclée de particules soit, à peu près une centaine de hadrons. L'analyse des différents événements est extrêmement difficile ainsi que l'identification des particules résultantes. De gros moyens de détection et de calcul sont nécessaires au niveau des centres de détection *CMS* et *ATLAS*.

3. Détection et détecteurs

Une collision ne peut donner en définitive que les différentes particules du modèle standard que nous connaissons. Ce sont :

Les quarks

Les gluons Les bosons W, bosons Z, leptons tau, bosons de Higgs

Les électrons et photons

Les neutrinos et gravitons

Les muons

Le détecteur est polyvalent (Voir la Figure 5) il est utilisé aussi bien dans ATLAS que dans CMS. La région centrale contient le détecteur interne qui mesure les trajectoires des particules chargées. L'enceinte suivante contient ce qu'on appelle le *calorimètre électromagnétique* qui capture *photons* et *électrons*. L'enceinte suivante est un *calorimètre hadronique* qui capture les *hadrons*. Enfin l'enceinte extérieure est destinée à enregistrer les traces de *muons*.

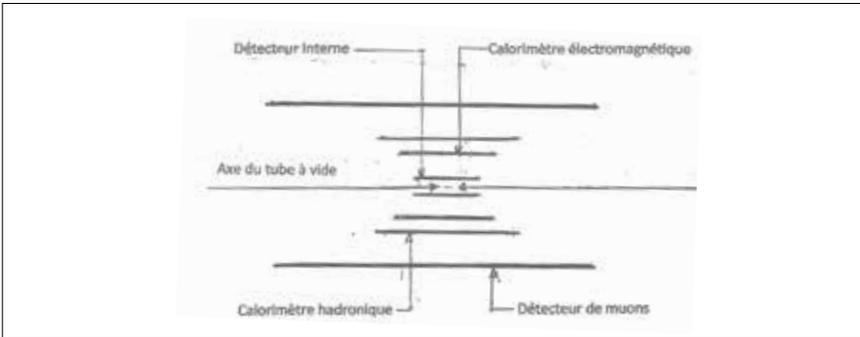


Figure 5. Coupe par un plan axial de l'appareillage montrant l'ensemble des divers détecteurs, chacun étant destiné à un type spécifique de particule.

Les trajectoires des particules dépendent de la charge et de la masse de celles-ci. Les particules neutres comme les photons et les hadrons neutres sont invisibles dans le détecteur interne, mais les particules chargées laissent des trajectoires incurvées (voir la figure 6). Les photons et les électrons sont capturés par le calorimètre électromagnétique tandis que les hadrons le sont par le calorimètre hadronique. Les muons parviennent jusqu'au détecteur externe et les neutrinos échappent totalement à toute détection.

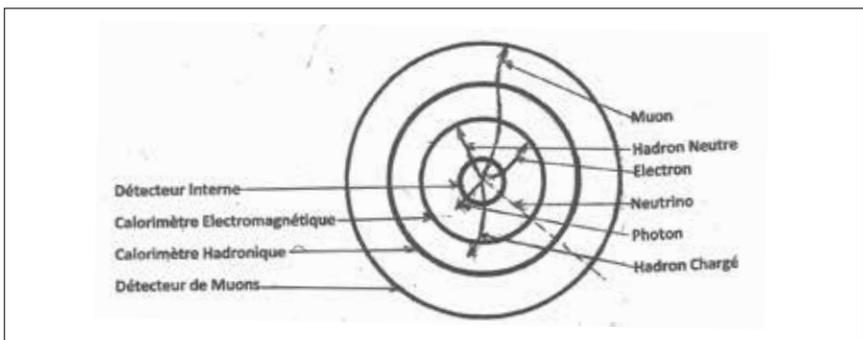


Figure 6. Coupe perpendiculaire à l'axe de l'appareil montrant le comportement des diverses particules issues de la collision au niveau des détecteurs.

S'agissant du traitement des informations obtenues dans le détecteur, précisons que chaque collision de protons (20 millions par seconde) qui produit une centaine de particules, se traduit par un *mégaoctet* de données à traiter. Il y a tellement de données que la majorité de celles-ci sont d'ailleurs détruites mais il convient de sélectionner parmi tous les "événements" ceux qu'il convient de conserver. C'est le rôle du "*trigger*", le déclencheur, combinaison très complexe de matériels et de logiciels qui opère à deux niveaux.

On ne conserve en définitive que quelques centaines d'événements sur les quelques millions qui sont produits par seconde mais ce sont les plus intéressants. Toutefois les scientifiques s'appliquent, actuellement, à affiner encore les déclencheurs.

En définitive il reste, après traitement par ce déclencheur, une centaine d'événements par seconde, chacun étant caractérisé par environ *un mégaoctet* de données qu'il convient d'analyser.

Des dizaines de milliers de scientifiques, exploitant les résultats des expériences obtenus par ATLAS et CMS, travaillent dans les laboratoires et centres de calcul de 35 pays du monde entier. Les informations sont transmises sur des distances parfois considérables (8 000 kms entre le CERN et Caltech par exemple) avec une rapidité et une efficacité reconnues.

Fabiola Gianoli, la physicienne italienne responsable d'ATLAS, a avoué qu'elle avait été plus impressionnée par le fait que le système de transfert des données avait fonctionné sans problème que par les performances mêmes des expérimentateurs.

Les travaux des physiciens s'établissent en trois phases :

- A créer des bosons de Higgs.
- A détecter les particules issues de leur désintégration.
- A déterminer si les particules détectées proviennent vraiment des Higgs, ou de quelque chose d'autre.

4. Différentes phases du travail des physiciens

a) "*Création*" des bosons de Higgs :

Nous savons que pour obtenir des bosons de Higgs, qui ont une masse élevée, il faut accélérer des protons dans le L.H.C., les fracasser les uns contre les autres (Voir la figure 3) et espérer qu'un Higgs sera produit dans la collision où l'énergie des protons est transformée en matière donc en particules en stricte application de la formule d'Einstein : $E=mc^2$

Les protons étant constitués de quarks, de gluons et d'antiquarks virtuels il en résulte que c'est une certaine combinaison de quarks et de gluons qui se fracassent pour libérer un Higgs.

Dans ces collisions un certain nombre de principes seront respectés lors de l'analyse des résultats: ce sont les **lois de conservation** :

Conservation de la charge électrique

Conservation du nombre de quarks

Conservation du nombre de leptons

Ces trois paramètres devront demeurer inchangés lors de l'analyse de toute interaction entre particules connues.

De *multiples processus peuvent conduire à la production de Higgs*. Nous ne les détaillerons pas tous ce qui serait long, compliqué et sans grand intérêt.

Nous en évoquerons un seul, à titre d'exemple :

Il s'agit de celui qui part de deux gluons comme indiqué sur le diagramme de **Feynmann**. Les gluons fusionnent pour créer un boson de Higgs en passant par une étape intermédiaire où interviennent des quarks virtuels ceci étant démontré à l'aide de la théorie quantique des champs.

Ce processus a été imaginé par **Franck Wilczek**, théoricien américain, qui par ses travaux a ouvert la voie à la compréhension des *interactions nucléaires fortes* et reçut pour cela le prix Nobel en 2004 et donc connaissait bien les gluons (Voir la figure 4)

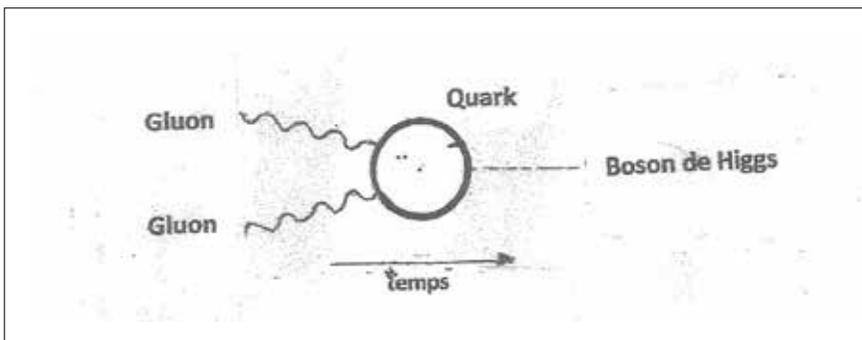


Figure 4. Fusion de deux gluons pour créer un boson de Higgs à l'aide d'une étape intermédiaire faisant intervenir des quarks virtuels (Théorie de Wilczek)

b). Détection des bosons de Higgs :

Il convient de préciser que les *Higgs* créés lors des collisions vont interagir relativement facilement avec les particules de masse élevée puisque le fait d'avoir une masse importante pour une particule implique une forte interaction avec le *Higgs*.

Il reste le plus difficile à accomplir peut-être. Comment savoir de façon certaine qu'un *Higgs* a été effectivement produit ?

Comme toutes les particules lourdes *le boson de Higgs* se désintègre très rapidement, sa durée de vie étant comme nous l'avons vu inférieure à 10^{-21} seconde, ce qui signifie qu'il parcourt quelques milliardièmes de centimètre avant d'être désintégré. Autrement dit il est absolument indétectable directement. On observe donc les produits de désintégration du *Higgs* ainsi que ceux des autres particules issues des collisions. La difficulté sera donc de détecter le minuscule signal afférent au *Higgs* au milieu de la monstrueuse importance du bruit de fond.

Il s'agit donc, d'abord, de savoir quels seront les produits de la désintégration du Higgs.

La figure 7 montre, par des schémas dus à **Feynman**, plusieurs possibilités de désintégration du *Higgs* d'après les résultats obtenus à partir des calculs des théoriciens. Dans le premier cas le *Higgs*, en début de canal va se désintégrer en *bosons W* pour aboutir à des *électrons*, des *muons* ou leurs *antiparticules*.

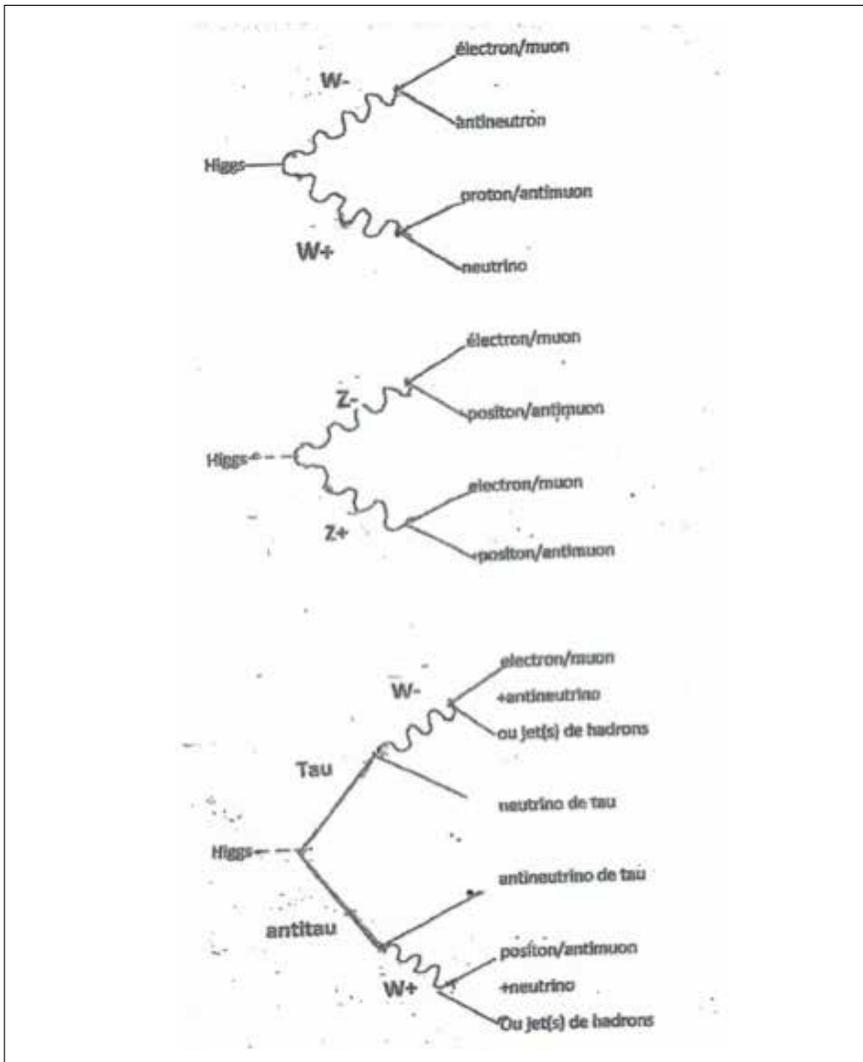


Figure 7. Quelques modes de désintégration du boson de Higgs prévus théoriquement et vérifiés expérimentalement.

Nous allons considérer, plus particulièrement le cas où, grâce à l'apport de particules virtuelles électriquement chargées, le **Higgs** se désintègre en deux photons. Comme les photons sont dénués de masse ils ne peuvent pas se coupler directement au **Higgs** mais celui-ci va d'abord s'insérer dans une particule massive qui, elle, va se désintégrer en donnant une paire de photons.

Ce processus, quoique rare (2%), est, en définitive le plus clair dont on dispose pour caractériser un *Higgs* de 125 GEV.

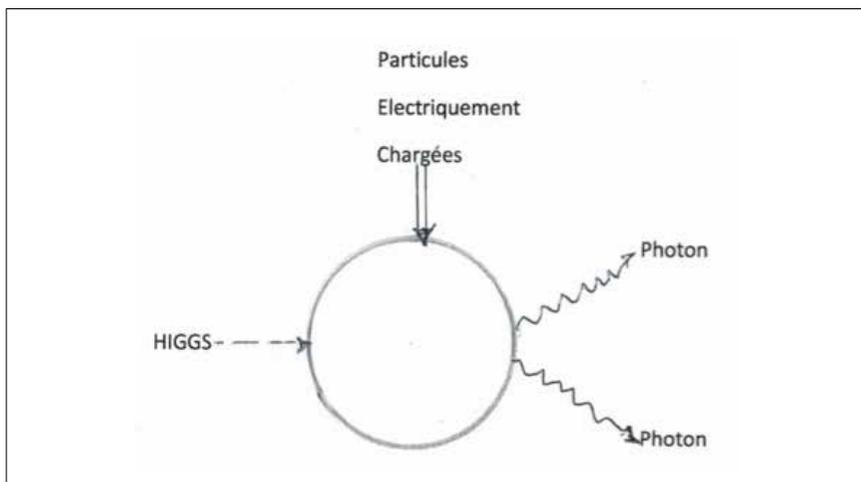


Figure 7 bis. Désintégration du boson de Higgs en deux photons.

On obtient toutefois un nombre suffisant d'événements et le bruit de fond est suffisamment bas pour qu'il soit possible d'observer l'émergence du signal du Higgs au-dessus de ce bruit de fond. On considère donc que la meilleure preuve de l'existence du Higgs provient effectivement des événements à deux photons.

Ces quelques éléments visant à répertorier les différentes manières dont un Higgs peut se désintégrer ne donnent qu'une vue superficielle de la quantité considérable d'efforts théoriques qu'il a fallu déployer pour comprendre les propriétés du boson de Higgs.

L'article de Ellis, Gaillard et Nanopoulos puis un grand nombre de travaux qui sont résumés dans un livre dont le titre en français s'intitule : *"Le guide du chasseur de Higgs"* par Gunion, Haber, Kane et Dawson) donnent une idée de la complexité du problème.

La détermination de la masse du *Higgs* a donc donné lieu à un nombre considérable d'efforts expérimentaux laborieux.

c). *Extraction du signal inhérent au boson de Higgs :*

Mais ces deux particules, les photons, apparaissent également en phase finale de processus qui n'ont rien à voir avec le *Higgs*. Il conviendra de faire une étude de chacun de ces processus dont on sait que chacun d'eux correspond à une

particule, issue des collisions de protons, parfaitement identifiée. Nous allons d'abord supposer qu'il n'existe pas de *Higgs* parmi le faisceau de particules recueillies et par conséquent pas de photons provenant de la désintégration de ceux-ci. Par ailleurs dans chaque cas nous faisons la somme de l'énergie totale des particules issues de la collision et en associant théorie quantique des champs et mesures effectives, nous sommes en mesure de prédire théoriquement le nombre d'évènements (c'est-à-dire de détections) attendus à chaque énergie ou si on préfère pour chaque *particule connue* apparue dans la collision. En représentant ce nombre en fonction de l'énergie (ou de la masse) nous obtenons une courbe lisse : Elle correspond à l'hypothèse nulle, c'est-à-dire à *ce que serait la courbe en l'absence de boson de Higgs*.

La courbe 8 donne les résultats obtenus stations à la station *ATLAS*. Les courbes en pointillé donnent le résultat des calculs théoriques concernant le nombre des "évènements" attendus. Les points indiquent les résultats expérimentaux. On constate qu'ils s'écartent assez peu de la courbe théorique et en l'absence de *Higgs* on n'observerait pas d'écart dépassant les erreurs expérimentales.

Si maintenant il existe un *Higgs*, d'une masse donnée, son effet principal sera d'augmenter sensiblement le nombre d'évènements à l'énergie correspondante avec un écart notable par rapport à la courbe théorique. Ainsi un *Higgs* d'une masse de 125 Gev va créer un certain nombre de particules supplémentaires dont l'énergie est de 125 Gev. Les résultats obtenus par la station *CMS* sont tout à fait semblables à ceux de la station *ATLAS*.

Créer un *Higgs* et le laisser se désintégrer fournit donc un mécanisme de production de particules, qui s'ajoute à tous les processus sans *Higgs*, et qui a typiquement la même énergie totale que la masse du *Higgs*. Cela implique l'existence de quelques évènements supplémentaires au-dessus du bruit de fond pour la masse attendue.

d). Fiabilité des résultats :

Il s'agit donc, pour les chercheurs, de faire la "*chasse à la bosse*" c'est-à-dire de rechercher s'il y a une déviation observable par rapport à la courbe lisse que nous obtenons en l'absence de *Higgs* ce que montre assez bien la figure 8.

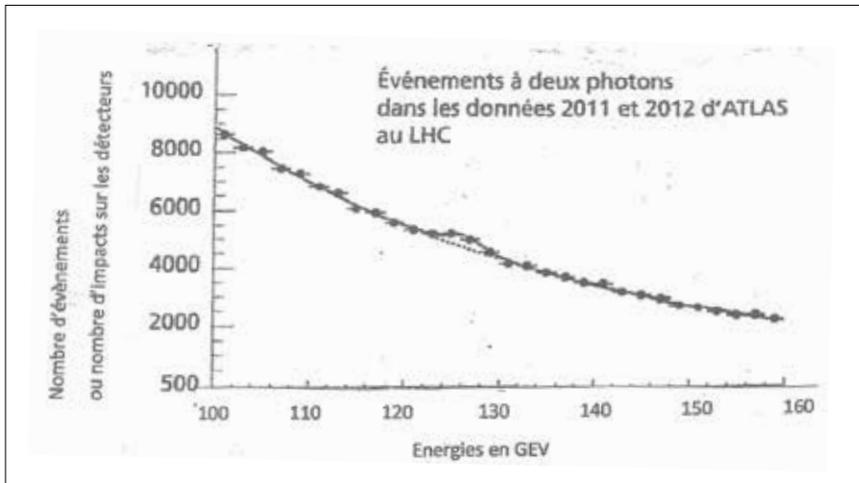


Figure 8.

On constate que ces anomalies correspondent, aux erreurs expérimentales près, à la même énergie donc à une même particule.

On pourrait peut-être afficher un certain scepticisme quant à la réalité du phénomène mais dans tous les canaux détectés théoriquement, on constate la même anomalie, plus ou moins accentuée pour la même énergie.

Quoi qu'il en soit, déterminer le niveau du bruit de fond n'est donc pas une tâche facile et même si nous disposons du modèle standard et de la théorie des champs il n'est pas aisé d'en effectuer une prédiction fiable. On doit faire appel à de puissants programmes informatiques pour simuler au mieux les résultats les plus probables des collisions de protons et ces résultats sont utilisés au niveau des détecteurs eux-mêmes. Le problème est très difficile et la plupart des grands centres mondiaux de calcul sont impliqués recevant les résultats expérimentaux des centres de détection ATLAS et CMS. Il faut donc sans cesse conjuguer les résultats directs de l'expérience avec les données théoriques en respectant le principe de la conservation du nombre de *quarks*, de la charge électrique et du nombre de *leptons*.

La figure 9 montre l'histogramme ou la courbe (en cloche) représentative des probabilités inhérentes à la recherche du Higgs. Dans cette courbe une valeur acceptable de *l'écart-type sigma* a été calculée à partir de multiples études des résultats expérimentaux et à des calculs théoriques d'une grande complexité.

Cet écart-type est porté en abscisse sur la courbe.

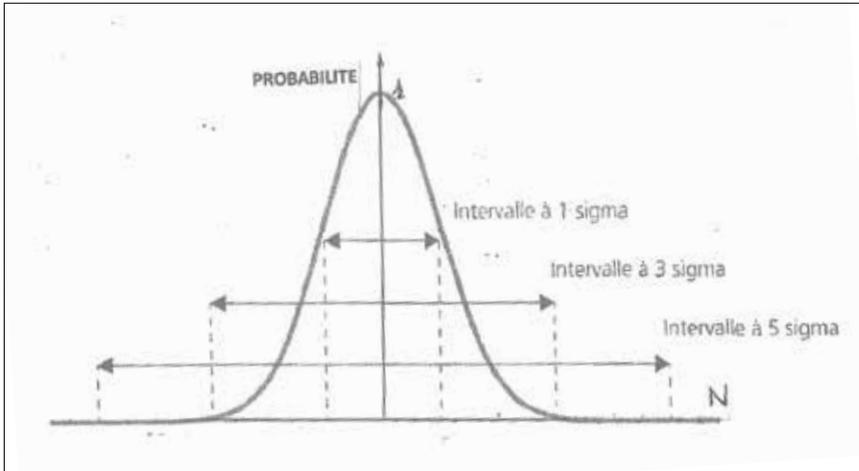


Figure 9

On peut considérer que la courbe représentant les résultats de cette recherche du **Higgs** est assez semblable à celle obtenue dans le cas du jeu de pile ou face avec une pièce que l'on soupçonne truquée. La présence du boson de **Higgs** dans le résultat de la collision correspond à l'existence du "trucage" de la pièce.

La valeur maximale de la courbe, égale à l'unité, correspond à l'absence totale de **Higgs**. On peut dire de façon triviale c'est la probabilité de ne pas détecter de **Higgs**. Au fur et à mesure que l'on se déplace sur l'abscisse (1 sigma, 3 sigma, etc) cette probabilité diminue ou si l'on préfère la probabilité de détecter un boson de **Higgs** augmente.

Au fur et à mesure que des résultats étaient obtenus, il s'agissait de déterminer leur fiabilité c'est-à-dire avec quelle précision ils étaient connus (à combien de sigmas ?).

Une norme informelle adoptée en **physique des particules**, indique qu'une déviation à 3 sigmas ne constitue qu'un élément de preuve.

Il faut une déviation de l'ordre de $\sqrt{5}$ sigmas pour avoir une assurance absolue quant à la fiabilité des résultats obtenus.

Résultat final

Au cours de l'année 2011, les chercheurs du LHC avaient signalé un « pic » proche de 125 GEV pour l'anomalie ou « pic » aussi bien dans les résultats d'ATLAS que dans ceux de CMS, avec un écart calculé de 3,6 sigmas dans les données d'ATLAS et de 2,6 sigmas dans celles de CMS. Même si cela pouvait

laisser bien augurer de la suite, sur le moment ces résultats étaient jugés non concluants.

En 2012, le LHC a accumulé les mesures augmentant d'ailleurs l'énergie des faisceaux qui passaient de TEV à 8 TEV et en améliorant la luminosité des appareillages.

Les responsables du LHC ont alors communiqué les derniers résultats obtenus dans le cadre de la conférence sur la physique des hautes énergies (**International Conference on High Energy Physics**) qui devait se tenir en Australie et à laquelle devaient participer Peter Higgs, François Englert, Gerald Guralnik et Carl Hagen qui étaient intervenus de façon déterminante dans le projet.

En ce jour de juillet 2012, les deux responsables d'une part de la station CMS et d'autre part d'ATLAS prirent successivement la parole.

Pour CMS, Joe Incandela intervint en premier lieu, passant en revue tous les canaux analysés par l'expérience, les événements à deux photons furent les premiers et montraient un « pic » remarquable là où il était espéré à 125 GEV. La signification statistique se fixait à 4,1 sigmas. Ensuite vinrent les événements à quatre leptons chargés qui résultent de la désintégration du Higgs en deux bosons Z, événements qui fournissaient un « pic » au même endroit, cette fois avec une signification de 3,2 sigmas.

Toutefois, la combinaison statistique de ces deux canaux aboutissait à 5,0 sigmas.

Le boson de Higgs était trouvé .

Fabiola Gianotti intervint alors, comme responsable d'ATLAS pour tout confirmer. Pour ATLAS, le résultat à deux photons donnait un pic aussi évident, voisin de 125 GEV, avec une signification statistique à 4,5 sigmas, celui à quatre leptons un pic petit mais discernable, avec une signification à 3,4 sigmas, leur combinaison dépassant légèrement 5 sigmas.

Les valeurs effectives expérimentalement trouvées pour l'énergie correspondant au « pic », c'est-à-dire la masse du Higgs ont été de 126,5 GEV pour ATLAS et de 125,3 GEV pour CMS, ces valeurs se situant tout à fait à l'intérieur des incertitudes expérimentales.

Il y avait un parfait accord entre les données expérimentales parfaitement indépendantes, ce qui rendait indiscutable le résultat global.

Ainsi s'achevait une des plus grandes aventures scientifiques de tous les temps.



Bibliographie

1. Senn CAROLL : *Higgs : le boson manquant*
2. Françoise BARE, Guy DUPLAT : *Particules de vie*
3. Etienne KLEIN : *Les secrets de la matière*
4. COHEN – TANNODJI : *Le boson et le chapeau mexicain*
5. Michel CROZON : *L'univers des particules*
6. LEDERMAN and TERESI : *The god particle* (édition française : *Une sacrée particule*)