

Installation d'une partie du détecteur de l'expérience CMS, le 9 janvier 2007.

## Derniers résultats sur la recherche du boson de Higgs au LHC

Lucia di Ciaccio<sup>(1)</sup> (lucia.di.ciaccio@cern.ch) et Gautier Hamel de Monchenault<sup>(2)</sup> (gautier.hamel.de.monchenault@cern.ch).

(1) Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique des Particules, CNRS et Université de Savoie, BP 110, 74941 Annecy-le-Vieux Cedex, membre de l'expérience ATLAS.

(2) Service de Physique des Particules, Institut de Recherche sur les lois Fondamentales de l'Univers, CEA/Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, membre de l'expérience CMS.

Le 13 décembre 2011, les expériences ATLAS et CMS du LHC ont présenté au CERN, à Genève, les résultats préliminaires de la chasse au boson de Higgs, la pièce manquante du « modèle standard », une théorie qui rend compte de la totalité des résultats expérimentaux observés jusqu'à présent en physique des particules.

Les deux expériences observent un excès d'événements compatible avec la production d'un boson de Higgs de masse située dans la région 124-126 GeV. Cet excès, cependant, est également compatible avec une fluctuation positive des bruits de fond.

### Le boson de Higgs

Dans la théorie de la physique des particules, les forces fondamentales sont transmises par des particules de *spin* entier (les bosons). Ainsi, l'interaction faible, force responsable de la désintégration  $\beta$  des noyaux radioactifs, est transmise par l'échange des bosons  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z^0$ , particules dont la masse (environ 85 GeV, le GeV étant l'unité de masse et d'énergie utilisée en physique des particules) est de l'ordre de 90 fois celle du proton. Dans le cadre du modèle standard (MS), les bosons W et Z acquièrent leur masse par un mécanisme dont la signature est l'existence d'une nouvelle particule, le boson de Higgs. Le même mécanisme est à l'origine de la masse des quarks et des leptons, les particules fondamentales de la matière. Le boson de Higgs est la seule particule fondamentale du MS à ne pas avoir été observée jusqu'à ce jour. Sa masse n'est pas prédite par la théorie. Les résultats des recherches expérimentales de ces vingt dernières années restreignent cependant la gamme des régions possibles de cette masse. Les recherches directes au LEP, le collisionneur électron-positon du CERN dans les années 90, excluent le boson de Higgs pour des masses inférieures à 114,4 GeV. Celles menées au Tevatron [1], le collisionneur proton-antiproton du

Fermilab aux États-Unis, en activité jusqu'en septembre 2011, excluent un boson de Higgs avec une masse comprise entre 156 et 177 GeV. Toutes les limites mentionnées ici sont données à 95% de niveau de confiance. Enfin, les contraintes théoriques découlant de l'ensemble des mesures de précision électrofaibles favorisent l'hypothèse d'un boson de Higgs léger, de masse typiquement inférieure à 200 GeV.

### La recherche du boson de Higgs au LHC

La recherche du boson de Higgs est un thème phare de la phase initiale du programme scientifique du LHC [2], le grand collisionneur de protons du CERN. ATLAS et CMS sont les deux expériences conçues pour explorer, entre autres, un large spectre de masses potentielles et de signatures du boson de Higgs. Les détecteurs ATLAS et CMS diffèrent par leurs structures magnétiques et les techniques de détection mises en jeu, mais leurs performances se rejoignent dans l'excellence en ce qui concerne la détection et la mesure des électrons, des muons et des photons de haute énergie, des jets hadroniques (qui signent la production de quarks et de gluons) et de l'énergie transverse manquante (qui signe la présence de neutrinos dans l'état final).

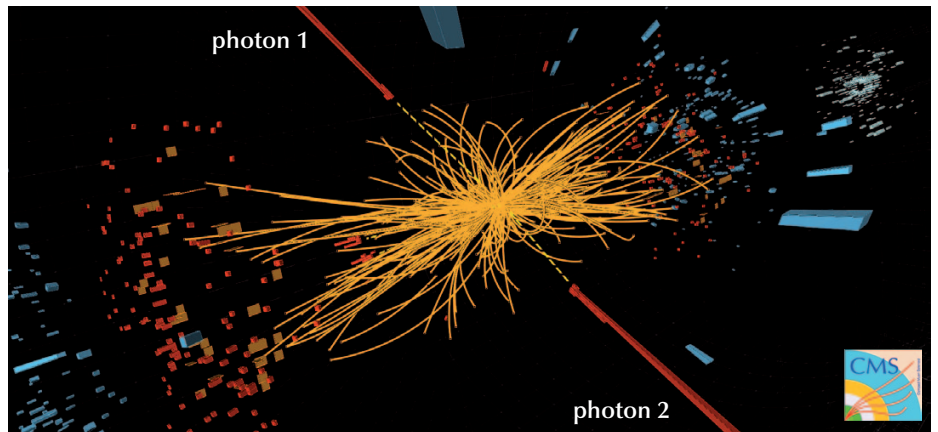
>>>



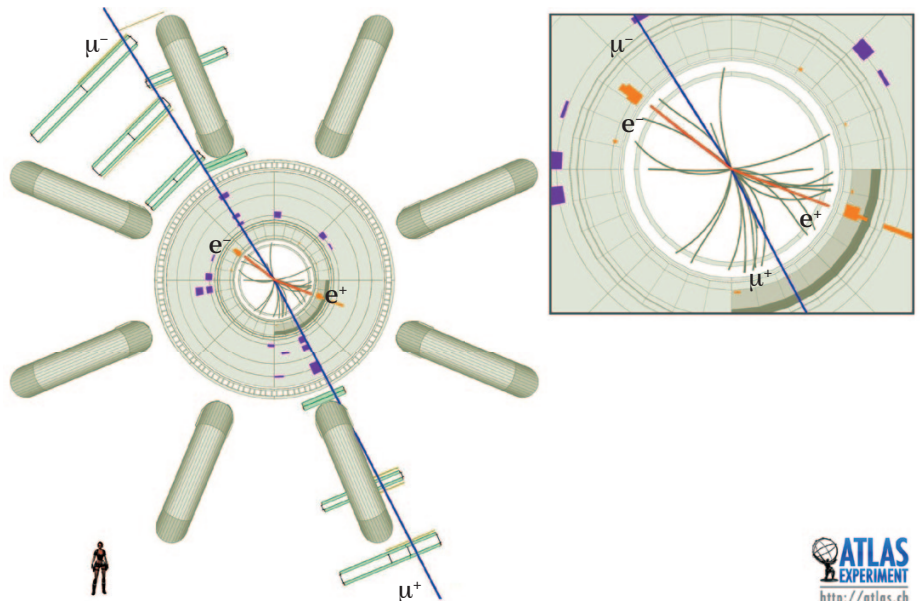
Les résultats présentés le 13 décembre 2011 au CERN s'appuient, pour la première fois, sur l'analyse de la totalité des collisions de protons enregistrées jusqu'à la fin de la campagne de prise de données de 2011, correspondant à un volume de données environ 140 fois supérieur à celui disponible à la fin de l'année 2010. Les conditions d'analyse sont toutefois plus délicates avec les données de 2011, en raison d'une luminosité intrinsèque du LHC bien supérieure à celle de 2010, conduisant à un grand nombre d'interactions inélastiques, typiquement de 10 à 20, qui, à chaque croisement des faisceaux, se superposent aux interactions dures intéressantes. Les équipes du CNRS/IN2P3 et du CEA/Irfu ont joué un rôle de premier plan dans les analyses présentées.

La durée de vie du boson de Higgs (s'il existe) est brève, bien inférieure à  $10^{-22}$  s (tout comme celles des bosons W et Z). Une fois produit dans une collision, le boson de Higgs se désintègre immédiatement selon des voies diverses, et sa découverte éventuelle repose sur l'observation des particules finales produites dans la chaîne de désintégration.

Le MS prévoit qu'en fonction de la masse, certains modes (ou *canaux*) de désintégration jouent un rôle important dans la recherche du boson de Higgs. ATLAS et CMS considèrent huit canaux principaux de désintégration, mais trois d'entre eux sont plus prometteurs que les autres dans l'intervalle de masse compatible avec les contraintes théoriques découlant de l'ensemble des mesures de précision électrofaibles : le canal de désintégration en deux photons ( $\gamma\gamma$ , voir figure 1), le canal de désintégration en deux bosons Z avec quatre leptons dans l'état final (ZZ, voir figure 2), et le canal de désintégration en deux bosons W avec deux leptons et deux neutrinos dans l'état final (WW). Ici, *lepton* désigne un électron ou un muon, de charge positive ou négative. Les canaux de désintégration  $\gamma\gamma$  et ZZ donnent lieu à une signature claire où apparaît un pic à la valeur de la masse du boson de Higgs dans le spectre de masse des particules finales, au-dessus d'un bruit de fond continu. Le canal de désintégration en deux bosons W est déterminant pour établir le résultat final (fig. 3), mais il ne permet pas de mesurer la masse du boson de Higgs de façon précise en raison de la présence des deux neutrinos indétectables dans l'état final.



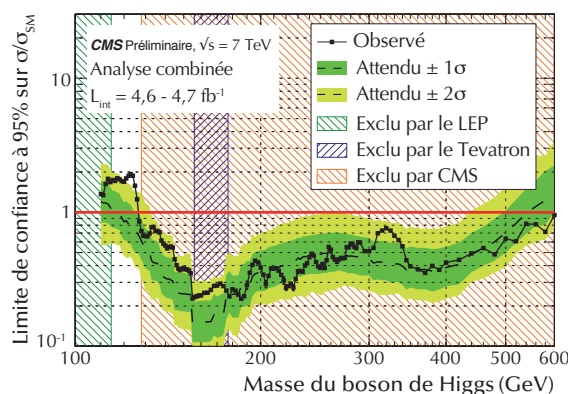
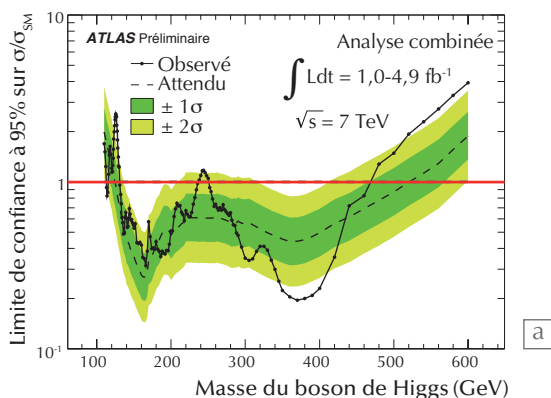
**1. Représentation dans l'espace d'un événement CMS candidat dans la recherche du boson de Higgs dans le canal de désintégration en deux photons.** Dans cet événement reconstruit par ordinateur, les traces des particules chargées produites dans la collision (lignes continues jaunes) sont fortement courbées par le champ magnétique de CMS et s'enroulent autour de l'axe des faisceaux (non représenté). Les volumes rouges et bleus représentent les dépôts d'énergie dans les calorimètres, respectivement électromagnétique et hadronique. Ces volumes pointent vers le point d'interaction et ont une taille radiale proportionnelle à l'énergie déposée. Les deux photons formant le candidat boson de Higgs sont identifiés par des dépôts isolés de très haute énergie dans le calorimètre électromagnétique, représentés par les deux longues tiges rouges (« photon 1 » et « photon 2 »). Les trajectoires des photons sont figurées par des lignes pointillées jaunes issues du point de collision et pointant vers ces tiges.



**2. Représentation d'un événement ATLAS candidat dans la recherche du boson de Higgs dans le canal de désintégration en deux bosons Z** se désintégrant l'un en deux électrons ( $e^+e^-$ ), l'autre en deux muons ( $\mu^+\mu^-$ ). La figure présente une vue dans le plan orthogonal à l'axe des faisceaux du LHC. L'encadré en haut à droite est une vue élargie de la région centrale du détecteur. Les traces de muons sont représentées en bleu, les traces d'électrons ainsi que leurs dépôts dans le calorimètre électromagnétique sont figurés en orange. Les boîtes vertes représentent les chambres à muons traversées par les deux muons de l'événement. Des éléments du détecteur ATLAS, ainsi que les traces des particules qui accompagnent les quatre leptons, apparaissent en gris. La position des signaux enregistrés dans le calorimètre hadronique, correspondant au passage des particules dans ce détecteur, est représentée par des rectangles violets.

## Références

- 1• G. Bernardi, « La recherche du boson de Higgs au Tevatron », *Reflète de la physique* **14** (2009) 10-14.
- 2• B. Mansoulié, « Le LHC, grand collisionneur de hadrons », *Reflète de la physique* **14** (2009) 5-9.
- 3• ATLAS Collaboration, ATLAS-CONF-2011-163, <http://cdsweb.cern.ch/record/1406358>
- 4• CMS Collaboration, CMS-PAG-HIG-11-032, <http://cdsweb.cern.ch/record/1406347>



**3. Limite supérieure à 95% de niveau de confiance, sur le taux de production du boson de Higgs (noté  $\sigma$ ) normalisé par le taux calculé dans le cadre du MS (noté  $\sigma_{SM}$ ), en fonction de la masse du boson de Higgs (exprimée en GeV), pour ATLAS (a) et CMS (b) respectivement.** Dans chaque figure, la courbe pointillée noire donne, en fonction de la masse, la valeur attendu en moyenne de la quantité rapportée en ordonnée dans l'hypothèse de la non-existence du boson de Higgs, et les bandes vertes et jaunes correspondent aux incertitudes (une déviation standard en vert, deux déviations standard en jaune) sur cette quantité. Cette courbe et ces bandes sont obtenues par l'étude des bruits de fond à l'aide d'échantillons de contrôle dans les données ou par la simulation. Une valeur inférieure à 1 signifie que l'expérience a atteint une sensibilité suffisante pour commencer à détecter le boson de Higgs. La courbe continue noire donne la limite effectivement observée en fonction de la masse. Les régions de masse du boson de Higgs pour lesquelles la courbe continue noire se situe sous la ligne horizontale rouge sont exclues avec 95% de niveau de confiance ou plus. Dans les régions où la courbe noire continue se situe au-dessus de la courbe noire en pointillés, le nombre d'événements observé est supérieur au nombre d'événements attendu dans l'hypothèse où le boson de Higgs n'existe pas. Pour confirmer une découverte, il faudrait que chaque expérience observe à la même masse un excès supérieur à 5 déviations standard dans une région non exclue.

## Les résultats de l'expérience ATLAS

Les résultats combinés de l'analyse d'ATLAS [3] dans tous les canaux de désintégration limitent la région de masse dans laquelle le boson de Higgs pourrait se trouver à deux étroites fenêtres, entre 115,5 et 131 GeV, et entre 237 et 251 GeV. Dans le canal  $\gamma\gamma$ , l'analyse montre un excès d'événements à une masse d'environ 126 GeV par rapport au nombre d'événements attendus dans l'hypothèse où le boson de Higgs n'existe pas. La signification statistique locale de cet excès est de 2,8 déviations standard (ici, locale signifie qu'on ne tient pas compte de la dilution due au fait que, dans toute distribution statistique, de telles fluctuations sont attendues). Dans le canal ZZ, le spectre de masse des quatre leptons présente trois légers excès, à des masses de 125, 244 et 500 GeV, par rapport au nombre d'événements de bruit de fond estimés. Le résultat de l'analyse combinée donne un excès avec une signification statistique locale de 3,6 déviations standard (3,6 sigma) à une masse d'environ 126 GeV. Les trois canaux principaux de désintégration contribuent à cet excès :  $\gamma\gamma$  (2,8 sigma), ZZ (2,1 sigma) et WW (1,4 sigma). Cet excès est compatible avec le taux de production du boson de Higgs calculé dans le cadre du MS, mais l'est tout aussi bien avec une fluctuation statistique

positive du nombre d'événements de bruit de fond. Si l'on tient compte de la probabilité qu'un excès similaire à l'excès observé à 126 GeV puisse se produire à une autre valeur de masse dans la région analysée, la signification statistique se réduit à 2,3 sigma.

## Les résultats de l'expérience CMS

L'analyse combinée présentée par l'expérience CMS [4] exclut l'existence du boson de Higgs pour des masses comprises entre 127 et 600 GeV. Or, la valeur observée de 127 GeV pour la borne inférieure de cet intervalle d'exclusion est de 10 GeV supérieure à la valeur attendue en moyenne par CMS dans l'hypothèse de la non-existence du boson de Higgs. Cette situation découle d'excès d'événements qui sont observés de façon cohérente dans les trois canaux de désintégration sensibles dans cette gamme de masse. Dans le canal  $\gamma\gamma$ , le bruit de fond est ajusté à partir des données entre 110 et 150 GeV. Les données fluctuent autour de l'ajustement moyen. En deux régions, autour de 124 GeV et de 135 GeV, les données de CMS présentent un excès de l'ordre de deux déviations standard par rapport à l'ajustement. Dans le canal ZZ, CMS constate un léger excès d'événements en dessous de 150 GeV, avec deux régions où se concentrent dans chacune trois événements dont les masses sont compatibles entre elles dans les marges

d'erreur, autour de 119 GeV et autour de 128 GeV, aucun de ces excès n'étant significatif à plus de deux déviations standard. Lorsque CMS regroupe ses résultats, les excès dans les canaux  $\gamma\gamma$  et ZZ se combinent pour dépasser une signification statistique de deux déviations standard au voisinage de 124 GeV. Comme pour ATLAS, ce résultat est compatible avec l'hypothèse du boson de Higgs, mais aussi avec une fluctuation positive des bruits de fond attendus.

## Conclusion

En conclusion, ATLAS et CMS ont présenté des analyses préliminaires de recherche du boson de Higgs avec l'ensemble des données 2010 et 2011 au LHC. Les deux expériences observent un excès d'événements compatible avec la production d'un boson de Higgs de masse dans la région 124-126 GeV, mais dont la signification statistique ne permet pas d'être assuré qu'il résistera à l'épreuve du temps. La campagne 2012 du LHC devrait fournir aux expériences entre cinq et dix fois plus de collisions de protons, à une énergie de collision légèrement supérieure. L'analyse de ces données sera une étape importante, qui pourrait permettre de trancher la question de l'existence ou de la non-existence du boson de Higgs du Modèle Standard. ■