

Ecrire pour une revue de vulgarisation

- Luc Allemand, journaliste

Trois histoires de physique

- Luc Allemand, journaliste

1. Le boson de Higgs



Mai 2003 : Qui attrapera le Higgs?



Mai 2008

L'ENTRETIEN

François Englert : « Le LHC détectera le boson de Higgs... s'il existe »

l'entretien - par Propos recueillis par Franck Daninos dans mensuel n°419 daté mai 2008 à la page 58 (2194 mots) | Gratuit

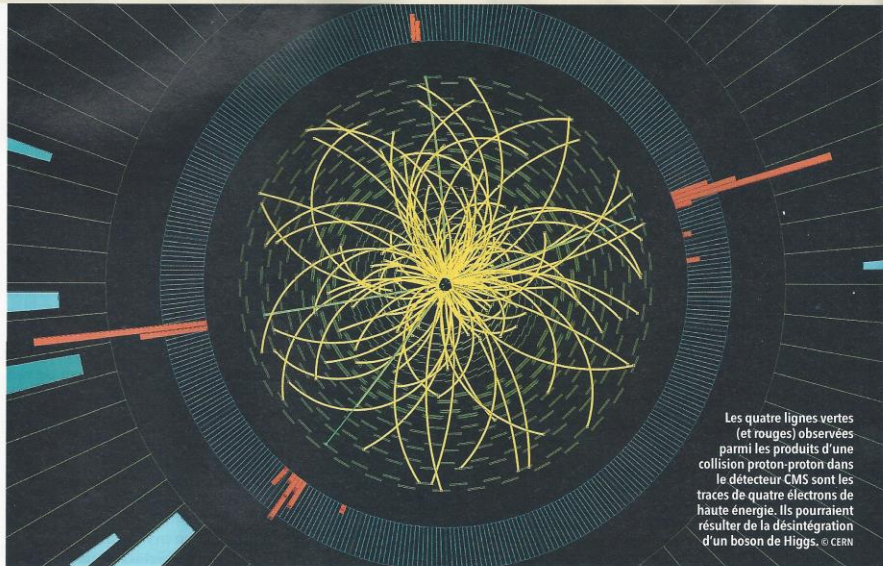
L'existence de cette mystérieuse particule a été pressentie par trois physiciens il y a plus de quarante ans. Cet été, un nouvel accélérateur de particules, le LHC, le traquera à son tour. Mais comment le boson de Higgs est-il devenu le Graal de la physique des particules ?

la recherche : Au vu des moyens investis - plus de 6 milliards d'euros ! -, le LHC constituera la plus importante expérience de physique jamais réalisée. Elle vise plusieurs objectifs, mais le principal est l'observation d'une particule dont vous êtes le co-inventeur. En quoi est-elle si importante pour les physiciens ?

François Englert : L'hypothèse de son existence est ancienne. Elle a été proposée dans les années 1960 par Robert Brout et moi-même, puis peu après, et indépendamment, par le physicien écossais Peter Higgs. Cette particule a été dénommée « boson scalaire » et plus communément « boson de Higgs » - en référence à ce dernier. Elle a une grande importance pour la physique, car



Novembre 2008



Les quatre lignes vertes (et rouges) observées parmi les produits d'une collision proton-proton dans le détecteur CMS sont les traces de quatre électrons de haute énergie. Ils pourraient résulter de la désintégration d'un boson de Higgs. © CERN

Fin de traque pour le boson de Higgs

En mars 2012, le Grand Collisionneur de hadrons du CERN recommencera à accumuler des données, à la recherche de la particule responsable de la masse. L'annonce de sa découverte, ou de son inexistence, pourrait venir dès juillet.

L'essentiel

- > LE CERN a construit un collisionneur, le LHC, pour détecter le boson de Higgs.
- > LES DONNÉES accumulées ont réduit l'intervalle de masse où on pourrait le trouver.
- > QUELQUES MOIS d'expériences devraient suffire pour le découvrir, ou démontrer qu'il n'existe pas.

L'heure de vérité sonnera bientôt pour le boson de Higgs. En 2012, les physiciens du LHC, collisionneur de particules du CERN, installé près de Genève, annonceront si cette particule, la plus recherchée de la physique, existe ou non. D'ores et déjà, ils ont quelques raisons d'espérer que cette annonce sera positive. Dans les données collectées en 2011 par les deux détecteurs, Atlas et CMS, ils ont en effet repéré des signes ténus qui trahiraient la présence du boson. « Il est trop tôt pour parler de découverte mais c'est extrêmement excitant », confie Yves Sirois, du laboratoire

Leprince-Ringuet, à Palaiseau, responsable de CMS pour la France.

Si cette accumulation de données excite tant les physiciens, c'est qu'elle apportera la réponse à une question posée il y a près de cinquante ans. Dans les années 1960, plusieurs théoriciens ont en effet proposé l'existence d'une particule (nommée plus tard d'après l'un d'eux, l'Écossais Peter Higgs) capable de doter toutes les autres d'une masse. Progressivement, cette particule est devenue l'une des pierres angulaires du modèle standard de la physique des particules, qui décrit les

constituants élémentaires de la matière et trois des quatre forces qui s'exercent entre eux (il ne décrit pas la gravitation).

Mais en physique, la théorie, aussi solide soit-elle, ne remplace jamais l'expérience. Il faut donc détecter cette particule pour confirmer sa réalité. C'est dans ce but que le LHC a été construit. Dans un anneau de 27 kilomètres de circonférence creusé à 100 mètres sous terre, deux faisceaux de protons circulant à une vitesse proche de celle de la lumière sont projetés l'un contre l'autre à des énergies encore jamais atteintes dans les autres accélérateurs de particules. Au cours des violentes collisions qui en résultent, de nouvelles particules plus massives sont créées, dont, espèrent les physiciens, le boson de Higgs.

La masse du boson. Démarrés en novembre 2009, les chocs n'ont pas encore montré de signaux incontestables de cette insaisissable particule. En juillet dernier, les chercheurs pensaient pourtant avoir mis la main dessus. Mais les données recueillies le mois suivant n'ont pas confirmé ces premiers indices.

Avec cinq fois plus de données analysées depuis, les scientifiques ont désormais acquis une certitude : la masse du boson de Higgs est nécessairement située entre 115 et 130 gigaélectronvolts* (GeV), comme le CERN l'a annoncé officiellement le 13 décembre dernier. Le LEP, précédent accélérateur du CERN, n'en avait en effet

* LE GIGAÉLECTRONVOLT est l'unité de masse utilisée en physique des particules, en vertu de l'équivalence entre la masse et l'énergie $E = mc^2$.

* L'INTERACTION NUCLÉAIRE FAIBLE est l'une des quatre forces fondamentales dans l'Univers.

vu aucune trace au-dessous de 115 GeV. Et les 400 000 milliards de collisions enregistrées par chacun des détecteurs Atlas et CMS rien qu'en 2011 ont permis d'exclure une masse supérieure à 130 GeV.

Mieux encore, dans cette zone très réduite, les chercheurs du LHC ont observé des signaux troublants. Les deux expériences Atlas et CMS ont enregistré dans la même région (aux environs de 125 GeV), et ce, indépendamment l'une de l'autre, « un léger excès d'événements qui pourrait être la signature du boson de Higgs, la trace de sa désintégration en d'autres particules », explique Daniel Fournier, du laboratoire de l'accélérateur linéaire à Orsay, responsable d'Atlas pour la France. Mais il faut rester extrêmement prudent : ces signaux pourraient aussi être le résultat du bruit de fond produit par des événements parasites. Car si les physiciens savent prédire la façon dont le boson de Higgs doit se désintégrer immédiatement après sa création, d'autres processus sans rapport avec celui-là possèdent une signature proche, voire semblable.

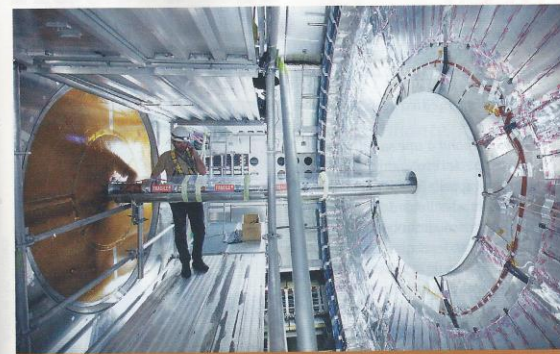
La seule solution pour discriminer le très faible signal du Higgs de cet inévi-

table bruit de fond est d'accumuler les données. « En 2012, on devrait recueillir autant de données qu'en 2011, voire le double, note Johann Collot, du laboratoire de physique subatomique et de cosmologie, à Grenoble, et membre de l'expérience Atlas. Ce sera suffisant pour voir si ces fluctuations sont consolidées par la statistique, ou si au contraire elles s'évanouissent. Et pour dire avec certitude si le Higgs existe ou non. »

Pour les physiciens les plus optimistes, il y a une autre raison de croire en l'existence du boson de Higgs : la région délimitée par le LHC où pourrait exister la particule tant recherchée est conforme à leurs attentes. En effet, bien que le modèle standard ne donne aucune indication quant à la masse du boson de Higgs, des expériences menées dans d'autres accélérateurs de particules suggèrent qu'il serait légèrement plus lourd que les bosons W et Z, responsables de l'interaction nucléaire faible*, soit moins que 130 GeV. Et une autre théorie baptisée supersymétrie, extension du modèle standard, va dans le même sens en prédisant aussi une valeur pour cette masse inférieure à 130 GeV.

La découverte du Higgs représenterait un énorme triomphe pour le modèle standard. Un succès de plus pour une théorie qui n'a jamais été remise en question par les expériences. « Une fois que nous l'aurons capturée, il faudra étudier en détail les propriétés de ce boson », explique Johann Collot. Et notamment vérifier s'il s'agit de la version la plus simple décrite par le modèle standard ou d'une version plus complexe, notamment celle imaginée par la supersymétrie.

L'absence du boson de Higgs serait bien entendu une déconvenue. Mais cela n'en resterait pas moins une grande avancée, obligeant les physiciens à repenser leurs modèles. L'annonce pourrait être faite dès juillet, à l'occasion de la grande conférence de physique des particules à Melbourne. Pour cela, le LHC, arrêté pendant l'hiver, devra, après sa réouverture en mars prochain, fonctionner à un régime plus soutenu qu'en 2011. ■ Julien Bourdet



Le détecteur Atlas, ici lors d'une opération de maintenance en janvier 2011, a lui aussi enregistré des événements qui pourraient correspondre à la formation de bosons de Higgs. © CLAUDIA MARCELLONI/CERN

Pour en savoir plus

> <http://bit.ly/LHCCERN> L'Organisation européenne pour la recherche nucléaire présente le Grand Collisionneur de hadrons.

N° 466 • 6,50€ JUILLET-AOÛT 2012

LA Recherche

L'actualité des sciences

Numéro
d'été
116 pages

Spécial PHYSIQUE DU XXI^e SIÈCLE

Matière noire Boson de Higgs
Neutrinos Théorie des cordes
Supersymétrie Constante cosmologique
Énergie sombre Particules
Expansion Gravitation quantique
de l'Univers Énergie du vide
Ondes gravitationnelles Trous noirs

ARCHÉOLOGIE : la saga
de la grotte Chauvet



M 01108-466 - F. 6,50 € - RD



MENSUEL DOM 6,90 € BEL 7,50 € LUX 7,50 € D 8,20 € ESP 7,50 € GR 7,50 € ITR 7,50 € POR 7,50 € CAN 10,50 \$ CAN 13,15 \$ MAR 6,50 DH TUN 6,50 TND MAYOITE 8,90 € TOM 5,970 XPF TOM A 1,620 XPF ISSN 02955711

Juillet 2012

Là où se cache le boson de Higgs

S'il est un résultat attendu, c'est bien la découverte du boson de Higgs, particule clé de l'édifice théorique décrivant les interactions fondamentales. Au moment où l'on écrit ces lignes, les mesures permettent surtout d'affirmer là où il n'est pas.

> Le boson de Higgs

Les particules élémentaires et leurs interactions sont aujourd'hui décrites par un cadre théorique, le « modèle standard ». Ce modèle ne répond pas à une question fondamentale : pourquoi les particules ont-elles une masse ? La solution la plus simple pour y remédier est d'introduire dans ce modèle un mécanisme qui postule l'existence d'une nouvelle particule, le boson de Higgs. Ce serait en interagissant avec lui que toutes les autres particules acquerraient une masse. Mais le modèle ne prédit pas la masse de ce boson de Higgs. Seul un instrument capable d'explorer une large gamme d'énergie, comme le Grand collisionneur de hadrons (LHC) à Genève, permet donc sa recherche expérimentale.



© MAXIMILIEN BRACCERRA 2005

> Les expériences Atlas et CMS

Au LHC, deux faisceaux de protons sont accélérés dans un anneau souterrain. Ils ont atteint une énergie de 4 000 gigaelectronvolts (GeV) chacun en avril 2012. Les expériences, Atlas et CMS, sont installées aux points de rencontre de ces faisceaux pour détecter toutes les particules produites par leurs collisions. Elles analysent l'énergie, la direction et l'identité afin de repérer toute trace du boson de Higgs.

> Un événement vu dans le détecteur Atlas

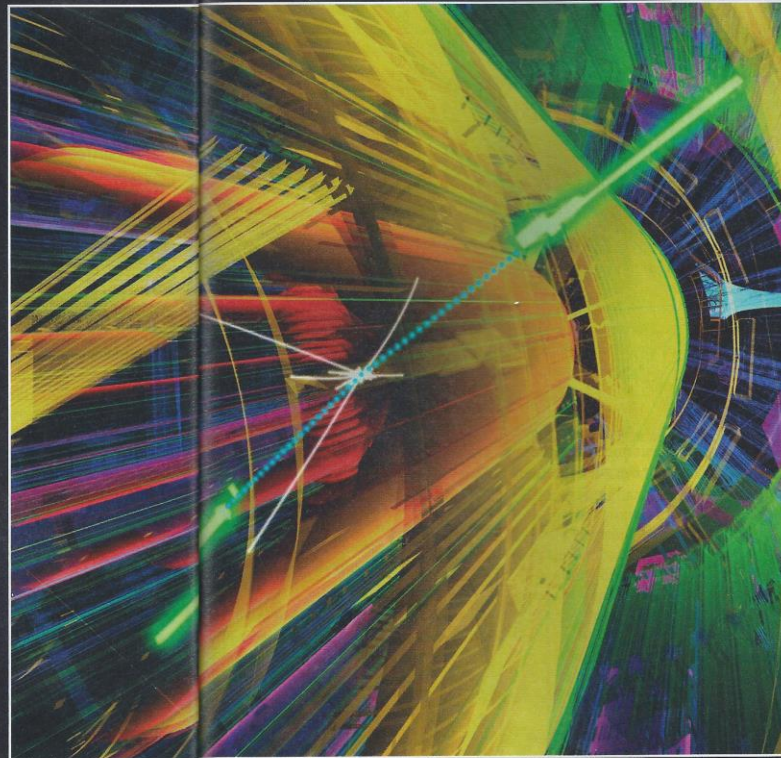
Cet événement, enregistré par le détecteur Atlas, est un bon candidat d'une collision qui aurait produit un boson de Higgs s'étant, à son tour, désintégré en deux photons. Surimposées aux différents éléments du détecteur, on distingue les traces des particules sortant du point de collision. En particulier, les lignes blanches correspondent aux particules chargées de basse énergie. Apparaissent aussi clairement deux dépôts intenses d'énergie (en vert), mesurés dans le calorimètre. Ces signaux correspondent à ceux que devraient provoquer les deux photons, dont la trajectoire à partir du point de collision est représentée en pointillés bleus.

> Zones d'exclusion

Les différentes expériences ont éliminé au fur et à mesure les valeurs possibles pour la masse du boson de Higgs (voir ci-contre). Le LEP, prédécesseur du LHC, avait exclu dès 2000 toute masse inférieure à 114 GeV (en violet). Et l'état de l'art daté de mars 2012 – Tevatron au Fermilab à Chicago (en jaune), CMS au LHC (en vert), Atlas au LHC (en rouge) – montre qu'il ne reste plus qu'une fenêtre très restreinte autour de 125 GeV, sans oublier les très hautes énergies non explorées. Fin 2012, trois à quatre fois plus de données qu'en 2011 devraient avoir été collectées et permettre de trancher quant à l'existence du boson de Higgs. Les prochains résultats sont attendus pour ce mois de juillet. À suivre sur <http://larecherche.typepad.fr/boson>

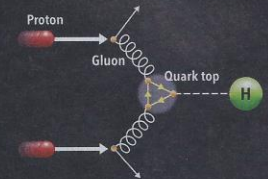
de Higgs

PAR SANDRO DE CECCO, MEMBRE DE L'EXPÉRIENCE ATLAS, LPNHE, UNIVERSITÉ PARIS VII-DIDEROT.



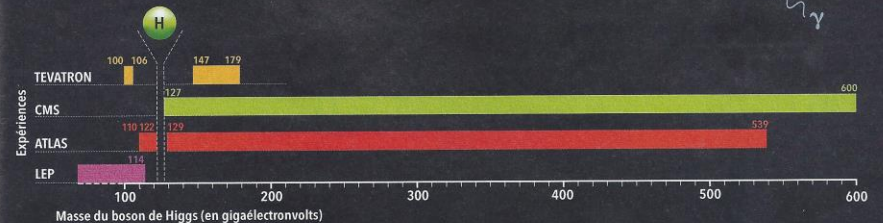
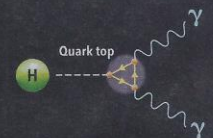
> La production du boson de Higgs

Dans les collisions du LHC, l'un des constituants de chaque proton – quark ou gluon – participe au mécanisme de production du boson de Higgs. Ci-dessous, ce sont deux gluons qui, par un processus de fusion mettant en jeu un couplage intermédiaire, avec des quarks top, conduisent au boson.



... et sa désintégration

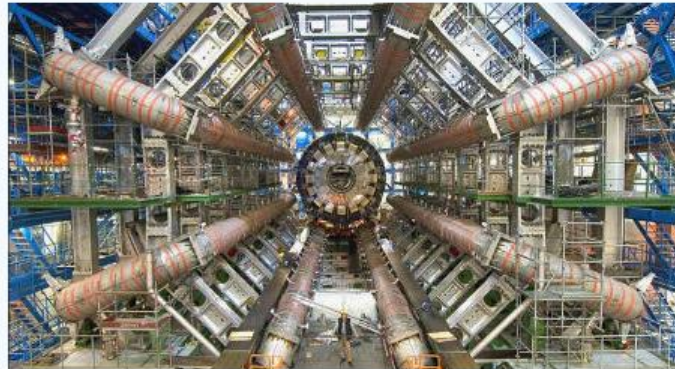
Le boson de Higgs se désintègre ensuite, par le biais d'un autre couplage, en deux photons γ . Ce mode de production-désintégration est particulièrement pertinent si le boson de Higgs a une masse autour de 125 GeV. D'autres modes sont aussi recherchés. Et c'est la combinaison de tous les résultats qui permet de conclure à la découverte ou non.



ET AUSSI

Le boson de Higgs enfin découvert !

et aussi - 03/07/2012 par Fabien Goubet (1160 mots)



Les physiciens du CERN ont annoncé avoir mis la main avec une quasi-certitude sur le boson de Higgs lors d'une grande conférence, mercredi 4 juillet à Genève.

Cette fois, il s'agit bien du fameux boson de Higgs. Les physiciens travaillant à Genève dans le grand collisionneur de hadrons, le LHC, ont annoncé mercredi 4 juillet la découverte d'une nouvelle particule, "du boson le plus lourd jamais observé, autour de 125-126 gigaélectronvolts", dont les caractéristiques sont compatibles avec le boson de Higgs.

Clé de voûte ou pierre angulaire de la physique moderne, particule de Dieu...les métaphores ne manquent pas pour qualifier l'importance de ce boson, traqué depuis près de cinquante ans.

Restez connectés sur larecherche.fr à l'occasion de cette journée exceptionnelle pour :

• [suivre en direct la conférence](#) de l'organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN).

NOTES

Suivez le [décryptage des annonces du CERN](#) par Sandro de Cecco, membre de l'expérience Atlas.

Sur le même thème, *La Recherche* a publié :

> [Entretien avec François Englert](#) (PDF, mai 2008)

> [Et si le Higgs n'existait pas ?](#) (PDF, novembre 2008)

> [L'après-LHC s'organise](#) (PDF, novembre 2008)

> [Entretien avec Geneviève Bélanger](#) (PDF, septembre 2010)

> [Qui attrapera le Higgs ?](#) (PDF, mai 2003)

SUR LE MÊME THÈME

- [Boson de Higgs : la découverte commentée par les physiciens](#)
- [Le boson de Higgs enfin dévoilé](#)
- [1. Boson de Higgs : la découverte qu'attendaient les physiciens](#)
- [1. Boson de Higgs : la découverte qu'attendaient les physiciens](#)
- [La course au boson de Higgs relancée ?](#)

ARTICLES

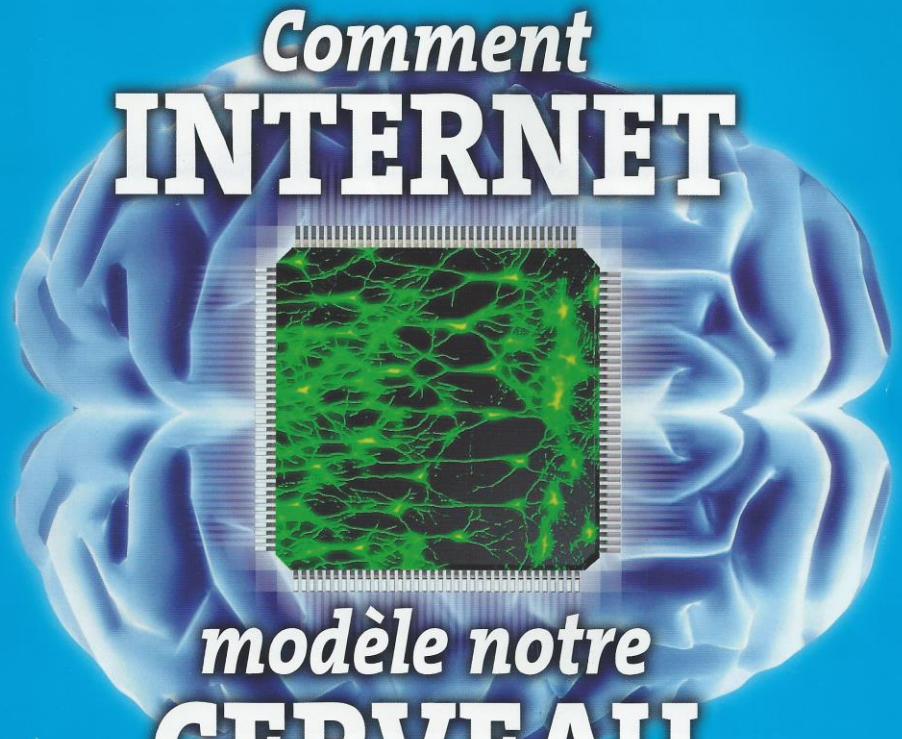
Juillet 2012

N° 467 • 6,20€ SEPTEMBRE 2012

LA Recherche

L'actualité des sciences

Comment
INTERNET



modèle notre
CERVEAU

**BOSON DE HIGGS :
la découverte
historique**



François Englert et Peter Higgs lors de l'annonce officielle de l'existence de la particule qu'ils ont imaginée en 1964

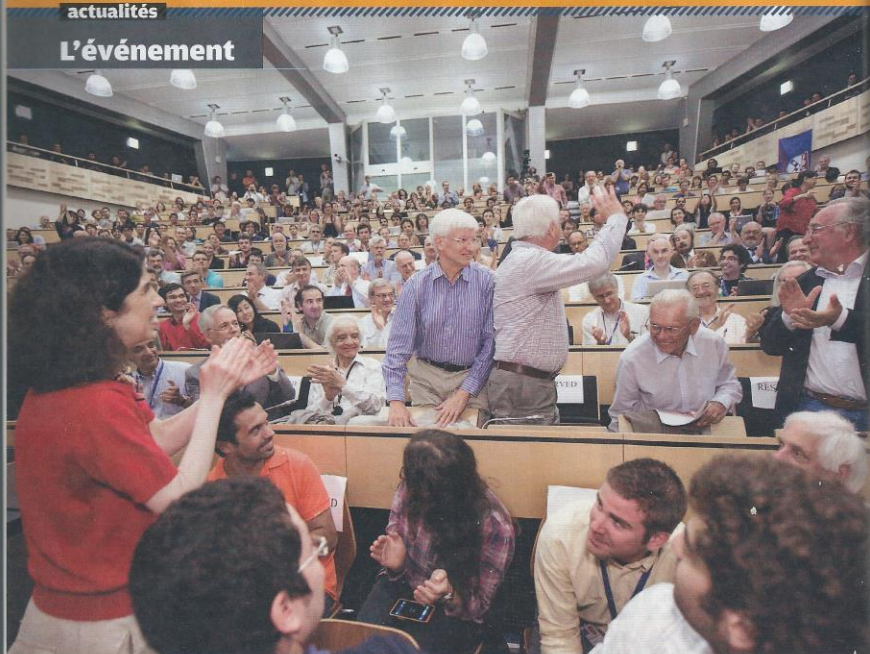
M 01108 - 467 - F - 6,20 €



MENSUEL DOM 6,70 € BEL 7,20 € LUX 7,20 € D 7,90 € ESP 7,20 € GR 7,20 € IR 7,20 € ITR 7,20 € PORT CONT 7,20 € CAN 9,75 \$ CAN CH 12,40 FS MAR 60 DH TUN 6,10 TTD MAYOTE 8,70 € TOM SURFACE 9,20 XPF TOM ANION 1,600 XPS - ISSN 0095-8711

Septembre 2012

L'événement



Le boson de Higgs enfin dévoilé

Le 4 juillet 2012, les physiciens du CERN annonçaient la découverte d'une particule dont l'existence est indispensable à notre compréhension du monde. Retour sur cette journée qui restera inscrite dans l'histoire de la physique des particules.

Par **Pascaline Minet**, journaliste.

Ce matin du 4 juillet 2012, c'est l'effervescence dans la banlieue de Genève. Au Laboratoire européen de physique des particules, plus connu sous le nom de CERN, des centaines de physiciens sont venus assister à un séminaire scientifique.

De l'autre côté de la Terre, à Melbourne, leurs collègues qui participent au Colloque international de physique des hautes énergies, qui se déroule tous les deux ans (ICHEP, selon son acronyme anglais), se sont eux aussi rassemblés dans un amphithéâtre pour assister en direct à l'événement.

Dans la salle de conférences du CERN, la porte-parole de l'expérience Atlas, Fabiola Gianotti (à gauche), vient de conclure à la découverte du boson de Higgs. Toute la salle applaudit avec elle quatre anciens directeurs du CERN, présents pour l'occasion.

© MAXIMILIEN BRICE, LAURENT EGLI/2012 CERN

L'événement ? Le séminaire accueille deux communications qui feront le point sur la recherche du boson de Higgs, dans le Grand collisionneur de hadrons (LHC). Cette particule, dont l'existence a été prédite il y a plus de quarante ans, est devenue au fil du temps l'un des éléments essentiels du « modèle standard », qui décrit les particules élémentaires et leurs interactions.

Seuls quelques centaines de physiciens, parmi les milliers qui ont participé aux expériences, ont pu prendre place dans l'amphithéâtre où ont lieu les exposés. Des dizaines de journalistes se sont massés dans une salle attenante afin de suivre, eux aussi, les échanges. L'excitation est à son comble : depuis quelque temps déjà, des blogs spécialisés annoncent que le boson a été découvert. Que vont donc annoncer les porte-parole des deux expériences installées sur le LHC ?

En attendant les orateurs, les regards convergent vers deux physiciens aux cheveux blancs : l'Écossais Peter Higgs, 83 ans, et le Belge François Englert, bientôt 80 ans. S'ils sont présents, n'est-ce pas parce que le modèle qu'ils ont proposé indépendamment en 1964 va enfin être confirmé ? Une troisième équipe, américaine, était arrivée la même année, mais un peu plus tard, à des conclusions semblables.

Ces théoriciens cherchaient alors à expliquer pourquoi le photon, qui transmet la force électromagnétique, ne possède pas de masse, tandis que d'autres particules, les bosons W et Z, responsables d'une autre interaction fondamentale appelée force électrofaible, en possèdent une. Le postulat de ces physiciens : notre Univers baigne dans un champ qui donne leur masse aux particules. Ces physiciens ont ultérieurement fait l'hypothèse que ce champ devait être incarné par une particule... qui restera connue sous le nom de « boson de Higgs », bien que l'Écossais n'en soit pas

le seul inventeur. Plus l'interaction entre une particule donnée et le champ porté par ce boson est forte, plus la masse de cette particule est importante.

Les physiciens cherchent à confirmer expérimentalement l'existence de cette particule depuis la fin des années 1980. Mais ils ne savaient pas, au départ, où la chercher précisément. Le modèle standard ne permet pas, en effet, de calculer *a priori* la masse d'une particule : on ne la connaît que parce qu'on la mesure !

En aveugle. Ainsi, les premières expériences, menées grâce au Grand collisionneur électron-positron du CERN (le LEP), ou grâce au Tevatron, installé au laboratoire Fermilab, près de Chicago, aux États-Unis, ont démarré en aveugle. Dans ces expériences, comme dans celles du LHC aujourd'hui, deux faisceaux de particules sont accélérés et envoyés l'un contre l'autre. Leurs collisions à haute énergie génèrent des particules plus lourdes, parmi lesquelles, espère-t-on, le boson de Higgs. Le LEP et le Tevatron ont tous deux été arrêtés sans avoir mis en évidence la formation de celui-ci. En revanche, ils ont permis d'exclure expérimentalement certaines gammes de masse, confirmant ainsi qu'un collisionneur de plus grande énergie serait nécessaire pour le trouver, s'il existait.

C'est dans cet objectif que le LHC a été mis en service en 2008. Dans cet anneau de 27 kilomètres de circonférence, installé

L'essentiel

► LE 4 JUILLET DERNIER, les porte-parole des expériences CMS et Atlas, installées sur le LHC, ont annoncé avoir détecté le boson de Higgs.

► LA MASSE de cette particule clé du modèle standard serait de 125,3 GeV selon CMS, 126,5 GeV pour Atlas.

► LES EXPÉRIMENTATEURS du CERN vont maintenant chercher à préciser les propriétés de cette particule.

* **UN PHOTON** est la particule élémentaire responsable de l'électromagnétisme, l'une des forces fondamentales à l'œuvre dans l'Univers.

* **UN BOSON Z** est une particule élémentaire responsable, avec le boson W, de l'interaction faible à l'œuvre dans l'Univers, qui se manifeste notamment dans la fusion nucléaire des étoiles.

* **UN MUON** est une particule élémentaire de matière ; avec les électrons, les taus et les neutrinos, il fait partie de la famille des leptons.

à 100 mètres sous terre à la frontière franco-suisse, deux faisceaux de protons sont accélérés à très haute énergie : actuellement de 8 téraélectronvolts (ou TeV, l'unité d'énergie égale à 1 000 milliards d'électronvolts), cette énergie sera presque doublée d'ici deux ans, à l'issue d'améliorations techniques.

Pas question, toutefois, d'observer directement la fameuse particule : le boson de Higgs est trop instable. Aussitôt formé, il se désintègre en d'autres particules, plus légères et plus stables. Cette désintégration peut suivre différents chemins : un Higgs peut ainsi donner naissance à 2 photons* ; il peut aussi se transformer en 2 bosons Z*, qui eux-mêmes donnent ensuite chacun 2 électrons ou 2 muons*. Détecter le boson de Higgs revient donc à repérer, dans le chaos des particules formées par les collisions des faisceaux, un surplus d'événements qui pourraient lui être attribués.

Deux expériences sont consacrées à la recherche du boson de Higgs : CMS (acronyme anglais pour « Solénoïde compact à muons ») et Atlas (acronyme anglais pour « un appareil toroidal pour le LHC »). Ces détecteurs géants, auprès de chacun desquels travaillent environ 3 000 personnes, ont été conçus pour analyser à la fois la masse, l'énergie et la trajectoire des particules apparues lors des collisions. Les corrélations réalisées entre ces informations permettent de reconstituer ce qui s'est produit.

À la fin de l'année 2011, ces expériences avaient permis de préciser que, si le boson de Higgs existait effectivement, alors sa masse probable était quelque part entre 122 et 129 gigaelectronvolts (GeV) (lire « Comment les détecteurs Atlas et CMS ont trouvé le boson de Higgs », ci-contre). Les physiciens >>>

L'événement

Le boson de Higgs enfin dévoilé

>>> avaient repéré un léger excès d'événements correspondant à une particule située dans cet intervalle de masse. Mais ils ne pouvaient pas exclure qu'il s'agisse d'une simple variation dans le « bruit de fond » constitué par l'ensemble des événements qui se produisent lors des collisions de particules.

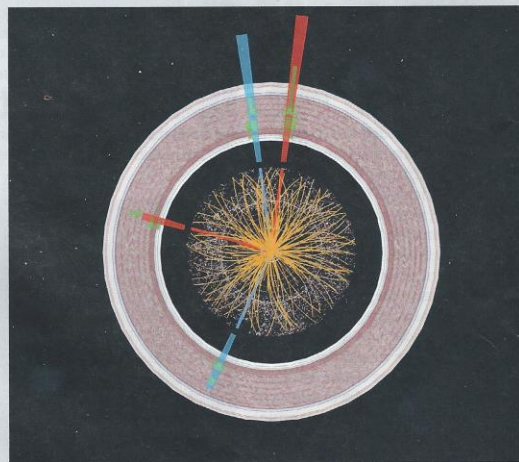
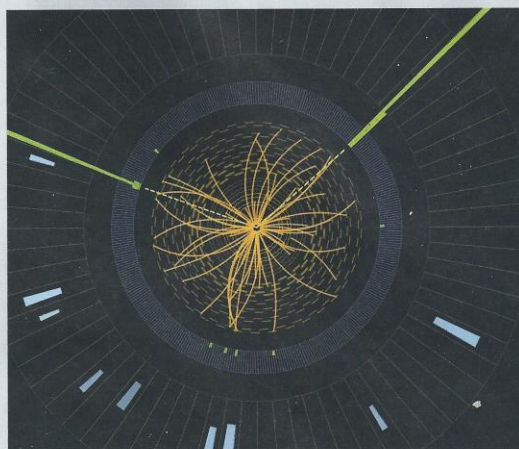
Car, selon les critères de la revue de référence *Physical Review Letters*, les physiciens des particules doivent présenter leurs résultats avec une marge d'erreur extrêmement faible, dite « à 5 sigma », pour pouvoir parler de découverte. Cette mesure correspond à une possibilité d'erreur... sur 3 millions ! Or, les résultats obtenus en décembre n'étaient qu'à 3 sigma, soit environ une possibilité d'erreur sur 350. Pour améliorer leur précision, les expérimentateurs du CERN ont donc multiplié leurs données : grâce au bon fonctionnement du LHC, ils ont accumulé autant de résultats entre mars et juin 2012 qu'au cours de l'ensemble de l'année 2011.

Suspense. Lors du séminaire du 4 juillet, les physiciens qui travaillent directement sur Atlas ou CMS connaissent les résultats de leur expérience, mais pas ceux de l'expérience « concurrente ». Le suspense règne ! À 9 heures, Joe Incandela, de l'université de Californie, à Santa Barbara, commence la présentation des résultats de CMS, dont il est le porte-parole. CMS a analysé cinq voies possibles de désintégration du boson de Higgs. Celles qui donnent les meilleurs résultats sont celles où il se transforme en 2 photons ou en 2 bosons Z.

À 9 h 50, Joe Incandela parvient à sa conclusion : en combinant l'ensemble de ses données, l'expérience CMS a bel et bien décelé un excès d'événements, qui suggèrent l'existence d'un boson inconnu, d'une masse de 125,3 GeV. Ce résultat est significatif à 4,9 sigma. Les

COMMENT LES DÉTECTEURS ATLAS ET CMS

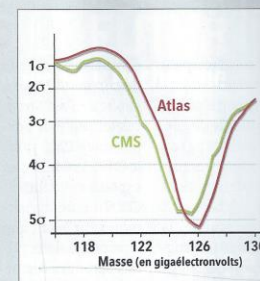
Quelles preuves de l'existence du boson de Higgs les deux détecteurs du LHC ont-ils obtenues ? Voici leurs résultats.



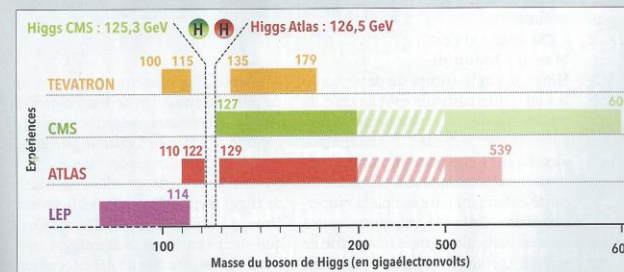
CES VUES EN COUPE montrent les trajectoires de particules issues de la désintégration d'un boson de Higgs observée par les détecteurs CMS (en haut) et Atlas (en bas). On voit ici deux des voies de désintégration étudiées par les deux expériences : celle qui aboutit à la production de 2 photons (en haut, traits verts) et celle qui aboutit à la production de 4 électrons (en bas, traits bleus et rouges).

ONT TROUVÉ LE BOSON DE HIGGS

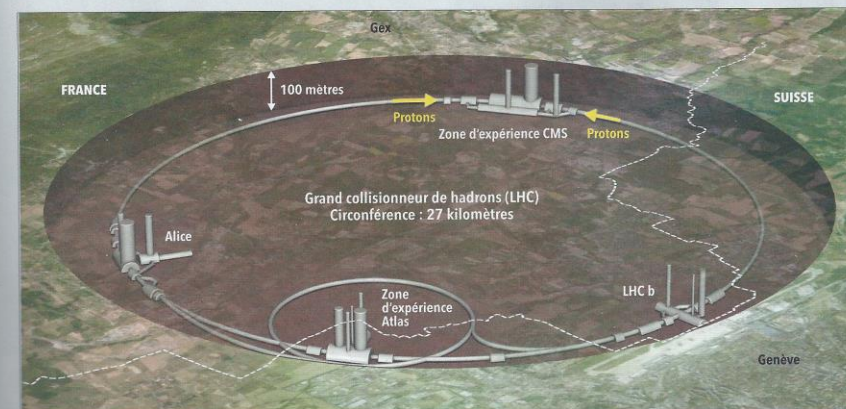
Cette découverte s'appuie sur près d'un million de milliards de collisions proton-proton, produites par les faisceaux du LHC avec une puissance de 7 téraélectronvolts (TeV) en 2011, puis de 8 TeV entre avril et juin 2012. Ces collisions ont été enregistrées par les détecteurs CMS et Atlas, ce qui représente environ 10 femtobarns inverses de données pour chacun. En physique des particules, le femtobarn inverse mesure la quantité de données délivrées aux expériences par l'accélérateur. Après analyse, les physiciens n'ont retenu que les collisions les plus intéressantes, soit 3,15 milliards d'événements. Ils y ont détecté quelques dizaines d'événements correspondant à la production possible d'un boson de Higgs.



CE GRAPHIQUE résume les résultats présentés par Atlas (en rouge) et CMS (en vert) le 4 juillet. Les minima des deux courbes montrent que la masse du boson de Higgs se situe autour de 125 à 126 gigaélectronvolts (GeV). Ils indiquent la fiabilité très forte de ces résultats : les ordonnées des courbes atteignent autour de 5 sigma, soit moins d'un risque sur trois millions que l'observation soit due à une erreur.



JUSQU'AU 4 JUILLET DERNIER, les physiciens ne pouvaient qu'exclure toute une gamme de masses du boson de Higgs. CMS avait ainsi éliminé les masses entre 127 et 600 GeV (vert), et Atlas celles entre 110 et 122 GeV, et entre 129 et 539 GeV (rouge). Le 2 juillet dernier, la dernière analyse des données du Tevatron, le collisionneur américain fermé le 30 septembre 2011, resserrait la gamme des valeurs entre 115 et 135 GeV (jaune). Deux jours plus tard, CMS et Atlas révélait la découverte du boson de Higgs, avec une masse de 125,3 GeV pour CMS, et 126,5 GeV pour Atlas.



DEUX FAISCEAUX DE PROTONS (en rouge) circulent en sens inverse dans l'anneau du Grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN. Celui-ci a une circonférence de 27 kilomètres. À 100 mètres sous terre, près de Genève, en Suisse, il s'étend des deux côtés de la frontière avec la France. À côté d'Atlas et de CMS, les deux détecteurs chargés de détecter le boson de Higgs, on en trouve deux autres, Alice et LHCb. © INFOGRAPHIES : BRUNO BOURGEOIS

L'événement

Le boson de Higgs enfin dévoilé

>>> applaudissements fusent : on peut presque parler de découverte !

C'est ensuite au tour de la porte-parole d'Atlas, Fabiola Gianotti, du CERN, de s'exprimer. Elle présente les résultats de son expérience, mis à jour en 2012 uniquement dans deux voies de désintégration : celle à 2 photons et celle à 2 bosons Z. À 10 h 30, le résultat majeur tombe : la combinaison de toutes les mesures suggère l'existence d'un boson de Higgs d'une masse de 126,5 GeV, cette fois avec une significativité de 5 sigma !

Une clameur retentit dans l'amphithéâtre. « *Nous l'avons !* » s'exclame Rolf Heuer, directeur général du CERN.

Peter Higgs essuie une larme : « *Je n'aurais jamais cru assister à un tel événement de mon vivant !* » Les premiers mots de François Englert sont pour regretter que son compagnon de recherche Robert Brout, décédé l'année dernière, ne soit pas là pour partager cet instant.

Prudence. Les deux expériences Atlas et CMS, menées indépendamment, ont toutes deux conclu à l'existence d'une particule inconnue, plus de cent fois plus lourde que le proton. Et celle-ci a toutes les chances d'être le fameux boson de Higgs : « *Jusqu'à maintenant, toutes les caractéristiques que nous avons observées pour cette nouvelle particule, la manière dont elle se désintègre par exemple, sont*

compatibles avec la description du Higgs », explique Yves Sirois, responsable de l'expérience CMS pour le CNRS. Prudents, les expérimentateurs du CERN insistent néanmoins sur le fait que davantage de résultats seront nécessaires pour préciser la nature de la nouvelle venue.

Car même si c'est bien un boson de Higgs, il s'agit encore de déterminer lequel ! Cette particule est-elle celle du modèle standard de la physique des particules ? Ou alors est-elle d'une nature plus « exotique » ? Elle pourrait notamment trouver sa place dans une extension du modèle standard, par exemple la « supersymétrie ». Cette théorie, qui associe à chaque particule connue une particule « miroir », prévoit l'existence de pas moins de 5 bosons de Higgs. « *Avec une masse située autour de 125 à 126 GeV, la particule que nous avons mise en évidence pourrait être l'un des plus légers bosons de la supersymétrie* », suggère Rolf Heuer.

Les expérimentateurs du CERN vont donc se remettre au travail : c'est en analysant de plus grandes quantités de



François Englert (au centre) et Peter Higgs (à droite), deux des physiciens ayant prédit le mécanisme de Brout-Englert-Higgs en 1964, se sont rencontrés pour la première fois lors de l'annonce de la découverte. © MAXIMILIEN BRICE, LAURENT EGLI/2012 CERN

données qu'ils préciseront les propriétés de cette particule. Un de leurs objectifs sera de déterminer son « spin », propriété quantique associée à chaque particule, qui ne peut prendre que des valeurs entières ou demi-entières ; dans le cas du boson de Higgs du modèle standard, il devrait être nul. Les physiciens vérifieront aussi que « leur » particule se désintègre bien selon toutes les voies de désintégration prévues par la théorie. Ils devront enfin s'assurer qu'elle interagit avec les autres particules, de manière proportionnelle à leur masse, ce qui correspond à la définition même du boson de Higgs.

Les physiciens ont peu de temps devant eux : le LHC doit normalement être arrêté à la fin de l'année, pour deux ans. Des travaux seront alors entrepris pour porter à 14 TeV l'énergie de collision des protons. Afin d'accumuler le maximum de données avant cette fermeture, les responsables du CERN décideront très probablement de la reporter au mois de mars 2013. « *Compte tenu du temps nécessaire pour analyser les données, on peut s'attendre à de nouveaux résultats dans la compréhension de la nature de ce boson jusqu'à l'été 2013* », estime Sandro de Cecco, du laboratoire de physique nucléaire et des hautes énergies du CNRS, à Paris, et membre de l'expérience Atlas. Avant, évidemment, que le LHC ne reprenne des mesures à partir de 2015. ■

Fin de partie pour le Tevatron

Deux jours avant le CERN, le Fermilab, laboratoire de physique des particules situé près de Chicago, aux États-Unis, a tenté de s'inviter à la fête, en annonçant les derniers résultats de son propre accélérateur de particules : le Tevatron. Cette expérience, qui a définitivement pris fin en septembre 2011 après dix ans de fonctionnement, était un collisionneur de protons et d'antiprotons. Il avait une énergie de collisions plus faible que le LHC, mais il générait aussi moins

de bruit de fond, ce qui lui permettait d'étudier d'autres voies de désintégration du boson de Higgs. Les résultats du 2 juillet, tirés des dernières mesures réalisées avant l'arrêt de l'expérience, suggèrent l'existence d'un boson de Higgs d'une masse comprise entre 115 et 135 GeV. Ils sont donc compatibles avec ceux du LHC. Mais ils ne sont pas assez significatifs : avec 2,9 sigma, il y a au moins une possibilité sur 350 que le signal observé soit dû à une fluctuation statistique.

BOSON DE HIGGS

Les physiciens racontent la découverte



© PETER GONTER/AGENCEUR BILDREX/EPFL

Dans la salle de contrôle d'Atlas, l'une des deux expériences dédiées à la quête du boson au LHC, les chercheurs surveillent les productions et désintégrations de particules.

Un succès historique ! On en connaît peu d'aussi spectaculaires que la découverte, il y a quelques mois, du boson de Higgs, particule qui manquait à l'édifice théorique décrivant la physique des particules. Depuis près de trente ans, physiciens et ingénieurs avaient mobilisé leurs connaissances et leurs savoir-faire dans l'espoir d'atteindre ce but. Et tout a fonctionné à la perfection, comme ils le racontent dans ce dossier. Ils nous expliquent aussi que, cette étape franchie, beaucoup d'autres les attendent encore.

- 1 **Michel Spiro : « Le pari gagné des physiciens »** propos recueillis par Bernard Romney
- 2 **Comment la théorie a guidé les expériences** par Daniel Fournier et Yves Sirois
- 3 **Un siècle de physique des particules**
- 4 **Le défi technologique des détecteurs** par Daniel Fournier et Yves Sirois
- 5 **Une carte d'identité à compléter** par Olivier Dessibourg

N°471 • 6,50 € JANVIER 2013

LA RECHERCHE

LA Recherche

L'actualité des sciences

Numéro spécial

Cellules souches

Génome

Mars

Rayons gamma

Boson de Higgs

LES 10 PLUS BELLES DÉCOUVERTES DE L'ANNÉE

Énergie noire

Sida

Tore plat



ENTRETIEN AVEC GENEVIÈVE FIORASO,
ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche

Les grands rendez-vous de la science en 2013

M 01108 - 471 S - F : 6,50 € - RD



MEISSURIL DOM 6,90 € BEL7,50 € LUX7,50 € ID 8,20 € ESP 7,50 € GR 7,50 € ITA 7,50 € PORTCONT 7,50 € CAN 10,50 \$ CAN 13,15 \$ MAR 6,53 DH TUN 6,50 TND MAVOITE 8,90 € TOM S 970 XPF TOM A 1620 XPF - ISSN 002966711

Janvier 2013

1 Boson de Higgs : la découverte qu'attendaient les physiciens

Après une traque acharnée de plus de deux ans, les expériences menées au CERN ont révélé l'existence d'une nouvelle particule, fort ressemblante au boson de Higgs.

PAR Vincent Glavieux et Olivier Dessibourg, journalistes.

L'année 2012 aura donc été l'année du boson de Higgs ! Une année historique, à coup sûr, pour la physique des particules. Tombée le 4 juillet, l'annonce de la découverte d'une nouvelle particule au CERN déclenche la liesse des physiciens et l'engouement médiatique [1].

Et pour cause, le nouveau boson possède des caractéristiques « compatibles » avec celles prédites pour la particule que les physiciens traquent depuis trente ans : le fameux boson de Higgs. Imaginée dans les années 1960, cette particule est la clé de voûte du cadre théorique élaboré depuis le début du XX^e siècle pour décrire les constituants élémentaires de la matière et leurs interactions, le « modèle standard de la physique des particules ». Pour valider ce modèle, les physiciens doivent donc, à toute force, prouver son existence.

Couronnement. Accomplissement, succès, bonheur, soulagement, les mots ne manquent pas pour saluer le résultat [2]. Cette découverte couronne la réussite des équipes du LHC au CERN, collisionneur géant de 27 kilomètres de circonférence principalement construit pour produire le boson de Higgs. Tout comme celle des collaborations inter-

nationales des expériences Atlas et CMS conçues pour le détecter, fortes de plusieurs milliers de physiciens chacune.

Il n'en fallait pas moins pour espérer déceler une trace du boson de Higgs. Seul le choc de deux faisceaux de protons suffisamment énergétiques (plusieurs téraélectronvolts (TeV) chacun) pouvait en effet produire cette particule. Mais, très instable, le boson de Higgs n'existe qu'une infime fraction de seconde avant de se désintégrer en d'autres particules. L'unique chance de remonter jusqu'à lui est donc d'identifier les particules stables issues des collisions pour repérer s'il s'agit bien de celles découlant des cinq voies possibles de désintégration du boson de Higgs [fig. 1]. C'est donc ce à quoi se sont attelés les physiciens d'Atlas et de CMS, inlassablement pendant plus de deux ans.

Au-delà de la découverte elle-même, ce qui impressionne les physiciens, ce 4 juillet et aujourd'hui encore, c'est l'exceptionnelle vitesse à laquelle ont progressé les deux expériences, en particulier depuis la fin de l'année 2011.

Revenons quelques mois en arrière. Nous sommes le 13 décembre 2011, lors de la conférence annuelle du CERN. Les deux collaborations Atlas et CMS présentent leurs résultats. Il y a déjà des frémissements : elles observent un

signal intéressant, qui correspondrait à un boson de Higgs ayant une masse comprise entre 122 à 129 GeV.

Cependant, la prudence règne. Les physiciens sont encore loin de pouvoir annoncer une découverte : ils ne peuvent pas exclure un biais, lié au bruit de fond de l'ensemble des collisions de particules. Pour déclarer une découverte, les physiciens des particules sont soumis à une règle très stricte : leurs résultats doivent atteindre un seuil de certitude de 5 sigmas, soit une probabilité d'erreur dans l'analyse d'un sur trois millions. Or, en cette fin d'année 2011, celle-ci n'est que de 3 sigmas environ pour Atlas et CMS, soit une possibilité d'erreur sur 350 [fig. 2].

Accélération. Comment, en seulement six mois, les deux expériences sont-elles donc parvenues à transformer une forte présomption de l'existence d'une nouvelle particule en preuve ? Il faut rappeler que le calendrier des physiciens était très serré. En effet, dès le 31 janvier 2011, la direction du CERN avait annoncé un arrêt de deux ans du LHC pour travaux et optimisations à la fin 2012. Ils avaient donc deux ans pour produire et enregistrer un maximum de données. En d'autres termes, 2012 devait être l'année du boson.

Pour 2011, les physiciens du CERN jouent la prudence. Ils ont encore en mémoire les problèmes du LHC à son démarrage, en 2008, qui les avaient forcés à arrêter le collisionneur durant un an. Ils maintiennent donc l'énergie de chaque faisceau du collisionneur à 3,5 TeV, soit 7 TeV au total, comme en 2010. « Cette année 2011 s'est passée sans encombre, la direction du CERN a donc décidé, en février 2012, de prendre quelques risques pour l'année à venir », raconte Jorg Wenninger, du département des faisceaux du CERN. Après travaux, l'énergie de collision de chaque faisceau du LHC passe ainsi à 4 TeV, soit une puissance totale de 8 TeV. « C'est-à-dire une augmentation de 20 % de la probabilité de produire un boson de Higgs », traduit le physicien suisse.

Pour ce dernier, la principale amélioration du collisionneur, celle qui a >>>

La découverte en six étapes

> OCTOBRE 1964

Prédiction du boson de Higgs, qui expliquerait entre autres pourquoi certaines particules élémentaires ont une masse, et pas d'autres.

> 30 MARS 2010

Le Grand collisionneur de hadrons (LHC), nouvelle machine du CERN chargée de produire le boson de Higgs, débute sa première campagne de collisions.

> JUILLET 2010 et AVRIL 2011

Des rumeurs circulent sur Internet annonçant la découverte du boson de Higgs.

> 13 DÉCEMBRE 2011

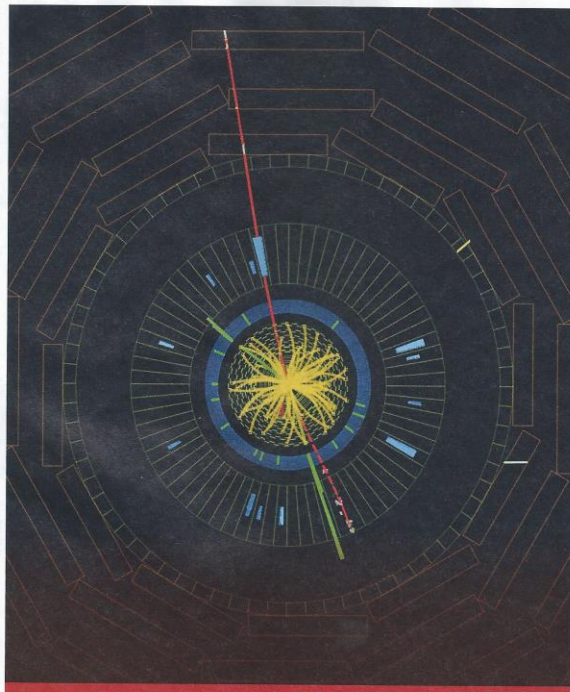
Les collaborations Atlas et CMS, chargées de détecter l'hypothétique boson de Higgs dans les collisions du LHC, annoncent les résultats les plus significatifs jamais présentés : la masse de la particule serait comprise entre 124 et 126 gigaélectronvolts (GeV).

> 5 AVRIL 2012

Début de la campagne annuelle de recherche du boson de Higgs, après des optimisations réalisées depuis janvier sur le LHC et sur les méthodes d'analyse des collisions.

> 4 JUILLET 2012

Atlas et CMS annoncent avoir chacun découvert une particule ressemblant au boson de Higgs lors d'un séminaire du CERN auquel assiste François Englert (ci-dessous, à droite), l'un des théoriciens ayant prédit son existence.



Les trajectoires de particules issues de la désintégration d'un boson de Higgs sont ici observées par le détecteur CMS. Il s'agit de la voie de désintégration qui aboutit à la production de 4 leptons : 2 électrons (traits verts) et 2 muons (traits rouges). © 2012 CERN, FOR THE BENEFIT OF THE CMS COLLABORATION

L'essentiel

> LE 4 JUILLET, les responsables des expériences Atlas et CMS du CERN, à Genève, annoncent la découverte d'une particule qui a les caractéristiques du boson de Higgs.

> C'EST LE TRAVAIL d'optimisation mené sur le collisionneur et sur les détecteurs entre décembre 2011 et mai 2012 qui a conduit à la découverte.

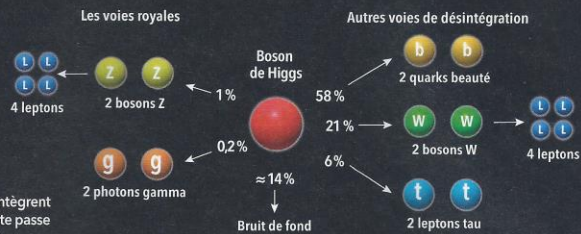
> DEPUIS L'ANNONCE, les équipes d'Atlas et de CMS analysent les propriétés de la nouvelle particule trouvée, et les questions qu'elles posent.

© MAXIMILIEN BRICE, LAURENT EGUIZ/2012 CERN



Fig.1 Deux canaux royaux mais rares

POUR UN BOSON DE HIGGS ayant une masse autour de 125 à 126 GeV, il existe 5 canaux de désintégration. Deux sont appelés « royaux » car ils permettent une mesure plus précise de la masse : celui qui aboutit à la production de 2 photons et celui qui donne 2 bosons Z, puis 4 leptons (à gauche). Ils sont aussi les plus rares : seuls 0,2 % des bosons de Higgs se désintègrent en 2 photons, et 1 % en bosons Z. Le reste passe par les autres canaux et le bruit de fond.



Boson de Higgs : la découverte qu'attendaient les physiciens

►►► permis de « faire le grand saut » en 2012, vient toutefois d'ailleurs, de la focalisation des faisceaux. La focalisation des faisceaux est importante pour la luminosité de l'accélérateur, c'est-à-dire le taux de collisions qui se produit, au point d'impact, sur un centimètre carré

à chaque seconde. « Plus les faisceaux sont concentrés, plus ils produisent de collisions », résume Jorg Wenninger.

En fin d'année 2011, chaque faisceau mesurait 25 micromètres de diamètre au point d'impact. Après un travail sur différentes parties du collisionneur,

leur taille est réduite à 18 micromètres début 2012. « Nous avons ainsi doublé le taux de collisions au centimètre carré », calcule le physicien.

Des faisceaux plus focalisés et plus énergétiques, cela donne plus de collisions à observer, et donc plus de données. Un nouveau défi à relever pour les équipes d'Atlas et de CMS. Pour gérer au mieux cette augmentation des données, elles ont donc travaillé d'arrache-pied afin d'optimiser leurs méthodes d'analyse.

Question à John Ellis Que nous dit le nouveau boson de la supersymétrie ?



JOHN ELLIS est physicien théoricien au King's College de Londres et au CERN.

Selon la théorie de la supersymétrie, à chaque particule du modèle standard, qui décrit le monde de l'infiniment petit, est associée une superparticule, bien plus massive. Mais à ce jour, aucune d'entre elles n'a été observée. La nouvelle particule découverte, le « prérésumé » boson de Higgs, a une masse de 125 gigaélectronvolts, et pourrait être la pièce manquante du modèle standard. Néanmoins, elle pourrait aussi correspondre au plus léger des 5 bosons de Higgs prévus par la version la plus simple de la supersymétrie, dont la masse est forcément au-dessous de

130 gigaélectronvolts. Un tel boson imposerait que les superpartenaires des gluons et des quarks, les gluinos et les squarks, auraient, eux, des masses plus élevées que prévues jusqu'ici. Cela expliquerait pourquoi ils n'ont pas été observés au LHC. En ce sens, cette découverte n'invalide pas la supersymétrie : c'est déjà une victoire ! Mais avec les données actuelles, on ne peut faire la différence entre ce boson de Higgs de la supersymétrie et celui du modèle standard. Certains prétendent le contraire : ils pensent que les taux de désintégration observés fournissent déjà des informations, mais je n'y crois pas. La traque continue donc pour déboucher d'autres indices validant la supersymétrie. ■ **Propos recueillis par Olivier Dessibourg**

En « aveugle ». Par ailleurs, les très bons résultats obtenus en 2011 ont permis de réduire la gamme possible pour la masse du boson de Higgs : un signal très intéressant est apparu autour de 124 à 126 GeV [β]. La direction du CERN veut donc éviter tout risque de biais dans le traitement des données 2012 et d'amélioration artificielle des résultats : il ne faut pas se laisser influencer, même inconsciemment, par ce qui a déjà été observé.

D'emblée, une règle est donc imposée : l'amélioration des outils d'analyse doit être menée en « aveugle ». « Cela signifie que la zone pour laquelle de sérieux indices existent ne doit pas être étudiée avant que l'ensemble des optimisations ne soit entièrement examiné et approuvé par la direction de chaque collaboration », explique Christophe Ochando, de CMS.

Première phase de ce travail d'optimisation, qui mobilise les équipes d'Atlas et de CMS jusqu'à la mi-mai environ : réanalyser les données de 2011, dont les résultats complets ont été présentés ►►►

Portrait Peter Higgs : une paternité qu'il partage volontiers

Dans l'amphithéâtre bondé du CERN, ce 4 juillet 2012, un homme aux cheveux nacrés, au premier rang, essuie une larme. « J'ai fait la connexion avec la réalité, glissera-t-il plus tard. Alors que je m'étais tenu à l'écart de tout cela, j'ai senti concerné émotionnellement. » Cet homme, Peter Higgs, père du mythique « boson de Higgs », veut que le modèle standard de la physique des particules, dont l'existence vient d'être confirmée. Déjà, lors de son entrée sous les applaudissements, le théoricien écossais cachait mal sa gêne. Lui qui ne cherche jamais à bragger, à lui seul, la paternité de ce boson. Lui qui ne souhaite maintenant qu'une chose : recouvrer son anonymat qu'il sait pourtant évanou. D'ailleurs, il ne répond pas au téléphone, ni n'utilise le courriel, tolérant au mieux la bonne vieille relation épistolaire.

Sentiment d'iniquité. La conférence achevée, devant notre persévérance, le scientifique nous accorde son unique et court interlude du jour. Peut-être le fait-il aussi en souvenir de notre première rencontre, en 2007. Il nous avait alors accueillis à Edimbourg, dans une pièce de séjour meublée vintage, sur un trône un équipement hi-fi dernier cri, témoin de sa passion pour l'amusique. Un peu nerveux, il nous avait proposé d'emblée une tasse de thé que nous n'avions jamais goûtée... Car l'interroger sur la physique, c'est s'embarquer aussitôt pour un monde complexe mais fascinant, où théorèmes et formules impénétrables se répondent.

Il se livre tout de même un peu. Physicien à l'université d'Edimbourg, « je suis passé d'un champ de recherche à l'autre. Au terme de six années, je n'avais pas l'impression d'avoir fait grand-chose ». Peut-être se serait-il alors réorienté vers la biologie, s'il n'était tombé sur les travaux de Yoichiro Nambu. Les écueils sur lesquels bute ce théoricien japonais, Peter Higgs va les résoudre en un week-end de 1964, en se promenant dans le parc montagneux de Cairngorms, en Écosse. Un premier article très sobre, 79 lignes et 5 équations (!), est soumis à la revue *Physics Letters*. Puis, peu après, un deuxième, l'abord rejeté. Le physicien y ajoute la description d'une nouvelle particule, servant à matérialiser sa théorie. L'article est accepté par les *Physical Review Letters*. La fantasmagorie de l'article est née. « Ce terme de « boson de Higgs » est apparu dans les années 1970, à la suite d'une conférence dans laquelle

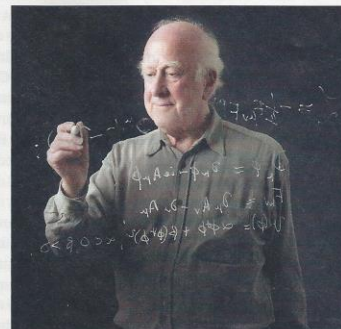
mon seul nom a été cité, précise-t-il. Or, deux physiciens belges, François Englert et feu Robert Brout, avaient aussi proposé le même mécanisme. Depuis, je vis avec cette iniquité. »

Tous les scientifiques débattent alors de cette nouvelle théorie, la développent. Peter Higgs participe au mouvement. Puis, « il est venu un temps et de nouveaux domaines où je ne me suis plus senti compétent, j'étais perdu. J'ai été chanceux de trouver ce que j'ai découvert. Mais arrive un point où vous prenez conscience que ce que vous faites ne sera plus bon. » Le chercheur s'est alors consacré à l'enseignement, avant de prendre sa retraite.

Curiosité intacte. En nous accompagnant à la porte, il s'était arrêté devant une pièce en cuivre : un morceau de l'un des aimants de l'accélérateur LHC. Et le seul objet à lui rappeler la persévérance de milliers de physiciens, depuis des décennies, à déboucher ce fameux boson. Combien de fois ce vieux sage s'est-il demandé s'ils y parviendraient de son vivant ? « Au début, j'en doutais, admet-il, ce 4 juillet. Mais au fur et à mesure que les expériences ont été construites, cette attente est devenue plus réelle. »

Malgré ses 83 ans, Peter Higgs n'a rien perdu de sa malice, de sa bonhomie, ni de sa mémoire. À chaque rencontre, il égrène les anecdotes sur l'histoire de sa discipline autant que sur sa vie privée. Une adolescence teintée de résignation, chahutée par des crises d'asthme virant à la pneumonie. Une éducation scolaire reçue à son domicile de Bristol. Et une carrière universitaire à Londres puis à Edimbourg. Derrière sa timidité brûlée depuis toujours la même curiosité : « Le propre de l'homme est d'essayer de comprendre », dit-il à qui lui demande ce qui l'a poussé à creuser ses idées sur le boson.

En revanche, ne l'interrogez pas sur les sujets qui sortent de ses compétences. Quant à expliquer ses travaux avec les mots du quidam, il rosit chaque fois, confus : « C'est difficile... Il faudrait remonter loin dans l'histoire de la physique, pour poser les bases. » Il est plus à l'aise pour évoquer l'avenir : « Les théories allant au-delà du modèle standard vont pouvoir être testées. Il existe peut-être quelque chose qui appartient à une vision plus large. » Et Peter Higgs de repartir dans un monde où le nom des forces et des physiciens résonnent comme ceux des puissants héros sortis tout droit de l'imaginaire d'un enfant ébahi. ■ **O. D.**



Peter Higgs écrit l'équation de la brisure spontanée de symétrie, qui prédit l'existence du boson. Il a eu l'idée de cette formule lors d'une promenade dans un parc, en Écosse.

© MAXIMILIEN BRICEZ/CEA

Boson de Higgs : la découverte qu'attendaient les physiciens

» en mars 2012, aux rencontres de Moriond, en Italie. « Nous les avons réévaluées en prenant en compte les difficultés supplémentaires induites par la montée en puissance des faisceaux du LHC, explique Nansi Andari, membre du groupe de recherche sur la désintégration du boson de Higgs en deux photons au sein de l'expérience Atlas. De cette façon, nous avons déterminé ce qu'il fallait optimiser sur les détecteurs avant de commencer à analyser les données 2012. »

Les équipes de CMS ont ainsi amélioré de 25 % la calibration* des 88 000 cristaux de tungstate de plomb utilisés dans leur détecteur pour mesurer l'énergie des particules issues des collisions. Tout comme celles d'Atlas, elles ont aussi optimisé les outils pour repérer les particules produites. « Par exemple, ceux permettant d'isoler les photons provenant de la désintégration d'un boson de Higgs, détaille Sergueï Ganjour, spécialiste de cette voie de désintégration au sein de

l'expérience CMS. En effet, ce type de photon a un niveau d'énergie bien plus faible que ceux issus de la désintégration d'autres particules, ce qui rend donc leur observation plus difficile. »

Derniers réglages. Les algorithmes de reconstruction de la trajectoire de chaque particule à l'intérieur des détecteurs ont également été affinés. Prédire, ou calculer, la trajectoire d'une particule est en effet essentiel pour déterminer la particule dont elle est issue. « Au sein d'Atlas, le perfectionnement des algorithmes a mobilisé plusieurs dizaines de personnes tous les jours, de janvier à avril 2012 », se souvient Nansi Andari.

Autour de fin avril-début mai, chaque collaboration avait entériné, et mis en place, toutes les optimisations retenues pour l'analyse des données acquises depuis le 5 avril 2012, jour de démarrage de la campagne annuelle. Cette analyse a commencé vers la mi-mai, et s'est éten-

due jusqu'à la fin du mois de juin. Une période intense pour tous : « Je n'ai dormi qu'une heure par nuit tout au long de cette période », confirme Nansi Andari.

Et pour cause : l'idée était d'utiliser un maximum de données de 2012 dans les résultats qui devaient être présentés à la grand-messe de la physique des hautes énergies, le congrès IChEP, à Melbourne, en Australie, du 4 au 10 juillet. Ainsi, en quelques semaines, les équipes d'Atlas et de CMS ont analysé près de cinq femtobarns inverses* de données chacune, soit autant de données que sur l'ensemble de l'année 2011 !

En vue du 4 juillet, les équipes d'Atlas et de CMS ont concentré leurs efforts sur les deux « canaux royaux » : celui où, à l'issue d'une chaîne de désintégrations, le boson de Higgs donne 2 photons et celui où il produit 2 bosons Z puis 4 leptons. En effet, ces deux modes sont les plus intéressants car ils génèrent peu de particules « parasites ». Mais ils sont aussi les plus rares : pour 100 bosons de Higgs produits, on estime qu'à peine 1 % se désintègre en 2 bosons Z et 0,2 % en 2 photons !

« On a finalement regardé dans la zone critique, autour de 125 GeV, à partir de la mi-juin, raconte Sergueï Ganjour. Quand on a vu ce qui s'y trouvait, ça a été un grand plaisir, mais il n'y a pas eu de vraie surprise. » « Rien n'était encore sûr », nuance Louis Fayard, son homologue au sein d'Atlas. « Nous étions tous un peu fébriles, surtout quand la force du signal diminuait même un tout petit peu », confirme Nansi Andari.

C'est en combinant les analyses des données de 2012 avec celles de 2011, à partir de début juin, que chaque expérience a acquis la certitude qu'elle avait découvert une particule ressemblant au boson de Higgs. « En décembre 2011, nous manquions de données pour pouvoir parler de

Question à Géraldine Servant

Que nous indique ce boson sur la matière sombre ?



GÉRALDINE SERVANT, physicienne théoricienne au CERN.

Le nouveau boson ne donne pas d'indication directe sur la nature de la matière sombre, mystérieuse matière qui compose 23 % de l'Univers. Cependant, le fait d'avoir mesuré la masse de cette particule nous guide pour élaborer les modèles cosmologiques : cette valeur limite en effet les propriétés des particules qui pourraient la composer. Les candidates favorites, appelées « mauviettes », raccourci pour « particules massives inter-

agissant faiblement avec la matière ordinaire » (ou WIMPs, en anglais), possèdent une masse de l'ordre de celle du boson découvert (entre 0,1 et 10 fois sa masse). Et on s'attend qu'il existe un couplage entre elles et le boson de Higgs. Ainsi, un déficit d'énergie, à l'issue de la désintégration de ce dernier, pourrait correspondre à la création de bribes de matière sombre. Mais c'est un scénario difficile à étudier. Et, si les premières mesures limitent déjà un peu les possibilités, il faudra attendre 2015, que le LHC tourne à pleine puissance, pour éclaircir cette question avec plus de précision. ■ **Propos recueillis par O.D.**

* **LA CALIBRATION** est un réglage, qui consiste à vérifier que la mesure produite par un appareil correspond bien à une valeur de référence attendue.

* **LE FEMTOBARN INVERSE** est l'unité de luminosité intégrée utilisée pour déterminer la quantité totale de données produites par un accélérateur de particules.

* **LE SPIN** est une propriété quantique d'une particule.

Question à Paul Colas Que nous dit-il sur la stabilité de l'Univers ?



Paul Colas, chercheur à l'institut de recherches sur les lois fondamentales de l'Univers, au CEA, à Saclay.

P.C. Une masse du boson de Higgs à 125 GeV indique que l'Univers peut théoriquement se désintégrer ! Pour comprendre, il faut savoir que le vide possède en lui-même une certaine énergie. Et pour que l'Univers soit indéfiniment stable, cette énergie doit être dans son état minimal. Or, avec la

masse trouvée, la théorie indique que ce n'est pas le cas. Prenons l'image de la balle et du bol : une balle au fond d'un bol illustre un état de stabilité perpétuelle. Imaginons maintenant cette balle en équilibre sur le bord du bol : elle peut à tout moment tomber au fond du récipient, le système est alors dans un état « métastable ». Et quand elle tombe à côté, le système est instable. Si l'Univers était instable, nous ne serions pas là. Mais il est dans un état « métastable » : il peut donc à tout

moment commencer à évoluer vers un autre état. Cette transition consisterait en un changement des propriétés du vide, d'abord localement. Mais *in fine* les particules perdraient leur masse, et se déplaceraient toutes à la vitesse de la lumière, désintégrant toute forme de matière. Grâce à la nouvelle découverte, on sait désormais que ce phénomène de désintégration du vide devrait se produire d'ici quelques dizaines de milliards d'années. ■ **Propos recueillis par O.D.**

découverte, rappelle Louis Fayard. Or, le 4 juillet, chaque collaboration a présenté ses résultats en s'appuyant sur 10 femtobarns inverses de données, soit le double de ce que nous avions six mois auparavant. Le doute n'était plus permis [4]. »

Précisions nécessaires. Depuis, la pression est un peu retombée. « Le travail actuel consiste à intégrer les canaux de désintégration qui n'ont pas été pris en compte pour les résultats présentés en juillet, raconte Marumi Kado, coor-

dinateur d'Atlas. Dans l'article que nous avons publié en août, nous avons ainsi ajouté celui où le boson de Higgs, après plusieurs désintégrations successives, donne deux bosons W, [5]. » Ceux en paires de quarks beauté et en paires de leptons tau, eux, l'ont été en vue de la conférence sur la physique des collisionneurs de hadrons, prévue à Kyoto, au Japon, mi-novembre 2012 [6].

Mais ce qui mobilise surtout les physiciens, c'est le travail sur les propriétés de la nouvelle particule : son spin[†], la

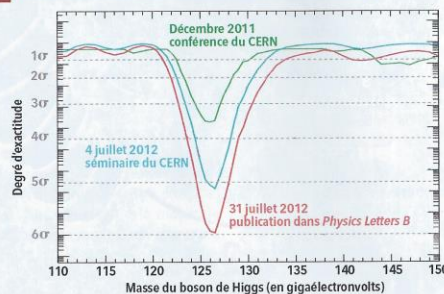
mesure précise de sa masse, ses interactions avec les autres particules, etc. Deux questions tiennent d'ailleurs la communauté en haleine.

La première : les physiciens de CMS ne détectent pas de signal pour un boson de Higgs autour de 125 GeV dans le canal de désintégration en paire de leptons tau. « C'est intrigant, confirme Christophe Ouchand, et problématique, car on a besoin de trouver la particule dans toutes les voies de désintégration pour être certain qu'il s'agit du boson de Higgs. »

La seconde interrogation concerne Atlas : « Nous observons un taux de désintégration du boson de Higgs en 2 photons presque deux fois plus important que ce qui est attendu. C'est un résultat étonnant, que nous ne parvenons pas encore à expliquer », reconnaît Marumi Kado.

Toutes ces interrogations laissent encore l'espoir à certains physiciens que le boson découvert n'est pas le boson de Higgs du modèle standard. « Assurément, ce serait une nouvelle très excitante, avoue Marumi Kado. Mais nous serions aussi heureux si ce n'était pas le cas. » ■

Fig.2 De la présomption à la découverte



EN DÉCEMBRE 2011, l'expérience Atlas perçoit des indices de l'existence d'un boson de Higgs autour d'une masse de 124 à 126 GeV (courbe verte). La certitude de ce signal est de 3 sigmas, soit un risque d'erreur sur 350, insuffisant pour parler de découverte. Après l'amélioration des outils d'analyse début 2012, le résultat pour la masse du Higgs s'affine, autour de 126 GeV, et la confiance aussi. En juillet, elle atteint le seuil indispensable à l'annonce d'une découverte : 5 sigmas, soit un risque d'erreur sur 3 millions (courbe bleue) - et même 6 sigmas en août (courbe rouge).

[1] « Boson de Higgs - le pari gagné des physiciens », *La Recherche*, novembre 2012, p. 40.
 [2] Pascaline Minet, « Le boson de Higgs enfin dévoilé », *La Recherche*, septembre 2012, p. 8.
 [3] Sándoro de Cecco, « La où se cache le boson de Higgs », *La Recherche*, juillet 2012, p. 42.
 [4] Atlas collaboration, <http://tinyurl.com/atlas07042012>, 2012 ; CMS collaboration, <http://tinyurl.com/cms07042012>, 2012.
 [5] Atlas collaboration, *Phys. Lett. B*, 716, 1, 2012 ; CMS collaboration, *Phys. Lett. B*, 716, 30, 2012.
 [6] Atlas collaboration, <http://tinyurl.com/atlas15112012>, 2012 ; CMS collaboration, <http://tinyurl.com/cms11152012>, 2012.

© MAXIMilien BEZOUZ/CERN

En bref

RÉACTION CHIMIQUE EN TEMPS RÉEL

Une équipe internationale a mis en évidence, pour la première fois, un état qui apparaît très transitoirement lorsque des molécules s'adsorbent sur une surface, ou désorbent de celle-ci. Les chimistes ont d'abord déposé des molécules de monoxyde de carbone à la surface d'un cristal de ruthénium. Après avoir chauffé cette dernière très ponctuellement avec un laser, ils ont étudié l'évolution de la structure électronique des molécules à l'aide d'un faisceau de rayons X très intense. Résultat : les molécules ne se détachent pas immédiatement de la surface, mais passent d'abord par un état quasi gazeux où elles continuent à interagir faiblement avec celle-ci.

M. Dell'Angela et al., *Science*, 339, 1302, 2013.

VORTEX ENTRELAÇÉS

Des physiciens américains ont, pour la première fois, fait des nœuds dans l'eau. Ce phénomène avait été prédit théoriquement il y a plus de 100 ans, et il se produirait dans toutes sortes de fluides. Ils ont plongé dans l'eau des ailes d'avion miniature et les ont soumises à une accélération soudaine, créant des tourbillons se propageant en sens opposé. La rencontre de ces tourbillons forme un nœud. À l'aide d'une caméra capable d'enregistrer 76 000 images à la seconde, les physiciens ont visualisé le parcours de petites bulles dans ces structures, ce qui leur a permis d'en étudier la dynamique.

D. Kleckner et al., *Nature Physics*, sous presse, 2013.

sur le web

<http://openflask.blogspot.fr>
Le blog du chimiste organicien Phil Baran, de l'Institut de recherche Scripps, aux États-Unis, et des membres de son équipe.

PARTICULES **Il s'agit bien d'un boson**

QUESTIONS À L'EXPERT



Yves Sirois est responsable de l'expérience CMS pour la France.

Quel est le principal enseignement à tirer des derniers résultats présentés sur la recherche du boson de Higgs ?

Y.S. Les expériences Atlas et CMS, installées sur le Grand Collisionneur de hadrons (LHC) du CERN, ont présenté au début du mois de mars leurs plus récents résultats lors des Rencontres de Moriond, organisées cette année dans le val d'Aoste, en Italie. Ceux-ci confirment ce que l'on pressentait depuis le 4 juillet 2012 : la particule

dont on a alors annoncé la découverte est bien un boson de Higgs. La confirmation nous a été fournie par l'analyse complète des données que nous avons produites l'an dernier. Cette quantité de données, 3 fois supérieure à celle produite en 2011, nous a permis de confirmer la découverte avec une certitude bien supérieure aux « 5 sigmas » (1 possibilité d'erreur sur 3 millions) requis pour annoncer une découverte en physique des particules. On n'observe pas directement le boson de Higgs, seulement les produits de sa désintégration. Et quand il se désintègre en 4 leptons, situation la plus simple à analyser, les résultats pour chacune des deux expériences ont une certitude de 7 sigmas envi-

ron. Ils permettent aussi de caractériser avec certitude d'autres propriétés attendues pour le boson de Higgs, comme son spin et sa parité (des propriétés quantiques intrinsèques). Quelles sont les autres précisions apportées au cours de cette conférence ? Y.S. Le fait d'accumuler plus de données nous a permis d'obtenir des résultats significatifs dans des modes de désintégration auxquels on n'avait pas accès auparavant. Par exemple, pour le canal de désintégration du boson de Higgs en paires de leptons tau, nous possédons désormais des résultats avec une certitude d'environ 3 sigmas (1 risque d'erreur sur 350). C'est la première preuve du couplage direct entre ce boson et ce type de

zoom **Des ondes en forme d'étoile et de polygone**

Des physiciens français, de l'université de Nice-Sophia Antipolis, ont créé des ondes de forme originale : une forme d'étoile à cinq branches ou de polygone à la surface d'un liquide très visqueux, l'huile de silicone. Ils ont mené leur expérience dans un « plat » cylindrique, rempli d'huile de silicone sur 7 millimètres de hauteur. Ils ont soumis ce plat à des vibrations verticales, dont ils contrôlaient la fréquence et l'amplitude. C'est en augmentant l'amplitude des vibrations jusqu'à 1,95 millimètre qu'ils ont observé la formation, en alternance, d'ondes en forme d'étoile ou de polygone. D'après eux, ce phénomène serait causé par des interactions non linéaires entre ces ondes de grande amplitude. J. Rajchenbach et al., *Phys. Rev. Lett.*, 110, 094502, 2013.



© JEAN RAJCHENBACH, ALPHONSE LEROUX (LIPACI) ET ANNE MARIE LEROUX (LIPACI) DE NICE-SOPHIA ANTIPOLIS

de Higgs

leptons, qui appartiennent à la série la plus lourde des composants élémentaires de la matière, les fermions. Par ailleurs, dans les résultats qu'elle a présentés au Japon, en fin d'année 2012, Atlas observait un taux presque 2 fois trop important, par rapport aux prédictions, pour le canal où le boson

de Higgs se désintègre en 2 photons. Cet excès qui attise la curiosité demeure dans Atlas, mais il disparaît si on combine avec les résultats des dernières analyses dévolées par CMS. Les résultats entrent maintenant dans les marges d'erreur compatibles avec les prédictions.

Pourquoi le directeur du CERN, Rolf Heuer, parle-t-il d'« un » boson de Higgs, et non « du » boson de Higgs ?

Y.S. Ce boson de Higgs, avec sa masse estimée à 125,8 gigaélectronvolts (GeV, 10⁹ électronvolts) pour CMS, et 125,5 GeV pour ATLAS, pourrait être le plus léger des 5 bosons de Higgs que l'on retrouve dans certaines théories au-delà de notre cadre théorique actuel, le modèle standard. En effet, dans une théorie comme la supersymétrie, le plus léger des bosons de Higgs possède

presque les mêmes propriétés que celui du modèle standard. Pour l'instant, nous n'avons détecté aucun signe de l'existence de ces éventuels autres bosons. Mais peut-être en sera-t-il autrement, à partir de 2015, lorsque le collisionneur aura commencé à fonctionner à pleine puissance – 14 téraélectronvolts (10¹² électronvolts). ■ Propos recueillis par Vincent Glavieux

Nouvelles orbites pour le problème des trois corps

DYNAMIQUE

De nouvelles solutions à un célèbre problème de mécanique céleste permettent de mieux comprendre sa structure mathématique.

Déterminez les trajectoires de trois corps massifs soumis uniquement à l'attraction gravitationnelle qu'ils exercent les uns sur les autres, tels le Soleil et deux planètes. L'énoncé du « problème des trois corps » est simple. Les équations qui le décrivent aussi : elles découlent directement de la loi de la gravitation de Newton. Et pourtant, astronomes et mathématiciens n'en ont pas encore percé tous les secrets, d'où l'intérêt des résultats que viennent de présenter Milovan Suvakov et Veljko Dmitrasinovic, de l'Institut de physique de Belgrade, en Serbie. Ils ont découvert 13 familles supplémentaires de solutions d'orbites périodiques, et ont proposé une classification mathématique pour celles-ci [1].

En écrivant le principe fondamental de la dynamique, on

obtient des équations différentielles qui formalisent le problème des trois corps. Or, à la fin du XIX^e siècle, le mathématicien Henri Poincaré a apporté un élément décisif en démontrant qu'on ne pouvait pas exprimer une solution générale de ces équations. Il a alors affirmé que, pour s'attaquer à ce problème, l'une des rares méthodes d'approche était de rechercher des solutions périodiques : à savoir des solutions pour lesquelles les trois masses décrivent une trajectoire se répétant de manière quasi identique à elle-même dans le temps.

Les scientifiques se sont depuis attelés à chercher des solutions de ce type. Cela ne peut toutefois pas se faire à l'aveugle, car « si l'on cherche des orbites au hasard avec un ordinateur, la probabilité de tomber sur une orbite intéressante est nulle », explique Jacques Féjoz, professeur de mathématiques à l'université Paris-Dauphine et à l'Observatoire de Paris.

Pour trouver de nouvelles familles de solutions (orbites aux caractéristiques voisines) aux symétries intéressantes, les physiciens serbes ont imposé certaines conditions initiales telles que les posi-



© M. SUVAKOV & D. MITRASINOVIC, INSTITUTE OF PHYSICS, BELGRADE (HTTP://DOI.ORG/10.1088/0954-6460/25/1/013101)

Trois des 13 nouvelles familles de solutions périodiques du problème des trois corps sont ici représentées sur une sphère qui code les variations au cours du temps de la forme du triangle formé par les trois objets.

tions et des relations mathématiques entre les vitesses. Ils ont ensuite exploré la fenêtre de paramètres initiaux ainsi délimitée. Les calculs menés sur ordinateur ont permis aux chercheurs de trouver 13 nouvelles familles d'orbites.

S'inspirant de travaux antérieurs de Richard Montgomery, professeur de mathématiques à l'université de Californie, les scientifiques ont ensuite classifié les orbites, nouvelles et anciennes, en les représentant sur une sphère appelée « sphère des formes ». À chaque point de cette sphère correspond une configuration en triangle des trois corps, où la taille et l'orientation du triangle ne comptent pas. C'est donc l'évolution de la forme du triangle au cours du temps qui est tracée. Les physiciens ont pu dégager quatre classes d'orbites, distinguées notamment par les symétries qu'elles présentent sur cette sphère. Avec cette nouvelle étape, « ils ont fait un pas en avant vers une classification sur laquelle je travaille depuis plus de dix ans », s'enthousiasme Richard Montgomery. ■

Florence Martinache [1] M. Suvakov et al., *Phys. Rev. Lett.*, sous presse, 2013.

N° 484 • 6,40€ FÉVRIER 2014

LA Recherche

L'actualité des sciences

Entretien
exclusif

PETER HIGGS RACONTE L'AVENTURE DU BOSON

Prix Nobel de physique 2013
avec François Englert

MATHÉMATIQUES
La théorie qui révolutionne
L'IMAGE
NUMÉRIQUE



M 01108 - 484 - F: 6,40 € - RD

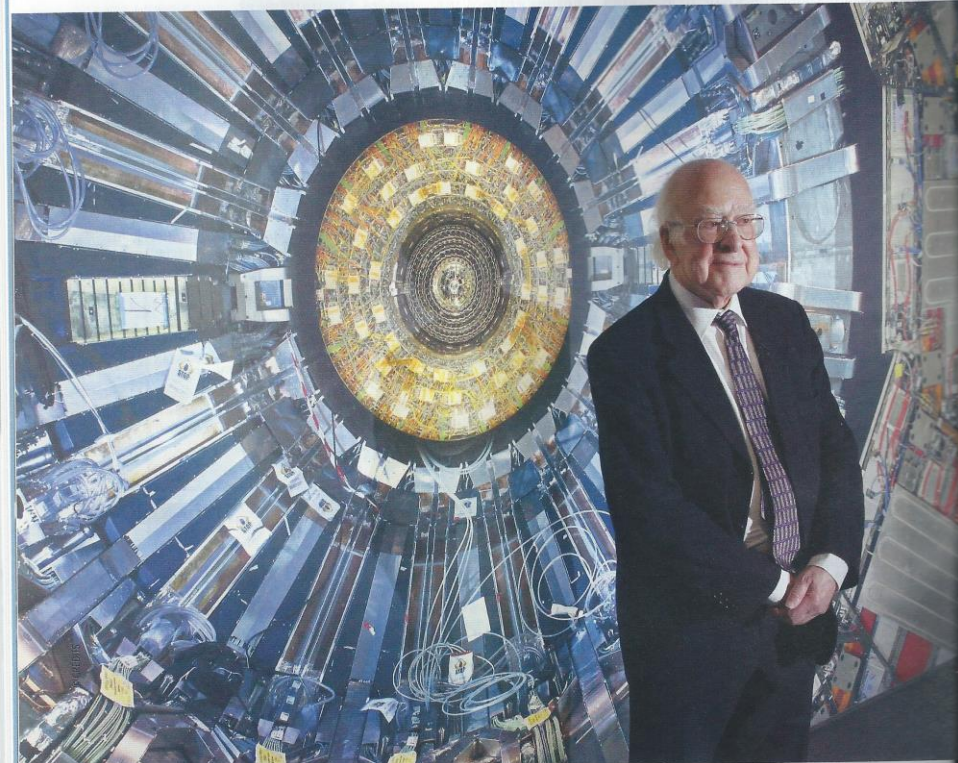


MENSUEL DOM 7,40 € BEL 7,40 € LUX 7,40 € D 8,20 € ESP 7,40 € GR 7,40 € ITA 7,40 € PORT 7,40 € CAN 10,5 \$ CAN CH 12,40 \$ MAR 4,3 DH TUN 6,50 TND MAVOITE 8,80 € TOM SURFACE 970 XPF TOM AVION 1420 XPF - ISSN 0029571

Février 2014

PETER HIGGS : « Imaginer que ma théorie était fausse semblait difficile »

Le Prix Nobel de physique 2013 revient sur cinquante ans d'histoire de la physique des particules : de ses travaux théoriques à la découverte du boson de Higgs en passant par la construction du « modèle standard ».



Février 2014

→ **Bref**

→ **MÉDECINE**
Mécanisme anti-diabète

Il aura fallu cinquante ans pour découvrir comment la metformine, médicament couramment utilisé contre le diabète de type 2, bloque la production de glucose par le foie : elle inhibe une enzyme hépatique située dans les mitochondries, « usines énergétiques » des cellules.

A.K. Madiraju et al., *Nature*, 510, 542, 2014.

→ **PHYSIQUE**
Le boson de Higgs et ses fermions

La collaboration CMS vient de le montrer : le boson de Higgs peut se désintégrer directement en fermions, particules de matière. Jusqu'à présent, on pensait qu'il devait d'abord se désintégrer en bosons, particules responsables des interactions entre fermions.

Collaboration CMS, *Nat. Phys.*, doi:10.1038/nphys3005, 2014.

→ **ÉTHOLOGIE**
Des chimpanzés coquets

Se mettre un brin d'herbe dans l'oreille : cette pratique s'est répandue dans un groupe de onze chimpanzés d'une réserve de Zambie, observés durant un an par une équipe néerlandaise. Initiée par une femelle, elle s'est perpétuée après sa mort.

E.J. van Leeuwen et al., *Anim. Cogn.*, doi:10.1007/s10071-014-0766-8, 2014.

Indicateur
100 000

femmes portant ou ayant porté des implants mammaires seront suivies pendant dix ans, dans le cadre de l'étude française Lucie, pour évaluer l'incidence des effets indésirables.
<http://alarecherchehelucie.fr>

Environnement

« Les fonds marins menacés par l'exploitation des minerais »



SYLVAIN LAMARE est biochimiste à l'université de La Rochelle et directeur adjoint scientifique de

l'Institut écologie et environnement du CNRS.

Vous avez copiloté la récente expertise collective réalisée par le CNRS et l'Ifremer sur l'impact environnemental de l'exploitation des minerais dans les fonds marins. Pourquoi une telle étude ?

S.L. Parce que les minerais des grands fonds océaniques, entre 800 et 5500 mètres de profondeur, suscitent de plus en plus d'intérêt des industriels et des États. Actuellement, plus de 1,8 million de kilomètres carrés de fonds océaniques font l'objet de dépôts de permis d'exploration. Et, depuis avril dernier, la société canadienne Nautilus Minerals peut exploiter les nodules polymétalliques des fonds marins de Papouasie-Nouvelle-Guinée. Cet intérêt tient au fait que les ressources minérales des continents s'épuisent, tandis que la demande des pays émergents ne fait que croître. Avec son domaine maritime qui s'étend sur 11 millions de kilomètres carrés, la France est particulièrement concernée. Aussi le ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie a-t-il demandé au CNRS et à l'Ifremer de synthétiser les connaissances scientifiques permettant d'évaluer les impacts environnementaux d'une telle exploitation [1].

Quels sont les écosystèmes concernés ?

S.L. On en distingue trois : les sites hydrothermaux, les monts sous-marins et les plaines abyssales. Les sites hydrothermaux, actifs ou inactifs, sont situés entre 800 et 5000 mètres de profondeur. Ils renferment des amas de minéraux sulfurés contenant des métaux de base (fer, cuivre, zinc) et des métaux rares

(or ou argent). Les monts sous-marins, entre 400 et 4000 mètres de profondeur, sont recouverts de croûtes avec de fortes teneurs en manganèse et en cobalt, parfois en platine et en tellure. Enfin, certaines zones des plaines abyssales, entre 3000 et 5500 mètres de profondeur, sont parsemées de nodules riches en fer, manganèse, cuivre, nickel et cobalt.

En quoi l'exploitation de ces minerais ferait-elle courir des risques ?

S.L. Il est difficile d'être précis, car les industriels restent très discrets en ce qui concerne les techniques d'exploitation envisagées. Toutefois, il est évident que l'extraction endommagera la faune et son habitat. Par exemple, le grattage des croûtes cobaltifères entraînera la destruction des coraux qu'elles abritent. Cela pourrait également générer des nuages de particules contenant des métaux lourds toxiques susceptibles de s'accumuler tout le long de la chaîne alimentaire. Le rejet à l'eau des sédiments extraits en même temps que les minéraux pose aussi problème. S'il est effectué à proximité immédiate des fonds marins, la faune risque d'être étouffée. Et s'il est fait à mi-hauteur dans la mer, cela pourrait affecter des espèces pêchées.

Au-delà de ce diagnostic, que préconisez-vous ?

S.L. Pour mieux évaluer les risques, il faut absolument poursuivre l'exploration scientifique des écosystèmes marins concernés, car ils restent mal connus. Ainsi, on ne sait presque rien de la faune des sites hydrothermaux inactifs. En ce qui concerne les monts sous-marins et les plaines abyssales, on connaît bien les animaux de moyenne et grande taille mais pas la microfaune. Mais surtout, il faut susciter une concertation entre les sociétés exploitantes, les États, les organisations non gouvernementales, l'Autorité internationale des fonds marins et les organismes de recherche. C'est le seul moyen d'éviter des controverses sociétales. ■

Propos recueillis par Jacques Abadie

[1] www.cnrs.fr/linee/communication/esco2014.htm


2. Le neutrino supraluminique

N° 457 • 6,20€ NOVEMBRE 2011

LA RECHERCHE

LA Recherche

L'actualité des sciences



COMMENT NOUS DEVENONS INTELLIGENTS

*Ce que révèle
l'imagerie cérébrale*



ÉVÉNEMENT
**Neutrinos
Einstein
a-t-il tort ?**

Cahier spécial
**Le Prix
La Recherche
2011**

M 01108 - 457 - F. 6,20 €



Novembre 2011

L'événement



Au CERN de Genève, un accélérateur émet un flux de particules focalisées en un faisceau et orientées par un système de lentilles magnétiques vers l'Italie. En se désintégrant, ces particules donnent naissance à un faisceau de neutrinos qui voyagent en ligne droite à travers l'écorce terrestre jusqu'au détecteur du laboratoire souterrain de Gran Sasso.

© INFOGRAPHIE BRUNO BOURGEOIS - PHOTO CERN

neutrinos sont arrivés 60 milliardièmes de seconde plus tôt que prévu. Comme s'ils avaient franchi la ligne d'arrivée avec 20 mètres d'avance sur la lumière [1].

Six mois de calculs. « Débutée en 2006, l'expérience Opera a été conçue pour observer les oscillations des neutrinos : c'est-à-dire leur transformation d'un type en un autre, en particulier celle du neutrino "muon" en neutrino "tau" », résume Dario Autiero. Ces particules fugaces sont créées au CERN par bombardement d'une cible par un faisceau de protons, provoquant une série de désintégrations qui donne finalement naissance à des neutrinos. Comme ces derniers interagissent très peu avec la matière et ne se détectent qu'indirectement, le détecteur est placé sous une roche immense, la montagne de Gran Sasso. « En 2008, nous avons décidé de mesurer le temps de parcours entre la source et le détecteur. Nous avons mis en place toute l'instrumentation nécessaire pour mesurer la distance exacte et tous les délais pouvant intervenir dans l'expérience. » Le résultat tombe en mars dernier, au très grand étonnement de l'équipe d'Opera.

Des neutrinos supraluminiques ? « Je n'y croyais pas un instant, se souvient Dario Autiero. Ça a été un vrai choc pour tout le monde. Nous avons décidé de ne rien en dire, et de tout reprendre de zéro. » Les spécialistes de géodésie de l'institut allemand de métrologie PTB ont été rappelés en renfort pour vérifier la distance parcourue. Pendant six mois, des calculs ont été faits pour évaluer l'influence des mouvements des plaques tectoniques, celle du séisme italien de l'Aquila, en 2009, la position des balises de positionnement GPS, la précision des horloges atomiques, l'emplacement des

détecteurs... Et aucune de ces vérifications n'a remis en question le résultat : l'avance des neutrinos (60 nanosecondes) est six fois plus importante que l'incertitude sur la mesure. Un résultat qui devient de plus en plus difficile à garder secret. Les responsables de l'expérience Opera décident donc de le rendre public le 23 septembre dernier.

Dans la communauté scientifique, le sentiment est partagé entre l'admiration pour le travail de vérification entrepris par Dario Autiero et ses collègues, et le scepticisme. Déjà, en 1987, une expérience similaire, menée dans le cadre du programme Minos, du Fermilab américain avait conduit à une conclusion proche, mais l'incertitude expérimentale était trop élevée. Jenny Thomas, porte-parole de Minos, reste prudente : « On ne jette pas des modèles qui marchent depuis longtemps pour un seul résultat. Mais si c'est vrai, ce serait le plus grand séisme dans la physique depuis Einstein. »

Pour Michel Gonin, de l'École polytechnique, qui participe à T2K, une expérience similaire à Opera au Japon, il n'est pas question de parler de vitesse supraluminique du neutrino. Il s'agit pour l'instant d'une « anomalie », comme le CERN l'indique dans ses communiqués. « C'est un excellent travail, avec un souci méticuleux d'éliminer les causes d'erreurs. Il n'y a aucun doute sur leur résultat. » >>>

Des neutrinos supraluminiques interrogent la physique

Un neutrino peut-il aller plus vite que la lumière ? C'est ce que laissent penser les résultats d'une expérience conduite entre le CERN, en Suisse, et le laboratoire italien de Gran Sasso. Chez les physiciens, la prudence est de mise.

Tout reste encore à démontrer. Mi-septembre, la révélation, par une équipe internationale, respectée en physique des hautes énergies, de l'existence de neutrinos « supraluminiques » a suscité une grande excitation chez les physiciens et le grand public, tout autant qu'un doute profond. Car les résultats de l'expérience dite Opera aboutiraient, s'ils étaient validés par d'autres équipes et expliqués, à une remise en question d'un des fondements de la théorie de la relativité restreinte énoncée par

Einstein en 1905 : rien ne peut dépasser « c », la vitesse de la lumière dans le vide. Rien que ça... On comprend dès lors la prudence, le scepticisme, voire l'incrédulité des spécialistes du domaine. Retour sur une annonce époustouflante, et sur ses enjeux.

Vitesse de la lumière. Imaginons une course contre la montre. Un faisceau de neutrinos sur la ligne de départ pour un parcours de 732 kilomètres en ligne droite à travers l'écorce terrestre. La montre a fixé le temps du trajet : 2,4 millièmes de seconde, soit celui qui mettraient des photons de

Par Denis Delbecq, journaliste.

lumière pour parcourir le même trajet dans le vide. Albert Einstein l'avait proposé sans jamais être démenti : rien ne peut dépasser la vitesse de la lumière, les neutrinos ne peuvent donc que l'égaliser. La course s'est tenue sous l'égide de l'équipe de l'expérience internationale Opera, entre le site du CERN, près de Genève, et le laboratoire souterrain de Gran Sasso, enfoui sous 1400 mètres de roche dans les Abruzzes italiennes. Et les résultats du chrono ont provoqué un véritable séisme : le 23 septembre, lors d'une conférence organisée au CERN, Dario Autiero, de l'institut de physique nucléaire de Lyon, annonçait que les

L'essentiel

- > LA MESURE DU TEMPS mis par les neutrinos pour traverser la croûte terrestre dans le cadre de l'expérience Opera contredit Einstein sur la vitesse de la lumière.
- > LES PHYSICIENS du projet Opera ont refait leurs calculs et cherché l'erreur, sans succès. Deux autres équipes vont les y aider.
- > LE SCEPTICISME domine parmi les physiciens car d'autres expériences sur les neutrinos ne montrent aucun écart inexplicable.

En bref

VOITURE
NANOMÉTRIQUE

La plus petite voiture jamais créée a été mise au point par des chercheurs néerlandais et suisses. L'engin nanométrique est fait d'une molécule organique centrale à laquelle sont attachées quatre « roues », constituées de seulement quelques atomes chacune. Mobiles, les roues sont mises en mouvement lorsqu'elles sont frappées par un faisceau d'électrons, permettant ainsi à la voiture de se déplacer en ligne droite. De telles machines miniatures pourraient être utilisées dans le futur pour transporter des molécules avec une extrême précision.

T. Kudernac et al., *Nature*, doi:10.1038/nature10567.

NOUVEAU CANDIDAT
POUR L'ORDINATEUR
QUANTIQUE

Le carbure de silicium, utilisé en électronique, pourrait aussi servir à la réalisation d'un ordinateur quantique, une machine qui tirerait parti de la capacité des particules à être dans plusieurs états à la fois. C'est la conclusion de physiciens américains qui ont identifié dans le matériau des défauts à l'échelle atomique dans lesquels ils sont parvenus à manipuler le spin des électrons – sorte de minuscule aimant porté par ces particules – et à le conserver dans deux états à la fois pendant un temps relativement long. Ce spin pourrait ainsi être utilisé comme bit d'information quantique.

W. Koehl et al., *Nature*, doi:10.1038/nature10562.

sur le web

<http://tinyurl.com/double-chooz>
L'expérience Double Chooz livre ses premiers résultats sur l'oscillation des neutrinos. Le site explique les enjeux et le fonctionnement des détecteurs qui capturent le flux de neutrinos produits par la centrale de Chooz dans les Ardennes.

PARTICULES *Le neutrino s'entête à dépasser la lumière*

QUESTIONS À L'EXPERT



© C. FRESLIN/PHOTODISC PHOTOT

Dario Autiero, physicien à l'Institut national de physique nucléaire de Lyon, coordonne l'expérience Opera au CERN.

Vous venez d'annoncer de nouvelles mesures de la vitesse du neutrino, entre le CERN, en Suisse, et le laboratoire de Gran Sasso, en Italie. Qu'apportent-elles de plus ?

D.A. En septembre, nous avions montré que les neutrinos produits au CERN en bombardant une cible avec un faisceau de protons sont détectés à Gran Sasso avec environ 57,8 nanosecondes d'avance sur le temps que mettraient des photons pour parcourir le même trajet. Nous avons tenté de répondre à plusieurs critiques portées par la communauté scientifique. Nos précédentes mesures étaient réali-

sées avec des impulsions de protons sur la cible d'une durée de 10,5 microsecondes, espacées de 50 millisecondes. Cela nous empêchait de mesurer le temps de parcours de chaque neutrino individuellement. Nous devions donc en passer par une analyse statistique, comme si on mesurait le temps moyen mis par les participants d'un marathon. Ainsi nous avons refait des mesures en utilisant des

Avec des impulsions beaucoup plus courtes, nous avons pu calculer la vitesse individuelle de chacun des neutrinos

impulsions beaucoup plus courtes – d'une durée de 2,5 nanosecondes, espacées de 524 nanosecondes. Suffisamment courtes pour nous permettre de relier directement chaque neutrino observé à Gran Sasso à l'impact sur la cible qui lui a donné naissance au CERN, et par conséquent de calculer de manière très simple la vitesse individuelle de chacun. Lors de cette seconde

série d'expériences – qui porte sur 20 événements enregistrés, entre le 22 octobre et le 6 novembre –, les neutrinos arrivent, en moyenne, avec une avance de 62,1 nanosecondes sur le temps que mettrait la lumière dans le vide. Une valeur qui, compte tenu de l'incertitude de mesure, confirme nos premières estimations.

Pourquoi ne pas avoir procédé de cette manière plus tôt ?

D.A. L'expérience Opera s'est greffée sur d'autres expériences qui reposent sur

l'observation à Gran Sasso des neutrinos produits au CERN. Elles ont besoin d'un très grand nombre d'événements et ne permettent donc pas d'utiliser des impulsions de très courte durée. Nous avons profité de la disponibilité des installations avant le début de la trêve hivernale – l'accélérateur du CERN ne fonctionne pas de novembre à mars en raison du coût élevé de

l'électricité – pour conduire nos nouvelles mesures, qui confirment la fiabilité de la méthode statistique que nous avions utilisée avec des impulsions plus longues. Dorénavant, nous allons nous attacher à améliorer l'expérience sur plusieurs points, pour affiner encore la précision de nos mesures. Nous réfléchissons aussi à faire des mesures sur des antineutrinos et des mesures en fonction de l'énergie des neutrinos.

Fort de vos nouveaux résultats, avez-vous la certitude que le neutrino se déplace plus vite que la lumière ?

D.A. Ils renforcent la confiance que nous avions déjà dans nos mesures, et nous avons soumis l'ensemble de notre travail le 17 novembre au *Journal for High Energy Physics* [1]. Mais nous n'aurons pas de certitude tant que d'autres expériences indépendantes, comme Minos aux États-Unis ou T2K au Japon, n'auront pas reproduit nos résultats. ■ **Propos recueillis par Denis Delbecq**
[1] <http://arxiv.org/abs/1109.4897>, 2011.

Des nœuds dans les molécules

SYNTHÈSE

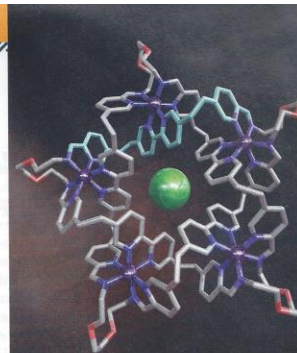
Des chimistes ont mis au point une molécule en forme de nœud à cinq points d'intersection, la plus complexe de ce genre jamais synthétisée.

Imaginer nouer un fil 100 000 fois plus fin qu'un cheveu. C'est la prouesse que vient d'accomplir une équipe de chimistes dirigée par David Leigh, de l'université d'Édimbourg. Les chercheurs ont créé une molécule de 160 atomes seulement en forme de nœud, le plus complexe de cette taille jamais fabriqué [1]. Cette molécule est la version miniature du nœud à cinq points d'intersection et en forme d'étoile à cinq branches bien connu des mathématiciens, encore baptisé nœud de Salomon, un symbole culturel ancien que l'on retrouve sur le drapeau du Maroc.

Les chimistes n'en sont pas à leur première réalisation de nœud moléculaire. Il y a plus de vingt ans déjà, une équipe française avait synthétisé le premier d'entre eux, le nœud de trèfle, à trois points d'intersection. Depuis, plus rien. « Il faut dire que cet art de tri-

coter les molécules est extrêmement compliqué, confie Jean-Pierre Sauvage, de l'Institut de science et d'ingénierie supramoléculaires, à Strasbourg, auteur de la première molécule à nœud. Il faut mélanger les bons ingrédients dans les bonnes proportions pour qu'ils puissent s'entrelacer. »

Pour établir ce record, David Leigh et ses collègues ont sélectionné trois espèces chimiques, qui, en se liant entre elles à des endroits bien précis, allaient aboutir au canevas microscopique qu'ils avaient imaginé. Les ions fer, d'abord, chargés positivement, ont joué le rôle d'une aiguille. Quant aux longues chaînes de molécules organiques, elles ont servi de fil. Les ions chlorure, enfin, chargés négativement, ont orchestré la réaction : chacun a attiré à lui cinq de ces fils et aiguilles moléculaires. Dirigés par les ions métalliques – les aiguilles de fer –, les cinq fils se sont alors entremêlés avant de se refermer, via des liaisons chimiques, aux pointes de l'étoile, formant



Cette vue de la structure de la molécule mise au point montre comment les chaînes de molécules organiques (en gris, rouge et bleu) se nouent au niveau des atomes de fer (en violet) autour de l'atome central de chlore (en vert). ■ ROBERT H. SCOT/COOR (WWW.COORFLEAT.COM)

ainsi une molécule unique. « L'innovation a été de faire réagir ces trois briques de base au cours d'une seule et même réaction, explique Jean-François Ayme, un des auteurs de ces travaux. Et non pas étape par étape, comme les chimistes avaient l'habitude de travailler jusqu'à maintenant pour construire un nœud moléculaire. »

L'équipe de David Leigh ne compte pas s'arrêter là. Les chimistes pensent déjà à la réalisation de nœuds plus complexes encore, à commencer par ceux à sept croisements, et pas seulement pour la prouesse technique. Car comme l'explique Jean-Pierre Sauvage : « Les nœuds sont présents partout, dans les molécules biologiques (ADN, protéines...) et dans les polymères naturels et ceux créés par l'homme. » En fabriquant des nœuds en laboratoire, les scientifiques espèrent ainsi mieux comprendre comment ces entrelacements influencent les propriétés des matériaux ou les fonctions des molécules du vivant, mais aussi mettre au point des composés aux propriétés encore inconnues en y intégrant tel ou tel type de nœuds. ■ **Julien Bourdet**
[1] J.-F. Ayme et al., *Nature Chemistry*, doi:10.1038/NCHEM.1193.2011.

zoom Origamis magnétiques

Comment sculpter à distance la forme de minuscules objets ? Des chercheurs français (dont un collaborateur régulier de *La Recherche*) apportent une réponse originale. En déposant une gouttelette d'eau contenant des particules magnétisées sur une membrane élastique millimétrique triangulaire, puis en appliquant un champ magnétique, ils ont modifié la forme de l'enveloppe. En l'absence de champ magnétique, la membrane

s'enroule autour de la goutte, du fait de la tension de surface de cette dernière : les trois sommets se rejoignent (à gauche). Puis, quand le champ magnétique augmente, la goutte s'étire et avec elle la membrane, qui finit par changer complètement de configuration (à droite). La technique pourrait être utilisée un jour en électronique pour réaliser des structures microscopiques.

T. Jamin et al., *PRL*, doi:10.1103/PhysRevLett.107.204503.



© T. JAMIN/UNIV. PARIS-DIDEROT PARIS

N° 466 • 6,50€ JUILLET-AOÛT 2012

LA Recherche

L'actualité des sciences

Numéro
d'été
116 pages

Spécial PHYSIQUE DU XXI^e SIÈCLE

Matière noire Bosc de Higgs
Neutrinos Théorie des cordes
Supersymétrie Constante cosmologique
Énergie sombre Particules
Expansion Gravitation quantique
de l'Univers Énergie du vide
Ondes gravitationnelles Trous noirs

ARCHÉOLOGIE : la saga
de la grotte Chauvet



M 01108 - 466 - F - 6,50 € - RD



MENSUEL DOM 6,90 € BEL 7,50 € LUX 7,50 € ESP 7,50 € GR 7,50 € ITA 7,50 € POR 7,50 € CAN 10,50 \$ CAN 10,50 \$ CH 13 FS MAR 6,50 DH TUN 6,50 TND MAYOTE 8,90 € TOM 5 970 XPF TOM A 1620 XPF USA 002956711

Juillet 2012

Les neutrinos défient les physiciens

Les neutrinos, infimes particules, n'en finissent pas d'intriguer. De nouvelles expériences cherchent à mettre à l'épreuve des théories divergentes quant à leur nature et à ouvrir la voie à une « nouvelle physique ».



PAR Gilles Cohen-Tannoudji ET Etienne Klein, qui travaillent au laboratoire de recherche sur les sciences de la matière du CEA.

Le 23 septembre 2011, des chercheurs de l'expérience Opera, installée dans le laboratoire souterrain du Gran Sasso, en Italie, présentaient un résultat intrigant : les neutrinos semblaient pouvoir aller plus vite que la lumière !

Cette annonce, qui laissa les physiciens plutôt sceptiques, déclencha un

enthousiasme médiatique considérable : Einstein se serait-il donc trompé ?

Opera est une expérience internationale, destinée à observer le phénomène d'« oscillation de neutrinos » dont on attend qu'il nous renseigne sur la masse encore inconnue de ces particules. Elle utilise un faisceau de neutrinos de haute énergie produit par l'un des accélérateurs du CERN, à Genève, dirigé

vers un détecteur installé à Gran Sasso, à environ 730 kilomètres de distance. L'avance de 60 nanosecondes affichée par les neutrinos, révélée par ses mesures, était donc sans rapport direct avec son objectif principal.

Depuis, à l'issue d'un long travail de détective, deux sources d'erreur expérimentale ont été découvertes : une mauvaise connexion entre un GPS et un ordinateur avait réduit le temps de vol des neutrinos de 75 nanosecondes, tandis qu'une horloge vibrant plus vite que prévu l'avait augmenté de 15 nanosecondes... La somme des deux effets explique les 60 nanosecondes d'avance, indûment constatées.

Icarus, une autre expérience installée au Gran Sasso, et ayant des objectifs voisins de ceux d'Opera, n'avait d'ailleurs pas confirmé l'anomalie détectée par sa consœur. Quelques mois auront donc suffi pour que les choses « rentrent dans le rang », c'est-à-dire pour qu'on ait l'assurance que les neutrinos, comme toutes les autres particules, respectent le droit canon mis en place en 1905 par la théorie de la relativité restreinte. En d'autres termes, la vitesse de la lumière demeure toujours cohérente avec son anagramme : elle « limite les rêves au-delà ».

Le rôle de l'anomalie. Cet épisode n'est pas dénué d'enseignements. D'abord, il rappelle, s'il en était encore besoin, que les erreurs sont possibles en science, notamment lorsque les expériences sont d'une très grande complexité. Il montre également qu'il peut toujours arriver que des données nouvelles obligent les chercheurs à réexaminer leurs connaissances les mieux établies. Même lorsqu'il ne s'agit finalement que d'une fausse alerte, cet exercice n'est jamais inutile.

L'expérience Gerda lors de sa construction : les détecteurs contenant du germanium-76 sont plongés dans 70 mètres cubes d'argon liquide, le tout installé dans une cuve d'eau au laboratoire souterrain du Gran Sasso, en Italie.

© KAI FREUND / UNIVERSITY OF TÜBINGEN



En contrôlant tout le système, les physiciens de l'expérience Opera, qui avaient annoncé avoir détecté des neutrinos plus rapides que la lumière, ont finalement découvert que leurs mesures étaient entachées d'erreurs.

L'annonce des résultats d'Opera a suscité de nombreux échanges entre physiciens de différentes spécialités. Les uns ont expliqué que ces résultats ne pouvaient être pris au sérieux. Soit pour des raisons théoriques, comme les physiciens américains Andrew Cohen et Sheldon Glashow, qui ont très vite montré que de tels neutrinos supraluminiques auraient de toute façon perdu la quasi-totalité de leur énergie, par une sorte de rayonnement de freinage, avant d'atteindre le détecteur d'Opera [1]. Soit parce que ces résultats étaient en contradiction flagrante avec d'autres observations, notamment celles faites lors de l'explosion d'une supernova nommée 1987A [2].

D'autres chercheurs ont traqué les failles possibles ou les biais éventuels de l'expérience, concernant par exemple la synchronisation des horloges, la prise en compte des erreurs statistiques, les incertitudes sur les instants d'émission des neutrinos... D'autres ont proposé des interprétations alternatives du résultat, s'interrogeant en particulier sur la notion de temps de vol en théorie de la relativité générale.

D'autres encore ont tenté de « recycler » d'anciennes théories, notamment celle des « tachyons », particules hypothétiques supraluminiques satisfaisant malgré tout aux postulats de la relativité restreinte [3], ou bien ont réexaminé le statut du principe de causalité dans un cadre relativiste. D'autres enfin ont cherché à

rendre compte des résultats d'Opera, soit à partir d'une nouvelle physique impliquant des neutrinos authentiquement supraluminiques, soit à partir de théories physiques encore à l'ébauche, comme la théorie des supercordes qui envisage des dimensions supplémentaires d'espace-temps que les neutrinos auraient pu emprunter entre Genève et l'Italie...

Ces diverses réactions, mises ensemble, sont venues enrichir une sorte de leçon d'épistémologie que l'histoire de la physique nous a déjà largement >>>

> LA QUESTION

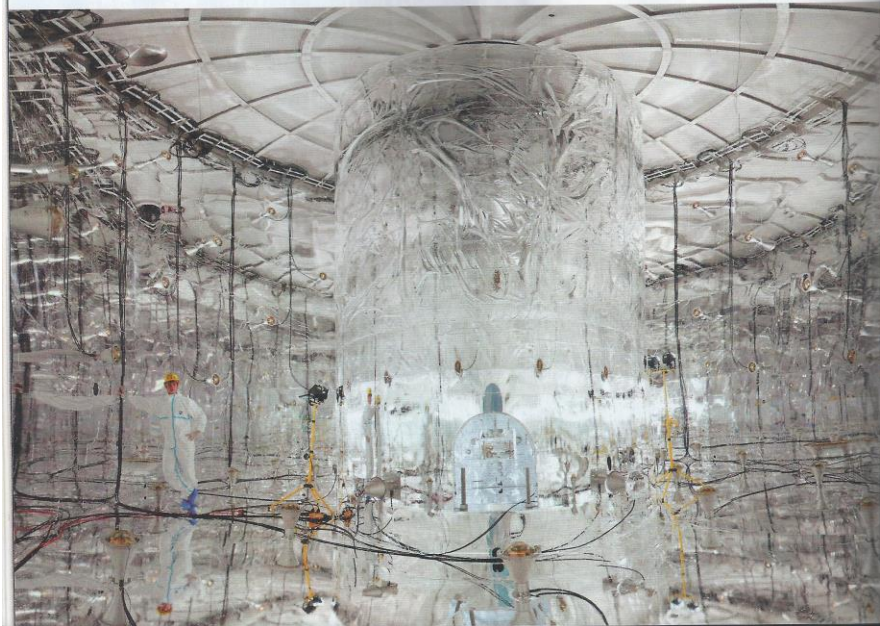
Le neutrino est-il sa propre antiparticule ? Cette question fondamentale est liée aux recherches sur sa masse, que l'on cherche toujours à déterminer.

> L'EXPÉRIENCE

Les physiciens cherchent à détecter un type de désintégration nucléaire, très rare, la double désintégration β sans émission de neutrino, à partir de noyaux atomiques particuliers.

> L'ÉCHÉANCE

La nouvelle génération d'expériences internationales, développées actuellement, devrait fournir des données à l'horizon 2015.





Dario Autiero est né le 3 décembre 1964 à Naples, en Italie. Après ses études à l'université de Pise, où il obtient un doctorat de physique des particules, il rejoint en 1994 le CERN à Genève. Il y travaille notamment sur l'expérience Nomad, avant de s'impliquer dans la collaboration internationale Opera et de rejoindre en 2002 l'institut de physique nucléaire de Lyon du CNRS. Il a été désigné « Personnalité scientifique de l'année 2011 » par la revue *Nature*.

« Ce qui compte, c'est que nous avons mesuré la vitesse du neutrino »

Coordinateur discret de l'expérience internationale Opera sur les neutrinos, le physicien Dario Autiero s'est retrouvé sous les projecteurs l'an dernier en annonçant que la particule semblait aller plus vite que la lumière.

C'est l'histoire d'une particule, un neutrino, qui n'aurait jamais dû arriver en avance. L'histoire, aussi, d'un physicien trahi par un câble mal branché. Expérimentateur de renom, Dario Autiero s'était mis en tête, avec une vingtaine de physiciens, de mesurer la vitesse des neutrinos, particules qui n'interagissent presque pas avec la matière. En septembre 2011, le résultat est rendu public : la particule serait plus rapide que la lumière, en violation de la théorie de la relativité d'Einstein. Neuf mois et de nombreuses expériences plus tard, le neutrino est rentré dans le rang. Le héros de l'histoire n'a pas pour autant perdu sa soif de comprendre.

« Maintenant que cette période un peu folle est achevée, j'ai retrouvé mon état fondamental », sourit Dario Autiero. Sa voix douce dévoile ses origines italiennes. Elle ne laisse paraître ni lassitude ni déception. Dans son bureau de l'institut de physique nucléaire de Lyon, le quadragénaire grisonnant affiche une passion intacte pour la science. « Ça remonte à mon enfance, raconte le physicien. À 7 ans, j'ai remarqué, sur un étalage à Venise, une série de jolis livres qui expliquaient les atomes, les molécules et toutes ces choses. J'ai convaincu mon grand-père de me les offrir. J'étais surpris d'apprendre que le son et la lumière n'ont pas la même vitesse. J'ai alors compris que c'est la physique qui tente de répondre aux questions essentielles sur notre monde. »

Son appétit grandit au cours de l'adolescence. « Pendant les vacances, j'allais à la plage le matin, puis je me plongeais dans des livres universitaires. » Né dans une famille où les nombres s'alignent

en tableaux – un père économiste et une mère experte-comptable –, le jeune Dario rejoint l'université de Pise. Sa thèse de doctorat, soutenue en 1991, portait sur l'étude des propriétés magnétiques d'une particule élémentaire, le boson W.

« Il était très méticuleux, se souvient Vincenzo Cavasinni, qui dirigea son doctorat. Il revérifiait maintes fois ses résultats. Ensuite, il est parti travailler à l'Organisation européenne de recherche nucléaire (CERN), à Genève, mais on est toujours resté en contact. » Dans ce temple de la physique des particules, Dario Autiero rejoint l'expérience Nomad sur les « oscillations » des neutrinos.

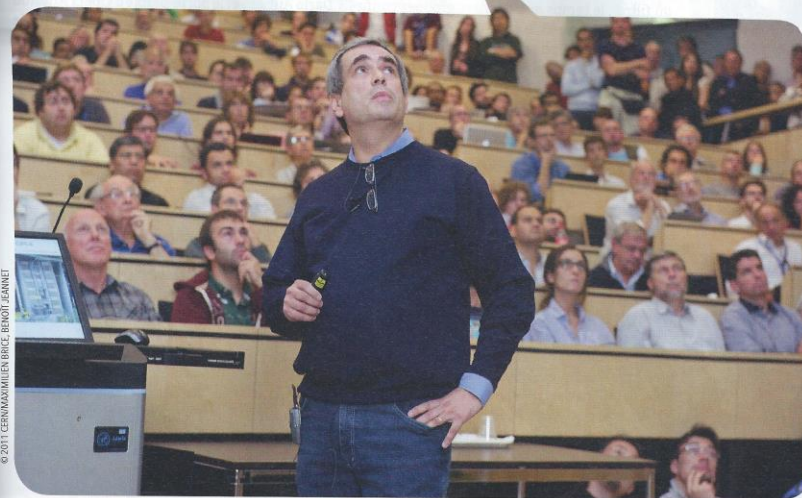
Cette particule existe sous trois formes, et passe spontanément de l'une à l'autre. Nomad a pour but de surprendre de rares neutrinos de type « mu » qui se transforment en neutrinos « tau ». « Ces études doivent répondre à des questions sur l'origine de la masse et de la matière noire dans l'Univers », précise Dario Autiero.

Comprendre l'origine de la masse dans l'Univers passe par l'étude des neutrinos

Au démarrage de Nomad, les physiciens calculent qu'il suffit de placer les détecteurs à un kilomètre de la source de neutrinos. Mais il apparaît qu'il faut laisser les particules parcourir plusieurs centaines de kilomètres pour espérer observer la transformation de quelques-unes. D'où l'idée de la collaboration internationale Opera, démarrée

en 2000 : orienter un faisceau de neutrinos produit au CERN vers le laboratoire souterrain de Gran Sasso, en Italie, à 732 kilomètres de là.

Quand, en 2002, le CERN se retire d'Opera faute de moyens, Dario Autiero rejoint l'institut de physique nucléaire de Lyon, au CNRS. Il est alors dirigé par Yves Déclais, porte-parole de la collaboration. « Dario Autiero est une référence mondiale en phy-



© 2011 CERN/MAXIMILIEN BRICE, RENOTÉ JEANNET

sique, souligne celui-ci, aujourd'hui chercheur émérite. Il a fait partie du noyau dur d'Opera, les trois ou quatre personnes qui ont été essentielles à sa conception et sa mise en œuvre. »

Règle non graduée. Dario Autiero se passionne aussi pour la géodésie et les horloges atomiques. « On s'est dit qu'en améliorant le système de synchronisation avec le CERN, on pourrait mesurer le temps de parcours des neutrinos et en déduire leur vitesse, tout en conduisant nos expériences sur les oscillations », explique-t-il. Opera reçoit des équipements complémentaires pour chronométrer les neutrinos et déterminer la position du laboratoire.

Les chercheurs procèdent en aveugle, pour éviter tout préjugé. « Les données étaient enregistrées dans le cadre d'une configuration technique plus ancienne, qui remontait à 2006. C'est un peu comme si nous avions mesuré une longueur avec une règle non graduée, puis comparé les différentes mesures

pour vérifier qu'elles se recoupaient, avant de recalibrer le résultat pour connaître sa valeur. Ce n'est qu'au printemps 2011 que nous avons calculé la distance entre le CERN et Gran Sasso avec une incertitude de 20 centimètres et déterminé le temps de vol à dix nanosecondes près. » Dario Autiero et son étudiante de thèse, Giulia Brunetti, découvrent alors l'inimaginable : au terme d'un voyage de 2,5 millisecondes, les neutrinos arrivent avec 60 milliardièmes de seconde d'avance sur le temps que mettrait de la lumière sur la même distance.

« Nous étions persuadés qu'il y avait une erreur. Nous avons gardé ça pour nous et entrepris de tout vérifier », précise-t-il. Les ordinateurs, les cartes électroniques, les détecteurs... L'influence, millimétrique, des marées de l'écorce terrestre. L'effet du séisme de l'Aquila en 2009, qui a déplacé le laboratoire de 7 centimètres, etc. Après deux mois d'un travail acharné avec la vingtaine de personnes impliquées, tout a été passé au peigne fin, >>>

Dario Autiero, lors du séminaire du CERN le 23 septembre 2011, où il a présenté les résultats extraordinaires de ses expériences : les neutrinos semblaient avoir voyagé plus vite que la lumière entre la Suisse et l'Italie.

Dario Autiero



Son laboratoire

Il dirige le groupe neutrinos de l'Institut de physique nucléaire de Lyon. Il partage son temps entre Lyon et le laboratoire italien souterrain de Gran Sasso, où sont installés les détecteurs de l'expérience internationale Opera. Il collabore également à l'expérience japonaise T2K sur les oscillations du neutrino et préside le conseil scientifique du groupement de recherche sur les neutrinos (CNRS-CEA).

Ses publications

Il est auteur et coauteur de 130 publications de physique des particules, dans des revues à comité de lecture. Il est également relecteur de nombreuses revues de physique, comme le *Journal of High Energy Physics*, le *New Journal of Physics* et *Earth, Planets and Space*.

» croient alors les chercheurs. « Nous n'avons pas trouvé de biais. Nous avons donc prévenu les responsables de la collaboration, créé un groupe de travail qui a entrepris d'autres vérifications, et enfin averti l'ensemble des membres d'Opera », se souvient Dario Autiero.

Rumeur et fuite. L'information n'aurait pas dû filtrer, le temps que d'autres groupes confirment ou infirment le résultat. Mais Opera rassemble près de 170 scientifiques, ce qui rend le secret difficile à garder. Un séminaire public est donc prévu à Genève le 23 septembre 2011. Hélas, informé de la rumeur deux jours plus tôt, le physicien – retraité – Antonio Zichichi, père du laboratoire de Gran Sasso, appelle le quotidien italien *Il Giornale*, qui relaie la nouvelle dans son édition du 22 septembre, rejoint quelques heures plus tard par l'influent *New York Times*.

Le lendemain, à Genève, chercheurs et journalistes écoutent, médusés, les explications de Dario Autiero. « Je n'ai pas parlé de découverte. Nous avons détaillé notre méthode et ce résultat anormal pour inciter d'autres équipes à faire leurs propres expériences », se défend celui-ci. Malgré cette prudence, de nombreux journalistes évoquent un bouleversement de la physique. « Les médias français ont réagi sans sensationnalisme, souligne le physicien. Mais en Italie et dans les pays anglo-saxons, il y a eu de tout. »

Des dizaines d'articles scientifiques sont diffusés sur le site de prépublication Arxiv. « Je passais mes nuits à répondre aux journalistes, aux chercheurs et même à des particuliers qui avaient chacun, bien sûr, une explication théorique », se souvient-il. Chez les physiciens, le scepticisme est de mise. Le théoricien italien Gian Guidice, du CERN, dira que l'explication théorique la plus plausible qu'il a entendue est qu'en Suisse les neutrinos voyagent à la vitesse de la lumière, mais que sitôt la frontière italienne franchie, ils ne respectent plus les limites de vitesse !

À l'automne 2011, des chronométrages – plus précis – renforcent la confiance du groupe de travail, qui soumet un article au *Journal of High Energy Physics (JHEP)* le 17 novembre. Mais début décembre, une série de vérifications laissent penser qu'un connecteur de fibre optique était mal branché, fait attesté depuis par une photographie découverte dans un dossier. De quoi surestimer la vitesse des neutrinos. Parallèlement, un défaut d'électronique est repéré, qui agit dans le sens inverse. « Le 23 février

2012, j'ai donc demandé au JHEP de mettre en attente l'article, qui avait été accepté. Tout le monde a travaillé jusqu'au bout sans compter, jour et nuit. »

En mai, Opera et trois autres expériences indépendantes de Gran Sasso mettent enfin un terme à l'incertitude : le neutrino ne va pas plus vite que la lumière. Entre-temps, une motion circule au sein de la collaboration pour « renverser » Dario Autiero et le porte-parole d'Opera Antonio Ereditato, autre Italien, basé, lui, à l'université de Berne, en Suisse. En mars, les deux physiciens démissionnent. Pour Yves Déclais : « Cette affaire n'était qu'un prétexte. Les Italiens de Gran Sasso n'ont jamais pardonné à Dario d'avoir choisi le CNRS plutôt que leur laboratoire. »

Ce dernier affirme être heureux de son nouveau sort : « La coordination d'Opera me prenait beaucoup de temps. J'en ai plus aujourd'hui pour faire de la physique. » Il jette un voile pudique sur la manière dont il a traversé ces épreuves. « Ces centaines de courriels et de coups de fil quotidiens, c'était à la limite de l'inhumain. Mais ce qui compte, c'est que l'objectif est atteint : une mesure très fine de la vitesse des neutrinos qui marie la physique des particules et les techniques de métrologie du temps et de l'espace. Cela n'avait jamais été fait. »

L'objectif initial de l'expérience Opera a été atteint, deux neutrinos tau ont été observés

À entendre Vincenzo Cavasinni, il a été plus affecté qu'il ne le dit. « Dario était triste, très touché. Il a même parlé d'abandonner la physique. Je ne m'explique pas qu'ils aient pu passer à côté d'un tel biais alors qu'ils ont vérifié des effets physiques très subtils ; je lui ai rappelé que l'erreur fait partie de la science, et qu'on doit la gérer de manière honnête. Et c'est ce qu'il a fait. » Yves Déclais regrette aussi cette erreur « grossière » : « Mais il a eu raison de mettre son résultat sur la table, et il peut être fier d'avoir conduit jusqu'au bout ce travail, qui reste une vraie première. Certains sont très forts pour commenter le travail des autres. Ils oublient qu'il y a eu beaucoup d'erreurs dans l'histoire de la physique des neutrinos. »

Par ailleurs, l'objectif initial d'Opera a été atteint : deux neutrinos tau ont été observés dans le faisceau de neutrinos mu, en 2010 et 2012. Et le dépouillement des données continue. Mais déjà, Dario Autiero a le regard tourné vers l'avenir. « Notre groupe de Lyon participe à un projet de mesure des oscillations de neutrinos sur une distance plus grande encore. Nous espérons installer un détecteur géant au fond d'une mine en Finlande, à 2 300 kilomètres du CERN. »

■ Denis Delbecq

3. BICEP2 et les ondes gravitationnelles primordiales

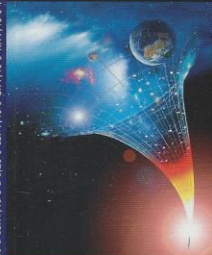
N° 487 • 6,40€ MAI 2014

LA Recherche

L'actualité des sciences

T-REX

*Ce qu'on
a appris
depuis
Jurassic Park*



**Les ondes
gravitationnelles
du Big Bang**



**Le mystère des chats
qui retombent sur leurs pattes**



Mai 2014

Cosmologie Les premières preuves directes de l'inflation de l'Univers ont été détectées

Des astrophysiciens américains ont présenté des preuves directes que l'Univers s'est étendu démesurément quelques fractions de seconde après le Big Bang.

Les astrophysiciens de la collaboration américaine BICEP2 viennent d'annoncer l'une des découvertes les plus retentissantes de l'histoire récente de la cosmologie. Grâce à son télescope de 26 centimètres de diamètre installé au pôle Sud, ce petit groupe dirigé par John Kovac, du département d'astronomie de l'université Harvard, aux États-Unis, aurait observé pour la première fois des traces directes de l'état de l'Univers quelques fractions de seconde après le Big Bang [1]. Traces qui confirment, selon eux, qu'il a subi très brièvement une expansion extrêmement rapide, que

l'on appelle l'« inflation » (son diamètre a été multiplié par au moins 10^{50} en 10^{-35} seconde). Pour comprendre ce résultat il faut, une fois de plus, revenir à la théorie de la relativité générale, proposée par Albert Einstein en 1915. Celle-ci prévoit en effet l'existence de distorsions de l'espace-temps capables de se propager : des « ondes gravitationnelles ». « Les modèles cosmologiques prévoient que des ondes gravitationnelles ont été créées par les fluctuations quantiques des champs de l'Univers primordial, pendant la période d'inflation », explique Nicolas Ponthieu, de l'institut de planétologie et de cosmologie de Grenoble. Comment détecter ces ondes

gravitationnelles primordiales ? En étudiant le fond diffus cosmologique, rayonnement électromagnétique visible dans toutes les directions, émis quand l'Univers était âgé d'environ 380 000 ans. « En distordant l'espace, ces ondes influent sur les mouvements de matière et de rayonnement au moment où le fond diffus se forme », détaille Nicolas Ponthieu. Elles produisent alors des fluctuations, notamment dans la manière dont ce rayonnement est orienté, polarisé. »

Tourbillons. Ce sont ces anomalies de polarisation que les membres de BICEP2 ont traquées. Et plus particulièrement l'une d'elles : les modes B. « Ces modes

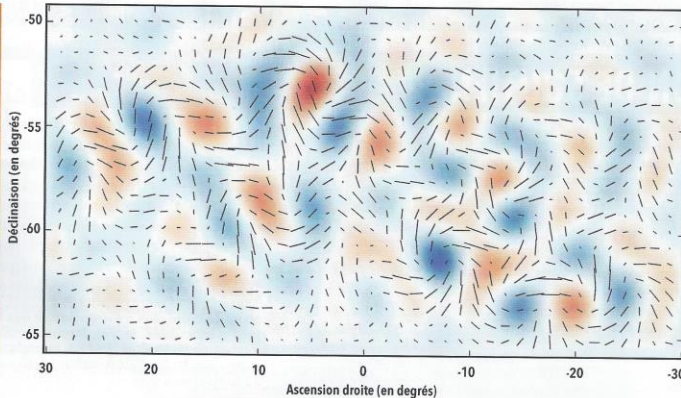
prennent la forme de tourbillons, d'hélices », décrit Jean-Christophe Hamilton, du laboratoire astroparticule et cosmologie, à l'université Paris-VII Diderot. Pour les détecter, John Kovac et ses collègues ont cherché le lieu où les observations de leur télescope seraient les moins faussées. D'où le choix du pôle Sud : « C'est l'endroit le plus sec de la Terre, où il y a le moins de perturbations liées à l'atmosphère », confirme Jean-Christophe Hamilton. Les astrophysiciens ont par ailleurs braqué leur instrument sur une zone de 1 % du ciel qui offre une fenêtre d'observation sur le rayonnement du fond diffus cosmologique peu perturbée par d'autres

émissions. Enfin, le télescope opérait sur une fréquence de 150 gigahertz, celle où le fond diffus émet le plus de photons.

Perturbations. Pendant près de 600 jours, les membres de BICEP2 ont ainsi accumulé les données, qu'ils ont ensuite analysées. Pour aboutir à la découverte de perturbations liées aux ondes gravitationnelles, avec moins d'une possibilité sur un million qu'il y ait une erreur. « C'est un résultat extrêmement beau, qui semble correspondre aux prédictions des modèles d'inflation », s'enthousiasme Cécile Renault, du laboratoire de physique subatomique et de cosmologie de Grenoble. L'astrophysicienne, à l'image de tous ses collègues, souligne néanmoins la nécessité de lever certaines incertitudes : « Il faudra s'assurer que les mesures ne sont pas contaminées par les émissions de poussières galactiques ou par des biais instrumentaux. » D'autres expériences devront confirmer cette découverte. On attend ainsi avec impatience les résultats des analyses analogues réalisées sur les données d'observation du satellite européen Planck, qui sont annoncées pour le dernier trimestre de 2014. ■ Vincent Glavieux

[1] Collaboration BICEP2, arXiv:1403.3985 et arXiv:1403.4302, 2014.

LA RÉPARTITION des plages bleues et rouges sur ce secteur du ciel prouve l'existence d'une phase d'expansion accélérée et exponentielle de l'Univers, peu après le Big Bang. Ces couleurs correspondent aux variations de polarisation observées par la collaboration BICEP2 dans le rayonnement émis alors que l'Univers était âgé de 380 000 ans. © THE BICEP2 COLLABORATION



→ Bref

→ ÉTHOLOGIE Oiseaux droitiers

Des éthologistes australiens ont observé que, face à un obstacle, la moitié des perruches ondulées *Melopsittacus undulatus* passent systématiquement à gauche, et l'autre moitié systématiquement à droite. Lorsqu'ils volent en groupe, les oiseaux éviteraient ainsi les embouteillages.

R. S. Bhagavatula et al., *PLoS Computational Biology*, 10, e1003473, 2014.

→ TECHNOLOGIE WC à l'énergie solaire

À l'essai en Inde, des toilettes sèches financées par la fondation Gates pourraient améliorer les conditions sanitaires dans les pays en développement. Elles portent les excréments à très haute température en captant la chaleur du Soleil. L'objectif : les désinfecter pour en faire de l'engrais.

http://colorado.edu/news

→ CHIMIE Prédictions de réactions

Dans une molécule, les liaisons qui relient les atomes vibrent en permanence, ce que l'on mesure par spectroscopie infrarouge. Des chimistes de l'université de l'Utah, aux États-Unis, ont mis au point un modèle qui relie précisément ces mesures aux réactions dans lesquelles peut s'engager la molécule.

A. Milo et al., *Nature*, 507, 210, 2014.

Indicateur

3 millions

d'années, c'est l'âge de « Little Foot », australopithèque retrouvé en Afrique du Sud en 1994. C'est le mieux conservé jamais découvert.

L. Bruxelles et al., *J. hum. evol.*, sous presse



RECONSTITUTION VIRTUELLE de l'école de gladiateurs de Carnuntum, en Autriche. Les archéologues ne l'ont pas fouillée mais étudiée grâce à des relevés géophysiques.

Archéologie Une école de gladiateurs découverte en Autriche

Coups d'épée et lancer de filet : c'était le programme d'une école autrichienne antique. Au II^e siècle apr. J.-C., les étudiants n'y apprenaient en effet pas à lire, mais à tuer, afin de devenir gladiateurs. Elle a été découverte dans la ville romaine de Carnuntum, à la frontière slovaque [1]. Celle-ci était la capitale de la province de Pannonie, centrée sur l'actuelle Hongrie. Elle s'était développée autour d'un camp de légionnaires protégeant la frontière de l'Empire romain. Plusieurs bâtiments civils bien conservés y ont été dégagés dès le XIX^e siècle. Dans les années 1990, des photographies aériennes avaient révélé une structure près de l'amphithéâtre. Dans les années 2000, des prospections géophysiques avaient précisé qu'il s'agissait de fondations de murs. Depuis 2011, avec l'amélioration des techniques radar, des archéologues ont tracé un plan tridimensionnel de cette infrastructure avec une précision au centimètre près, sans ouvrir le sol pour fouiller. Cette école était un vaste complexe trapézoïdal, regroupant les cellules des gladiateurs, une arène d'entraînement, des bains ainsi que les bâtiments administratifs. Ses 2 800 mètres carrés et son état de conservation en font une découverte exceptionnelle. « Ce type d'édifice n'avait jamais été mis en évidence dans les provinces septentrionales, à l'exception des sites de Sarmizegetusa, en Roumanie, ou d'Autun, en France, mais dont les vestiges sont moins bien caractérisés », précise Mathieu Poux, de l'université Lumière-Lyon-II. ■ Rémi Canali

[1] W. Neubauer et al., *Antiquity*, 83, 339, 2014.

Cosmologie Les premières preuves directes de l'inflation réduites en poussières

L'enthousiasme était prématuré. Le 17 mars dernier, la collaboration BICEP2 annonçait ce que certains présentaient comme la découverte de l'année, voire de la décennie, en cosmologie. Grâce à son télescope installé au pôle Sud, elle pensait avoir observé, pour la première fois, des traces directes de l'expansion extrêmement rapide de l'Univers, survenue quelques fractions de seconde après le Big Bang. Mais dans un récent article, les astrophysiciens reconnaissent que leurs résultats ont pu

être faussés par des émissions de poussières galactiques [1]. Les traces repérées par BICEP2 sont des anomalies dans la polarisation du rayonnement émis alors que l'Univers était âgé de 380 000 ans. Dans un premier temps, les chercheurs avaient estimé qu'elles résultaient directement de l'effet exercé par des ondes gravitationnelles primordiales sur les mouvements de matière et de rayonnement, au moment où le fond diffus cosmologique s'est formé. Mais ces anomalies étaient si prononcées que certains spécialis-

tes s'en étaient étonnés, pointant une sous-évaluation des poussières galactiques qui aurait conduit à mal interpréter les observations [2]. L'équipe de BICEP2 a finalement concédé que ses résultats n'étaient peut-être pas uniquement l'effet d'ondes gravitationnelles. Mais pour – peut-être – trancher la question, il faudra attendre les nouveaux résultats du satellite Planck, fin octobre. ■
Vincent Glavieux
 [1] Collaboration BICEP2, *Phys. Rev. Lett.*, 112, 241101, 2014.
 [2] R. Flauger *et al.*, arXiv:1405.7351, 2014.

Cardiologie

Un gène redonne du rythme au cœur

Comment remédier à une fréquence cardiaque trop lente ? Appelée bradycardie, cette pathologie résulte du dysfonctionnement de certaines cellules qui, regroupées dans une zone particulière du cœur, déclenchent le battement des cellules contractiles de l'organe en leur délivrant des impulsions électriques régulières. Chez l'homme, cette défaillance est compensée par la pose d'un pacemaker. Mais chez des porcs, une équipe américaine vient de tester une approche bien différente : elle a transformé une fraction de banales cellules contractiles en cellules qui jouent le rôle de pacemaker, en leur injectant un seul et unique gène, *TBX18* [1]. En l'occurrence, ces cardiologues ont d'abord bloqué la propagation des impulsions issues des cellules « pacemaker » des animaux, tout en leur implantant un pacemaker électronique réglé à 50 battements par minute

(bpm), contre 70 à 120 chez un porc sain. Puis ils ont injecté le gène *TBX18* (qui *in vitro* transforme les cellules contractiles en cellules « pacemaker »), après l'avoir préalablement inséré dans un virus qui facilite son entrée dans les cellules. Résultat : 48 heures après l'injection de *TBX18*, la fréquence cardiaque a franchi le cap des 70 bpm, puis a dépassé les 75 bpm du 5^e au 11^e jour... avant de retomber sous les 70 bpm au-delà du 14^e jour. Encourageants, ces résultats mettent toutefois en évidence deux points faibles : une trop courte durée d'action, et le risque d'effets indésirables liés au virus utilisé (des traces ont été retrouvées dans les poumons et la rate des porcs). Si les pacemakers électroniques ne sont pas parfaits – avec en particulier un risque d'infection nécessitant leur retrait temporaire –, ils ont encore de beaux jours devant eux.

■ **Jean-Philippe Braly**
 [1] Y.-F. Hu *et al.*, *Sci. Transl. Med.*, 6, 245Ra94, 2014.

→ Bref

→ COGNITION Enfants et médias électroniques

L'usage intensif des jeux électroniques et de la télévision aurait un effet délétère sur le bien-être des jeunes enfants. Une étude réalisée dans huit pays européens auprès de 3 604 enfants âgés de 2 à 6 ans montre que cet impact négatif affecte surtout l'équilibre émotionnel et les relations familiales.
 T. Hinckley *et al.*, *JAMA Pediatr.*, 168, 485, 2014.

→ VERBATIM

« En Belgique, pays cinq fois plus petit que la France, on fait cinq fois plus de recherche sur l'embryon. »

Pierre Jouannet, membre du comité d'éthique de l'Inserm, lors de la première réunion annuelle de ce comité, le 17 juin 2014.

→ CHIMIE

Fullerène de bore

Une équipe chinoise vient de synthétiser et d'analyser le premier fullerène de bore. Sphérique, cette molécule est constituée de 40 atomes agencés en 48 triangles, 2 hexagones et 4 heptagones. On ne connaissait jusque-là que des fullerènes de carbone.
 H.-J. Zhai *et al.*, *Nat. Chem.*, doi: 10.1038/nchem.1999, 2014.

Indicateur

40 kilomètres

au compteur : c'est la distance totale parcourue par le rover Opportunity, quelque dix ans après son atterrissage sur la planète rouge.

<http://tinyurl.com/opportunity-40kms>

Vingt ans d'aventures du satellite Planck

>>> cosmos sur tout le ciel, avec une sensibilité de quelques millièmes de degré. La précision de la mesure sera alors de l'ordre du pour-cent.

Pour réaliser cette carte, il faut d'abord concevoir les instruments les mieux à même de remplir cette mission. L'accès à tout le ciel ainsi qu'à un large panel de fréquences impose rapidement l'utilisation d'un satellite. Ce satellite se compose d'un télescope chargé de concentrer le rayonnement lui parvenant vers un miroir primaire, puis vers un miroir secondaire. Le rayonnement ainsi concentré est ensuite orienté vers deux instruments, où il est divisé par fréquences puis analysé. L'un de ces deux instruments opère à basses fréquences (traduction de l'acronyme anglais « LFI »), l'autre à hautes fréquences (« HFI »).

LFI ressemble à un COBE amélioré. Comme le satellite américain, ses détecteurs sont des radiomètres, instruments qui mesurent l'intensité du flux de rayonnement électromagnétique. Ces radiomètres opèrent à des fréquences de 30, 44 et 70 gigahertz. Celles-ci correspondent à ce qu'on appelle le domaine des micro-ondes*. La différence essentielle avec COBE se situe au niveau de sa résolution angulaire, c'est-à-dire sa capacité à discerner des détails fins : pour COBE, elle était de 7 degrés ; pour LFI, comme pour WMAP, successeur américain de COBE, elle est considérablement affinée puisqu'elle passe à 0,25 degré.

*LE DOMAINE DES MICRO-ONDES, invisible à l'œil nu, correspond aux longueurs d'onde de la lumière comprises entre 1 millimètre et 10 centimètres.



Le ballon stratosphérique Archeps, lancé en 2001, a permis de tester l'instrument à hautes fréquences du satellite Planck, dont il emportait une copie quasi exacte. © CNES

HFI se veut encore plus ambitieux. Ses détecteurs ne sont pas des radiomètres, mais des bolomètres. Les bolomètres sont des grilles, d'un diamètre total inférieur au centimètre, maintenues à température constante. Quand le rayonnement arrive sur ces détecteurs, il est piégé dans les grilles, qui convertissent son énergie en chaleur. Un thermomètre, placé au bord ou au centre de chaque grille, mesure la variation de température engendrée dans le détecteur, qui est transformée en signal électrique. Ce signal est alors

Des poussières partout, ou l'échec de Bicep 2



Par Alain Riazuelo, de l'Institut d'astrophysique de Paris.

[1] P. Ade et al., *Phys. Rev. Lett.*, 112, 241101, 2014.

[2] Planck Collaboration, <http://arxiv.org/abs/1409.5738>, 2014.

Observer une trace directe de l'inflation, moment furtif où l'Univers naissant se dilate très rapidement, est l'objet de toutes les convoitises de la part des astronomes.

Les ondes gravitationnelles primordiales, produites lors de cette inflation, ne sont malheureusement pas détectables directement pour le moment. En revanche, ces ondes ont dû imprimer leur marque sur la première lumière émise librement, le fond diffus cosmologique, sous la forme de motifs spécifiques dans la polarisation de la lumière :

les « modes B ». La difficulté est que les poussières de notre propre galaxie émettent également des modes B, qu'il faut donc soustraire aux observations. En plaçant le télescope Bicep 2 en Antarctique, près du pôle Sud, les astronomes américains espéraient que la bonne qualité de ciel permettrait de s'affranchir partiellement de cette émission parasite. Et ils ont annoncé en mars 2014 la première détection des modes B primordiaux [1]. Bicep 2 avait-il réellement observé pour la première fois ce signe de l'inflation ? Des mesures de

polarisation obtenues par Planck sur une grande partie du ciel ont refroidi l'enthousiasme de nos collègues. Ces mesures montrent que, quelle que soit la partie du ciel visée, en particulier la petite partie du ciel observée par Bicep 2, les poussières galactiques dominent le signal en lumière polarisée [2]. Autrement dit, il n'existe pas de région du ciel qui, vue de la Terre, permettrait de s'affranchir de l'émission de ces poussières. Cela ne signifie pas que le signal de l'inflation est absent, seulement qu'il sera beaucoup moins facile à voir qu'on ne l'imaginait. ■

Février 2015

Conclusion

