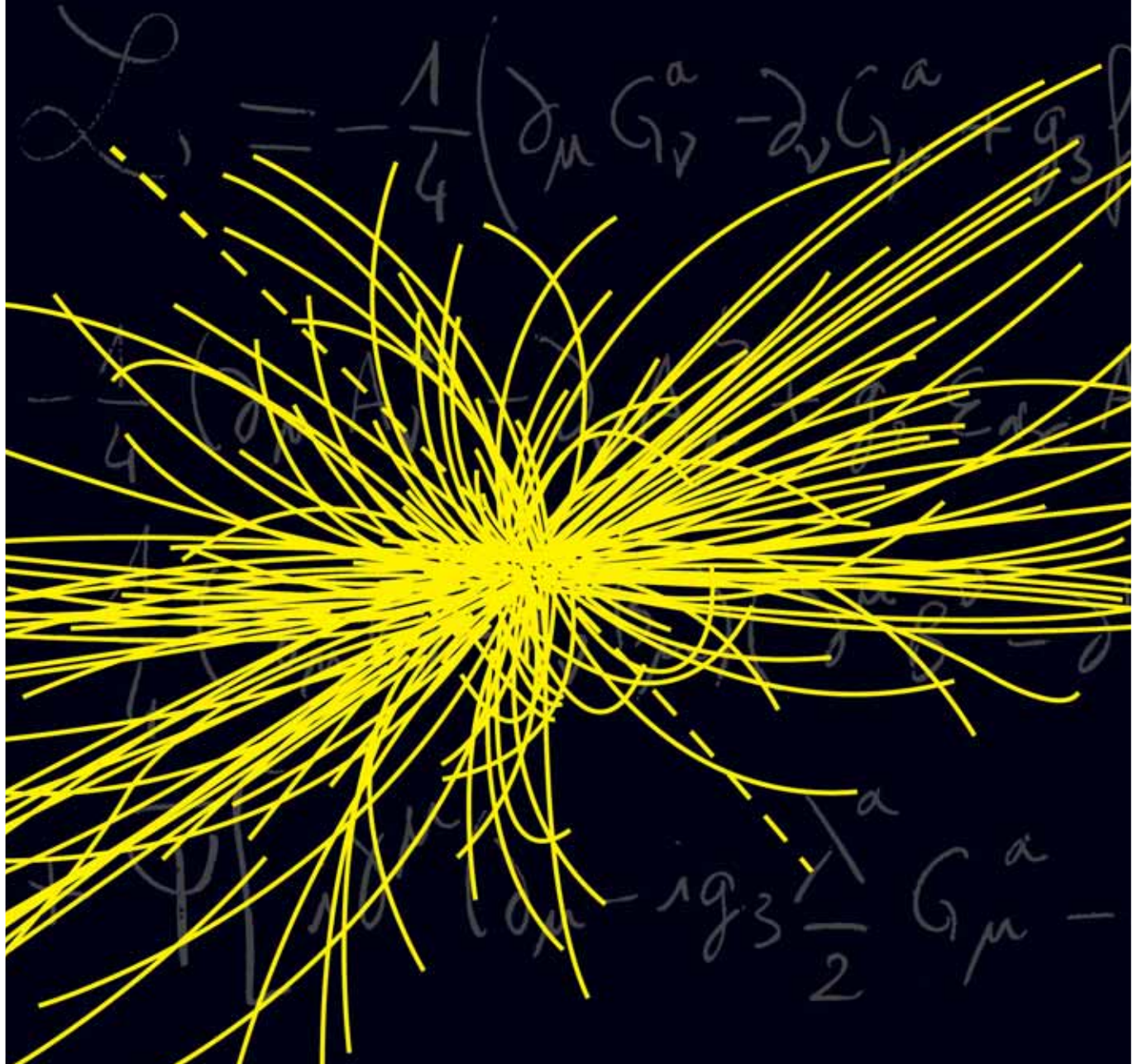


les défis du cea

Le magazine de la recherche et de ses applications

HORS-SÉRIE

Décembre 2013



L'ÉLÉGANTE TRAQUE
DU **BOSON DE HIGGS**



03 **ÉDITO**

04 **UNE THÉORIE ÉCRITE À PLUSIEURS MAINS, TOUTES ILLUSTRÉS**

- Une histoire modèle
- L'élaboration d'un modèle abouti,
par Jean Zinn-Justin
- **INFOGRAPHIE**: Le modèle standard de la physique des particules
- La masse, la symétrie et le vide...,
interview d'Etienne Klein

14 **HISTOIRE D'UNE PETITE FABRIQUE DE PARTICULES**

- Des microscopes géants pour sonder la matière
- Le LHC, antre de la création... de nouvelles particules
- **PORTFOLIOS**: Les quadripôles du LHC, Le toroïde d'Atlas, Les calorimètres électromagnétiques de CMS et d'Atlas, Le spectromètre à muons d'Atlas
- **INFOGRAPHIE**: Détecteur de particules
- Des millions de milliards de données en ligne

28 **SIGNÉ BOSON DE HIGGS!**

- Les connaissances avant le LHC
- En ce jour du 4 juillet 2012...
- Un modèle de « coopération », par Michel Spiro
- Du côté d'Atlas et de CMS, interview croisée de Gautier Hamel de Monchenault et Bruno Mansoulié
- **PORTFOLIO**: Portraits-robots du boson de Higgs
- Vers la nouvelle physique
- L'aventure technologique continue pour le CEA
- Une quête pour la connaissance, au service de l'humanité, interview de Philippe Chomaz

▶ **ABONNEMENT GRATUIT**

Vous pouvez vous abonner sur :
defis@cea.fr en mentionnant vos noms, prénoms, adresse et profession ou par courrier à *Les Défis du CEA* – Abonnements, CEA. Bâtiment Siège. 91191 Gif-sur-Yvette.



Éditeur Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, R.C.S. Paris B77568019 | Directeur de la publication Xavier Clément | Rédactrice en chef Aude Ganier | Rédacteurs en chef adjoint: Sophie Kerhoas-Cavata, Frédéric Déliot | Rédactrice Amélie Lorec | Ont contribué à ce numéro Patrick Philippon, Vahé ter Minassian | Comité éditorial Brigitte Raffray, Jean-Luc Sida | Iconographie Micheline Bayard | Conception et réalisation www.rougevif.fr | N°ISSN 1163-619X | Tous droits de reproduction réservés. Ce magazine est imprimé sur du papier PEFC Magno Satin, issu de forêts gérées durablement. Imprimerie Sira.



© L. Godart / CEA



Gabriele FIONI,
directeur des sciences
de la matière du CEA

LA VALSE DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE

La quête du boson de Higgs est une gigantesque aventure humaine. Elle a mobilisé, durant des décennies, toute la communauté internationale de la physique pour construire un instrument inédit, le LHC, aux pièces uniques dignes de l'horlogerie de haute précision. Bien sûr, le CEA était de la partie, et l'est toujours, fort de ses chercheurs et ingénieurs qui savent travailler main dans la main sur les projets les plus ambitieux. Je me souviens des gigantesques cavernes vides des expériences Atlas et CMS ; de l'attente et de l'appréhension lors de l'assemblage au micron près de ces énormes détecteurs. Le jour où le premier courant électrique a circulé dans les bobines du toroïde d'Atlas, tout le monde a tremblé car rien n'était acquis. Certes les calculs disaient que la structure allait tenir. Encore fallait-il qu'elle tienne... Et elle a tenu !

La science et la technologie ont donc gagné leur pari. Peu importe de savoir qui de l'une ou de l'autre est le précurseur, si l'une permet à l'autre de gravir les échelles. C'est ensemble qu'on se dépasse, qu'on réussit, liés comme deux danseurs dans une valse d'une rare élégance. Chercheurs, ingénieurs, techniciens : tous ont été embarqués dans une même danse pour repousser les frontières de la connaissance. Une quête aux limites de la technologie, source constante d'innovation.

“
**Chercheurs,
ingénieurs,
techniciens : tous
ont été embarqués
dans une même
danse pour repousser
les frontières
de la connaissance.
Une quête aux limites
de la technologie,
source constante
d'innovation.**”

Ils ont doublement été récompensés. D'une part, ils sont parvenus à découvrir le boson de Higgs offrant au modèle standard la cohérence qui lui manquait. D'autre part, ils peuvent se réjouir de l'attribution du Prix Nobel de Physique 2013 aux théoriciens François Englert et Peter Higgs car il consacre

ceux qui ont brisé « l'effet horizon », moteur indispensable de la science et de la technologie. L'audace des pionniers qui osent affronter l'inconnu au-delà de l'horizon stimule des générations entières de chercheur qui trouvent ainsi le courage de mener à bien un rêve *a priori* fou : aller voir le monde de l'autre côté de la colline...

Cette élégante, et audacieuse, traque du boson de Higgs encourage alors l'Homme, qui doit toujours faire face à son ignorance, à dépasser ses limites. Il n'y a qu'à lever la tête pour s'en apercevoir ! Le ciel étoilé que nous pouvons admirer ne représente que 5 % de ce dont est constitué l'Univers. L'Homme a encore de

nombreuses frontières à franchir pour comprendre les lois de la nature, de nombreuses valses à danser dans une quête de connaissances si difficile à poursuivre. Échecs et limites sont notre quotidien mais nous n'avons pas d'alternative car, pour reprendre l'injonction de Dante Alighieri : « *considérez la race dont vous êtes, créée non pas pour vivre comme brutes, mais pour suivre vertu et connaissance* ».

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} (\partial_\mu G_\nu^a - \partial_\nu G_\mu^a + g_3 f_{abc} A_\mu^b A_\nu^c - \partial_\nu G_\mu^a + g_3 f_{abc} A_\mu^b A_\nu^c)$$

$$-\frac{1}{4} (\partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + g_2 \epsilon_{abc} A_\mu^b A_\nu^c - \partial_\nu A_\mu^a + g_2 \epsilon_{abc} A_\mu^b A_\nu^c)$$

$$-\frac{1}{4} (\partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu) (\partial^\mu B^\nu - \partial^\nu B^\mu)$$

$$+ \bar{\Psi} \left[i \gamma^\mu (\partial_\mu - i g_3 \frac{\lambda^a}{2} G_\mu^a - i g_2 \frac{\tau^a}{2} A_\mu^a - i g_1 B_\mu) \right] \Psi$$

$$- \lambda_L \bar{\Psi}_L \Phi \Psi_L - \lambda_R \bar{\Psi}_R$$

$$+ \left[(\partial_\mu - i g_3 \frac{\lambda^a}{2} G_\mu^a - i g_2 \frac{\tau^a}{2} A_\mu^a - i g_1 B_\mu) \right] \Psi_L$$

▲ Le lagrangien du modèle standard est l'équation mathématique la plus élégante, en termes de simplicité et de compacité, et la plus complète à ce jour pour décrire la physique des particules.

► LE MODÈLE STANDARD DE LA PHYSIQUE DES PARTICULES

UNE THÉORIE ÉCRITE À PLUSIEURS MAINS, TOUTES ILLUSTRÉS

Bienvenue dans le monde de l'infiniment petit où les particules élémentaires mènent la danse. Ces constituants ultimes de la matière ont peu à peu trouvé le modèle qui les unit, et décrit leurs interactions de la manière la plus élégante qui soit. Après de nombreux obstacles, parmi lesquels le problème de la masse des particules, cette théorie du modèle standard trouve enfin la pièce qui lui manquait : le boson de Higgs.

UNE HISTOIRE MODÈLE

Les particules élémentaires s'organisent dans une théorie qui souffre toutefois d'un problème : l'une de ses prédictions n'est pas correcte... C'était sans compter sur le génie de théoriciens qui postulent l'existence du boson de Higgs dont la découverte en 2012 confirme la cohérence du modèle standard de la physique des particules. Une audace récompensée par le Prix Nobel de physique 2013.



© Olivier Quastah

▲ **Diagramme de Feynman présentant la production d'un boson de Higgs. Il a été filmé pour l'exposition *Mathématiques, un dépassement soudain* (octobre 2011 à mars 2012) de la Fondation Cartier.**

• **PARTICULE ÉLÉMENTAIRE**: brique fondamentale et indivisible de la matière par opposition aux particules composites comme le proton et le neutron.

• **HADRON**: particule composite, formée de quarks, de deux types : les baryons (3 quarks) et les mésons (un quark, un anti-quark).

De quoi le monde qui nous entoure est-il fait ? Une question qui taraude les philosophes et les scientifiques depuis la Grèce antique. À cette époque, Démocrite postule l'existence de corpuscules solides et indivisibles constituant la matière : les atomes. Ce n'est qu'à la fin du XIX^e siècle que le concept de **particule élémentaire** se précise.

L'électron est identifié en 1897 par Thomson. Rutherford découvre en 1911 que l'atome est constitué d'un noyau dense contenant des protons. Le neutron, qui stabilise le noyau atomique, est découvert par Chadwick en 1932. Pauli et Fermi postulent l'existence d'un

neutrino associé à un électron en 1930. Le muon, sorte d'électron 200 fois plus massif, est découvert fortuitement en 1936 par Anderson. De plus, Dirac introduit théoriquement en 1928 l'antimatière avec le positron (antiélectron)... Ainsi, avec les photons « quanta de lumière d'Einstein », tous ces corps forment, à la fin des années 1940, une zoologie particulaire assez simple.

Organiser le bestiaire des particules de la matière

Les choses se compliquent lorsque de nouvelles particules, des **hadrons**, sont découvertes dans les rayons cosmiques ou auprès des premiers

accélérateurs, fin des années 1940. Ce foisonnement rend les phénomènes difficilement intelligibles et nécessite de remettre de l'ordre. Une situation comparable à celle des éléments chimiques avant que Mendeleïev ne les organise par une classification périodique. En 1964, Gell-mann, Ne'eman et Zweig proposent, indépendamment, leur modèle théorique des quarks selon lesquels les hadrons ne sont pas des particules élémentaires car ils sont constitués d'éléments ultimes baptisés quarks. Il faut attendre 1968 pour que des expériences à SLAC¹, en Californie, montrent que le proton contient effectivement des particules plus petites. Les quarks, de

trois types différents (*up*, *down* et *strange*), gagnent alors leur statut de particule élémentaire. En 1970, Glashow, Iliopoulos et Maiani vont plus loin en théorisant l'existence d'un quatrième quark, le *charm*, qui sera observé en 1974 au SLAC et à Brookhaven². Les quatre quarks se scindent en deux branches : une première composée des quarks *up* et *down*, constituants du proton et du neutron ; la seconde formée par le *charm* et le *strange*. « *L'expérience reprend le dessus sur les arguments théoriques lorsqu'un nouveau quark est découvert en 1977, au Fermilab³, ouvrant la voie à une troisième branche avec le bottom. Cette découverte induit l'existence du compagnon de ce quark, le quark top, lequel est mis en évidence au Fermilab, en 1995* » indique Frédéric Déliot, physicien des particules à l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers du CEA (CEA-Irfu).

La famille des leptons, composée alors de l'électron et du muon, n'est pas en reste puisque, comme celle des quarks, elle s'enrichit d'une nouvelle génération avec la découverte, en 1975, du lepton tau. Les particules de matière, également appelées fermions, s'organisent alors de manière **symétrique** en trois familles de quarks et trois familles de leptons.

Que les forces soient avec elles!

Cependant, décrire la matière ne suffit pas! Il faut aussi comprendre

comment ces particules interagissent entre elles. En mécanique quantique, théorie appropriée pour traiter de l'infiniment petit, une particule est aussi une onde. L'interaction entre les particules de matière consiste alors en l'échange d'une onde de force (également nommée « champ ») qui est une particule liée à l'interaction appelée boson vecteur. Aux trois des quatre interactions fondamentales connues (les forces)⁴, correspond ainsi un (ou plusieurs) bosons vecteurs. La force électromagnétique, responsable de l'interaction entre les particules chargées et à qui nous devons la lumière, l'électricité et le magnétisme, est véhiculée par l'échange d'un photon. La force faible, intervenant dans la combustion des étoiles et dans la **désintégration bêta**⁵, correspond à l'échange de bosons W et Z. Enfin, la force forte relie les quarks entre eux dans les protons et neutrons des noyaux atomiques grâce à l'échange de gluons. Si différentes soient-elles, ces forces présentent toutefois des similitudes, en particulier la force électromagnétique et la force faible. Leurs intensités sont très différentes à l'échelle des atomes mais sont les mêmes à des échelles inférieures, correspondant à des hautes énergies (voir p. 16). Ainsi, comme pour les fermions, les théoriciens ont utilisé la notion de symétrie pour construire un modèle unifiant dans un même formalisme mathématique ces

L'UNION FAIT LA FORCE

La force faible et la force électromagnétique sont décrites dans le cadre d'une théorie unifiée qui constitue la base du modèle standard. Ainsi, l'électricité, le magnétisme, la lumière et certains types de radioactivité sont des manifestations d'une seule et même force appelée force électrofaible.

deux interactions : c'est la théorie électrofaible, développée dans les années 1960 par Glashow, Weinberg et Salam. Cette démarche, ultérieurement étendue à l'interaction forte, marque la naissance du « modèle standard » de la physique des particules (voir pp 10-11).

Un modèle « à la masse » ?

Si tout semble parfaitement maîtrisé dans le monde de l'infiniment petit, un problème de taille demeure. Selon le modèle standard, l'union des forces électromagnétique et faible, appelée « symétrie électrofaible », nécessite que les bosons W et Z soient sans masse. Or, ce n'est pas le cas, comme le montreront deux expériences du SpbarS⁵ au CERN au début des années 1980. Alors, comment doter ces bosons d'une masse sans faire s'effondrer l'édifice qui les prédit et qu'aucune mesure ne vient contredire ? Dans les années 1960, de nombreux théoriciens sont à l'œuvre pour résoudre ce problème (voir encadré p. 9). « *À l'époque, ils avaient déjà compris que les forces agissaient*

• **SYMÉTRIE** : propriété selon laquelle un système physique reste invariant sous l'action d'une transformation. En physique des particules, elle est relative aux équations qui restent identiques quand on applique des transformations à leurs variables.

• **DÉSINTÉGRATION BÊTA** : type de désintégration radioactive d'un noyau instable lors de laquelle une particule bêta (électron ou positron) est émise.

Notes :

1. *Stanford Linear Accelerator Center. Laboratoire du Department of Energy (DOE) Californie.*
2. *Brookhaven National Laboratory, (DOE) New York.*
3. *Fermi National accelerator Laboratory, sous tutelle du DOE, Chicago*
4. *La force gravitationnelle, qui maintient la Terre en rotation autour du Soleil, n'est pas prise en compte par le modèle standard car elle est négligeable à l'échelle subatomique des particules élémentaires.*
5. *Supersynchrotron à protons du CERN, transformé en collisionneur proton-antiproton (SpbarS) dans les années 1980 et qui "alimente" en particules les faisceaux du LHC.*

LES PRINCIPAUX PRIX NOBEL DE PHYSIQUE LIÉS AU MODÈLE STANDARD



BURTON RICHTER (1931)
SAMUEL CHAO CHUNG TING (1936)
Physiciens américains

Prix Nobel de Physique 1976. Découverte expérimentale, en 1974, d'une nouvelle particule qui apporte la preuve de l'existence du quark *charm*.



ABDUS SALAM (1926-1996)
SHELDON LEE GLASHOW (1932)
STEVEN WEINBERG (1933)
Physiciens pakistanais et américains

Prix Nobel de Physique 1979. Théorie électrofaible, élaborée dans les années 1960, qui unifie les interactions faible et électromagnétique et constitue un pilier du modèle standard.



CARLO RUBBIA (1934)
SIMON VAN DER MEER (1925-2011)
Physiciens italien et néerlandais

Prix Nobel de Physique 1984. Découverte expérimentale en 1983 des bosons W et Z, vecteurs de l'interaction faible.



JÉRÔME I. FRIEDMAN (1930)
HENRY W. KENDALL (1926-1999)
RICHARD E. TAYLOR (1929)
Physiciens américains et canadien
Prix Nobel de Physique 1990. Mise en évidence expérimentale dans les années 1970 de l'existence des quarks.

▶ LE MODÈLE STANDARD DE LA PHYSIQUE DES PARTICULES

Chercheurs réunis au CERN, lors de l'annonce de l'attribution du Prix Nobel de Physique 2013 à François Englert et Peter Higgs.



• **TRANSITION DE PHASE:** transformation d'un système par la variation d'un paramètre extérieur (température, champ magnétique). Cas des transitions de phase des systèmes thermodynamiques (fusion, ébullition, sublimation) ou du changement de comportement magnétique d'une pièce métallique...

• **PRODUITS DE DÉSINTÉGRATION:** particules issues de la désintégration d'une particule instable.

Notes:

6. Large Electron Positron collider, collisionneur électron-positon du CERN.
7. Accélérateur circulaire proton antiproton du Fermilab.
8. Large hadron collider, collisionneur de protons du CERN.
9. Le Prix Nobel n'étant pas décerné à titre posthume, Brout, décédé en 2011, n'en est pas lauréat.

par l'intermédiaire de bosons vecteurs et que leur portée était sans doute déterminée par la masse de ces derniers. Comme la force faible est de courte portée, ses bosons, les W et Z, devaient par conséquent être massifs. De même, comme les photons sont sans masse, ils doivent être les vecteurs d'une force de portée infinie, la force électromagnétique » Ursula Bassler, chef du service des particules au CEA-Irfu.

Peter Higgs, d'une part, Robert Brout et François Englert, d'autre part, proposent en 1964 un mécanisme de « brisure spontanée de symétrie » au cours duquel les bosons W et Z acquièrent une masse tandis que celle du photon reste nulle. Ce mécanisme résulte d'une **transition de phase** au cours de laquelle un champ, le champ de Higgs, développe spontanément une valeur de densité

d'énergie non nulle dans le vide. « C'est un peu comme si la nature avait joué aux dés et avait fixé cette valeur, une fois pour toutes, après le big bang » illustre la physicienne. Après la transition, les bosons W et Z ont acquis une masse, réduisant l'interaction faible à des distances sub-nucléiques. Par la même occasion, cette brisure de symétrie fournit aux particules

élémentaires de la matière une masse, d'autant plus élevée qu'elles interagissent fortement avec le champ de Higgs...

Chercher la pièce manquante du puzzle

Mais comment « prouver » l'existence du champ de Higgs ? En physique quantique, le champ étant indissociable d'une particule,

LES MÉTAPHORES DU CHAMP DE HIGGS

Le physicien David J. Miller compare le champ de Higgs à un groupe de personnes dans un cocktail : lorsqu'une célébrité entre dans la salle, elle attire la foule ce qui lui confère une « masse » importante. John Ellis, physicien, aime à évoquer un champ de neige avec lequel des randonneurs en raquette interagiraient fortement, comme s'ils étaient massifs, tandis que des skieurs rencontreraient moins de résistance, comme s'ils étaient très légers...

LES PRINCIPAUX PRIX NOBEL DE PHYSIQUE LIÉS AU MODÈLE STANDARD



GEORGE CHARPAK (1924-2010)
Physicien français
Prix Nobel de Physique 1992. Invention d'un grand nombre de détecteurs de particules élémentaires, en particulier la chambre proportionnelle multifils.



GERARD 'T HOOFT (1946)
MARTINUS J.G. VELTMAN (1931)
Physiciens néerlandais
Prix Nobel de Physique 1999. Élucidation, en 1971, de la structure quantique des interactions électrofaibles.



DAVID J. GROSS (1941)
H. DAVID POLITTZER (1949)
FRANK WILCZEK (1951)
Physiciens américains
Prix Nobel de Physique 2004. Découverte en 1970 de la « liberté asymptotique » dans la théorie des interactions fortes



YOICHIRO NAMBU (1921)
MAKOTO KOBAYASHI (1944)
TOSHIHIDE MASKAWA (1940)
Physiciens nippon-américain et japonais
Prix Nobel de Physique 2008. Application, à la fin des années 1950, du mécanisme de brisure spontanée de symétrie dans la physique subatomique (pour le premier) et prédiction, dans les années 1970, de l'existence d'une 3^e famille de quarks (pour les seconds).



la solution consiste à trouver le célèbre « boson de Higgs ». Problème : cette particule massive, et interagissant très faiblement avec la matière, est ultra-difficile à produire. De plus, sa durée de vie est si courte qu'une détection directe est impossible. Les chercheurs n'ont d'autres choix que de repérer ses **produits de désintégration**•. Or, ceux-ci dépendent précisément de sa masse, laquelle justement n'est pas connue. Pour déboucher « le Higgs », les scientifiques doivent alors retrouver les différentes signatures des désintégrations possibles pour les différentes hypothèses de masse (voir p. 36). Autant chercher une aiguille dans une botte de foin ! C'est à cette tâche que se sont attelés les physiciens de la communauté internationale sur le LEP⁴, au CERN, et le Tevatron⁷ (voir p. 30). Mais, comme ces instruments n'étaient pas assez puissants, ils ont décidé, dès les années 1980, de construire le LHC⁸. L'accélérateur le plus puissant au monde depuis 2009 a récompensé leurs efforts car, trois ans à peine après son démarrage, le boson de Higgs est enfin découvert... Une découverte, annoncée le 4 juillet 2012, qui vaut à deux de ses premiers instigateurs, les théoriciens Englert et Higgs⁹, le Prix Nobel de Physique 2013.

Vahé Ter Minassian et Aude Ganier

• **SUPRACONDUCTIVITÉ** : phénomène caractérisé par l'absence de résistance électrique et l'expulsion du champ magnétique à l'intérieur de matériaux dits supraconducteurs qui se manifeste à des températures très basses.

• **CORRECTIONS QUANTIQUES** : calculs s'ajoutant aux calculs classiques pour étudier des phénomènes à l'échelle subatomique (quantique).

• **UNITARITÉ** : principe selon lequel une probabilité doit toujours être inférieure ou égale à 1.

Note :

1. La notion de brisure spontanée de symétrie est déjà utilisée par Nambu et d'autres, certes sans boson vecteur, pour décrire les propriétés chirales de la physique hadronique.

Jean Zinn-Justin et Benjamin Lee, en 1975, à l'École d'été de Physique des Houches.



L'ÉLABORATION D'UN MODÈLE ABOUTI

Postulé en 1964, le mécanisme de « brisure spontanée » de symétrie repose sur des concepts de physique classique, apparus dans la description des transitions de phase. Pour être transposé à l'échelle quantique, il aura mobilisé de nombreux théoriciens, tel que l'explique Jean Zinn-Justin, théoricien du CEA-Irfu qui a fortement contribué à l'élégance de cette théorie...

« En 1937, le physicien russe Landau élabore une théorie générale des transitions de phase qui sont des exemples de brisure spontanée de symétrie. En 1950, avec Ginzburg, il l'applique à la supraconductivité : l'expulsion du champ magnétique du supraconducteur est la première analogie, dans le cadre classique, du "phénomène de Higgs". Ce travail, trop précurseur, ne sera apprécié que plus tard...

Dans les années 1960, l'interaction nucléaire faible est décrite comme une interaction de contact "courant-courant" mais ce modèle ne permet pas de calculer les corrections quantiques. Cependant, il ressemble beaucoup à l'interaction électromagnétique et à son échange de photons (bosons vecteurs). Or, dans l'électromagnétisme, les photons sont de masse nulle alors que l'interaction faible exige l'échange de bosons vecteurs très lourds. Il fallait trouver un mécanisme pour leur donner une masse.

En 1963, Philip Anderson s'intéresse aux travaux de Landau et Ginzburg qui pourraient mathématiquement donner une solution au problème. Reste à transposer son idée au cadre de l'infiniment petit... C'est ce que font, en 1964, Peter Higgs et ses collègues¹. Ils postulent que, pour engendrer dans ce cadre une transition de phase (et donc une brisure de symétrie), il faut l'existence d'un boson scalaire (spin 0) qui donnerait leur masse aux bosons vecteurs. Certes, il s'agit d'une idée simple mais elle va jouer un rôle fondateur en focalisant la communauté internationale pour élaborer un modèle théorique abouti. En 1966, Higgs examine les premières corrections quantiques dans un modèle à un boson vecteur. Mais, la description de l'interaction faible nécessite un modèle à plusieurs bosons vecteurs. Cela exige des outils mathématiques supplémentaires : comprendre la théorie classique (Yang et Mills en 1954) et en faire une théorie quantique (Faddeev et Popov en 1967) ; être conforme au principe d'unitarité ; et démontrer la possibilité de calculer systématiquement les corrections quantiques (c'est-à-dire "à tous les ordres"). En 1970, Lee démontre ces propriétés à tous les ordres dans le modèle à un boson vecteur. Hooft propose alors en 1971 des pistes de démonstration à plusieurs bosons vecteurs et, en 1972, Lee et moi-même en donnons la démonstration à tous les ordres. Ainsi le modèle électrofaible de Salam et Weinberg, proposé en 1967, devient calculable. En 1974, je donne une démonstration plus élégante ainsi qu'une équation fondamentale que Weinberg baptise "équation de Zinn-Justin". »

LES NOBELS DE PHYSIQUE 2013



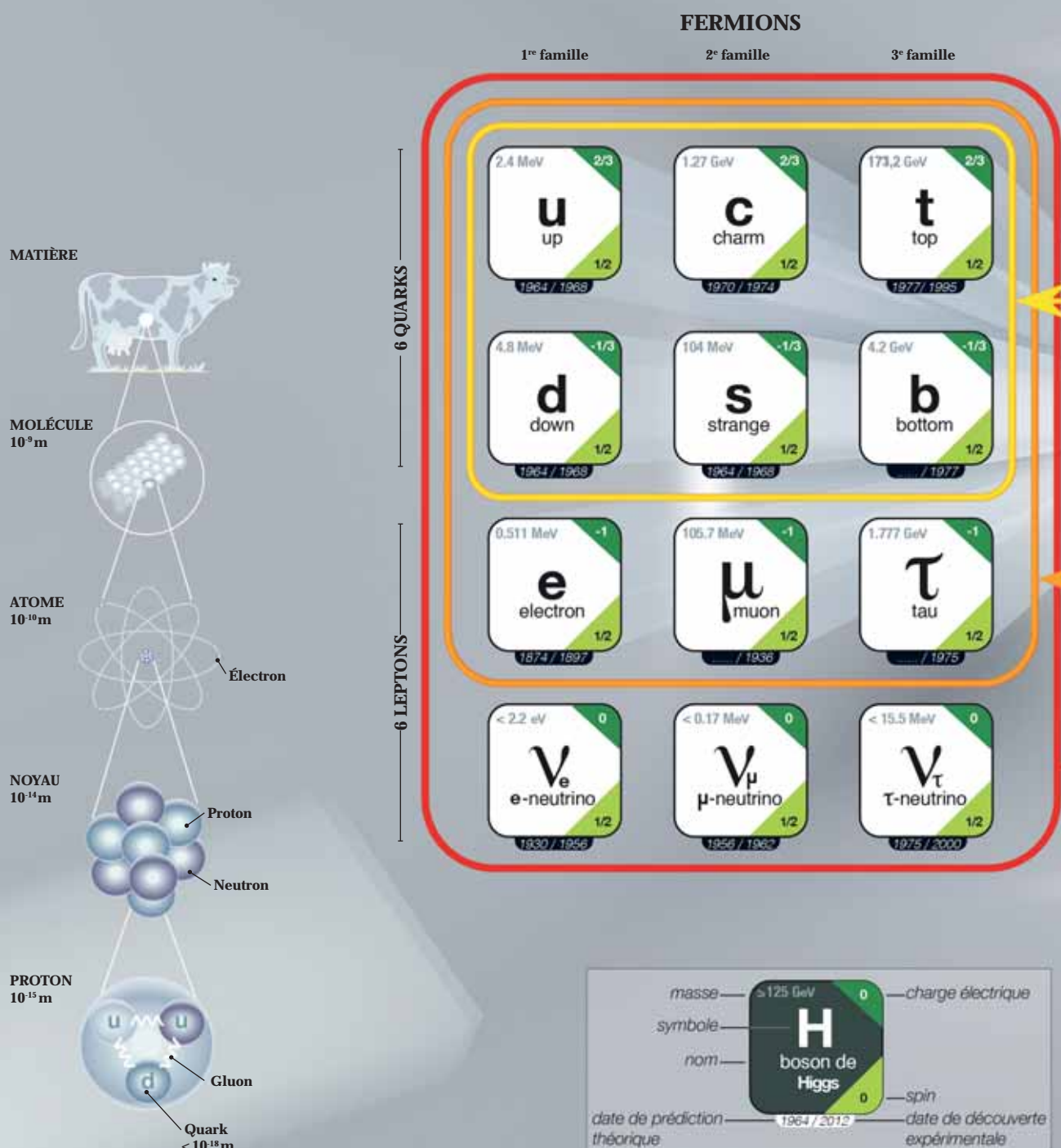
FRANÇOIS ENGLERT (1932)
PETER HIGGS (1929)
Physiciens belge et anglais
Découverte en 1964 d'un mécanisme conférant leur masse aux particules élémentaires, confirmée par la détection du boson de Higgs par les expériences Atlas et CMS menées au LHC.



© DR

LE MODÈLE STANDARD DE LA PHYSIQUE

Le modèle standard de la physique des particules est la théorie qui décrit les particules de la matière et les particules médiatrices d'interactions fondamentales qui s'exercent entre elles. Le tout à des échelles inférieures à 10^{-15} m. Certaines de ces particules ont été observées et étudiées depuis longtemps. D'autres commencent à l'être, comme le fameux boson de Higgs prédit en 1964 et découvert en 2012 au LHC!



Infographie : Fabrice Mathé - Textes : Amélie Lorec

DES PARTICULES

BOSONS VECTEURS

Interaction forte



Interaction électromagnétique



Interaction faible



CARTE D'IDENTITÉ DES PARTICULES

- **Masse** : s'exprime en énergie à cette échelle, donc en électronvolt du fait de l'équivalence masse-énergie ($E=mc^2$ cf. page 12).
- **Charge électrique** : positive ou négative.
- **Spin** : responsable d'une partie des propriétés magnétiques à l'échelle subatomique qui permet de différencier fermions (1/2 entier) et bosons (entier).
- **Charge de couleur** : valeur qui code les propriétés des quarks et des gluons pour qu'ils s'assemblent en une particule résultante blanche.

À noter : à toute particule est associée une antiparticule, de même masse mais de charge électrique et de couleur opposées.

Fermions

Les fermions sont les particules élémentaires de la matière. La 1^{re} famille rassemble les particules stables à l'origine de la matière ordinaire (la nôtre !). Les 2^e et 3^e familles sont présentes dans les rayons cosmiques ou étaient présentes aux âges reculés de l'Univers (juste après le big bang).

Il existe deux types de fermions : les **quarks** et les **leptons**. En se regroupant, les quarks forment des hadrons, particules composites qui se classent en baryons (3 quarks), comme les protons ou les neutrons, et en mésons (un quark et un anti-quark), comme les pions et les kaons... Les leptons sont insensibles à l'interaction forte et ne peuvent former de particules composites.

Bosons vecteurs

Les bosons vecteurs sont les particules qui véhiculent les interactions fondamentales. En particulier, ils permettent d'assembler les particules de matière pour former des particules composites.

Interactions (ou forces) fondamentales

- **Interaction forte** : portée par les gluons, elle lie entre eux les quarks, et également les protons et les neutrons dans le noyau.
- **Interaction électromagnétique** : véhiculée par les photons, elle lie les électrons au noyau des atomes, et permet aux atomes de former des molécules.
- **Interaction faible** : portée par les bosons W et Z, elle est notamment responsable de la radioactivité bêta des noyaux atomiques. Ainsi, la désintégration bêta+ permet à un quark « u » de se transformer en un quark « d » par échange d'un boson W+ : un proton formé de 3 quarks « uud » devient un neutron composé de 3 quarks « udd ».

À noter : le modèle standard ne considère pas l'interaction gravitationnelle (véhiculée par « l'hypothétique » graviton) négligeable à l'échelle des particules subatomiques.



© Philippe Matsas/Flammarion



INTERVIEW
Étienne KLEIN,
directeur du Larsim au CEA

LA MASSE, LA SYMÉTRIE ET LE VIDE...

Le vide ne serait pas vide ! Il abriterait des « particules en sommeil »... Étienne Klein, directeur du laboratoire des recherches sur les sciences de la matière (Larsim) au CEA-Irfu, décode en douceur des notions fondamentales qui expliquent la portée de la découverte du boson de Higgs.

■ D'où vient la masse des particules ?

Selon la physique classique, qui respecte la tradition philosophique, la masse est une propriété consubstantielle de la matière : on n'envisage pas qu'il puisse exister de matière non massive, ni que de la masse puisse exister autrement que sous forme de matière. Dans ce cadre, poser la question « d'où vient la masse des particules ? » équivaut simplement à demander « d'où vient la matière ? ».

Cette interrogation prend toutefois une autre tournure dans le cadre du modèle standard de la physique des particules. La masse des particules élémentaires y apparaît comme n'étant qu'une propriété secondaire, résultant

de l'interaction des particules avec... le vide, qui n'est pas vide ! Le vide est habité. Il contient notamment les ingrédients qui confèrent aux particules élémentaires leur masse apparente, c'est-à-dire l'inertie par laquelle elles résistent aux forces. C'est en substance l'idée que les théoriciens Brout, Englert et Higgs ont formalisée en proposant le mécanisme dit « de Higgs »...

■ Que dit précisément ce mécanisme de Higgs ?

Ce mécanisme s'appuie sur l'existence au sein du vide d'un champ, le champ de Higgs, avec lequel les particules élémentaires interagissent plus ou moins fortement. Ce champ acquiert soudainement une valeur non nulle dans le vide, à un moment donné de l'histoire de l'Univers, à l'issue d'une « brisure spontanée de symétrie ». En se couplant à ce champ, les particules ont alors acquis une masse non nulle, qu'elles ont conservée par la suite. Pour comprendre de quoi il s'agit, il faut s'intéresser au concept de symétrie. On dit qu'un objet est symétrique si, après avoir été soumis à une certaine transformation, son apparence n'est pas modifiée. Ainsi, si je fais subir une rotation à une sphère autour d'un axe passant par son centre, cela ne change rien ni à sa forme ni à sa position. Dans le monde des particules élémentaires, c'est exactement la même chose

$$E = mc^2$$

En 1905, Albert Einstein démontre que selon la théorie de la relativité restreinte qu'il vient d'énoncer, toute particule de masse m possède, du seul fait qu'elle est massive, une énergie E égale au produit de m par le carré de la vitesse de la lumière c : $E = mc^2$. Dans certaines conditions, de la matière peut se transformer en énergie. Dans d'autres, l'énergie devient matière...

sauf que les symétries auxquelles on s'intéresse opèrent dans des espaces mathématiques abstraits.

On parle de « brisure de symétrie » à propos d'un système qui n'est plus symétrique, ponctuellement, mais dont la description de manière symétrique demeure valable. Imaginons une table circulaire sur laquelle sont régulièrement disposées des assiettes avec, entre elles, des petits pains. Cette situation est *a priori* parfaitement symétrique. Sauf qu'à un moment où à un autre, un convive va vouloir se saisir d'un petit pain. Si aucune règle de politesse ou norme culturelle ne vient lui dicter sa

conduite, il pourra prendre celui de droite aussi bien que celui de gauche. Mais le choix, parfaitement arbitraire, qu'il fera viendra briser la symétrie initiale. L'idée de Brout, Englert et Higgs est que c'est un processus analogue qui a brutalement rendu le vide moins symétrique, au prix de l'apparition d'un nouveau champ.

Le vide ne serait donc plus vide ?

En effet. Selon la physique quantique, le vide est rempli de ce qu'on pourrait appeler de la « matière en sommeil », constituée de particules bel et bien présentes mais n'existant pas réellement : elles ne possèdent pas assez d'énergie pour pouvoir vraiment se matérialiser et, de ce fait, elles ne sont pas directement observables. Ce sont des particules « virtuelles », en hibernation. Pour les faire exister vraiment, il faut leur donner l'énergie qui manque à leur pleine incarnation. Pour cela, il suffit de faire entrer en collision deux particules de haute énergie, qui offrent alors leur énergie au vide. Du coup, certaines particules virtuelles que celui-ci contenait deviennent réelles et s'échappent hors de leur repaire. C'est ainsi que, grâce aux collisions du LHC, le boson de Higgs a pu être extirpé du vide, puis repéré et identifié grâce à deux énormes détecteurs, CMS et Atlas.

Que nous apprend la découverte du Higgs ?

En juin 2012, les expériences menées auprès du LHC ont fait apparaître une particule qui ressemble trait pour trait à celle qui avait été prédite 48 ans plus tôt. Reste à déterminer si cette particule est unique ou si elle a des partenaires de charges électriques différentes. Dans ce dernier cas, cela ouvrirait la voie à une nouvelle physique, au-delà du modèle standard.

Comment réagissez-vous à l'attribution du Prix Nobel à François Englert et à Peter Higgs ?

Ce Prix Nobel récompense une très grande découverte de physique, qui a de surcroît des implications philosophiques. Il porte également un message politique : c'est en Europe que cette belle avancée scientifique a eu lieu, résultat d'une longue persévérance et d'une forte détermination de la part des scientifiques et des institutions qui les encadrent.

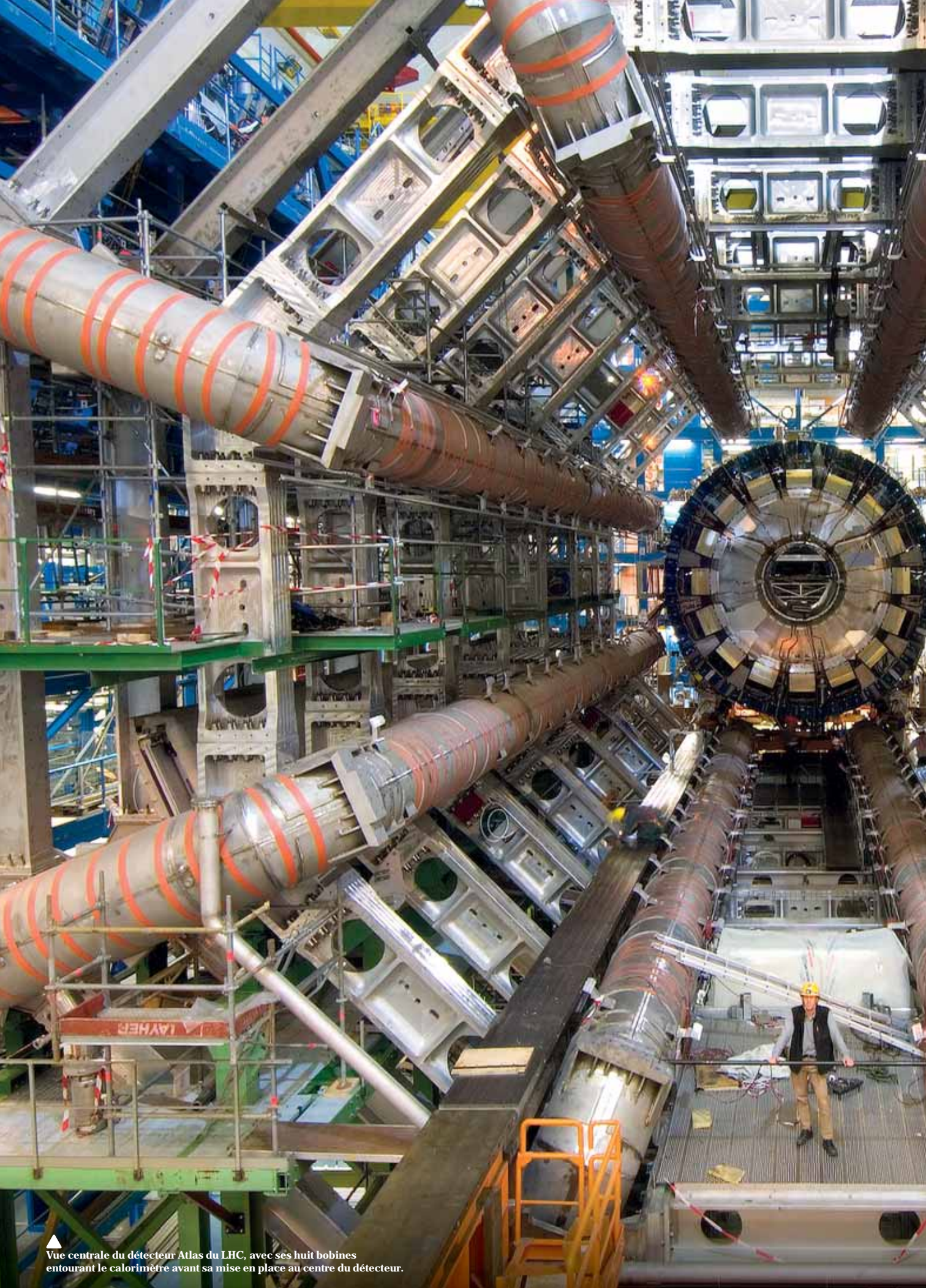
Propos recueillis par Vahé Ter Minassian

“
En faisant entrer en collision deux particules de haute énergie, celles-ci offrent au vide leur énergie : les particules virtuelles qu'il contient peuvent alors s'échapper de leur repaire et devenir réelles...”

DES INTERACTIONS QUI PORTENT !

En physique quantique, une interaction (ou force fondamentale) ne s'exerce entre deux particules que par l'échange d'une troisième, appelée « boson vecteur » de l'interaction. Une métaphore permet de l'expliquer, telle que la rappelle Étienne Klein : « Imaginons deux barques sur un lac, dont chacun des occupants est démuné de tout instrument de navigation (ni rames, ni pagaies...). Supposons que les deux barques se dirigent l'une vers l'autre de telle sorte que la collision paraisse inévitable. Inévitable ? Pas tout à fait. Si l'un des occupants dispose d'un objet massif, par exemple un ballon, et le lance avec vigueur au passager de l'autre barque qui le lui renverra et ainsi de suite, les deux embarcations s'écarteront peu à peu l'une de l'autre. Par l'entremise d'un médiateur, en l'occurrence le ballon, la succession des lancers créera une force répulsive capable de modifier les trajectoires. Bien qu'approximative cette image permet en outre de comprendre une chose importante : puisqu'un ballon lourd condamne à ne faire que des passes courtes, la portée d'une interaction sera d'autant plus faible que la masse de ses particules médiatrices sera élevée ».





▲
Vue centrale du détecteur Atlas du LHC, avec ses huit bobines entourant le calorimètre avant sa mise en place au centre du détecteur.

► L'AVENTURE TECHNOLOGIQUE DU CEA AU LHC

HISTOIRE D'UNE PETITE FABRIQUE DE PARTICULES

Pour débusquer le boson de Higgs, les physiciens et ingénieurs du CERN ont conçu l'accélérateur de particules le plus puissant au monde, le LHC. Deux de ses quatre détecteurs (Atlas et CMS), sont dédiés à cette traque et constituent le nec plus ultra de la technologie pour enregistrer, chaque seconde, les données de centaines de millions de collisions de particules. Un gigantisme au service d'une petite particule qui pèse lourd dans le modèle standard !

DES MICROSCOPES GÉANTS POUR SONDER LA MATIÈRE

Comment produire puis identifier les formes jusqu'ici inconnues de la matière ? Voici l'objet des accélérateurs de particules et de leur détecteurs qui permettent aux physiciens d'investiguer l'infiniment petit.



▲ Vue 3D d'un des 400 aimants quadripôles du LHC, dans lequel circulent en sens inverse deux faisceaux de protons.

• **TERA** : mille milliards 10^{12} .

• **ÉLECTRONVOLT (eV)** : unité utilisée pour quantifier l'énergie d'une particule. Par exemple, un électron accéléré par une tension de 1 V aura gagné une énergie de 1 eV. Cette unité correspond aussi à celle d'une masse, du fait de l'équivalence masse-énergie ($E=mc^2$).

• **IONISATION** : fait d'arracher un ou plusieurs électrons à la structure électronique d'un atome, le transformant ainsi en ion.

E = mc^2 : la masse peut se convertir en énergie, tout comme l'énergie peut devenir matière. L'élégante formule d'Einstein est à l'origine d'instruments très complexes : les accélérateurs de particules. Lorsque celles-ci se rencontrent en un point, leurs collisions libèrent une énergie qui se transforme aussitôt en d'autres particules. L'énergie s'est donc convertie en matière.

Une question d'énergie

Plus le choc est violent, plus la collision est énergétique et plus la structure de la matière peut être sondée à des échelles de distance petites (voir encadré). Ainsi, les physiciens n'ont eu de cesse de faire progresser les accélérateurs pour que les collisions puissent atteindre le domaine du **Tera[•] électronvolts[•]** (TeV). Cet ordre de grandeur n'a toutefois

rien d'impressionnant, 1 TeV correspondant à l'énergie cinétique d'un moustique en vol, mais le devient quand cette énergie est concentrée dans un espace environ mille milliards de fois plus petit qu'un moustique !

Pour ainsi produire des collisions à très haute énergie dans les collisionneurs, des particules circulent dans un tube à vide et sont dirigées par des dispositifs électromagnétiques : les aimants dipolaires maintiennent les particules dans leur orbite quasi-circulaire, des quadripôles concentrent le faisceau et des cavités les accélèrent.

Accélérateur d'interactions

Les particules issues des collisions sont très instables, ce qui empêche leur détection directe, elles se désintègrent quasi instantanément en des particules plus stables. Tous les efforts doivent se

concentrer sur la deuxième génération de particules produites, voire la troisième... Pour les identifier, les physiciens utilisent différents sous-détecteurs sophistiqués qu'ils interposent sur la trajectoire des particules pour observer comment elles interagissent avec les matériaux traversés (voir pp. 24-25). De nombreux indices sont scrutés à la loupe : courbure de leur trajectoire, quantité d'énergie déposée, traces laissées par **ionisation[•]**... Toutes ces données sont converties par de puissants logiciels en informations sur leur énergie, vitesse, charge et masse qui permettent d'en déterminer la nature. Une fois les particules « filles » identifiées, les physiciens procèdent à de nouveaux calculs, pour en déduire la nature de la particule « mère ».

Aude Ganier

VOIR AU CŒUR DE LA MATIÈRE

Une particule interagissant avec de la matière joue le rôle d'une sonde, d'autant plus précise que son énergie est élevée. Ainsi, un photon de lumière visible qui possède une énergie de l'ordre de l'électronvolt (eV) permet d'explorer la matière au niveau du micron (10^{-6} m). Une particule de quelques keV (comme un électron de microscope électronique) révèle des objets de la taille d'un atome (10^{-10} m). Une particule de 100 MeV « voit » un proton (10^{-15} m), l'un des constituants du noyau d'un atome. À l'échelle du TeV, les particules élémentaires (10^{-18} m) apparaissent...

LE LHC, ANTRE DE LA CRÉATION... DE NOUVELLES PARTICULES

Instrument d'une aventure scientifique initiée il y a près de trente ans, le LHC et ses détecteurs ont constitué un immense défi technologique et industriel. Le CEA, associé au CNRS, y a porté la participation française à la construction. Entre aimants supraconducteurs, calorimètres, électronique spéciale et cryogénie ultime, il a contribué à faire de cet accélérateur de particules le plus puissant au monde.

Dans un tunnel circulaire creusé à une centaine de mètres sous terre, à la frontière franco-suisse, deux faisceaux de protons circulent en sens opposé à une vitesse proche de celle de la lumière. À leurs points de rencontre, des détecteurs permettent aux physiciens de scruter les résultats de leurs collisions... Ainsi se présente le LHC, dernier-né du CERN, installé dans le tunnel de 27 km de son prédécesseur le LEP. Officiellement lancé le 16 décembre 1994 et en fonctionnement depuis fin 2008¹, c'est le plus puissant accélérateur de particules au monde. Un défi motivé par plusieurs objectifs dont celui de débusquer le boson de Higgs dans une gamme de masses allant de 100 GeV à 1 TeV... « *Dès les années 1980, nous nous sommes réunis avec quelques collègues du CERN, pour évoquer la conception d'un accélérateur de protons qui nous permettrait de scruter la matière à de tels niveaux d'énergie* » se souvient Bruno Mansoulié, physicien du CEA-Irfu, détaché au CERN sur l'expérience Atlas.

Le plus grand frigo du monde

Pour mener à bien ce saut technologique², la clé réside dans les **supraconducteurs**³. Ces matériaux sont les seuls à pouvoir soutenir l'**énergie nominale**⁴ de 14 TeV du LHC (7 TeV par faisceau de protons) en créant des champs magnétiques bien plus intenses que ceux de conducteurs classiques.

Les éléments clés du LHC sont 1 600 aimants supraconducteurs qui guident les protons sur leur trajectoire circulaire. Chacun d'eux doit être maintenu à -271,3 °C soit 1,9 Kelvin (K). Une température proche du **zéro absolu**⁵ qui fait du LHC l'endroit le plus froid de l'Univers!

Fort de son expérience sur le tokamak Tore Supra du CEA à Cadarache, un service du CEA-Inac s'est attelé dès la fin des années 1980 à la conception cryogénique du LHC en utilisant de l'hélium superfluide à 1,9K. « *Tore Supra était la première expérience industrielle au monde avec de l'hélium superfluide, même si l'échelle*

n'était pas celle du LHC » explique Alain Girard, chef du SBT³. La température très basse a permis d'utiliser des aimants en alliage de niobium-titane, plus facile à mettre en œuvre que le niobium-étain. En quelques années, les chercheurs, en forte interaction avec les équipes du CERN, ont conçu et validé le principe de refroidissement de l'accélérateur. Ils ont également participé à la conception des unités de réfrigération superfluide et au suivi de leur réalisation par les industriels Air Liquide et le consortium germano-nippon Linde/IHI.

Les experts du magnétisme

Concernant les aimants, le CERN s'est chargé de la réalisation des 1 200 dipôles qui courbent la trajectoire des protons et a confié au CEA celle des 400 quadripôles supraconducteurs focalisant les faisceaux autour de cette trajectoire idéale (voir p. 20). « *Nous avons réalisé ceux de l'accélérateur Hera⁴, du laboratoire allemand DESY de Hambourg, ce qui faisait de notre service le candidat*

• **SUPRACONDUCTEUR**: propriété de certains matériaux de conduire parfaitement le courant sans perdre d'énergie lorsqu'on les refroidit en-dessous d'une température critique très basse.

• **ÉNERGIE NOMINALE**: énergie de fonctionnement pour laquelle un accélérateur a été conçu.

• **ZÉRO ABSOLU**: notion relative à la température de zéro Kelvin (K) équivalente à -273,15 °C, température en-dessous de laquelle on ne peut descendre.



Notes:

1. Le LHC a démarré fin 2008 mais une défaillance quasi-immédiate a exigé un an de réparation. Les premiers faisceaux fonctionnels ont tourné en novembre 2009.
2. Par rapport aux accélérateurs de génération précédente, comme le LEP ou le Tevatron.
3. Service des basses températures.
4. Hadron-Elektron-Ring-Anlage, seul collisionneur électron-proton du monde, en service à Hambourg de 1992 à 2007.

◀ **Vue d'un des modules cryogéniques développés pour maintenir les aimants à une température de 1,9 K.**

10¹¹

Nombre de protons contenus dans chacun des 2808 paquets de chaque faisceau qui se croisent 30 millions de fois par seconde dans le LHC.

600 millions/s.

Nombre de collisions de particules générées au sein des détecteurs du LHC.

"naturel" » précise Antoine Dael, responsable du SACM⁵ au CEA-Irfu. Les prototypes ont été entièrement réalisés et testés au CEA en 1998. Le CERN a ensuite confié en 2000 leur production de masse à l'entreprise Accel Instruments. Pour assembler les aimants, l'industriel allemand a creusé dans son hall une fosse verticale de 8 mètres de profondeur et s'est équipé d'outillages spéciaux pour positionner les aimants dans leur section, longue de 3,2 m, avec une précision de 20 microns... « Nous avions dépêché des ingénieurs et techniciens pour assurer le transfert industriel. En pleine production, quatre aimants sortaient par semaine. En décembre 2004, le centième était livré et en novembre 2006 la fabrication des 400 aimants était achevée » raconte Antoine Dael.

Atlas et CMS, à la croisée des collisions

L'une n'allant pas sans l'autre, la réflexion sur les détecteurs a commencé en même temps que celle sur l'accélérateur. Quatre expériences ont été proposées par autant de collaborations de

physiciens du monde entier : deux d'entre elles sont généralistes, CMS (Compact Muon Solenoid) et Atlas (A Toroidal LHC Apparatus); les deux autres, Alice⁶ et LHC-B⁷, sont davantage spécialisées. Si Atlas et CMS sont toutes deux conçues pour débusquer le boson de Higgs et les signaux de la nouvelle physique, leurs technologies diffèrent. Avec 46 m de long, 25 m de haut, 25 m de diamètre et 7000 tonnes, le détecteur Atlas est le plus grand du monde. CMS, plus petit avec 21,5 m de long, 15 m de haut et 15 m de large, est le plus lourd avec 12500 tonnes ! « La conception de CMS est d'une très grande sophistication avec un très grand nombre de voies d'électronique. C'est comme une caméra numérique de 100 millions de pixels qui prendrait 40 millions de photos par seconde » image Marc Dejardin, chef du groupe CEA de la collaboration CMS, qui ajoute que jamais de tels outils n'avaient été construits auparavant. Les expériences comprennent également de grands aimants supraconducteurs dont le champ courbe la trajectoire des

particules, ce qui renseigne sur leur énergie⁸. « Pour CMS, nous avons choisi la forme classique d'un solénoïde, mais avec des dimensions et des performances uniques au monde : il délivre en effet un champ magnétique de 4 teslas (T) sur 13 m de long et 6 m de diamètre⁹ ! Son bobinage est constitué de câbles supraconducteurs noyés dans une matrice d'aluminium pur réfrigérante, un concept hérité du détecteur Aleph du LEP que le CEA avait conçu à l'époque » indique Marc Dejardin.

Atlas est également doté d'un solénoïde mais il innove avec un second aimant, le toroïde (voir p. 21), spécialement conçu pour aller de pair avec le spectromètre à muons (voir p. 23). « Cette idée, due en grande partie à Marc Virchaux, était inédite à l'époque et elle l'est toujours ! Nous avons longtemps travaillé avant de la proposer », précise Claude Guyot, chef du groupe CEA de la collaboration Atlas. « En effet, ajoute Pierre Védrine, spécialiste des aimants au CEA-Irfu, comment faire tenir ensemble ces gigantesques bobines, comment vont-elles supporter les forces dues au champ magnétique et le poids des chambres à muons ? Pour en optimiser la conception, à tous les niveaux y compris économiques, nous avons développé des outils de simulation que nous utilisons encore aujourd'hui... »

Stopper les particules dans leur course

De manière assez classique, les détecteurs sont constitués d'une succession de couches concentriques (voir pp. 24-25). Au centre, le trajectographe permet de reconstruire les trajectoires et de déterminer le point d'origine des particules, lieu de la collision initiale entre les protons. Viennent ensuite les calorimètres, électromagnétique et hadronique, qui stoppent les particules et en mesurent l'énergie. « Pour le calorimètre électromagnétique de CMS, nous avons utilisé le plomb, noyau stable comportant le plus grand nombre de nucléons, donc doté du meilleur pouvoir d'arrêt des particules » explique Michel Mur,



▲ Installation des 40 000 connexions du détecteur CMS.

**Vue du montage
du détecteur de CMS.**

chef du Sedi¹⁰ du CEA-Irfu. Les concepteurs du CEA ont en effet opté pour des dizaines de milliers de cristaux de tungstate de plomb (voir p. 22) alors que, pour Atlas, ils ont, avec l'IN2P3¹¹, conçu un dispositif alternant deux milieux, le plomb et l'argon liquide (voir p. 22). Enfin, des chambres à muons, installées à l'extérieur, recueillent les traces des muons les traversant (voir p. 23).

Des limiers endurcis à la traque des particules

Chacune des sous-unités (par exemple chaque cristal ou canal d'un calorimètre) est munie d'une électronique « durcie » pour résister aux rayonnements. C'est elle qui convertit en données (énergie, masse, charge) les indices laissés par les particules (impact, rayonnements, ionisation...) lors de leur interaction avec les sous-détecteurs. Elle sert également à sélectionner en temps réel les événements intéressants en réduisant par un facteur de plus d'un million le nombre de collisions à enregistrer. Une partie de cette électronique a été fournie par le CEA, en particulier les 80 000 circuits intégrés et les 135 cartes électroniques du calorimètre d'Atlas ou encore le système de lecture sélective du calorimètre de CMS.

Loin d'être ici décrite de manière exhaustive, cette aventure LHC du CEA a marqué les esprits, d'autant que l'Irfu est l'un des rares laboratoires au monde à être impliqué de près dans les deux expériences généralistes du LHC ! Au niveau international, il s'agit d'une belle victoire pour les collaborations Atlas et CMS qui, en dépit de leurs différences de conception, ont obtenu des résultats compatibles. « Les deux équipes ont produit la preuve de l'existence du boson de Higgs en même temps. Ça ne s'est pas toujours passé comme ça par le passé... » conclut Daniel Fournier, responsable d'Atlas à l'IN2P3.

Patrick Philipon

Notes :

5. Service des accélérateurs, de cryogénie et de magnétisme.
6. ALICE (A Large Ion Collider Experiment) étudie des collisions d'ions de plomb 208 pour étudier l'état de la matière ayant existé quelques microsecondes après le big bang.
7. Le LHCb (b pour beauté) détecte des « mésons beaux » dans l'espoir de comprendre l'origine du déséquilibre entre matière et antimatière dans l'Univers.
8. Plus l'énergie de la particule est élevée, moins sa trajectoire est courbée.
9. En comparaison, les IRM des hôpitaux ont des champs magnétiques de 1,5 voire 3 T, mais sur 2 m de long avec un tunnel de 70 cm de diamètre.
10. Service d'électronique, des détecteurs et d'informatique.
11. Institut national de physique nucléaire et de physique des particules du CNRS.



11 245

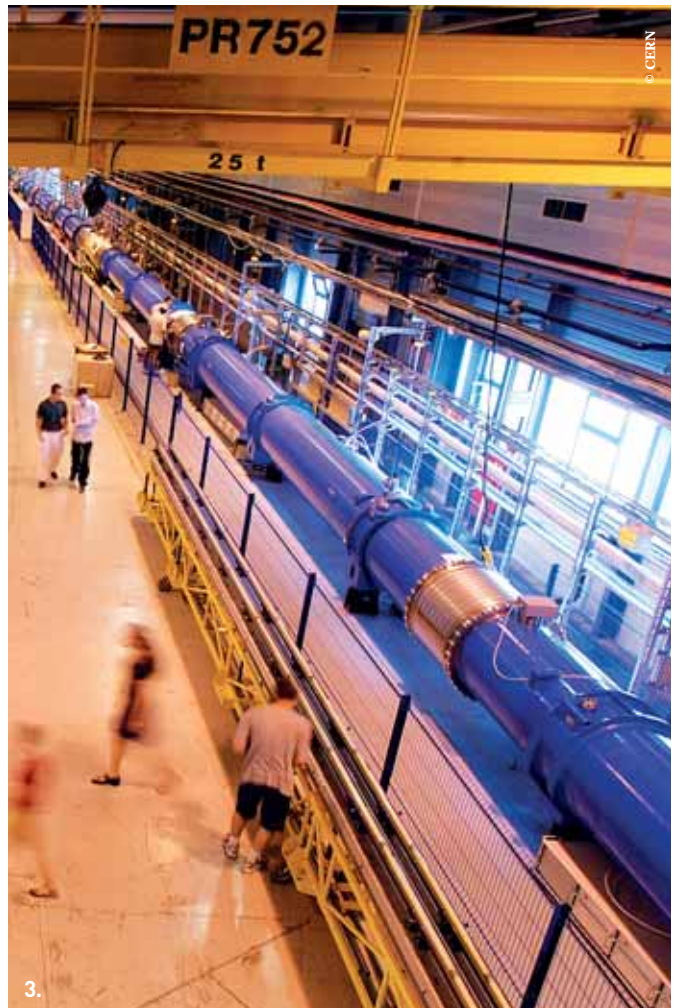
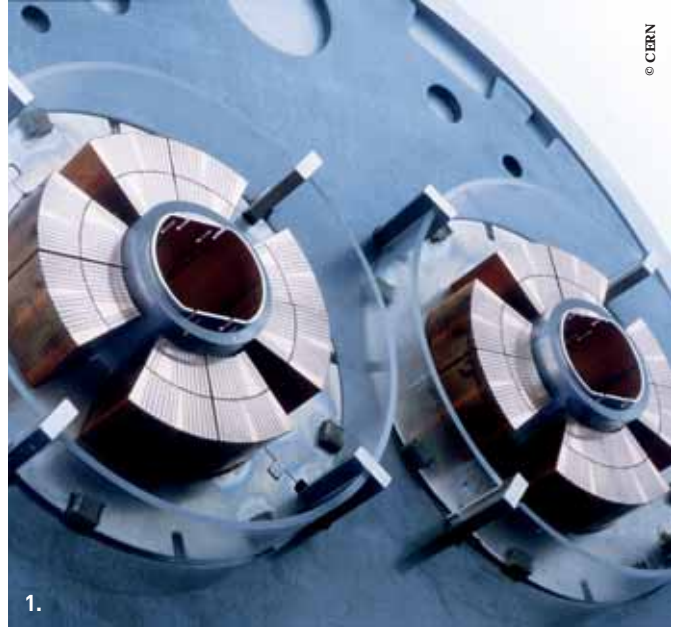
Nombre de tours du tunnel de 27 km effectués par seconde par un faisceau de protons. Chacun des faisceaux a une énergie totale équivalente à un train de 400 tonnes lancé à 150 km/h.

270 000 km

Longueur totale des brins des câbles des bobines magnétiques des aimants du LHC, de quoi entourer 6 fois la Terre à l'équateur.

LES QUADRIPOLES DU LHC

Les 400 aimants quadripôles du LHC ont été entièrement conçus par le CEA-Irfu qui a également réalisé les prototypes et suivi la production en série. Longs de 3,2 m, ils présentent une configuration inédite en double ouverture de 56 mm (pour les deux faisceaux de protons) disposée dans une même structure magnétique et cryogénique. Les bobines magnétiques sont formées d'un câble enroulé de 36 brins torsadés, composés de 6000 à 9000 filaments de 7 microns (un cheveu mesure environ 50 microns!), où circule un courant de 13000 ampères (A). Ce dispositif permet ainsi de générer un gradient de champ magnétique de 223 teslas/m pour focaliser les faisceaux de protons. Une performance qui repose sur la qualité du bobinage des câbles et sur la solidarisation des bobines entre elles avec une précision de positionnement de 20 microns.



Reconnaissables à la disposition en corolle de quatre bobines supraconductrices (1), les quadripôles focalisent les faisceaux qui circulent en sens inverse dans deux ouvertures (2). Pour ne pas s'échauffer, ils sont installés dans une enceinte cryogénique à 1,9 K (en bleu) (3).



LE TOROÏDE D'ATLAS

Véritable invention technologique des physiciens du CEA-Irfu, l'un des aimants du plus grand détecteur au monde, est un toroïde. Composé de huit bobines de 25 m de long sur 5 m de large, il est alimenté par un courant de 20400 A, qui a nécessité 30 km de câbles supraconducteurs. Deux enjeux : espacer les bobines pour y insérer les éléments du spectromètre à muons et obtenir un champ magnétique sans fer magnétisé. Les ingénieurs ont également innové pour assurer au bobinage une parfaite immobilité face au champ magnétique du système grâce à une boudruche métallique. Remplie d'une résine liquide contenant des billes de verre, elle est insérée entre le bobinage et le boîtier pour comprimer les câbles. Cette opération a été répétée plus de 2000 fois lors de l'intégration des bobines dans Atlas. Le CEA est chargé de la conception des outils de manutention, du montage et de son suivi.



Développé au CEA, le prototype d'une bobine à échelle réduite (9 m) arrive au CERN en 2000 (1). Il est à l'origine des huit bobines du toroïde descendues à 100 m sous terre dans la caverne d'Atlas en 2005 (2) pour être assemblées. Le montage final du toroïde repose notamment sur des pièces métalliques créées par le CEA pour assurer l'emplacement et l'espacement des bobines entre elles (3).



LES CALORIMÈTRES ÉLECTROMAGNÉTIQUES DE CMS ET D'ATLAS

Pour stopper les particules issues des collisions et en mesurer l'énergie, deux technologies sont utilisées !

Le calorimètre de CMS est constitué de 75848 cristaux de tungstate de plomb. Comme leur sensibilité aux rayonnements, produits par les particules, induit une perte de transparence et affecte la stabilité des mesures, les physiciens et ingénieurs du CEA ont inventé un système de monitoring laser. Une lumière laser distribuée par fibre optique sur chacun des cristaux, permet d'étalonner la réponse du détecteur toutes les 30 minutes pour ainsi corriger les mesures d'énergie en temps réel. Sur Atlas, le calorimètre est un empilement de plomb et d'argon liquide dans une géométrie innovante « en accordéon » qui assure la rapidité du signal. Un concept inventé à l'IN2P3, avec la grande contribution du CEA-Irfu qui a par ailleurs construit un tiers des 32 modules qui le composent et fourni une partie de l'électronique associée: 80000 circuits intégrés et 135 cartes électroniques.



Les cristaux de tungstate de plomb du calorimètre électromagnétique de CMS sont soigneusement préparés (1) tout comme le système de monitoring laser par fibre optique (2) avant d'être installés dans les modules du sous-détecteur. Constitués de multiples couches en accordéon, les modules du calorimètre Atlas sont montés en salle blanche (3), puis assemblés et connectés entre eux via un réseau électronique complexe (4).

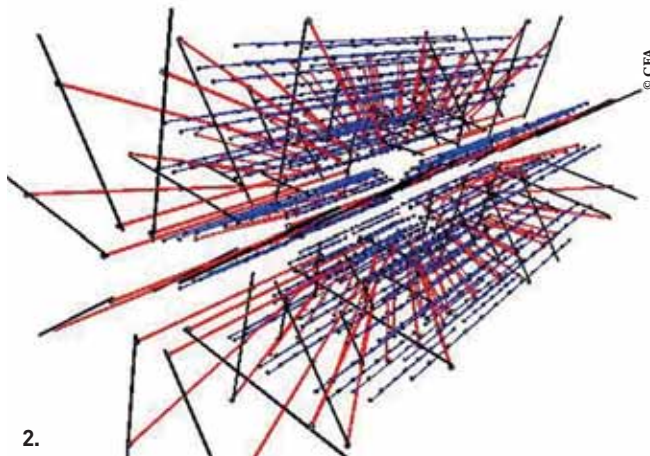
Textes : Amélie Lorec



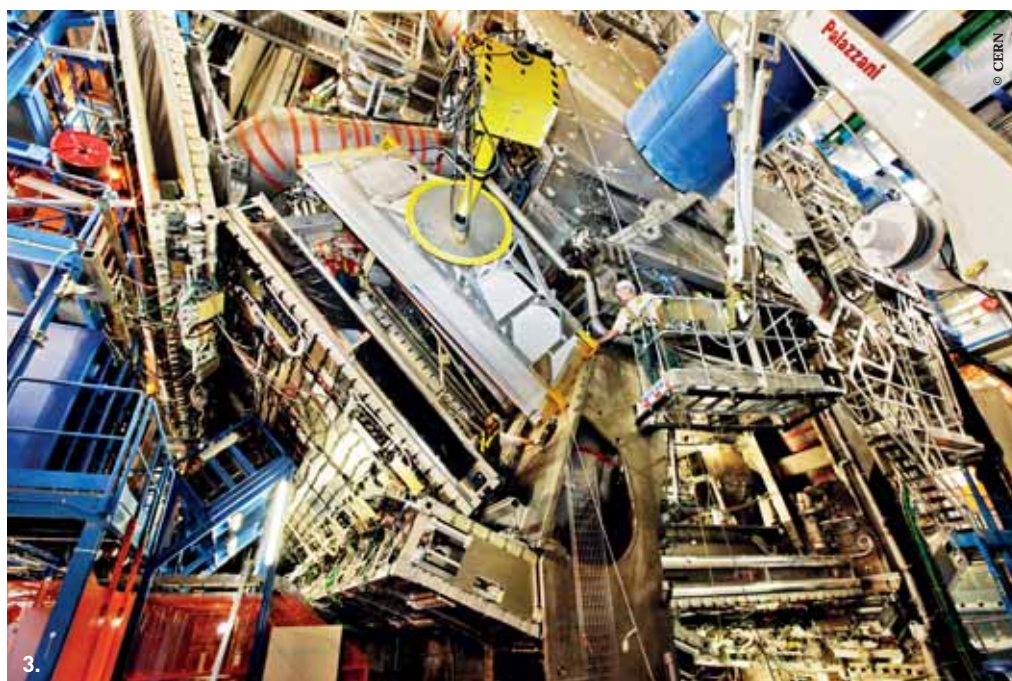
© CEA

LE SPECTROMÈTRE À MUONS D'ATLAS

Conçu en partie par le CEA-Irfu, le spectromètre à muons d'Atlas comporte 650 chambres de détection. Chacune est composée de centaines de milliers de tubes, remplis de gaz avec un fil au milieu qui détecte le passage des muons. Les ingénieurs du CEA ont particulièrement innové sur l'alignement des chambres de la couche centrale du spectromètre. Le système de 6000 capteurs de position (comportant source laser, lentille et caméra) qu'ils ont conçu, réalisé et étalonné permet d'exploiter le côté rectiligne d'une lumière infrarouge joignant trois chambres, pour ainsi reconstruire la trajectoire d'un muon. Cette fonction est aujourd'hui assurée avec une précision de 40 microns.



© CEA



© CERN

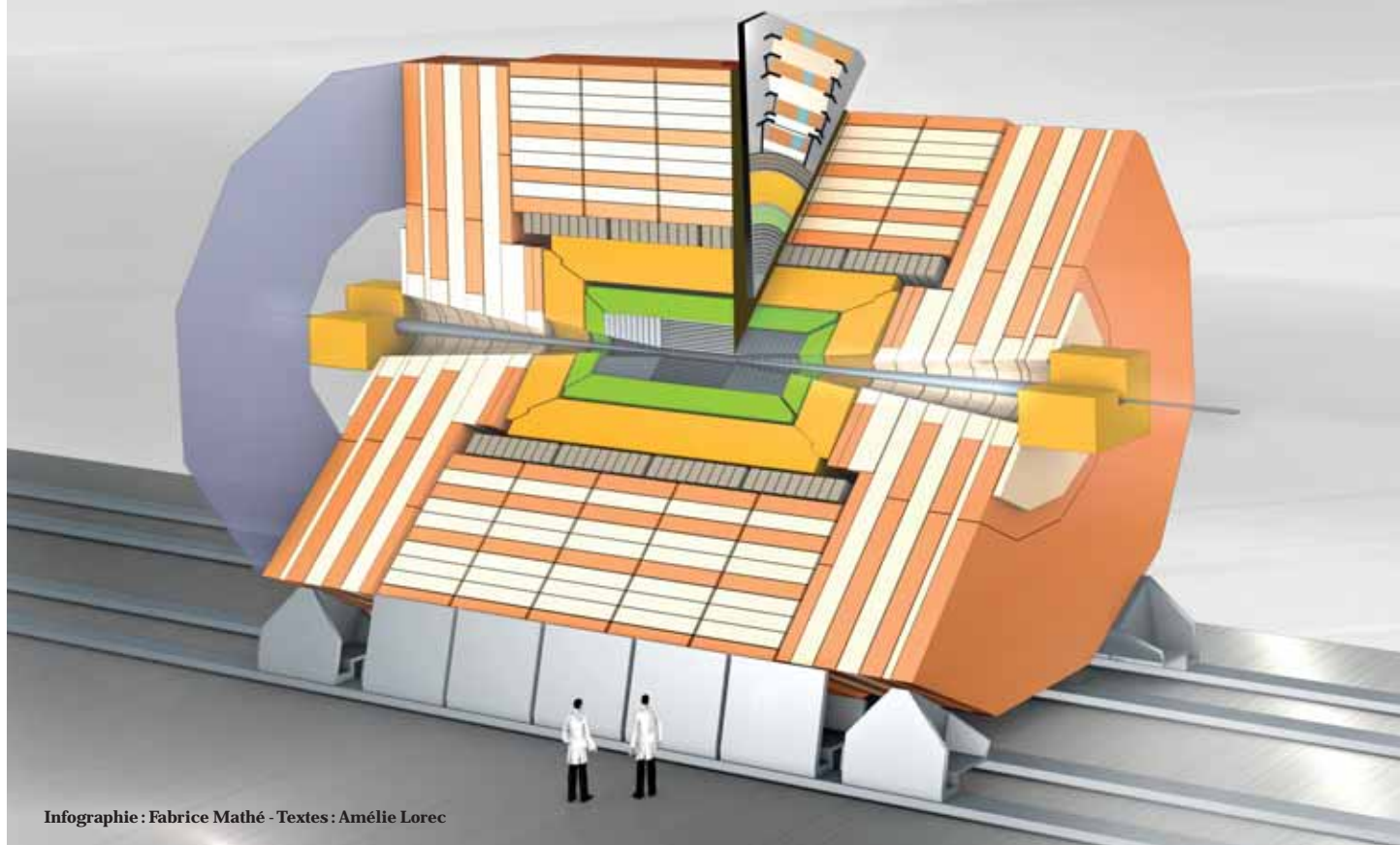
Les tubes à dérive des chambres sont disposés et collés entre eux à 20 microns près (1). Des logiciels permettent d'optimiser l'alignement de chacune de ces chambres par des faisceaux laser (2), notamment lors de leur placement dans le détecteur (3).

DÉTECTEUR DE PARTICULES

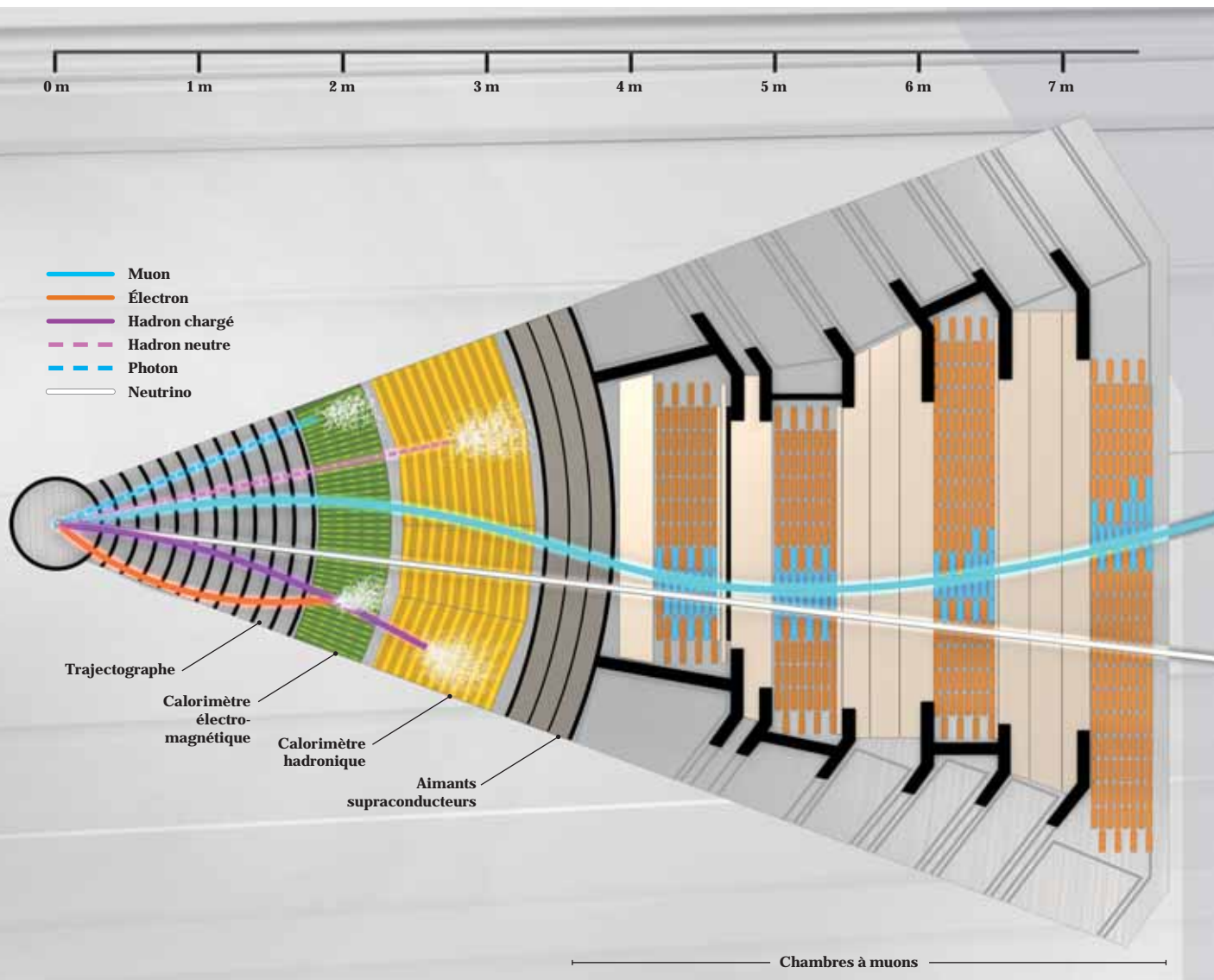
Dans le LHC, deux faisceaux de protons sont accélérés en sens inverse pour se rencontrer au centre de détecteurs. Ceux-ci recueillent et enregistrent des informations sur le trajet, la masse, la vitesse, l'énergie des particules issues des collisions. Comment ? En interposant sur leur trajectoire de la matière avec laquelle elles interagissent, en laissant une trace caractéristique. Des centaines de millions de données par seconde sont obtenues puis analysées par des systèmes de mesure performants. Explications du fonctionnement de ces puzzles technologiques géants.

Un champ magnétique intense

La plupart des particules issues des collisions sont chargées. Soumises à aucune force, elles se déplacent en ligne droite. Grâce à une puissante et gigantesque bobine supraconductrice, le détecteur est baigné dans un champ magnétique intense qui courbe les trajectoires des particules chargées. Cette courbure, renseigne sur leur énergie : moins la trajectoire est courbée plus l'énergie est élevée.



Infographie : Fabrice Mathé - Textes : Amélie Lorec



Des couches de sous-détecteurs

Le trajectographe : situé au plus près des collisions, il suit les trajets des particules dès leur formation en relevant leurs points d'impact dans ses cellules composées de silicium (semi-conducteur altérant peu les propriétés des particules incidentes) : les particules excitent le milieu en le traversant, ce qui laisse une trace dans le détecteur.

Les calorimètres : ils mesurent l'énergie perdue par les particules qui s'arrêtent dans son milieu très dense (plomb, cuivre), en émettant un rayonnement. Deux types de calorimètres : l'électromagnétique stoppe les particules les plus légères (électrons, photons et positons) ; l'hadronique piège les hadrons, particules composites formées de quarks.

Le spectromètre à muons : il détecte les muons, particules interagissant si peu avec la matière qu'elles échappent aux détecteurs précédents. Il est composé de chambres au milieu gazeux qui mesurent la quantité d'électrons arrachés au gaz lorsqu'un muon les traverse.

À noter : les neutrinos ne peuvent pas être détectés car ils ne sont pas chargés et interagissent trop peu avec la matière. Ils sont déduits du solde entre l'énergie de la collision et celle des événements détectés, selon le principe de la conservation de l'énergie.

Une électronique ultrasophistiquée

Chaque sous-détecteur contient des centaines de milliers de canaux indépendants qui « observent » une petite fraction de la zone de mesure. Tous possèdent une électronique qui va recueillir les informations sur les particules. Toutefois, seules quelques centaines d'événements d'intérêt (particules issues d'une collision) par seconde seront enregistrées grâce aux logiciels de tri associés à l'électronique de chaque sous-détecteur. Les données sont ensuite transmises aux physiciens qui pourront les épulcher et les analyser aux quatre coins du monde.

DES MILLIONS DE MILLIARDS DE DONNÉES EN LIGNE

Aucun centre informatique, aussi puissant soit-il, ne pouvait traiter la quantité de données produite par le LHC, les physiciens du CERN ont dû innover. Faisant appel à des ressources dispersées sur les cinq continents, ils ont conçu et mis au point un « ordinateur virtuel » de taille mondiale.



▲ Grille mondiale dédiée au LHC au centre informatique du CERN.

• PETA : million de milliards (10¹⁵).

Quinze pétaoctets[•] : voici le nombre de données générées par an (700 Mo/s) par les 150 millions de capteurs des quatre détecteurs du LHC qui enregistrent 40 millions de données par seconde ! « C'est l'équivalent d'une pile de CD-Rom haute de 20 km » illustre Jean-Pierre Meyer, du CEA-Irfu, responsable scientifique du Grif (voir encadré ci-dessous). Bien avant le démarrage de l'accélérateur, il était déjà évident que le CERN n'aurait jamais la capacité de traiter un tel volume. Dès 1999 a donc émergé l'idée de mettre à contribution les ressources informatiques de 150 centres de calculs répartis

dans 40 pays, via une organisation en réseau. Ainsi est née la grille mondiale de calcul, WLCG, du LHC¹, au service d'une communauté de 10 000 physiciens.

Filterer et reconstruire

La grille est organisée en niveaux, assumant chacun une mission spécifique. Après un filtrage en sortie de détecteur, les données brutes correspondant aux événements intéressants sont dirigées vers le centre de calcul du CERN. Ce dernier, qui constitue le niveau 0, stocke les données sur disque et les pérennise sur bande magnétique avant de les distribuer vers les douze

centres de niveau 1. « Le CERN a toujours distribué ses données. Naguère, un camion venait chercher les bandes magnétiques, alors qu'aujourd'hui ça se fait par un réseau de fibre optique à 10 Gb/s, le LHC OPN. La bande passante a augmenté encore plus vite que les capacités des processeurs ! » souligne Éric Lançon, physicien au CEA-Irfu impliqué dans les aspects calcul de l'expérience Atlas.

Les centres de niveau 1² « reconstruisent » les événements. Autrement dit, ils convertissent les traces que laissent les particules sur les sous-détecteurs en informations relatives à leur nature, énergie, charge... Toutes ces données sont pérennisées sur bande et transmises vers cent quarante centres de niveau 2. « Récemment encore, ce transfert se faisait par Internet mais le volume des données a fini par gêner les opérateurs. Nous construisons donc le réseau LHC One, qui s'ajoute à LHC OPN, afin de connecter les niveaux 1 et 2, ainsi que les niveaux 2 entre eux » explique Éric Lançon.

UNE GRILLE POUR L'ILE-DE-FRANCE

Fin 2004, des physiciens du CEA-Irfu et leurs collègues CNRS du laboratoire de l'Accélérateur linéaire se réunissent pour lancer le projet d'un centre de niveau 2 en région parisienne. Leurs ressources, ainsi que celles de quatre laboratoires³, sont mises à contribution, reliées par un réseau privé à 10 Gbits/s, et un engagement est pris auprès du CERN de mettre les données en ligne via les réseaux Renater et Geant. Ainsi est née la « Grille au service de la Recherche en Ile-de-France », ou Grif, l'un des cinq centres de niveau 2 en France. Dès 2005, elle participe à la mise en place de ce qui deviendra en 2010 l'European Grid Infrastructure, et qui, comme elle, est devenue une structure pérenne au service de tous les scientifiques.

L'analyse : entre intuition et simulation...

C'est au niveau 2, *grosso modo* celui des universités ou instituts, que se fait l'analyse à proprement parler. « Ces centres constituent la nouveauté du système en amenant les données jusqu'aux physiciens capables de les analyser. Auparavant cela se faisait au niveau 1, avec les problèmes d'occupation que cela suppose » affirme Jean-Pierre Meyer.

Là, l'intuition du physicien reprend ses droits car c'est à lui d'imaginer les algorithmes qui trient les données en fonction de la question de physique à explorer pour, éventuellement, permettre de décréter qu'il y a bien « quelque chose ». Pour cela, non seulement il analyse les données réelles provenant du détecteur, mais il les compare aussi avec un jeu de données simulées sur un détecteur virtuel, afin d'éliminer l'énorme **bruit de fond** dans lequel sont noyés les signaux significatifs (voir encadré). Évidemment, cela double le volume de données à manipuler...

Le plus grand défi de ce type d'architecture est évidemment de faire fonctionner ensemble, de manière transparente, des ressources informatiques très diverses – et évolutives – en termes de matériels et de systèmes d'exploitation. C'est le rôle du *middleware*, ou « intergiciel », une couche logicielle commune à l'ensemble. « L'arrivée des processeurs à 64 bits, par exemple, a exigé de revoir entièrement l'intergiciel » se souvient Jean-Pierre Meyer. C'est à ce prix que l'on peut créer une véritable entité informatique, fut-elle virtuelle. De fait, les physiciens du CERN ont bel et bien préfiguré, avec la grille du LHC, ce que l'on appelle aujourd'hui l'informatique « en nuage » ou le *cloud computing*.

Patrick Philipon

• **BRUIT DE FOND** : particules issues des désintégrations résultant de phénomènes physiques bien connus pouvant imiter le signal recherché car laissant les mêmes empreintes dans le détecteur.

Notes :

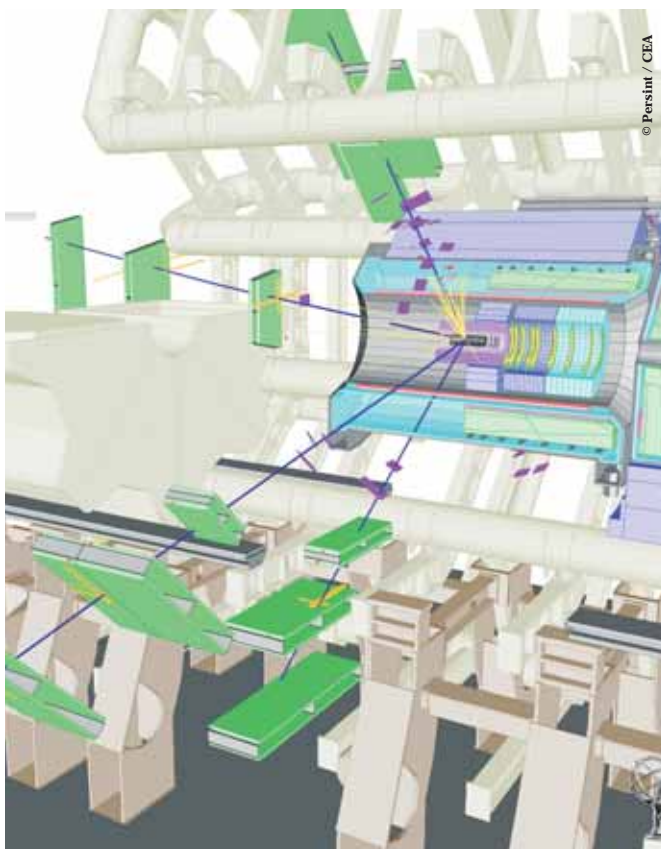
1. Le World LHC Computing Grid est un « réseau de réseaux » qui repose entre autres sur les grilles européenne (European Grid Infrastructure) et américaine (Open Science Grid), regroupant elles-mêmes des grilles plus locales.

2. En France, il s'agit du centre de calcul de l'IN2P3 à Lyon auquel participe le CEA.

3. Laboratoire astroparticule et cosmologie (APC), Institut de physique nucléaire (IPN), Laboratoire Leprince Ringuet (Polytechnique) et Laboratoire de physique nucléaire et de hautes énergies (LPNHE).

À GRAND RENFORT DE SIMULATION

Les données, si nombreuses et si difficiles à interpréter aux vues de la complexité des instruments, ne sauraient être analysées sans le soutien de la théorie et d'une description minutieuse du fonctionnement du détecteur, le tout modélisé dans de puissants outils de simulation. Le modèle standard prévoit de manière théorique toutes les interactions des particules entre elles ainsi que leurs produits de désintégration. « Nous avons développé des programmes de simulation pour la conception même du détecteur d'Atlas. Ils intègrent la presque totalité des phénomènes décrits par la physique. Ce logiciel comporte des centaines de milliers de lignes de code qui nous permettent de simuler des millions de collisions et leurs particules incidentes ainsi que leur signature dans le détecteur... » présente Laurent Chevalier, physicien du CEA-Irfu et expert de l'outil de visualisation Persint développé au CEA. La simulation est ainsi utilisée pour valider le bon fonctionnement des détecteurs puis pour guider les physiciens dans leurs recherches. « Par exemple, lorsque les détecteurs présentent des événements comme ce fut le cas pour le boson de Higgs, nous les comparons à ceux de la simulation qui contiennent ou non le boson de Higgs. Cela permet de contrôler nos erreurs de mesures et d'affirmer ou non une découverte. » explique le physicien.

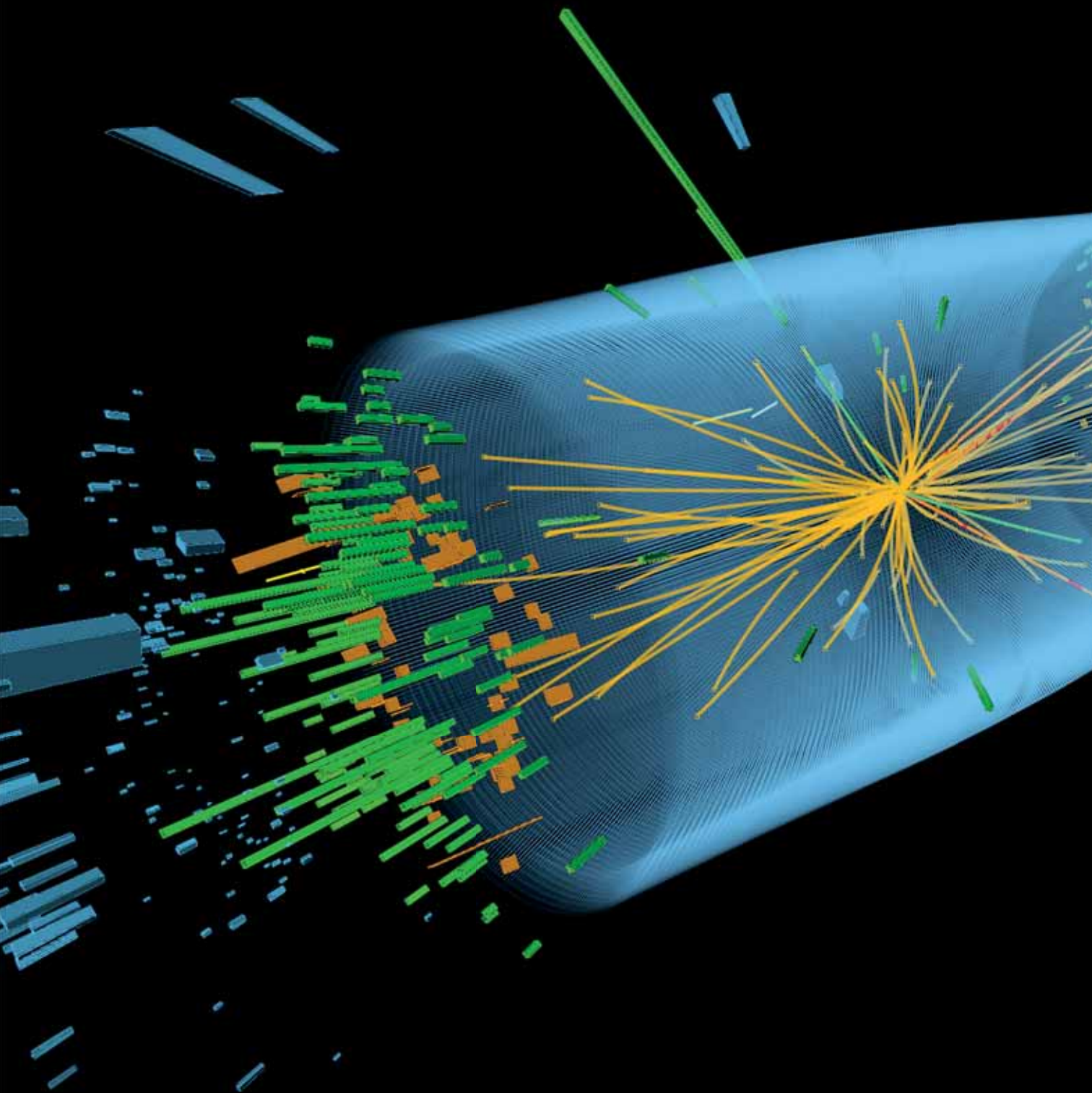


© Persim / CEA

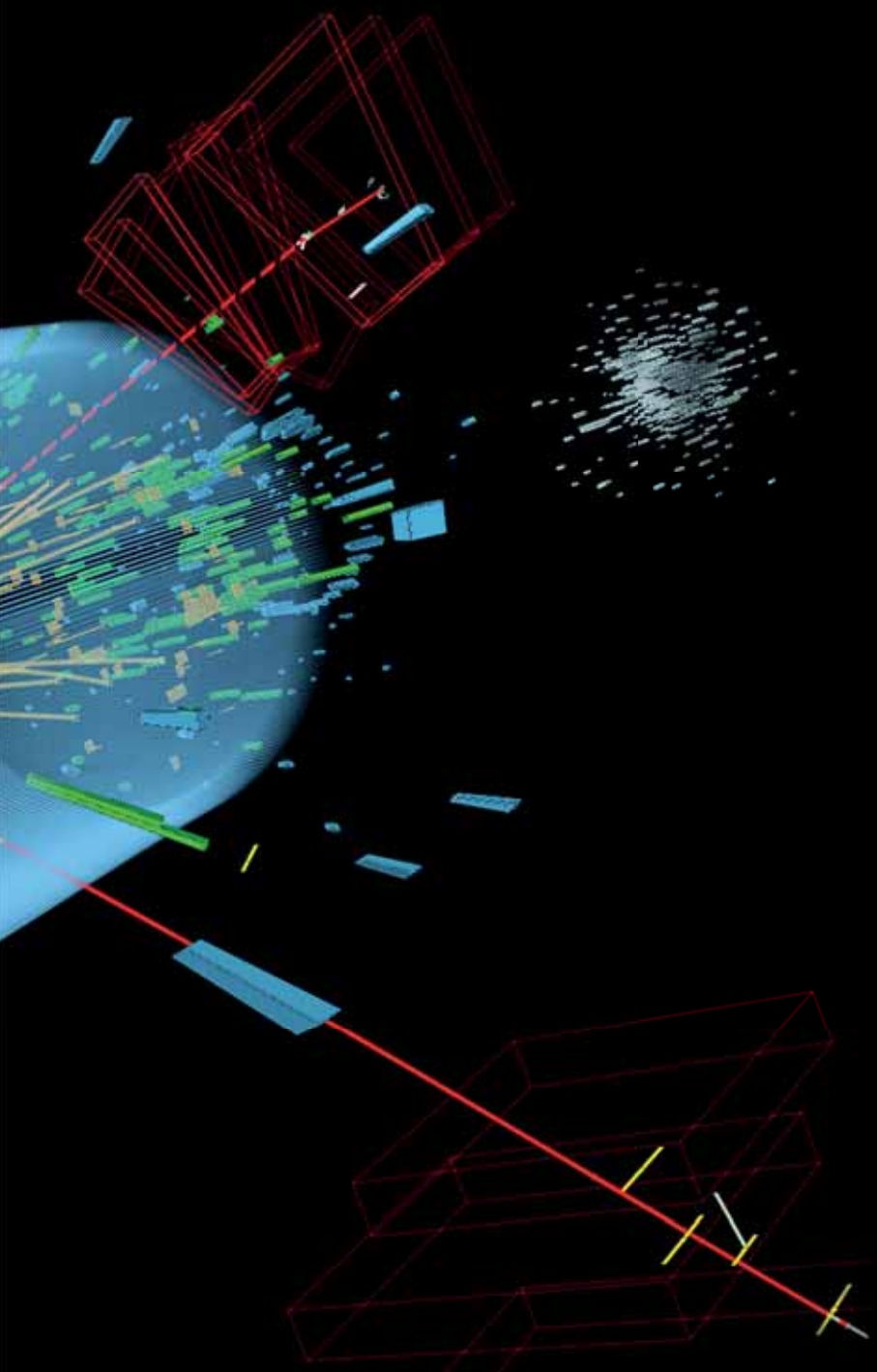
LE WEB INVENTÉ AU CERN

Le World Wide Web est inventé en 1990 au CERN pour permettre à ses 8 000 scientifiques, répartis sur les cinq continents, de travailler ensemble à distance. Il s'agit de combiner les technologies des ordinateurs personnels, des réseaux informatiques et de l'hypertexte en un système d'information mondial. www.info.cern.ch est ainsi l'adresse du tout premier site et serveur web du monde.

▲
Simulation, par le logiciel Persint développé au CEA, de la trajectoire de quatre muons, reconstruite à partir de l'impact qu'ils laissent chacun dans trois chambres différentes (en vert).



▲ Collision proton-proton d'une énergie de 8 TeV, enregistrée par le détecteur CMS en 2012. L'émission d'une paire de bosons Z, dont l'un se désintègre en deux électrons (lignes vertes) et l'autre en deux muons (lignes rouges), pourrait provenir de la désintégration d'un boson de Higgs.



▶ LA DÉCOUVERTE

SIGNÉ **BOSON** DE HIGGS!

Identifié dans Atlas et CMS avec un niveau de confiance de 99,97 %, le boson de Higgs est présenté au monde entier le 4 juillet 2012. Les physiciens profitent à présent de la maintenance du LHC, de 2013 à 2015, pour consolider leurs analyses. Peu à peu, ils entrevoient les horizons de la nouvelle physique et réfléchissent déjà aux machines du futur pour continuer cette quête scientifique et humaine inédite.



▲ Vue du détecteur Aleph du LEP, en cours de montage sur le LEP, prédecesseur du LHC au CERN.



LES CONNAISSANCES AVANT LE LHC

L'accélérateur du CERN et le Tevatron du Fermilab, déjà lancés sur la traque du boson de Higgs, avaient cherché dans plusieurs gammes d'énergie le fameux boson. Le Tevatron avait laissé entrevoir les premiers indices « là » où il allait finalement être débusqué au LHC. Les physiciens avaient auparavant une idée de cette valeur grâce à des mesures indirectes issues de calculs mathématiques.

Les physiciens n'ont pas attendu le démarrage du LHC pour traquer le boson de Higgs. Sans qu'il soit possible de donner une date précise, la quête expérimentale a probablement commencé dans les années 1990. En effet, si l'existence du mécanisme de Brout, Englert et Higgs a été théorisée à partir de 1964, il a fallu attendre que toutes les briques du modèle standard soient dûment découvertes pour prendre la mesure du problème restant... Un problème que Vanina Ruhlmann-Kleider, physicienne au CEA-Irfu, rappelle: « Dans les années 1980, les expériences du SppbarS au CERN avaient découvert les bosons W et Z dont elles avaient pu mesurer la masse, alors même que le modèle standard postulait qu'ils en étaient exempts. Pour conserver la cohérence de la théorie, le mécanisme du champ de Higgs constituait une réponse séduisante mais il fallait trouver le fameux boson pour prouver sa validité. »

La saga des zones d'exclusion

Les physiciens, conscients de la possibilité de son existence, profitaient d'autres expériences pour « jeter un coup d'œil ». Mais où chercher cette particule puisque sa masse était *a priori* inconnue? Réponse: partout! Chaque fois qu'un collisionneur donnait accès à un nouveau domaine d'énergie¹, les expérimentateurs l'exploraient

à la recherche d'événements imprévus, c'est-à-dire de particules qui signeraient la présence du boson de Higgs (voir encadré). Ainsi a commencé la grande saga des « zones d'exclusion », ces zones d'énergie où l'on ne trouve aucune trace de ces particules. En 1989, le CERN a mis en service son LEP générant des collisions à une énergie d'environ 100 GeV. Son but a d'abord été de mesurer précisément la masse du boson Z. Puis, en 1995, l'accélérateur a atteint environ 209 GeV grâce à l'addition de nouveaux aimants.

Le début de la traque du boson de Higgs

La traque du boson de Higgs commençait explicitement, sans résultat tangible. Cependant, en 2000, année de l'arrêt programmé du LEP, une de ses quatre expériences², Aleph, a constaté *in extremis* un excès d'événements à 115 GeV, juste à la limite des possibilités de la machine. Les discussions sur l'opportunité d'arrêter l'accélérateur ou de continuer l'exploitation furent assez vives: « C'était même conflictuel! Les partisans ne voulaient pas lâcher! Le LEP fut quand même arrêté le 2 novembre 2000. Rétrospectivement, ce fut une bonne décision car il s'agissait probablement d'une fluctuation statistique » se souvient Boris Tuchming, physicien du CEA-Irfu qui faisait partie de la collaboration Aleph.

Le Tevatron a repris le flambeau en mars 2001 car sa nouvelle configuration permettait de produire des collisions proches de 2 TeV. « Vers 2008, nous avons accumulé assez de données pour explorer des fenêtres au-delà de 115 GeV, donc au-delà de la précédente zone d'exclusion du LEP » se souvient Frédéric Déliot, physicien au CEA-Irfu et spécialiste

LES EMPREINTES DU HIGGS !

Le modèle standard prédit tous les modes de désintégration des particules instables et donc ceux du boson de Higgs dont la durée de vie est de 10^{-22} secondes ! Parmi ses huit modes possibles, deux sont à l'origine de sa découverte le 4 juillet 2012 au CERN. Soit il se désintègre en deux photons, selon le mode dit « gamma-gamma » ; soit il émet deux bosons Z qui se désintègrent respectivement en deux électrons ou deux muons ; le « Higgs » se manifeste alors par la présence de quatre leptons.

• **GAMMA** : lettre grecque « attribuée » au photon.

du quark *top* qui participait alors à une des expériences installées au Fermilab.

De premiers signes à 125 GeV...

Finalement, le Tevatron livrait une nouvelle fenêtre d'exclusion : le boson de Higgs ne peut pas se trouver dans la zone allant de 158 à 175 GeV. En septembre 2011, au moment de l'arrêt de l'accélérateur, l'histoire déjà vécue au CERN se répétait. Les expérimentateurs avaient en effet détecté un surnombre d'événements vers 125 GeV (soit la masse à laquelle a été trouvé, au LHC, le fameux boson de Higgs), mais avec un niveau de certitude assez faible. Certitude ou pas, c'était évidemment plus qu'assez pour engendrer des discussions « serrées » au moment de l'arrêt programmé de l'accélérateur... « *De toute façon, le LHC qui avait déjà démarré, aurait accumulé assez de données avant le Tevatron, même si celui-ci avait continué* » conclut Frédéric Déliot. Reste que les Américains revendiquent – rétrospectivement à juste titre – avoir « aperçu » le Higgs les premiers. La découverte au sens propre, c'est-à-dire avec un degré de certitude incontestable, reviendra logiquement au LHC...

Patrick Philipon

Notes :

1. Le domaine d'énergie est à corréler avec la gamme de masse où est cherchée une nouvelle particule.
2. Aleph, Delphi, L3 et Opal.

LES MARGES D'ERREUR

« *Je suis là pour me tromper* » s'amuse Laurent Chevalier, physicien au CEA-Irfu. Pour cause, aucun instrument, qui plus est complexe, n'a une précision infinie. Toute mesure est ainsi entachée d'une incertitude que les physiciens prennent systématiquement en compte ; tout comme l'erreur statistique résultant d'un nombre insuffisant de mesure (un sondage étant d'autant plus précis que le nombre d'interrogés est grand).

DES MESURES INDIRECTES

Seule la mesure directe d'une particule créée lors d'une collision permet d'en annoncer la découverte. Les physiciens peuvent également chercher la trace de son influence sur les autres particules. Cela nécessite évidemment des mesures extrêmement précises des particules connues mais présente l'avantage de pouvoir accéder virtuellement à des domaines d'énergie inatteignables par les machines mises à disposition des physiciens. En ce qui concerne le boson de Higgs, deux particules sont importantes : le boson W et le quark *top*. Le premier a été découvert et mesuré dans les années 1980 au LEP ; le second a été observé en 1995 au Tevatron qui en a déterminé la masse. Ces mesures ont donné une contrainte théorique sur la masse du boson de Higgs qui devrait, de fait, se situer autour de $94 \text{ GeV} \pm 24 \text{ GeV}$. Les physiciens savent donc depuis les années 1990 qu'ils ont de fortes chances de le trouver dans cette zone d'énergie, si toutefois il existe... Les expériences Atlas et CMS du LHC donneront raison à ces mesures, ce qui n'est pas toujours le cas. « *L'idéal est de toujours faire en même temps des mesures directes et indirectes : si elles ne correspondent pas, c'est le signe qu'il faut revoir la théorie car on a affaire à une nouvelle physique* » conclut Frédéric Déliot.



© Fermilab

◀ Vue de l'accélérateur semi-enterré Tevatron du Fermilab.

EN CE JOUR DU 4 JUILLET 2012...

L'annonce de la découverte du boson de Higgs, quarante-huit années après sa prédiction restera une date importante dans l'histoire de la physique des particules. Depuis ce 4 juillet, les physiciens continuent d'analyser les données pour s'assurer que les propriétés de la particule sont conformes au modèle standard.



▲ Fabiola Gianotti et Joe Incandela, porte-parole d'Atlas et de CMS, entourant Rolf Heuer, directeur général du CERN, lors de la conférence de presse annonçant la découverte du boson de Higgs le 4 juillet 2012.

• **DÉVIATION-STANDARD :** notion statistique, notée σ , caractérisant la dispersion des données autour de leur valeur moyenne.

« *Today is a special day* »¹ lance Rolf Heuer, le directeur général du CERN. Il est 10 heures du matin à Genève, et ce 4 juillet 2012 est bel et bien un jour particulier. Fabiola Gianotti puis Joe Incandela, respectivement porte-parole d'Atlas et de CMS, dévoilent leurs résultats dans l'amphithéâtre bondé du CERN. « *Il était impensable que l'annonce se fasse ailleurs qu'au CERN étant donné l'énorme implication de milliers d'ingénieurs, techniciens et physiciens depuis deux décennies autour de cette organisation* » souligne Michel Spiro,

conseiller scientifique du CEA et Président du Conseil du CERN au moment des faits! L'événement est retransmis en direct à l'*International Conference on High Energy Physics*², qui commence le même jour à Melbourne cette année-là, et sur les ordinateurs de tous les physiciens de la planète *via* le web. Les deux exposés d'une heure s'achèvent chacun par la projection d'un graphique (voir p.36) suivie d'une salve de cris et d'applaudissements. Pour cause, les expériences Atlas et CMS ont découvert, indépendamment, une nouvelle particule d'une masse d'environ 125 GeV: 126 GeV (± 0.4 GeV) pour Atlas³ et 125,3 GeV (± 0.6 GeV) pour CMS⁴.

Des petites bosses imprévues

Mais comment savoir qu'une nouvelle particule est découverte? Pour le dire simplement: de légères bosses apparaissent sur les distributions graphiques de l'ensemble des événements

détectés (voir p. 36). Parfois, ces distributions comportent déjà des bosses correspondant à la désintégration de particules connues. Pour mettre en évidence un excès éventuel d'événements, il faut alors soustraire des distributions tout ce qui est prévisible: c'est le bruit de fond dans le jargon des physiciens. Ce sont donc les petites bosses apparues vers 125 GeV sur les graphiques qui ont enflammé la communauté scientifique ce 4 juillet. Les résultats sont sans appel. Pour Atlas, comme pour CMS, le nombre d'événements constatés à 125 GeV est tellement supérieur à la valeur attendue en l'absence de toute nouvelle particule, qu'il y a moins de trois chances sur dix millions qu'il s'agisse d'une fluctuation aléatoire! En langage de physicien, c'est un « résultat à 5 sigmas »: le nombre d'événements constaté diffère d'au moins cinq **déviations-standard** de celui que l'on attendrait sans le boson. « *Il y a toujours une part d'arbitraire dans*

5 SIGMAS (σ)

En physique des particules, la détection d'événements est quantifiée en nombre de sigmas (σ). Un résultat est considéré comme significatif par l'obtention de 5 sigmas. On parle alors de découverte car il y a 3 chances sur 10 millions qu'il s'agisse d'une fluctuation statistique (0,00003 %) ce qui signifie un niveau de confiance de plus de 99,99997 %.

le choix des niveaux de signification statistique. Le fait qu'il faille 5 sigmas pour parler de « découverte » n'est pas une règle générale. Il y a eu consensus sur ce niveau d'exigence pour le boson de Higgs étant donné l'importance de l'enjeu : il n'était pas question de lancer une fausse alerte » explique Bruno Mansoulié, physicien du CEA-Irfu et membre d'Atlas.

Des résultats qui se sont précisés depuis

C'est pourquoi la traque du boson au LHC a duré si « longtemps » : il fallait atteindre les fameux 5 sigmas... De mars à novembre 2010, la première période de fonctionnement du LHC a surtout servi à comprendre les instruments et à s'occuper de questions de physique autres que celle du boson. La chasse proprement dite a commencé en mars 2011 (voir pp. 34-35) avec le redémarrage⁵ de l'accélérateur. Il a fallu attendre juin 2012 pour que les équipes, indépendamment, entrevoyent un signal évident. Indiscutablement, les physiciens ont découvert une particule nouvelle. Pour Gautier Hamel de Monchenault, physicien du CEA-Irfu et membre de CMS, « il n'y a plus aucun doute là-dessus aujourd'hui : on ne compte même plus les sigmas ! » Avec l'accumulation des données depuis l'annonce, le portrait du petit nouveau se précise. Les masses calculées par CMS et Atlas se rapprochent, atteignant aujourd'hui respectivement 125,7 GeV et 125,5 GeV, et il devient de plus en plus évident qu'il s'agit bien d'un boson de Higgs dont les propriétés sont compatibles avec celles prédites par le modèle standard...

Patrick Philipon et Aude Ganier

Notes :

1. « Aujourd'hui est un jour particulier ».
2. Cycle de conférences bisannuelles (appelées « conférences de Rochester » car la première a eu lieu à cet endroit en 1950). Ce sont les « grand messes » d'été des physiciens. En hiver, ils participent aux « Rencontres de Moriond » (actuellement à La Thuile, en Italie).
3. Résultat tel que publié dans Physics Letters B.
4. Idem.
5. Le LHC observe toujours une trêve hivernale de décembre à mars inclus.

UN MODÈLE DE « COOPÉTITION »

La présidence du conseil du CERN de 2009 à 2012 et la présidence du conseil scientifique du LEP en 2000 figurent parmi les illustres fonctions occupées par Michel Spiro, conseiller scientifique du CEA. Au premier rang de la découverte du boson de Higgs, il partage l'émotion créée par cette aventure qui dépasse le seul cadre scientifique.

« La découverte du boson de Higgs au LHC est une immense satisfaction. Il y a tout d'abord la joie de voir se concrétiser une prédiction énoncée il y a quarante-huit années et d'atteindre un nouveau palier de la connaissance. C'est ensuite un soulagement, à titre personnel : en 2000, je présidais le Conseil scientifique du LEP auquel devait succéder en 2008 le LHC. Or, des physiciens avaient cru observer le "Higgs" et avaient besoin, pour le vérifier, de repousser la fermeture de celui-ci, et, par voie de conséquence, de retarder la mise en service du LHC. J'ai néanmoins recommandé l'arrêt du LEP. C'était un choix difficile, sujet à polémiques et certains m'en veulent toujours. Or, cette découverte du Higgs à environ 125 GeV me conforte dans ma décision car cette masse n'aurait jamais été accessible à l'énergie nominale du LEP (voir p.30). Enfin, il y a la consécration avec le Prix Nobel de Physique 2013. Certes, il est nommé attribué à François Englert et Peter Higgs, mais il récompense également, en filigrane, toute la communauté internationale qui a su concevoir les outils pour aller vérifier la prédiction. C'est quelque part la reconnaissance de l'extraordinaire gouvernance du CERN et j'y vois un message d'espoir.

En effet, au-delà de sa principale mission qui est de faire progresser les connaissances, le CERN est avant tout un vecteur de paix, par la science, entre les nations, tels que l'ont voulu ses créateurs au début des années 1950. Le pari est aujourd'hui tenu quand l'on regarde 10 000 physiciens de 60 pays différents être capables d'autant de synergie et de solidarité pour parvenir à faire fonctionner ces "cathédrales de la science" dans un idéal collaboratif et généreux. Le pari est tenu quand israéliens et palestiniens apprennent ensemble. Ce modèle collaboratif mondialisé, cette "coopétition", est une autre manière de voir la mondialisation. Et c'est précieux, tant pour le monde et l'Europe que pour la science, l'innovation et la paix. »



Michel Spiro dans son bureau du CERN.



INTERVIEW
Gautier HAMEL DE MONCHENAUT,
physicien au CEA-Irfu et responsable des publications scientifiques de la collaboration CMS
et Bruno MANSOULIÉ,
ancien chef de groupe CEA pour la collaboration Atlas, détaché au CERN

DU CÔTÉ D'ATLAS ET DE CMS

Bruno Mansoulié, ancien chef de groupe CEA pour la collaboration Atlas toujours détaché au CERN, et Gautier Hamel de Monchenault, physicien au CEA-Irfu et responsable des publications scientifiques de la collaboration CMS, reviennent sur une aventure commune, vécue indépendamment sur leur expérience respective Atlas et CMS.

Quand avez-vous su que vous aviez découvert le boson de Higgs ?

Gautier Hamel de Monchenault : Au cours de l'année 2011, dans CMS, nous avons sélectionné des événements dans le mode de désintégration du boson de Higgs en 4 leptons. Comme il y en a très peu dans ce mode, nous les avons vus arriver un à un... Avec une certaine excitation, nous commençons même à constater une accumulation d'événements dans une région où le modèle standard n'en prévoyait pas en l'absence de boson de Higgs. Mais, nous ne disposions pas d'assez de données pour conclure à une découverte. En avril 2012, lorsque le LHC a redémarré, la quantité de données a été multipliée en quelques semaines. Début juin, nous levions le voile sur nos analyses et constatons que des événements avaient continué de s'accumuler là où nous n'avions jusqu'alors qu'une indication de signal. Dès lors nous savions ! D'autant que ce que nous observions était conforme aux prédictions du modèle standard pour un boson de Higgs de masse environ 125 GeV.

Bruno Mansoulié : À Atlas, c'est arrivé progressivement : je n'ai pas vu soudainement le signal sur un moniteur, comme je l'ai entendu ailleurs ! En décembre 2011, nous avions un faisceau de signes autour de 125 GeV. Tout comme l'expérience CMS, nous avions exclu de voir apparaître le boson de Higgs jusqu'à 550 GeV, sauf dans la zone 117-128 GeV. Mais, cet excès d'événements alors observé vers 125 GeV pouvait encore provenir d'une simple fluctuation statistique. Personnellement, j'étais convaincu que « c'était lui », mais personne ne pouvait encore l'affirmer. Après la

reprise en avril 2012, un flot de données est arrivé. Le signal a fluctué un moment mais en juin, c'était clair.

Comment évitez-vous les biais lors de l'analyse ?

G.HdM. : Nous menons nos analyses « en aveugle », en nous imposant de ne pas regarder le résultat en cours d'analyse. Nous étudions les bruits de fond en exploitant la simulation et les données, en dehors de la région où le signal recherché pourrait contribuer (région identifiée en 2011 autour d'une masse de 125 GeV). Lorsque, au sein de la collaboration, nous nous mettons d'accord sur le protocole d'analyse et l'estimation des bruits de fond, nous décidons de lever le voile sur la région du signal.

B.M. : Nous avons tous, peu ou prou, les mêmes types de procédures. À Atlas, nous définissons, optimisons et calibrons les analyses sur les données de simulation. Quand elles sont matures, nous les transposons tel quel, sans rien changer, sur les données expérimentales. De plus, une partie des données réelles sert à peaufiner le processus, dans des configurations où l'on n'attend pas l'apparition du boson de Higgs. Cela dit, en 2012, les performances de l'accélérateur ont évolué très vite et nous avons dû adapter les analyses très rapidement.

Avez-vous eu des fausses alertes ?

B.M. : À proprement parler fausse ? Non. Ceci dit, mi-2011, nous avons vu un excès d'événements dans le mode de désintégration du boson de Higgs en deux bosons W. Un tel excès pouvait être dû à l'existence d'un « Higgs », avec une masse comprise entre 120 et 150 GeV, ou à une fluctuation statistique des bruits de fonds. À l'automne 2011, cet excès était atténué par l'acquisition de nouvelles données mais les autres modes de désintégration du Higgs étudiés commençaient à montrer un signal à 125 GeV. Nous ne saurons jamais si le

“ Comme Atlas, CMS a confirmé que les propriétés de ce boson de Higgs sont conformes, dans la limite de la précision actuelle, aux prédictions du modèle standard. ”

tout le premier excès en WW était la signature du vrai Higgs ou bien une coïncidence...

G.HdM. : Il y en a eu mais pas dans le cadre de la recherche du boson de Higgs. Par exemple, en mai 2011, nous avons vu apparaître un signal significatif dans les distributions de masse des paires d'électrons et de muons autour de 1 TeV. Le modèle standard ne prévoyant rien dans cette gamme de masse, nous mettions le doigt sur la nouvelle physique! Tout le monde était sur les dents: certains sont rentrés précipitamment de vacances, d'autres élaboraient déjà de nouvelles théories. Nous avons décidé d'attendre la confirmation du signal avec plus de données... et, bien sûr, le signal a disparu! Il s'agissait d'une grosse fluctuation.

Comment avez-vous accueilli l'attribution du Prix Nobel de Physique à François Englert et Peter Higgs?

B.M. : Ce Prix Nobel est tout à fait opportun. Depuis 1964, un faisceau de preuves indirectes avait étayé cette théorie (voir p.31) et nous nous y sommes en quelque sorte habitués, au point que la découverte expérimentale n'apparaisse pas comme une surprise. La théorie est en quelque sorte victime de son succès. Mais, en prenant du recul, on est émerveillé par son audace et la profondeur de sa vision. Ce n'est pas rien d'affirmer, dès 1964, que les masses de toutes les particules sont dues à leur interaction avec un champ unique! Et rien n'était garanti: il y a quelques années on a vu fleurir des modèles théoriques sans « Higgs ». Pour l'aventure expérimentale, la tradition du Nobel veut que soit récompensé un petit nombre de

UN TRAVAIL DANS LE PLUS GRAND SECRET

Chaque membre des collaborations Atlas et CMS travaille en toute confidentialité pour ne pas influencer ses protocoles d'analyses. « Nous ne devons connaître ni l'état de progression ni les résultats de l'expérience concurrente » indique Bruno Mansoulié. **« Je n'ai pris connaissance des résultats d'Atlas que le 4 juillet. Et pourtant, au CEA-Irfu, je partage mon bureau avec un collègue d'Atlas! »** illustre Gautier Hamel de Monchenault.

personnes et le fait que les expériences aient été réalisées et analysées par de grandes collaborations a empêché de les associer dans le prix lui-même. Toutefois, le commentaire du prix mentionne explicitement le Cern, Atlas et CMS.

G.HdM. : En effet, ce Prix Nobel couronne une extraordinaire aventure théorique et expérimentale qui a conduit sur plusieurs décennies à une découverte majeure dans l'histoire des sciences. Personnellement, c'est la seconde fois qu'un Prix Nobel est attribué à des théoriciens à la suite d'une découverte à laquelle j'ai participé (la première fois, en 2008, le prix avait été attribué à Kobayashi et Maskawa à la suite de l'observation de l'asymétrie matière-antimatière dans l'expérience BABAR!). Même si mes contributions furent modestes, j'en retire une grande fierté.

Propos recueillis par Patrick Philipon

Note:

1. Expérience réalisée au SLAC en Californie.

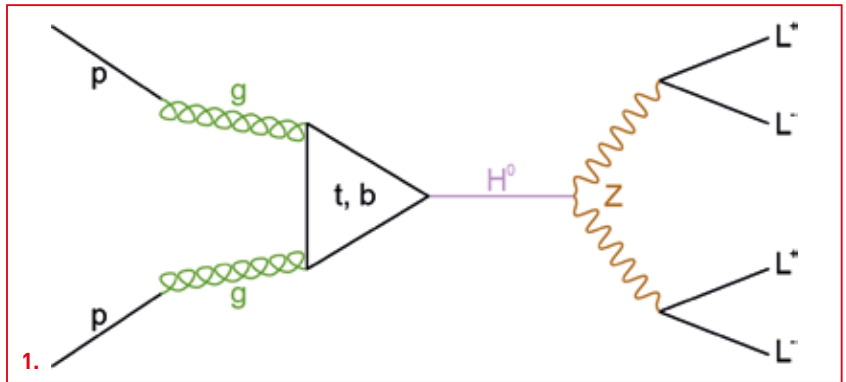


▲
Physiciens de la collaboration CMS posant au CERN devant la photo à échelle réelle de « leur » détecteur.

LES COLLABORATIONS ATLAS ET CMS

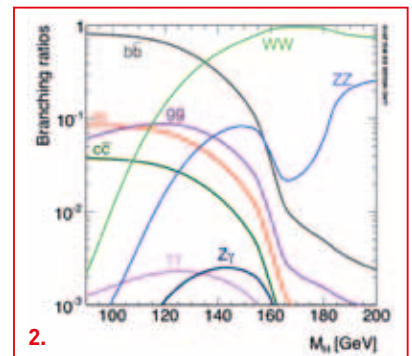
La collaboration Atlas rassemble 3000 physiciens provenant de 177 instituts ou laboratoires de 38 pays. Pour la France, en plus du CEA-Irfu, il y a l'IN2P3: Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique des particules (LAPP), Centre de physique des particules de Marseille (CPPM), Laboratoire de physique nucléaire et de hautes énergies de Paris (LPNHE), Laboratoire de l'accélérateur linéaire d'Orsay (LAL), Laboratoire de physique corpusculaire de Clermont-Ferrand (LPC) et Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie de Grenoble (LPSC).

La collaboration CMS regroupe environ 2700 physiciens de 182 laboratoires situés dans 42 pays. En France, sont impliqués le Laboratoire Louis Leprince-Ringuet (LLR) à l'École Polytechnique, l'Institut de physique nucléaire de Lyon (IPNL) et l'Institut pluridisciplinaire Hubert Curien (IPHC) de Strasbourg, tous trois de l'IN2P3, et bien sûr le CEA-Irfu.



PORTRAITS-ROBOTS DU BOSON DE HIGGS

Comment trouver le boson de Higgs parmi toutes les particules générées par les collisions de protons au LHC ? Première difficulté, le modèle standard ne prédit pas sa masse. Seconde difficulté, sa durée de vie extrêmement brève empêche sa détection directe. Toutefois, la théorie prévoit ses différents modes de désintégration en d'autres particules, que les physiciens vont chercher dans les détecteurs Atlas et CMS...

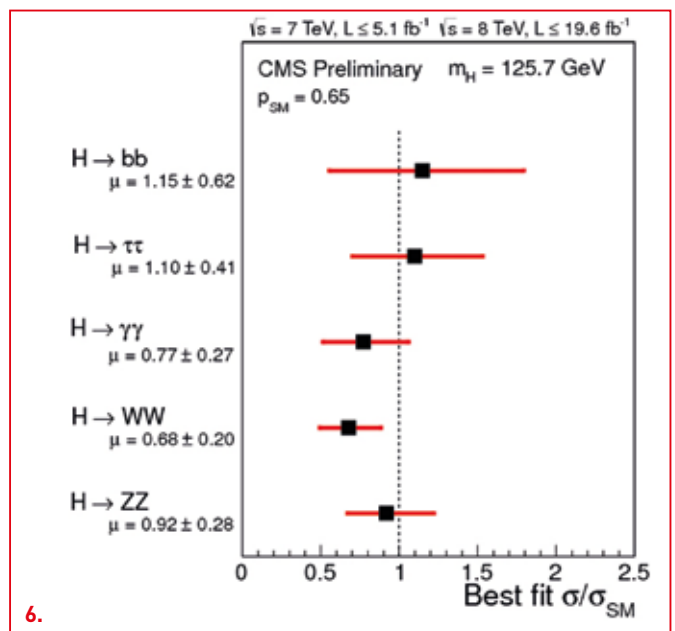
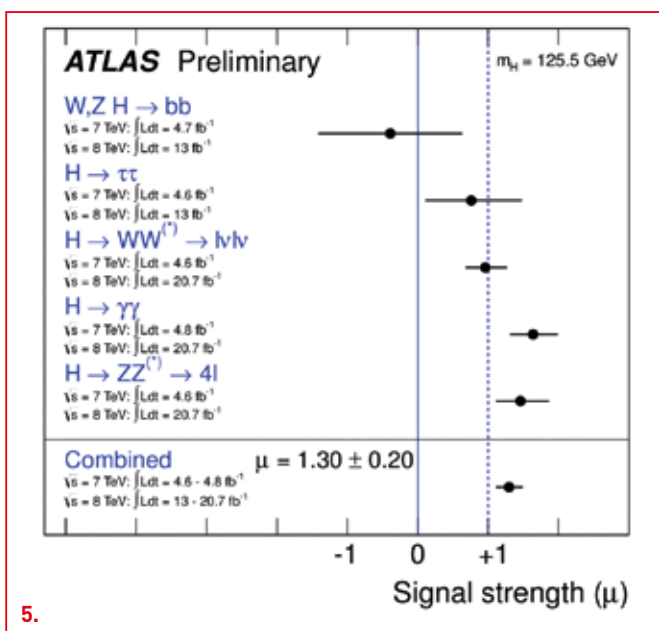


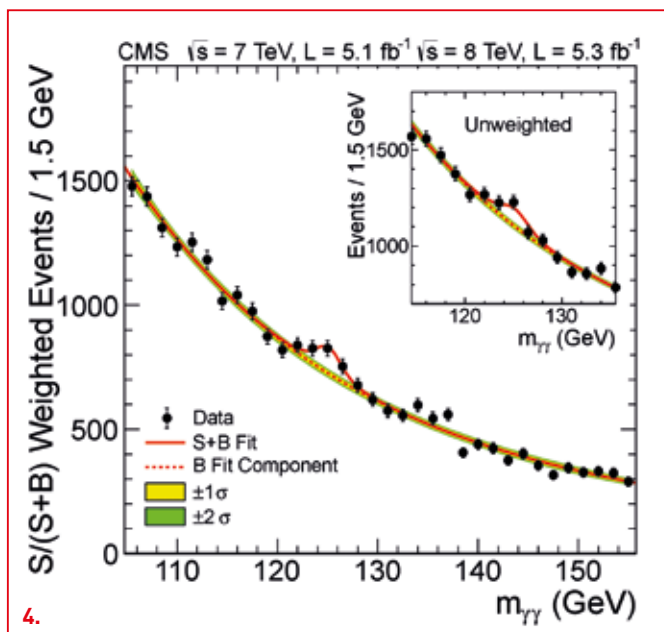
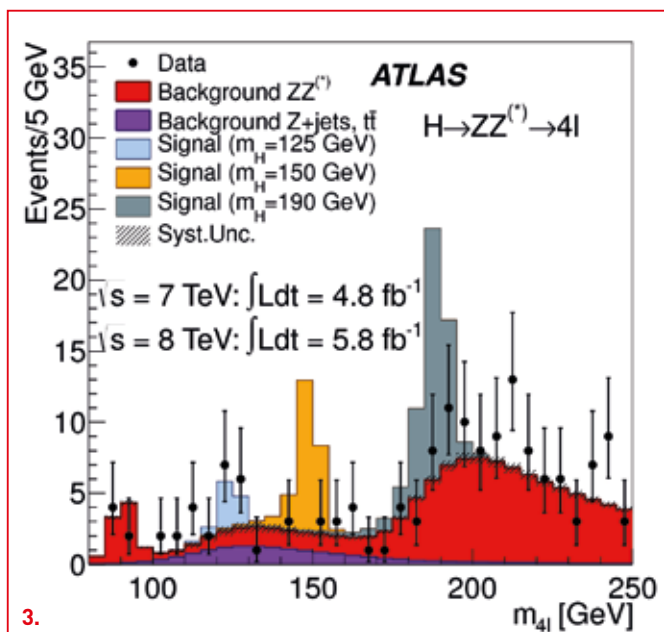
Au LHC, deux modes de désintégration ont été principalement recherchés pour découvrir le boson de Higgs : en deux photons ou en quatre leptons. Or, d'autres particules ont les mêmes modes de désintégration. En effet, si le mode « 2 photons » a une occurrence importante, il est parasité par un bruit de fond élevé (nombre important de paire de photons résultant d'autres processus physiques que la

désintégration d'un boson de Higgs). En revanche, le mode « 4 leptons », bien que plus rare, a un faible bruit de fond. Les chercheurs ont analysé des milliers de données pour identifier photons et leptons, et les recombinaison afin de déduire la masse de la particule dont ils pourraient provenir. Mais comment savoir si cette particule est un boson de Higgs ? Le bruit de fond prédit par le modèle standard a été modélisé pour

que les physiciens le comparent aux millions de données issues de chacune des collisions au LHC. Ainsi, en 2012, Atlas et CMS ont observé qu'un signal se détachait du bruit de fond sous la forme d'une petite bosse sur les graphiques « 2 photons » et « 4 leptons ». Traduisant la présence du boson de Higgs, ces résultats sont confortés par le fait que les deux détecteurs l'ont repéré à la même masse : environ 125 GeV.

Depuis, l'analyse des données d'Atlas et de CMS a montré que le boson de Higgs se manifeste dans d'autres modes de désintégration à des taux de production conformes au modèle standard. Des mesures qu'il convient d'affiner et d'étendre à tous les modes, avec de nouvelles données, pour confirmer qu'il s'agit bien de bosons de Higgs « standards ».





(1) Modélisation, par un diagramme de Feynman, de la production d'un boson de Higgs (H) lors de la collision de protons (P) et de sa désintégration en deux bosons Z (lesquels se désintègrent en deux leptons (L) chacun, soit quatre leptons).

(2) Prédiction par le modèle standard des taux de désintégration (en ordonnée) du boson de Higgs dans ses huit modes, à différentes masses (en abscisse) : celle du boson de Higgs n'est en effet pas calculée par le modèle.

« Photo » du boson de Higgs en « 4 leptons » (3) et « 2 photons » (4), à une masse d'environ 125 GeV (partie bleue/bosse rouge), réalisée en comparant le bruit de fond simulé (fonds rouge et violet/pointillé rouge) et les données réelles des détecteurs (points noirs).

(5) et (6) Données obtenues dans d'autres modes de désintégration, mesures d'autant plus précises que les traits horizontaux (noirs/rouges) sont courts. Le rapport de ces mesures avec les prédictions du modèle standard sont proches de 1, ce qui indique que le boson de Higgs est plutôt « standard ».

6 millions de milliards

Nombre de collisions proton-proton produites par le LHC de 2010 à 2012.

10 milliards

Nombre de collisions enregistrées par les détecteurs Atlas et CMS pendant cette période, car jugées intéressantes.

400

Nombre de collisions qui ont permis de mettre en évidence des événements signalant l'empreinte du boson de Higgs.

VERS LA NOUVELLE PHYSIQUE

Si le modèle standard affiche à présent « complet » avec la découverte du boson de Higgs, ultime pièce manquante à l'édifice, il ne permet toutefois pas de répondre à toutes les questions qui taraudent les physiciens. D'autres théories prennent le relais. Parmi elles, les dimensions supplémentaires et la supersymétrie.

Avec la découverte du boson de Higgs, l'ultime prédiction du modèle standard a été vérifiée. Celui-ci constitue-t-il, pour autant, la théorie ultime de la physique des particules ? La masse du Higgs, mesurée au CERN, comprise entre 125 et 126 GeV, mais qui sera précisée à l'avenir, permet *a priori* de répondre à cette question par l'affirmative. En effet, en couplant cette valeur à celle de la masse du quark *top* (la plus massive des particules élémentaires), les physiciens peuvent, à l'aide de certains outils mathématiques, en déduire le domaine de validité du modèle standard. « *Le calcul, effectué récemment, montre que le modèle standard est à même de décrire correctement les interactions entre les particules élémentaires jusqu'à des énergies phénoménales proches de "l'Énergie de Planck" estimée à 10^{19} GeV, le "mur" au-delà duquel la théorie de la relativité générale d'Einstein*

cesse d'être applicable » indique Gautier Hamel de Monchenault, physicien au CEA-Irfu. Dit autrement, la masse du boson de Higgs laisse peu de place à l'émergence d'une « nouvelle physique », au-delà du modèle standard. Alors, une affaire réglée ? Tant s'en faut ! Toute surpuissante qu'elle soit, la théorie s'avère incapable d'expliquer une série de phénomènes, dont certains n'ont pourtant rien d'anecdotiques. Qu'on en juge plutôt !

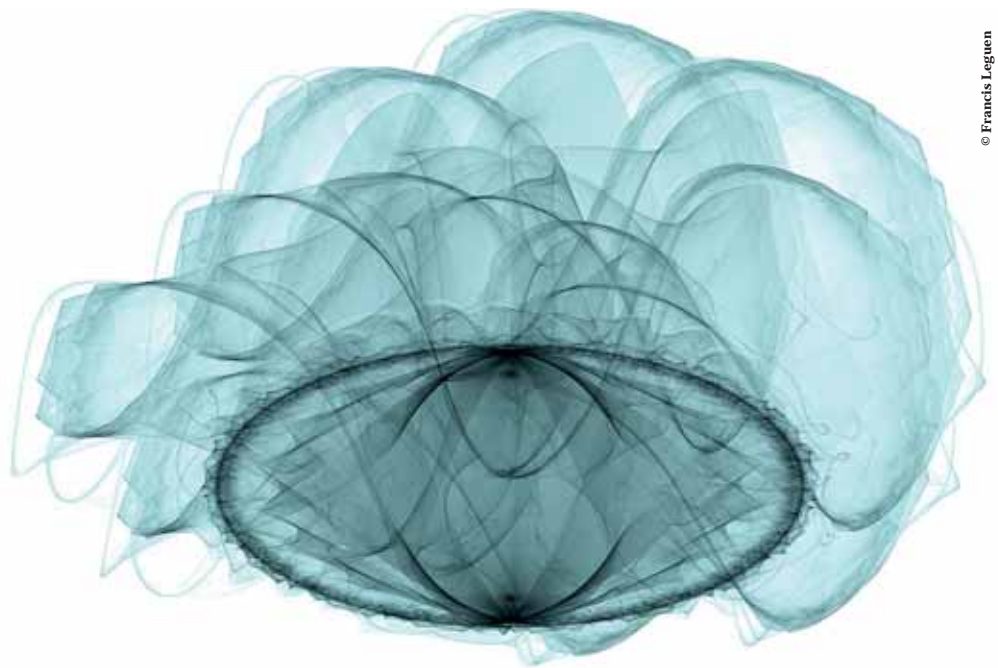
Quid de la matière noire, de l'antimatière, de la gravitation ?

En observant la vitesse de déplacement des étoiles dans les galaxies, les astrophysiciens ont découvert que plus de 80 % de la matière de l'Univers est faite d'une substance de nature inconnue : la « matière noire ». De quoi, est-elle constituée ? Nul ne sait ! Mais, il semble désormais établi

qu'aucune des 12 particules élémentaires du modèle standard ne présente ses caractéristiques. Autre mystère cosmologique : l'antimatière. Celle-ci aurait été créée en même quantité que la matière dans les tout premiers instants après le big bang. Or, on n'en trouve de nos jours que des traces infimes dans le cosmos. Pourquoi ? Des décennies d'expériences de physique des particules n'ont permis d'expliquer que très partiellement ce processus de disparition. Suggérant ainsi que le modèle standard n'est peut-être pas, en définitive, le mieux adapté pour répondre à cette question. *Last but not least*, les équations du modèle standard, elles-mêmes, ne satisfont pas totalement les physiciens. Elles ne décrivent pas la force gravitationnelle. Et n'unifient pas non plus la force électrofaible avec la forte de manière claire : aux hautes énergies, le calcul séparé de chacune des

• **ÉNERGIE DE PLANCK** : énergie extrêmement élevée caractérisant une période de l'Univers (jusqu'à 10^{-43} s après le big bang), au-delà de laquelle la gravité doit être décrite par des lois quantiques comme le reste des interactions faibles, fortes et électromagnétiques.

• **RELATIVITÉ GÉNÉRALE** : théorie qui englobe et supprime la théorie de la gravitation universelle de Newton et qui décrit la gravitation comme une théorie relativiste. C'est le cadre actuel utilisé en astrophysique et en cosmologie pour étudier l'Univers.



© Francis Leguen

Vue d'artiste d'un Univers replié sur ses dimensions supplémentaires. ▶



© CERN

interactions (électromagnétique, nucléaire faible et nucléaire forte), donne des résultats différents ! De plus, tel que l'explique Gautier Hamel de Monchenault : « *La théorie n'explique pas la masse des neutrinos. De nombreuses expériences en cours dans le monde s'accordent à dire que celle-ci est non nulle mais extrêmement faible au regard de celles des autres fermions : quarks, électron, muon, tau... Pourquoi ? Certains scientifiques avancent l'idée que cela pourrait être dû au fait que ces particules élémentaires n'acquiescent pas, comme les autres, leurs masses par des interactions avec le champ de Higgs mais par un mécanisme dit de "balançoire" qui nécessite de la physique au-delà du modèle standard.* »

Enfin, les équations mathématiques de la théorie cacheraient une contradiction entre le principe général d'« unitarité », selon lequel le calcul d'une probabilité ne peut aboutir à un résultat supérieur à 1, et l'effet des « corrections quantiques ». Suivant le premier principe, la masse du boson de Higgs doit être relativement faible (ce qui est le cas à environ 125 GeV). Or, le second effet fait tendre cette masse vers des valeurs très élevées. Ce problème, appelé parfois « problème de la hiérarchie des masses » n'a pas de solution naturelle dans le modèle standard.

Deux familles de théories à la rescousse

Quelle pourrait être l'alternative ? Parmi les grandes familles de théories, deux se présentent aujourd'hui en candidates : celle des « dimensions supplémentaires » et celle de la « supersymétrie ».

Les théories de dimensions supplémentaires, dont la théorie des cordes, ont été initialement proposées pour résoudre le problème de l'extrême faiblesse de la gravité. L'une des réponses serait que seule une petite fraction de la force gravitationnelle n'est perceptible, le reste agissant dans une ou plusieurs autres dimensions. Ces dimensions, imperceptibles, seraient courbées et non plates comme les quatre connues de l'espace et du temps. « *Ces modèles postulent notamment que les particules les plus massives comme le boson de Higgs et le quark top sont en réalité des particules composites, formées par des éléments fondamentaux encore plus petits qui interagissent par une nouvelle force forte. Les calculs mathématiques de ces modèles extra-dimensionnels prédisent alors de nouvelles particules dans des gammes de masse de l'ordre du TeV* » ajoute Brando Bellazzini, théoricien au CEA-IPhT.

L'autre grande classe de modèles actuellement étudiée est celle de

la supersymétrie. « *Elle peut également être considérée comme une extension des symétries d'espace-temps car elle ajoute une dimension supplémentaire "quantique" où chaque fermion du modèle standard a un partenaire "supersymétrique" »* poursuit Philippe Brax, théoricien au CEA-IPhT. Conçue au départ pour résoudre le problème de la hiérarchie des masses, cette théorie apporte également des réponses au niveau de l'unification des trois interactions : si les particules supersymétriques étaient incluses dans le modèle standard les trois forces auraient la même intensité à une énergie très élevée appelée « énergie de grande unification »... Philippe Brax conclut « *La supersymétrie prédit également une particule neutre très massive, qui interagit très peu avec celles du modèle standard et qui pourrait être un parfait candidat pour la matière noire...* » Reste à présent aux physiciens de détecter ces « nouvelles » particules de la « nouvelle » physique. Ce qu'aucune expérience n'a pour l'instant réussi à faire. Mais, à l'avenir, qui sait ? N'a-t-il pas fallu aux physiciens quarante-huit années pour débusquer le boson de Higgs ?

Vahé Ter Minassian

▲
Bureau d'un théoricien au CERN. Sur le squelette, le nom Susy est celui que les physiciens donnent à la théorie de la « SuperSYmétrie »...

L'AVENTURE TECHNOLOGIQUE CONTINUE POUR LE CEA

Pour étudier précisément le boson de Higgs, le LHC fait peau neuve, en mues successives. Alors qu'il redémarrera en 2015, les physiciens envisagent déjà les machines du futur, dont différents projets sont à l'étude. Là encore, les ingénieurs et physiciens du CEA-Irfu et de l'IN2P3 sont à l'avant-garde...



© CERN 2013

▲ Remplacement d'un aimant au LHC durant le LS1.

• **LUMINOSITÉ**: taux de collisions relatif à l'intensité du croisement des faisceaux de protons : en 2012, ils se croisaient toutes les 50 nanosecondes, en 2015 cela sera toutes les 25 nanosecondes.

• **UPGRADE**: terme anglais désignant l'actualisation ou la montée en gamme d'une nouvelle version d'un logiciel ou d'un matériel.

Aujourd'hui, la pièce maîtresse du programme de physique des particules est, sans surprise, le boson de Higgs. « *Il est la seule particule qui nous relie aux propriétés fondamentales du vide, en particulier par la façon dont le vide donne de la masse aux particules élémentaires grâce à la présence du champ de Higgs* » résume Philippe Chomaz, directeur du CEA-Irfu. Sa découverte nécessite à présent d'être précisée, d'autant qu'il a été pour l'instant « produit » en quantité limitée au LHC.

Le LHC fait peau neuve

Pour en détecter davantage, le LHC doit au moins fonctionner à son énergie nominale de 14 TeV, contre les 8 TeV atteint en 2012. Il doit, de plus gagner en

luminosité*. Les travaux de maintenance pendant l'arrêt du LHC appelé LS1 pour *long shutdown*¹, décidés avant la découverte du boson de Higgs, ont ainsi commencé le 13 février 2013 pour une durée de deux ans, tel que l'explique Simon Baird, adjoint au chef du Département d'ingénierie (EN) du CERN : « *Le travail principal concerne la consolidation des 10 170 jonctions électriques entre les aimants supraconducteurs. Les équipes vont commencer par ouvrir les 1 695 interconnexions situées entre chacun des cryostats des aimants principaux. Elles répareront et consolideront simultanément environ 500 interconnexions. Peu à peu, les activités de maintenance s'étendront sur les 27 km du LHC* ». Le LS1 permettra aussi

d'améliorer le LHC en optimisant la protection des équipements électroniques des détecteurs, sensibles aux radiations des particules.

Montée en lumière...

Les physiciens le savent, le LHC sera le seul accélérateur à pouvoir étudier le boson de Higgs dans les 10 prochaines années. Des **upgrades**• sont ainsi prévus pour augmenter à nouveau sa luminosité, d'un facteur 10 (2018-2019) puis d'un facteur 100 (vers 2023). Ces projets mobilisent de nombreux ingénieurs, techniciens et chercheurs dont ceux du CEA-Irfu, tel que l'explique le physicien Philippe Schune : « *Nous travaillons sur les petites roues d'Atlas, de 10 m de diamètre ! Ce*

sont les parties du spectromètre à muons qui "bouchent" le détecteur de chaque côté de la partie centrale. Ces nouvelles roues résisteront au flux intense de particules prévues à haute luminosité, en 2018, et auront l'avantage de participer à la sélection en ligne des événements grâce à leur réponse rapide. Elles sont en partie basées sur la technologie Micromégas (voir encadré) que nous maîtrisons déjà». Le CEA-Irfu est également à la manœuvre sur l'upgrade de la partie électronique du calorimètre d'Atlas. Avec l'IN2P3, il développe actuellement de nouvelles puces qui assureront plus de sélectivité aux systèmes d'acquisition des signaux.

Le second upgrade correspondra à la phase de haute luminosité du LHC (HL LHC).

Les machines du futur

Les découvertes à venir influenceront le cahier des charges du successeur du LHC qui ne sera alors plus assez puissant. « Il faut cependant se mettre en ordre de marche dès maintenant pour être prêt le moment venu : le LHC était déjà en discussion dans les années 1980, alors que son prédécesseur, le LEP n'était pas encore construit ! » indique Philippe Chomaz qui participe à l'élaboration de la feuille de route de la physique des particules à l'échelle européenne. Objectif : prévoir des scénarios permettant de décider dans 5 à 6 ans des grandes orientations. Ces options dépendront des gammes d'énergie où se situent la nouvelle physique et les questions auxquelles le modèle standard n'apporte aucune réponse (voir pp. 38-39).

Alors que la gouvernance européenne réaffirme lors d'un débat le 29 mai 2013, « la nécessité d'une recherche fondamentale ayant pour but la connaissance, sans qu'une finalité ne soit obligatoirement identifiée »², les physiciens et ingénieurs de la communauté internationale planchent sur les machines du futur. Certains évoquent un collisionneur d'électrons (Clic) ; d'autres, un collisionneur circulaire d'électrons

(TLEP) puis de protons (VHE-LHC) de 100 km, qui permettrait d'atteindre une énergie de l'ordre de la centaine de TeV grâce à de nouveaux aimants haut champ. « Nous travaillons avec le CERN sur ces nouveaux supraconducteurs et nos activités de R&D en la matière, avec des partenaires industriels, permettront de livrer un premier prototype dans les cinq ans » indique Antoine Dael, chef de service au CEA-Irfu. Les équipes du CEA suivent également le projet japonais ILC (*International Linear Collider*) de collisionneur linéaire d'électrons, de 100 km, dont la conception est déjà achevée. Ce type de machine, pourrait bénéficier du retour d'expérience du CEA sur les 103 cryomodules accélérateurs qu'il doit intégrer pour le projet européen d'accélérateur linéaire E-XFEL³. Si l'ILC est décidé, une chose est sûre : le CEA sera de la partie !

Aude Ganier

Notes :

1. Le LS1 concerne également les autres accélérateurs du CERN.
2. Débat réunissant des chercheurs, des industriels et des responsables politiques du Parlement Européen, de la Commission européenne et du ministre de la Recherche de l'Irlande (président actuellement l'Union Européenne).
3. European X-Ray free electron laser, source de rayons X de 4^e génération, un million de fois plus intense que les sources d'un synchrotron.

MICROMÉGAS, UNE TECHNOLOGIE DE DÉTECTEURS... VENUE D'AILLEURS

Micromégas est une technologie de détecteurs de particules gazeux issue du développement des chambres à fils (technologie du spectromètre à muons d'Atlas). Inventée en 1992 par Georges Charpak et Ioannis Giomataris, elle a bénéficié, dès 1995, des développements du CEA qui a déposé un brevet avec le CERN. Les détecteurs Micromégas sont légers, ce qui minimise la perturbation des particules à détecter, rapides et précis avec une résolution spatiale inférieure à 50 µm. En 2001, ils ont été utilisés à grande échelle dans l'expérience COMPASS du CERN puis en 2009 dans l'expérience T2K au Japon. « Le challenge est aujourd'hui de monter en gamme pour être capable de les produire en masse et surtout à bas coût. Il y a une vingtaine d'années, nous les avons mis au point avec le CERN sur des systèmes de quelques cm². Pour Atlas, il nous faudra livrer 1200 m² de détecteurs ! » indique Ester Ferrer-Ribas, chercheuse du CEA-Irfu. Une prouesse technologique qui permet d'envisager leur utilisation, moyennant de légères adaptations, pour les portiques de détection des aéroports, pour l'archéologie, pour le sondage du pétrole et de l'uranium en couches profondes...



© CERN 2013

▲ Travail sur les aimants durant l'arrêt du LHC.



INTERVIEW
Philippe CHOMAZ,
 chef du CEA-Irfu

UNE QUÊTE POUR LA CONNAISSANCE, AU SERVICE DE L'HUMANITÉ

Des idées, des technologies, des hommes et une organisation rompue aux défis les plus fous : voici le secret de la réussite du LHC dans sa quête du boson de Higgs. Philippe Chomaz, chef du CEA-Irfu, président des neuf grands laboratoires européens travaillant avec le CERN, et membre du secrétariat à la stratégie européenne du Conseil du CERN, revient sur cette aventure...

Que représente pour vous l'aventure du LHC ?

En physique des particules, nous progressons dans l'inconnu, dans une quête similaire à celle de la conquête de l'Ouest américain. On aperçoit au loin une montagne et on fait tout pour l'atteindre afin de savoir si elle est bien réelle. Une fois sur place, et le voyage est long (par exemple 48 ans entre la prédiction du boson et sa découverte au LHC), il faut prendre le temps de comprendre où l'on est, avant d'apercevoir une nouvelle montagne, et ainsi de suite... Cette aventure, nous ne pourrions la vivre sans l'incroyable organisation qu'est le CERN, structure imaginée comme un vecteur de paix entre les nations à la sortie de la guerre. Il y a tout juste soixante ans, en 1953, les états européens décidaient en effet d'unir leurs forces dans la physique des particules en déléguant leur souveraineté en la matière. En 1954, le CERN était créé, fédérant des milliers d'ingénieurs, techniciens, physiciens et théoriciens, d'abord de l'Europe puis du monde entier.

Le CERN apparaît comme un territoire à part...

En effet, le CERN compte 20 États membres européens¹ et des États au statut d'observateur (États-Unis, Inde, Israël, Japon, Russie et Turquie). Une trentaine de pays (Algérie, Iran, Mexique, Corée du Sud, etc.) participent à des programmes du CERN qui a également des contacts scientifiques avec une vingtaine d'autres (Autorité Palestinienne, Philippines, Rwanda, Thaïlande, Venezuela...). Ce qui est magique au CERN c'est que des milliers de physiciens de langue et culture différentes savent faire

fonctionner avec succès un système d'une extrême complexité. Les expériences se déroulent dans un cadre réellement démocratique, avec une constitution (un *memorandum of understanding*), des élections, des porte-parole et une solide culture de management du risque, indispensable pour mener à bien de telles opérations. De plus, le CERN est un lieu qui mobilise des personnes autour d'un bien qui se partage sans se diviser : la connaissance. En effet, quand on donne quelque chose, on sait ce que l'on perd mais quand on donne de la connaissance, on ne cesse de s'enrichir.

Quel est et quel a été le rôle du CEA ?

Un article² raconte la création du CERN et relate plusieurs initiatives parmi lesquelles celle de Raoul Dautrey, ancien ministre et alors administrateur général du CEA. En décembre 1949, il fit voter une résolution lors de la Conférence européenne de la culture de Lausanne qui recommandait de « mettre à l'étude la création d'un Institut de science nucléaire, orienté vers les applications à la vie courante » !

Le CEA est nécessairement concerné par l'aventure du CERN, fort de ses travaux sur l'atome, des radiations qu'il sait détecter et de toute l'expérience cumulée depuis 1945. Déjà présents sur le LEP et même avant, nous avons été choisis pour concevoir les deux plus gros aimants du CERN, le solénoïde de CMS (le plus puissant au monde) et le toroïde d'Atlas (le plus grand). Et il n'y a qu'une poignée de laboratoires dans le monde à pouvoir faire cela ! Bien entendu, nous avons pu compter sur de précieux alliés comme le CERN, l'IN2P3 et les partenaires industriels. Nous avons également beaucoup contribué

Notes :

1. Allemagne, Autriche, Belgique, Bulgarie, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Italie, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République slovaque, République tchèque, Royaume-Uni, Suède et Suisse.
2. L'organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), un succès politique et scientifique. *Vingtième siècle. Revue d'histoire* n°4. Octobre 1984.
3. L'équivalent de 14 hommes à plein temps pendant 100 ans.
4. Centre de recherche d'imagerie médicale en champ intensif du CEA.

aux aimants de l'accélérateur, à sa cryogénie, aux détecteurs et à toute l'électronique associée, sans compter l'investissement des physiciens et théoriciens.

Au LHC, le CEA a investi l'équivalent de 14 hommes-siècle³, tels des compagnons au temps des cathédrales. Au plus fort de l'activité, il y avait jusqu'à 200 personnes impliquées sur les 600 permanents de l'Irfu. Aujourd'hui, il demeure en physique des particules, deux groupes (pour Atlas et pour CMS) d'une soixantaine de personnes dont une dizaine est détachée au CERN pour des missions longues.

“
Pour concevoir et exploiter le LHC, le CEA a investi l'équivalent de 14 hommes-siècle, tels des compagnons au temps des cathédrales...”

Le LHC est-il un vecteur d'innovations ?

Sa mission première est bien sûr la progression dans la connaissance, ce qui n'est pas une mince affaire. Mais comme n'importe quelle aventure scientifique, telles les conquêtes spatiales, elle repose sur la mise au point d'instruments extraordinaires. Cette innovation par le besoin produit des ruptures technologiques et génère des applications qui dépassent leur cadre initial. L'exemple le plus flagrant, tant il concerne le quotidien de milliards de personnes, est bien sûr l'invention d'internet au CERN. De même, les accélérateurs de particules ont permis de développer une nouvelle méthode de radiothérapie pour traiter les cancers : la proton et hadronthérapie.

Au niveau des retombées industrielles générées par le CEA, on peut citer la conception et la réalisation d'Iseult, aimant le plus puissant au monde pour un IRM corps entier avec un champ de 11,7 teslas pour NeuroSpin⁴ à Saclay. Iseult n'aurait jamais vu le jour sans l'expérience acquise sur la conception des aimants du LHC. Les travaux sur la technologie Micromégas de détecteurs révèlent aussi un fort potentiel dans différents secteurs (voir p. 41)...

Quelles sont les retombées économiques pour la France ?

En tant que pays hôte, la France bénéficie naturellement de retombées conséquentes. Une partie importante des contrats (électricité, services) sont passés à des entreprises françaises. De plus, une partie de l'accélérateur étant sous les terres du pays de Gex, beaucoup de physiciens actifs ou retraités résident en France. S'en suivent de nombreuses dépenses par ces « foyers ». Il a été calculé que pour un euro versé au CERN, la France en reçoit 4 dont 1 euro directement au gouvernement à travers les taxes qu'il perçoit. Le budget annuel du CERN étant de 1 milliard d'euros, la France y contribue chaque année à hauteur de 120 millions et reçoit en retour environ 500 millions d'euros !

Que vous inspire l'attribution du Nobel de Physique 2013 ?

La portée de la découverte du boson de Higgs est immense et le comité des Nobel l'a bien compris en récompensant ses théoriciens. Toutefois, cette découverte ne saurait appartenir aux seuls physiciens. Désormais, elle est un bien de l'humanité dans son ensemble, comme toute connaissance à l'exemple de celle du big bang. Philosophiquement parlant, la connaissance de la physique a une valeur métaphysique en ce sens qu'elle change notre rapport au monde, notre rapport collectif.

Propos recueillis par Aude Ganier



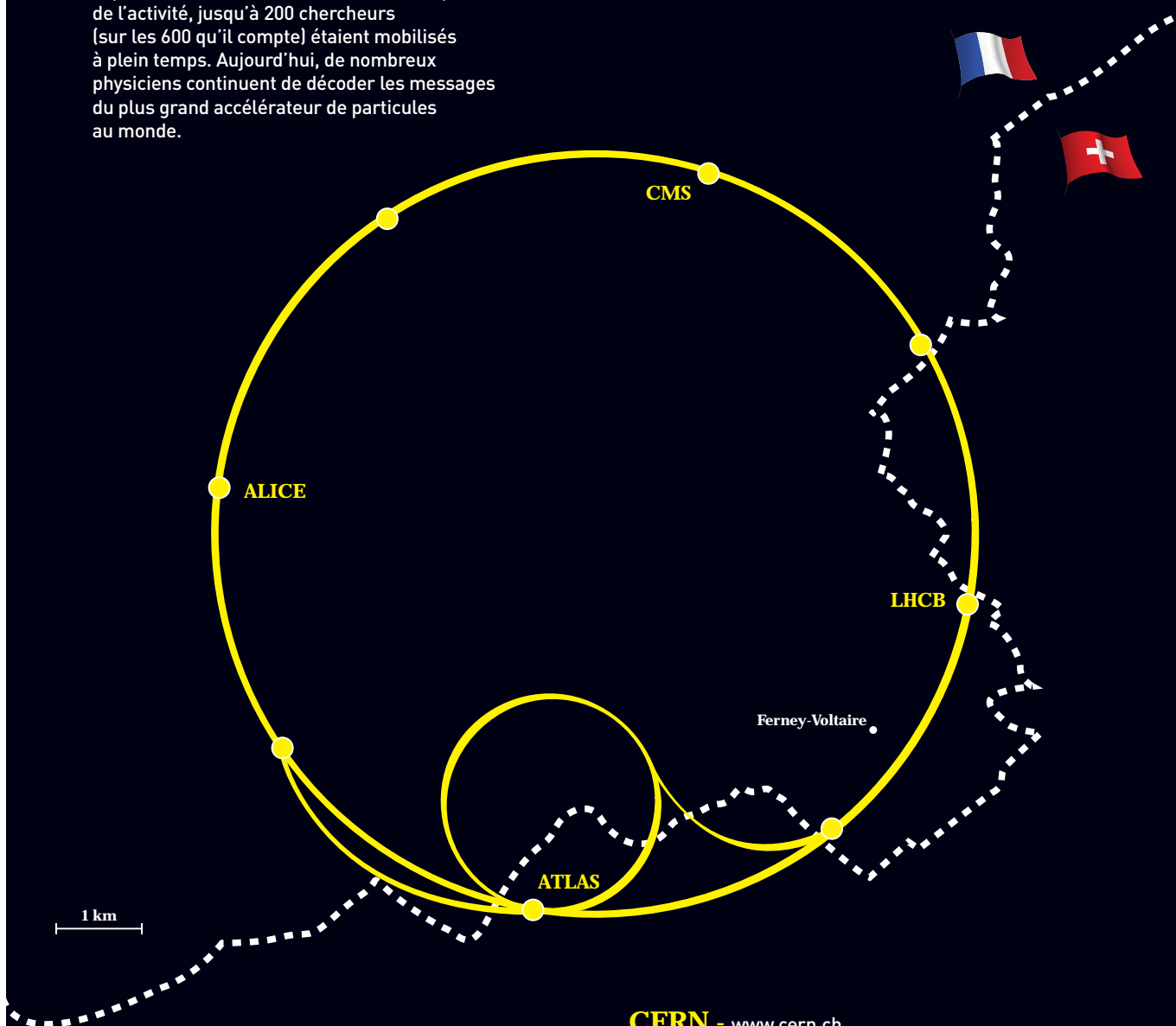
Les physiciens de CMS (en haut) et d'Atlas (en bas) se réjouissent des premières collisions du LHC. Ces scènes se répèteront lors de la découverte du boson de Higgs.



L'ÉLÉGANTE TRAQUE DU **BOSON DE HIGGS**

CEA-Irfu - <http://irfu.cea.fr>

L'institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers du CEA contribue fortement à la conception et à l'exploitation du LHC. Il est l'un des rares, au CERN, à être impliqué simultanément dans trois des quatre expériences (Atlas, CMS et Alice). Au temps fort de l'activité, jusqu'à 200 chercheurs (sur les 600 qu'il compte) étaient mobilisés à plein temps. Aujourd'hui, de nombreux physiciens continuent de décoder les messages du plus grand accélérateur de particules au monde.



CERN - www.cern.ch

Le Conseil européen pour la recherche nucléaire, temple mondial de la physique des particules, accueille environ 10 000 scientifiques visiteurs (soit la moitié des physiciens des particules dans le monde), issus de 608 instituts représentant 113 nationalités. Pour débusquer le boson de Higgs, Atlas réunit 3000 physiciens de 177 instituts de 38 pays et CMS fédère 2700 chercheurs de 182 laboratoires de 42 États. Jamais de telles collaborations n'avaient été menées auparavant...

• Genève