

« Quelle découverte a valu le Prix Nobel à François Englert ? »

Conférence à l'Assemblée facultaire annuelle,
Faculté des Sciences, Université de Namur
Jean Pestieau, CP3 – UCL et INEM
vendredi 25 avril 2014

La réponse

a été donnée le 8 octobre 2013 par le professeur Staffan Normark, secrétaire permanent de l'Académie royale suédoise des sciences :

Le prix Nobel de physique 2013 a été attribué conjointement à François Englert et à Peter W. Higgs « pour la découverte théorique d'un mécanisme qui contribue à notre compréhension de l'origine de la **masse des particules subatomiques**, et qui a récemment été confirmée par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS au Grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN ».

Mon objectif :
éclairer cette phrase au mieux

La masse :
le problème n° 1 de la physique

Avant de commencer :

mon approche de la nature

(ou mes préjugés sur l'approche de la nature)

*« S'il vous plaît
Regardez-moi je suis vraie
Je vous prie
Ne m'inventez pas
Vous l'avez tant fait déjà »*

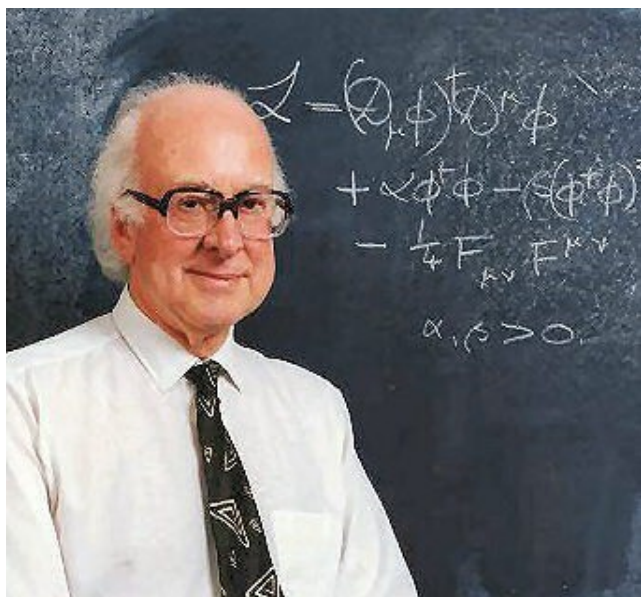
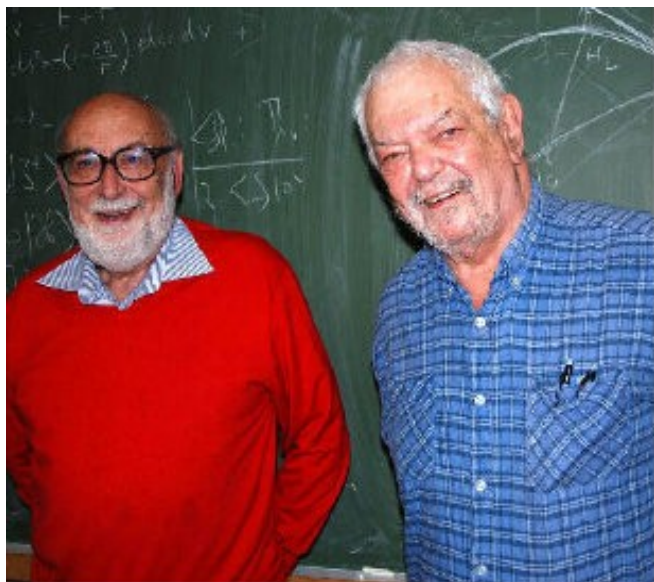
*Anne Sylvestre,
Une sorcière pas comme les autres*

*Pourquoi faire compliqué quand on peut faire simple.
KISS (keep it simple, stupid)*

*« Les concepts sont simplement vides quand ils arrêtent
d'être fermement liés aux expériences. Ils ressemblent
à un arriviste honteux de ses origines. »*

Albert Einstein

**La découverte a été faite par
les Belges Robert Brout et François Englert,
et par le Britannique Peter Higgs
durant l'année 1964, voici 50 ans.**



L'annonce du CERN du 4 juillet 2012 :

« Les expériences du CERN observent une particule dont les caractéristiques sont compatibles avec celles du boson de Higgs tant attendu. »

Ce boson scalaire est intimement lié au mécanisme Brout-Englert-Higgs qui explique la masse des particules élémentaires massives.

Avant le 4 juillet 2012,

quatre sortes d'**interactions fondamentales** (forces) avaient été mises en évidence dans la nature :

l'interaction **gravitationnelle** (de longue portée),
l'interaction **électromagnétique** (de longue portée),
l'interaction **nucléaire faible** (de très courte portée)
et l'interaction **nucléaire forte** (de courte portée).

Le 4 juillet 2012,

une nouvelle interaction s'est manifestée
explicitement :

l'interaction de masse
au travers du mécanisme BEH.

Le « modèle standard »

- constitue la théorie la plus précise et la plus complète jamais construite pour comprendre les interactions fondamentales de la nature ;
- concerne toutes ces forces d'interaction à l'exception de la gravitation ;
- montre comment des interactions à très courte distance entre particules élémentaires, comme la force nucléaire faible d'interaction, responsable de plusieurs désintégrations radioactives, et des interactions à longue distance, comme l'interaction électromagnétique, de portée infinie, peuvent avoir une origine commune ;
- a le mécanisme BEH pour constituant essentiel.

Courte revue des découvertes à la base du modèle standard des interactions électrofaibles

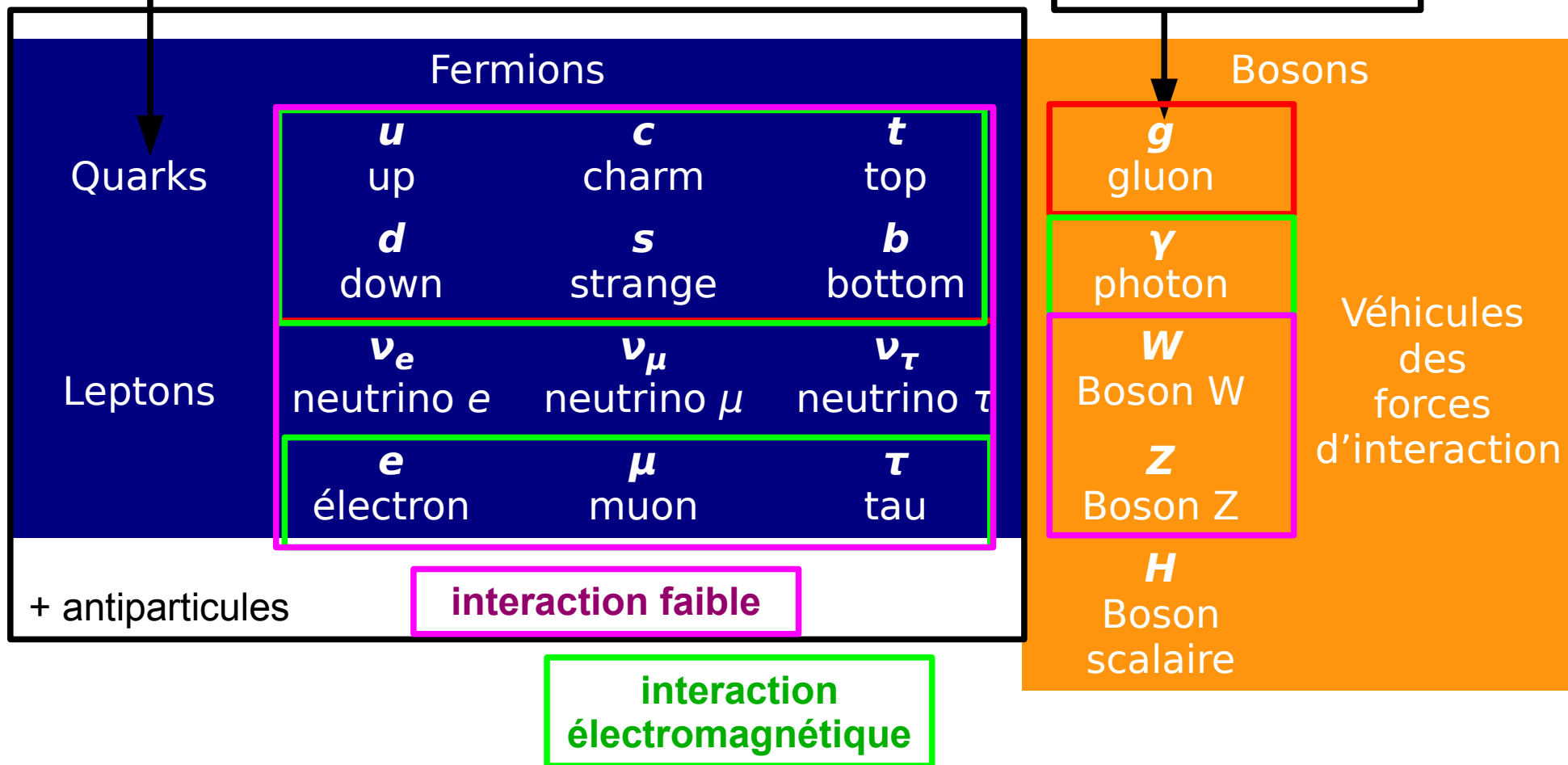
- 1961 unification des interactions électromagnétique et faible par Sheldon Glashow, mais problème de la masse
- 1964 **résolution du problème de la masse par Robert Brout, François Englert et Peter Higgs**
- 1967 jonction des travaux de 1961 et de 1964 dans la proposition du modèle standard électrofaible de Steven Weinberg, suivi par Abdus Salam en 1968
- 1971 consistance de la théorie de 1967 (pas de probabilités infinies !) par Gerard 't Hooft et Martinus Veltman
- 1973 **découverte des courants neutres au CERN**
- 1974 découvertes du « charm quark » (SLAC & BNL - USA)
- 1975 découverte du lepton tau (SLAC - USA)
- 1977 découverte du « bottom quark » (Fermilab - USA))
- 1983 découverte des W et Z au CERN
- 1995 découverte du « top quark » (Fermilab - USA))
- 2012 **découverte du boson scalaire H au CERN**

Tableau des particules élémentaires ou subatomiques

de 3 « couleurs »

interaction forte

de 8 « espèces »



De la mécanique de Newton à la théorie quantique des champs

La masse

L'**inertie** d'un corps est sa résistance à une variation de vitesse (accélération). L'inertie est fonction de la masse du corps : plus celle-ci est grande, plus la force requise pour modifier son mouvement sera importante.

En fait, le terme **masse** désigne deux grandeurs attachées à un corps : l'une mesure l'inertie du corps (la *masse inerte*) et l'autre la contribution du corps à la force de la gravitation (la *masse pesante*), par exemple celle de la Terre. L'égalité de ces deux grandeurs est expérimentalement vérifiée. On les identifie alors.

La masse intervient dans l'équation la plus célèbre de la physique classique (Newton) : $\text{force} = \text{masse} \times \text{accélération}$. Dans ce cadre, **la masse est une propriété intrinsèque d'un corps, indépendante de l'environnement extérieur.**

Le champ

Un **champ** est une réalité physique qui occupe tout l'espace et qui a une valeur à chaque instant et en chaque point.

Voici quelques exemples : la température, la pression, la densité qui sont définies en chaque point de l'espace et du temps.

La masse et le champ

La découverte du 4 juillet indique que

la masse d'une particule élémentaire est le fruit de l'interaction de ce corps avec le champ de l'interaction de masse, le champ de Brout-Englert-Higgs.

De la mécanique de Newton à la théorie quantique des champs

« *La Mécanique newtonienne pose la masse comme une caractéristique première de la matière, incapable de plus amples éclaircissements. Maintenant, nous considérons la masse newtonienne comme une propriété émergente. [...] Newton comme Maxwell, au contraire, considéraient que les éléments de base de la matière ont été fabriqués par Dieu au moment de la création. La théorie quantique des champs contemporaine ouvre la possibilité d'une autre explication. [...] Plutôt que d'avoir à traiter à part la masse de chaque objet dans l'univers, nous pouvons nous concentrer sur les propriétés de quelques champs quantiques, dont les excitations (quanta) sont les éléments constitutifs de la matière. Ainsi par exemple, si nous comprenions les propriétés (y compris la masse) d'un électron, nous pourrions comprendre les propriétés de tous les électrons. Plus généralement : Si nous comprenions les propriétés des champs associés aux éléments constitutifs de la matière, nous devrions être en mesure de déduire les propriétés — y compris de masse ! — de la matière même, et ces déductions seront valables universellement. »*

« Qu'est-ce que la matière? Ce n'est pas ce qu'elle semble être. Sa propriété la plus évidente - diversement appelée: résistance au mouvement, inertie ou masse - peut être comprise plus profondément dans des termes très différents. La masse de la matière ordinaire est l'énergie cristallisée de blocs fondamentaux de construction, des blocs de construction [leptons, quarks, gluons, photons] qui sont eux-mêmes (presque) sans masse »

Frank Wilczek, 2008

Le mécanisme BEH et le boson scalaire H

(d'après Matt Strassler, 4 juillet 2012)

- toute la matière qui nous entoure est constituée d'atomes
- la masse de l'atome est fonction, principalement, de son noyau minuscule ; les électrons forment un large nuage autour du noyau et représentent moins d'un millièème de la masse d'un atome.

Mais

- la taille d'un atome — la distance qui le traverse — dépend principalement de la masse de l'électron
- la lumière est, elle aussi, composée de particules élémentaires, les photons, qui n'ont pas de masse
- les noyaux atomiques sont constitués de particules, les quarks, qui ont une masse
- les neutrinos, particules peu détectables qui coulent à flot du soleil, semblent également posséder une masse, même si elle est très petite.

C'est ainsi que la question de l'électron s'intègre dans une question plus large : **pourquoi des particules telles que les électrons, les quarks ou les neutrinos ont-elles une masse, alors que les photons n'en ont pas ?**

Au milieu du siècle passé, les physiciens ont appris à écrire les équations qui prédisaient et décrivaient le comportement des électrons. Même s'ils ne savaient pas d'où venait la masse de l'électron, ils n'ont eu aucune difficulté à introduire à la main la masse dans leurs équations, en se disant qu'une explication complète de son origine serait donnée plus tard.

Mais alors qu'ils commençaient à en apprendre plus sur la force nucléaire faible, une des quatre forces connues de la nature [cinq aujourd'hui !], un problème sérieux fit surface.

Les physiciens savaient déjà que les forces électriques sont liées aux photons, et ils réalisèrent alors que la force nucléaire faible est liée, de la même façon, aux particules dites W et Z . Cependant, les W et Z sont différentes du photon en ce qu'elles possèdent une masse — elles sont aussi massives qu'un atome d'étain, plus de cent mille fois plus lourdes que les électrons. Malheureusement, les physiciens s'aperçurent qu'ils ne pouvaient pas introduire à la main les masses des W et Z dans leurs équations, car celles-ci donnaient alors des prédictions insensées. Et lorsqu'ils examinèrent la manière dont la force nucléaire faible affectait les électrons, les quarks et les neutrinos, ils découvrirent que l'ancienne méthode utilisée pour introduire, à la main, la masse de l'électron ne fonctionnait plus ; elle aussi briserait les équations.

Des idées nouvelles allaient être nécessaires si l'on voulait expliquer comment les particules élémentaires connues pouvaient bien avoir une masse.

Une solution possible vit le jour dès le début des années soixante : Robert Brout, François Englert, Peter Higgs et d'autres suggérèrent ce qu'on appelle maintenant le mécanisme BEH.

À supposer, disaient-ils, **qu'il existe un champ de la nature inconnu à ce jour qui ne soit pas zéro, distribué uniformément au travers de tout l'espace et du temps. Si ce champ**, désormais appelé *champ scalaire H*, **était du bon type, sa présence ferait que les particules W et Z acquerraient une masse, et les physiciens pourraient replacer la masse de l'électron dans leurs équations** — renvoyant toujours en cela à plus tard la question de savoir pourquoi la masse de l'électron est ce qu'elle est, mais permettant au moins d'écrire des équations dans lesquelles la masse de l'électron n'est pas zéro !

Au cours des années qui suivirent, l'idée du mécanisme BEH fut testée de différentes manières. **Les études exhaustives des particules W et Z ont permis de savoir, aujourd'hui, que c'est la bonne solution à l'énigme posée par la force nucléaire faible.**

Quant aux détails, nous ne les connaissons pas vraiment.

Qu'est-ce que le champ scalaire H et comment le concevoir ?

Il est analogue à l'air pour l'enfant ou à l'eau pour le poisson

- aussi invisible et imperceptible
- une perturbation le fait vibrer et des ondes s'y forment

Mais

- Plus difficile d'y créer des ondes → LHC
- Plus difficile de les détecter → ATLAS et CMS

La création de « la particule de Dieu » est relativement aisée :

le choc de deux protons très énergétiques

- peut provoquer des ondes de H très douces
- mais de manière très peu certaine.

La vague créée est la vague la plus douce possible du champ de Higgs : un seul quantum. C'est le boson scalaire H .

Sa détection est beaucoup plus difficile :

- la particule H se désintègre très vite
- ALAS et CMS ne peuvent mesurer que les débris de sa désintégration
- ses débris ne sont pas assez caractéristiques

Mais

Si les particules H sont rares, leurs débris ont une apparence relativement régulière alors que les autres processus sont plus communs mais plus aléatoires ; et les chercheurs arrivent à distinguer le son régulier du champ H dans la cacophonie aléatoire créée par les autres processus d'aspect semblable.

Mener à bien cette entreprise est extrêmement complexe et difficile. Et pourtant, **l'ingéniosité humaine collective a triomphé : cela a été fait.**

En fait (j'ai simplifié à outrance), il ne devait pas nécessairement en être ainsi. De nombreuses années auraient encore pu passer avant que le champ H ne révèle ses secrets. Mais nous avons de bonnes raisons (complexes) de nous préparer à nous montrer patients, (même si nous espérons ne pas avoir à les détailler aux médias).

Pourquoi cette tâche herculéenne a-t-elle été entreprise ?

Parce que l'importance profonde du champ H pour notre existence même est à la mesure de notre ignorance profonde de son origine et de ses propriétés.

Nous ne savons même pas s'il n'y a qu'un tel champ ; il pourrait y en avoir plusieurs. Il se peut que le champ H soit une chose compliquée, elle-même issue d'autres champs. Nous ne savons pas pourquoi il n'est pas zéro, et nous ne savons pas pourquoi il se comporte différemment avec des particules différentes, en donnant à l'électron une masse très différente de celle du type de quark que nous appelons le « top quark ».

Étant donné l'importance de la masse, non seulement pour la détermination de la taille des atomes, mais aussi dans nombre d'autres propriétés de la nature, **notre compréhension de l'univers et de nous-mêmes ne pourra être complète et satisfaisante tant que le champ H restera si mystérieux.**

L'étude de la particule H — les ondes dans le champ H — nous donnera nos premiers aperçus profonds de la nature de ce champ, tout comme la connaissance de l'air peut être déduite de ses ondes sonores, la connaissance de la roche des tremblements de terre et la connaissance de la mer de l'observation des vagues sur la plage.

Quel est, d'un point de vue pratique, l'avantage de tout cela pour la société ?

L'histoire montre que les avantages pour la société de la recherche sur des questions fondamentales n'apparaissent souvent qu'après des décennies, voire un siècle.

Nous ne pouvons espérer imaginer la technologie du siècle à venir, ou envisager l'impact sur un avenir lointain de la connaissance apparemment ésotérique acquise aujourd'hui. **Investir dans la recherche fondamentale a toujours quelque chose d'un pari éclairé.**

Mais, au pire, nous apprendrons très probablement sur la nature quelque chose de profond, avec de nombreuses implications imprévisibles. Et si une telle connaissance n'a, bien sûr, aucune valeur monétaire évidente, elle n'a pas de prix (dans les deux sens du terme).

La découverte de la particule H représente un tournant — un triomphe pour ceux qui ont suggéré le mécanisme BEH et pour ceux qui utilisent les détecteurs ATLAS et CMS au LHC. **Si elle ne met pas fin aux énigmes sur la masse des particules connues, elle est toutefois le début d'un espoir de les résoudre.**

Au fur et à mesure de l'augmentation du taux d'énergie et de collisions dans les années à venir au LHC, ATLAS et CMS poursuivront l'étude exhaustive et systématique de la particule H . Ce qu'ils apprendront aidera à comprendre les mystères de l'océan créateur de masse dans lequel nous nageons, et nous fera progresser dans le voyage épique entamé il y a plus d'un siècle, dont l'aboutissement dépassera peut-être notre horizon actuel de décennies, sinon de siècles.

**Le passage de la théorie à
l'expérience (pratique)**

Le CERN

- est une entreprise publique multinationale à base européenne qui se consacre à la recherche fondamentale,
- dont les succès scientifiques empêchent les interventions directes des États et des entreprises privées,
- et qui n'est pas (directement) liée au complexe militaro-industriel, à la politique des secrets et des brevets.

Sa convention constitutive stipule :

« L'Organisation assure la collaboration entre États européens pour les recherches nucléaires de caractère purement scientifique et fondamental, ainsi que pour d'autres recherches en rapport essentiel avec celles-ci. L'Organisation s'abstient de toute activité à fins militaires et les résultats de ses travaux expérimentaux et théoriques sont publiés ou de toute autre façon rendus généralement accessibles. »

Cette entreprise

- investit dans la construction de nouveaux accélérateurs, les physiciens et leurs organismes de financement étant responsables du financement, de la réalisation et de l'exploitation des expériences
- emploie environ 2 400 personnes
- accueille environ 10 000 scientifiques et 608 universités ou instituts de recherche, et 113 nationalités y sont représentées
- planifie ses travaux sur des périodes couvrant plusieurs générations (LHC : conception ~ 1985, construction de 1998 à 2008, parallèlement à celle de 4 grands détecteurs. LEP : mise service en 1989, fermeture en 2000)

Procédure (exemple du LHC) :

1. Réunions élargies composées de spécialistes de collisionneurs du monde entier qui évaluent les différents projets
2. Décision collective de l'adoption d'un projet par la direction scientifique
3. Constitution de groupes de travail qui étudient la répartition de la construction des différentes parties du collisionneur et des quatre détecteurs
4. Décision par la direction collégiale après discussions démocratiques sur base des rapports scientifiques
5. Répartition du travail entre des centaines d'instituts et d'universités du monde entier

Procédé similaire pour choisir les expériences à faire et les mener à bien collectivement.

Le LHC ne sert pas seulement à étudier les propriétés du boson de Higgs mais aussi

- à découvrir de nouvelles particules et leurs caractéristiques,
- à explorer les propriétés des diverses interactions fondamentales,
- à en découvrir éventuellement de nouvelles.

Il y a toujours l'espoir de pouvoir percer les secrets de la matière noire (26,8 % de l'Univers) et de l'énergie sombre (68,3 % de l'Univers) dont nous ne connaissons presque rien. **La matière ordinaire que nous connaissons relativement bien ne constitue que 4,9 % de l'Univers.**

Afin de se rendre compte de l'effort collectif, prenons l'exemple de la collaboration au détecteur CMS — à laquelle sont, entre autres, attachés 75 scientifiques travaillant dans les universités belges.

- environ 4 300 personnes y sont actives (physiciens, ingénieurs, techniciens, personnel administratif, étudiants, ouvriers, etc.), dont
- 1 740 physiciens avec doctorat,
- 845 doctorants en physique,
- 790 ingénieurs,
- 690 étudiants de maîtrise en physique.
- Un article publié par la collaboration a environ 2 100 signataires.

Entre décembre 2011, quand il a été annoncé qu'il n'était pas impossible qu'une particule aux caractéristiques semblables à celles du boson de Higgs existe avec une masse égale à 125-126 GeV, **et le 4 juillet 2012**, quand la découverte a été annoncée, **un extraordinaire travail collectif a été réalisé**. Des dizaines de propositions ont été faites à la base, centralisées au niveau adéquat et mises en pratique pour améliorer les performances du LHC et des détecteurs CMS et ATLAS.

Il y a deux conditions pour une telle réussite :

- (1) l'unification des connaissances, des intuitions et des volontés personnelles dans un but précis : accomplir un pas en avant dans la connaissance de la nature,**
- (2) la mise à disposition — au travers des impôts payés par des centaines de millions de travailleurs du monde entier — des moyens colossaux, chiffrés en milliards d'euros, nécessaires pour mener à bien de telles expériences scientifiques.**

« Toute vie sociale est essentiellement pratique.
Tous les mystères qui détournent la théorie vers le
mysticisme trouvent leur solution rationnelle dans
la pratique humaine et dans la compréhension de
cette pratique. »

Marx, *8^e thèse sur Feuerbach*, 1845

Références et lectures complémentaires

Françoise Barré et Guy Duplat, *Particules de vie – Conversation avec François Englert*, Renaissance du livre, 2014.

CERN (site) : public.web.cern.ch/public/fr/About/About-fr.html

Christophe Grojean et Laurent Vacavant, *À la recherche du boson de Higgs*, Librio, 2013.

Dominique Meeùs et Jean Pestieau, « À propos de la découverte de la particule de Higgs », http://www.marx.be/fr/content/%C3%A9tudes-marxistes?action=get_doc&id=97&doc_id=753

Jean-Pierre Kerckhofs et Jean Pestieau, « De la physique de Newton à la physique quantique du 21^e siècle - La matière illuminée », *Revue des Questions Scientifiques*, tome 183 (2012), p. 231; www.skolo.org/spip.php?article1378

Matthew J. Strassler,
profmattstrassler.com/articles-and-posts/the-higgs-particle/why-the-higgs-particle-matters/

www.marx.be/fr/content/%C3%A9tudes-marxistes?action=get_doc&id=97&doc_id=754 (en français)