



HAL
open science

Le boson de Higgs et sa place dans le modèle standard

Lise Bernard

► **To cite this version:**

Lise Bernard. Le boson de Higgs et sa place dans le modèle standard. Linguistique. 2017. dumas-01980289

HAL Id: dumas-01980289

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01980289>

Submitted on 14 Jan 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ESIT – Université Sorbonne Nouvelle – Paris 3

Le boson de Higgs et sa place dans le modèle standard

Lise BERNARD

Réalisé sous la direction de Madame Sandrine Détienne

Mémoire de Master 2 professionnel

Mention : Traduction et interprétation

Spécialité : Traduction éditoriale, économique et technique

Anglais-Français

Session de septembre 2017



Remerciements

Je remercie tout d'abord Mme Sandrine Détienne, ma directrice de mémoire, pour son soutien et ses encouragements ainsi que pour ses conseils et les corrections apportées au présent mémoire, tant sur le fond que sur la forme.

Je remercie également de tout cœur M. Philippe Rosnet, mon spécialiste-référent qui a pris le temps de me rencontrer et de répondre à mes questions. Un grand merci pour les nombreuses sources qu'il m'a prêtées ou conseillées ainsi que pour ses précieux conseils et explications au sujet des notions que je ne maîtrisais pas.

Enfin, je tiens à remercier Flora Bernard et Pierre Nérison pour leur relecture attentive et leurs conseils avisés concernant la rédaction de ce mémoire.

Table des matières

Avertissement au lecteur	1
EXPOSÉ.....	3
Introduction	5
I. Le Modèle standard de la physique	7
1) La matière	7
2) Les forces et les bosons associés	9
3) La théorie quantique	15
II. Le boson BEH et sa découverte au LHC	17
1) Présentation du CERN et du LHC	17
2) Le fonctionnement du LHC	19
3) Les expériences du LHC ayant permis la découverte du boson BEH	23
III. Le boson BEH et sa place dans le modèle standard de la physique	27
1) La pièce manquante	27
2) Expliquer la masse.....	29
3) La brisure spontanée de symétrie et la transition électrofaible.....	31
Conclusion et ouvertures.....	35
TEXTE-SUPPORT ET SA TRADUCTION.....	39
Avertissement au lecteur.....	41
Références du texte-support	41
STRATÉGIE DE TRADUCTION	67
I. Le texte support : présentation et choix.....	69
II. Méthode de travail	71
III. Les problèmes terminologiques	72
1) Le boson de Higgs... mais pas seulement !.....	72
2) La traduction de « CERN » et de « LHC ».....	73
3) Le modèle standard... tout court ?	74
4) L'intégrale de chemin de Feynman	74
5) Les fluctuations quantiques	75
6) Les « cut-offs » et les « coupures » d'énergie	76

IV. La reformulation.....	77
1) Le titre	77
2) Des champs qui se ressentent	77
3) Le casse-tête des symétries	78
4) Âne quantique et mécanisme BEH.....	79
Conclusion.....	81
ANALYSE TERMINOLOGIQUE	83
Fiches terminologiques.....	84
Glossaire français-anglais.....	97
Lexique anglais-français.....	109
Lexique français-anglais.....	117
BIBLIOGRAPHIE CRITIQUE	125
INDEX	138

Avertissement au lecteur

Tous les termes relatifs au sujet traité sont répertoriés dans les lexiques du présent mémoire. Les termes figurant dans le glossaire sont indiqués en gras (exemple : **terme**) et ceux faisant l'objet d'une fiche terminologique sont en gras et suivis du numéro de la fiche en exposant (exemple : **terme^{F01}**).

EXPOSÉ

Introduction

Le 4 juillet 2012, dans le grand amphithéâtre du CERN, près de Genève, les physiciens du LHC annonçaient officiellement ce que l'on appelle la « découverte du **boson de Higgs**^{F03} » par les équipes des expériences ATLAS et CMS. Cette fantastique découverte scientifique a été rendue possible grâce à la collaboration internationale de centaines de physiciens travaillant au sein d'une des machines les plus extraordinaires jamais construites par l'homme. Le LHC, *Large Hadron Collider* ou Grand collisionneur de hadrons, est un gigantesque **accélérateur de particules** dirigé par le CERN, un des plus grands laboratoires scientifiques du monde.

L'existence du **boson de Higgs**^{F03}, ou **boson BEH**^{F03}, une **particule élémentaire** permettant de compléter le **modèle standard de la physique**^{F05}, a été postulée en 1964 de manière indépendante par les physiciens Peter Higgs d'une part, Robert Brout et François Englert d'autre part, et avec une contribution moindre de Carl Hagen, Gérard Guralnik et Thomas Kibble. Cette **particule** est nécessaire à la compréhension de notre Univers et aux lois de la physique. Jusqu'en 2012, elle restait la seule **particule du modèle standard**^{F05} qui n'avait pas été observée. La découverte expérimentale du **boson de Higgs**^{F03} constitue donc, pour la communauté scientifique, un événement historique : elle valide les théories les plus fondamentales résultant de plusieurs décennies de recherches.

Dans cet exposé, nous verrons tout d'abord la structure du **modèle standard de la physique**^{F05} afin de mieux cerner les enjeux qu'implique la découverte du **boson de Higgs**^{F03}. Ensuite, nous présenterons le fonctionnement du LHC et comment celui-ci a participé à cette découverte. Enfin, nous expliciterons la place du **boson de Higgs**^{F03} dans la théorie du **modèle standard de la physique**^{F05}.

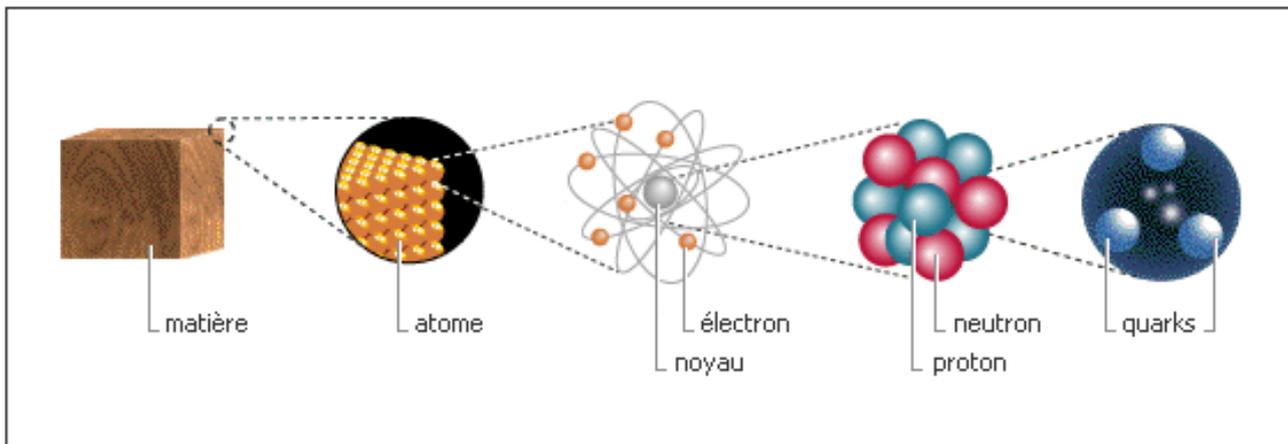


Figure 1 : Au cœur de la matière. Les atomes sont les constituants de la matière, mais eux-mêmes sont composés d'un noyau et d'électrons. Le noyau se compose à son tour de protons et de neutrons. Le stade le plus élémentaire est celui des quarks.

Source de l'image : DELRUE Johnathan, Théorie des quantas [en ligne], disponible sur : <http://logiqueformelle.free.fr/physique-quantique/theorie-quanta.php> (consulté le 15/06/17).

I. Le Modèle standard de la physique

Le **modèle standard de la physique**^{F05} englobe l'ensemble des théories des physiciens servant à décrire et expliquer la réalité immédiatement discernable. Ce modèle réussit à expliquer la quasi-totalité des résultats expérimentaux. Certains parlent d'une « théorie du presque tout ». Cette représentation se base sur trois types d'éléments : les **particules** de matière, les **forces fondamentales**^{F01} et les **médiateurs**^{F02}. À partir de ce triptyque simple, les physiciens tentent d'expliquer tous les phénomènes naturels. Le **modèle standard**^{F05} compte en tout 17 **particules élémentaires**, à partir desquelles il est possible d'expliquer l'ensemble des phénomènes physiques. Nous ne verrons ici que les principales **particules élémentaires**.

1) La matière

On a nommé les **atomes** selon le mot grec *atomos*, qui signifie qu'ils sont « insécables », c'est-à-dire qu'on ne peut les décomposer en matériel plus petit. Or, on sait aujourd'hui que cette appellation est erronée. En effet, un **atome** est constitué d'un noyau autour duquel « gravitent » des **électrons** (de charge électrique négative). Le noyau lui-même est constitué de deux types de **particules** appelées **nucléons** : les **protons** (de charge positive) et les **neutrons** (neutres). Cependant, si les **électrons** sont des particules dites élémentaires, les **nucléons**, qui font partie de la famille des **hadrons**, sont eux-mêmes composés de **particules élémentaires** : les **quarks**. Les **électrons** et les **quarks** font partie de la famille des **fermions**, d'après le nom du physicien italien Enrico Fermi, et sont appelés **fermions** élémentaires.

Les **quarks** sont de différents types : il existe les **quarks** up, down, strange, charm, top et beauty (que l'on nomme souvent par leurs initiales : u, d, s, c, t et b). Cependant, nous ne parlerons ici que des **quarks** up et down, qui constituent les **nucléons** et qui suffisent à décrire notre environnement. Ces **quarks** sont confinés à l'intérieur des **nucléons**, c'est-à-dire qu'ils ne peuvent pas exister individuellement. Les **quarks** sont en fait soumis à l'**interaction nucléaire forte**, que nous développerons plus tard. Les **protons** sont constitués de deux **quarks** up et d'un quark down, tandis que les neutrons se composent de deux quarks down et d'un quark up.

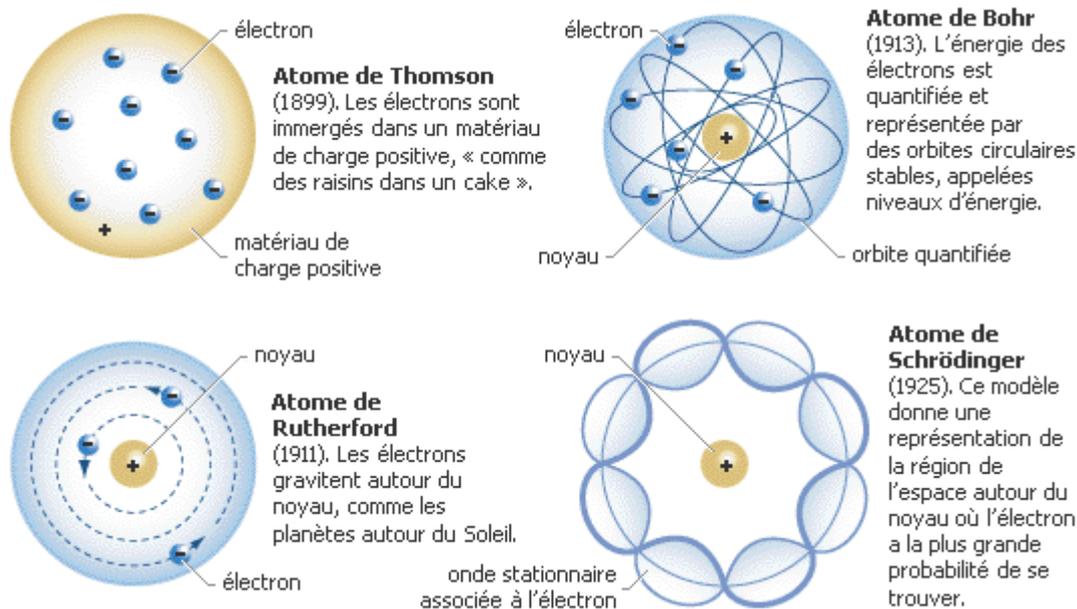


Figure 2 : La représentation de l'atome. Au cours de l'histoire des sciences, différentes représentations de l'atome ont été proposées : le « pudding » de Thomson, puis l'atome de Bohr et le « mini-système solaire » de Rutherford (ces deux dernières restant les plus connues par le grand public) et enfin l'atome de Schrödinger et son nuage électronique.

Source de l'image : Le Club d'Interstellar. Le modèle quantique de l'atome [en ligne], disponible sur : <<http://blog.univ-angers.fr/astrophysique/2015/02/02/le-modele-quantique-de-latome/>> (consulté le 9/06/17).

Dans un **atome**, le nombre respectif de **protons** et de **neutrons** détermine le type d'**atome**. Un **atome** de carbone classique est par exemple composé de 6 **neutrons** et de 6 **protons**, tandis qu'un **atome** d'oxygène comprend 8 **neutrons** et 8 **protons**. On représente souvent un **atome** selon le schéma de Rutherford (cf. figure). L'essentiel de la masse de l'**atome** est contenu dans le noyau, bien que celui-ci soit environ 100 000 fois plus petit que l'**atome**. Cependant, ce schéma simpliste prête à confusion. En effet, il donne l'impression qu'entre le noyau et les **électrons**, il n'y a que du vide. Or c'est faux : les **électrons**, bien que représentés par des **particules** ponctuelles, emplissent en réalité tout l'espace autour du noyau. D'après la **physique quantique**, ils n'ont ni position exacte ni vitesse précise : ils prennent la forme d'un nuage dont l'amplitude de probabilité est appelée **fonction d'onde**. Celle-ci permet de savoir à quel endroit il est probable que les **électrons** se situent, et à quelle vitesse il est probable qu'ils se déplacent.

2) Les forces et les bosons associés

Pour comprendre ce qu'est le **boson de Higgs**^{F03}, il faut savoir ce que sont les bosons et leur place dans le **modèle standard**^{F05} proposé par la physique.

Le **modèle standard**^{F05} décrit trois types de **forces fondamentales**^{F01} : la **force forte**, la **force faible**, et la **force électromagnétique**. Nous parlerons également ici de la **force gravitationnelle**, bien que celle-ci ne soit pas précisément décrite par le **modèle standard**^{F05}. Chaque **force** est générée par un échange de bosons, qu'on appelle **bosons de jauge**^{F02} ou **médiateurs**^{F02}, et qui sont des **particules élémentaires**. Dans cette partie, nous allons voir à quel phénomène correspond chaque force et de quelle manière les **bosons de jauge**^{F02} agissent afin de porter ces forces.

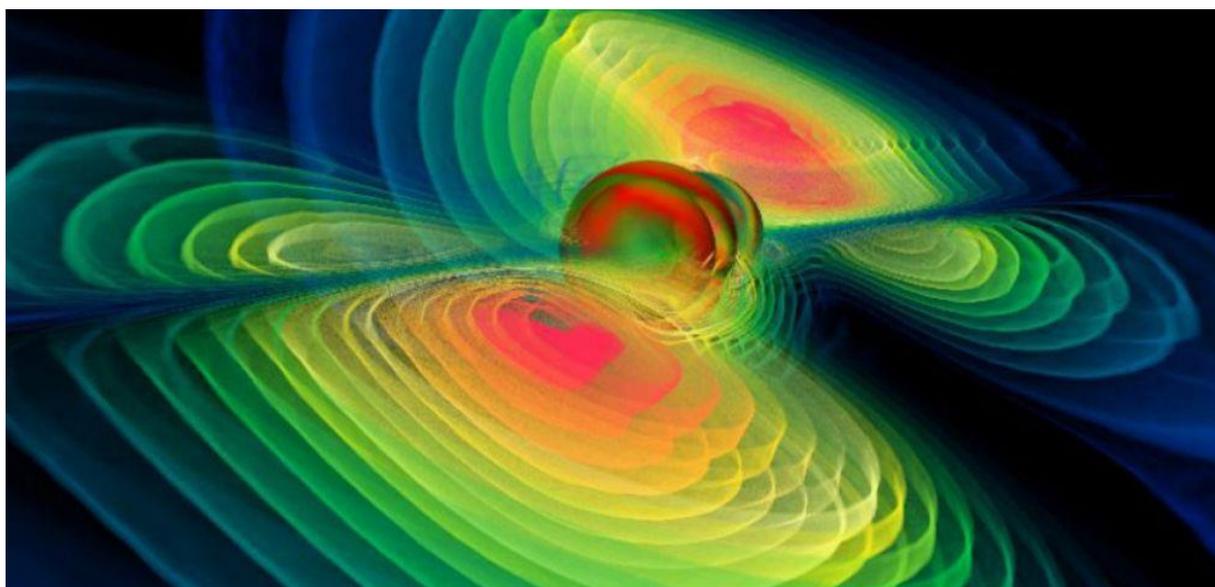


Figure 3 : Simulation numérique représentant des ondes gravitationnelles produites suite à la collision de deux trous noirs. Les ondes gravitationnelles correspondent à des vibrations de l'espace-temps. L'interaction gravitationnelle n'est cependant pas décrite par le modèle standard de la physique des particules.

Source de l'image : Sciences et Avenir. L'onde gravitationnelle prédite par Einstein détectée pour la 1^{ère} fois [en ligne], disponible sur :

https://www.sciencesetavenir.fr/espace/astrophysique/alerte-l-onde-gravitationnelle-predite-par-einstein-detectee-pour-la-1ere-fois_23386 (consulté le 15/06/17).

La **force gravitationnelle**, ou simplement **gravitation** dans le langage courant, est la force d'attraction entre deux corps massifs. Il est facile de se représenter la **force gravitationnelle** dans la vie quotidienne : la pomme qui tombe de l'arbre par exemple est attirée par la Terre. Cependant, bien que cette force soit *a priori* facile à observer, elle reste la force la moins bien comprise par les physiciens. En effet, elle ne s'exerce qu'à grande échelle et n'est que très peu observable au niveau des **particules élémentaires**. Les théories physiques prévoient l'existence d'un **boson de jauge**^{F02} pour cette force, appelé **graviton**, dont la masse serait nulle. Néanmoins, ce **médiateur**^{F02} n'a encore jamais été observé en laboratoire.

La **force électromagnétique** est transmise par les **photons**. Elle est responsable de l'attraction et de la répulsion entre les **particules** électriquement chargées : deux **particules** chargées porteuses de la même charge (deux charges positives ou deux charges négatives) se repoussent, tandis que deux **particules** de charges contraires s'attirent. Les **photons**, de masse nulle, se propagent à la vitesse de la lumière c (299 792 458 m.s⁻¹ dans le vide). De même, la longue portée de cette force est due à l'absence de masse des **photons**.

Une onde électromagnétique, qui est produite par des charges électriques accélérées (un courant dans une antenne par exemple), est interprétée comme un flux de **photons**. De la même manière, la théorie prévoit que de grandes masses en accélération produisent des ondes gravitationnelles. Cette prédiction a été faite par Einstein en 1915 et la première détection d'onde gravitationnelle a été réalisée un siècle plus tard, en septembre 2015. Sa source d'émission est associée à la fusion de deux trous noirs. Cette découverte plaide en faveur de l'existence des **gravitons** évoqués précédemment qui constitueraient le flux de particules associées à l'onde gravitationnelle.

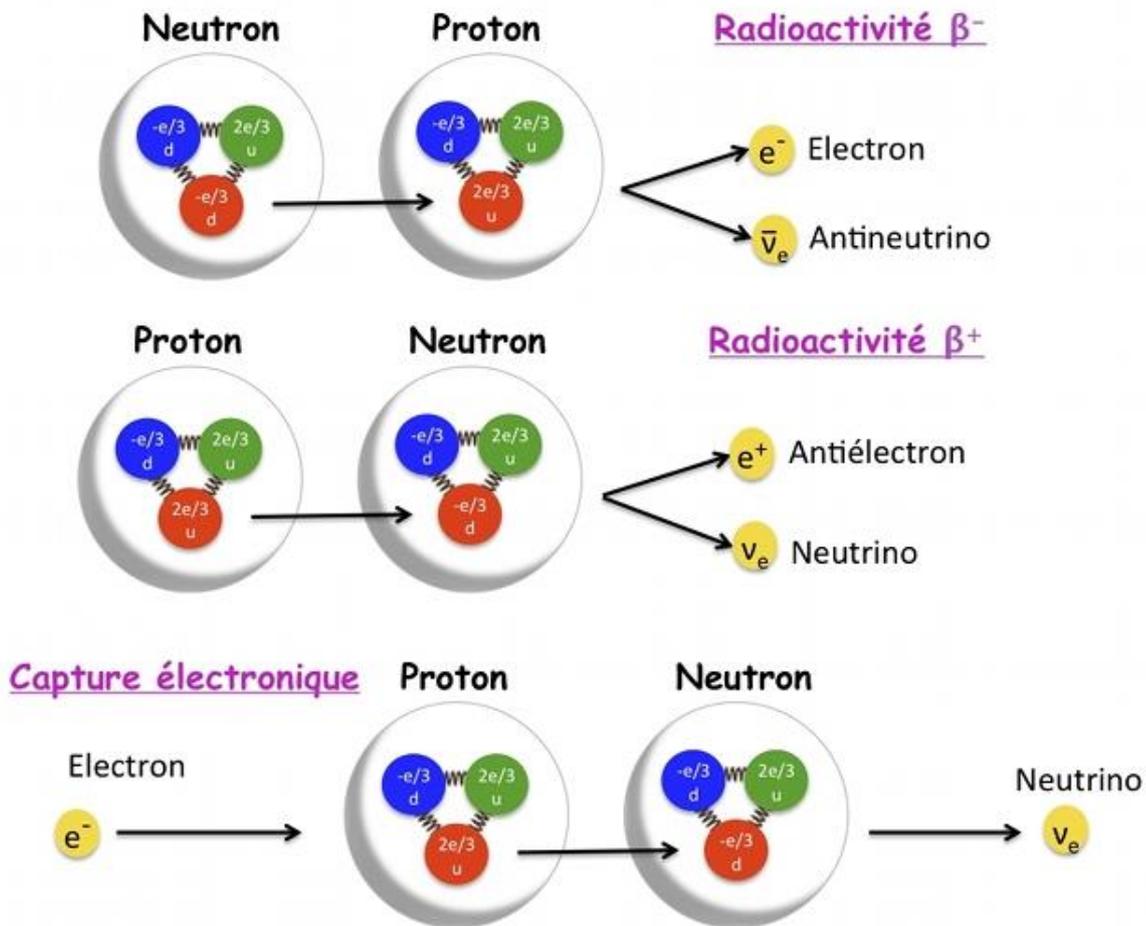


Figure 4 : Les différents types de radioactivité β induites par l'interaction faible. Celle-ci, de très courte portée, n'intervient qu'au niveau du noyau atomique.

Source de l'image : Observatoire de Paris. L'interaction faible [en ligne], disponible sur : https://media4.obspm.fr/public/AMC/pages_forces/force-faible_impression.html (consulté le 9/06/17).

La **force faible**, responsable des interactions radioactives, est transmise par les **bosons W** et **Z**. Les **bosons W** sont les seuls à posséder une charge électrique (il existe des **bosons W⁺** et des **bosons W⁻**), tous les autres **bosons** étant neutres. Les **bosons W** et **Z** sont très massifs, ce qui explique qu'ils sont difficiles à produire et qu'ils se désintègrent très facilement. Leur masse élevée est aussi la raison pour laquelle la **force faible** est de très courte portée, contrairement à la **force électromagnétique**. Par ailleurs, on a vu que les **protons** sont constitués de deux **quarks up** et d'un **quark down**, tandis que les **neutrons** se composent de deux **quarks down** et d'un **quark up**. Or, un **quark down** peut se transformer en **quark up** en émettant un **boson W⁻**. Ainsi, si un des **quarks down** d'un **neutron** émet un **boson W⁻**, alors il ne reste plus qu'un **quark down** et deux **quarks up** : le **proton** s'est transformé en **neutron**. Le **W⁻** se désintègre à son tour en un **électron** et une autre **particule** de matière extrêmement légère, un neutrino. On parle de désintégration radioactive dite bêta négatif (β^-).

La **force forte** enfin assure la cohésion du noyau. Elle a également une portée très courte. Elle est portée par les **gluons**, qui sont de huit types différents. Les **gluons**, de masse nulle, se trouvent à l'intérieur des **nucléons** et ce sont eux qui retiennent les **quarks** confinés. Dans le cas où deux **quarks** chercheraient à s'éloigner, l'**interaction forte** se fait de plus en plus puissante. Ainsi, éloigner deux **quarks** l'un de l'autre demande de plus en plus d'énergie, jusqu'à atteindre un niveau d'énergie tel qu'il se forme de la matière (selon la célèbre formule $E=mc^2$ qui montre que la masse d'une **particule** est proportionnelle à son énergie au repos) : une paire **quark-antiquark** apparaît. C'est pour cette raison que les **quarks** ne se déplacent jamais librement.

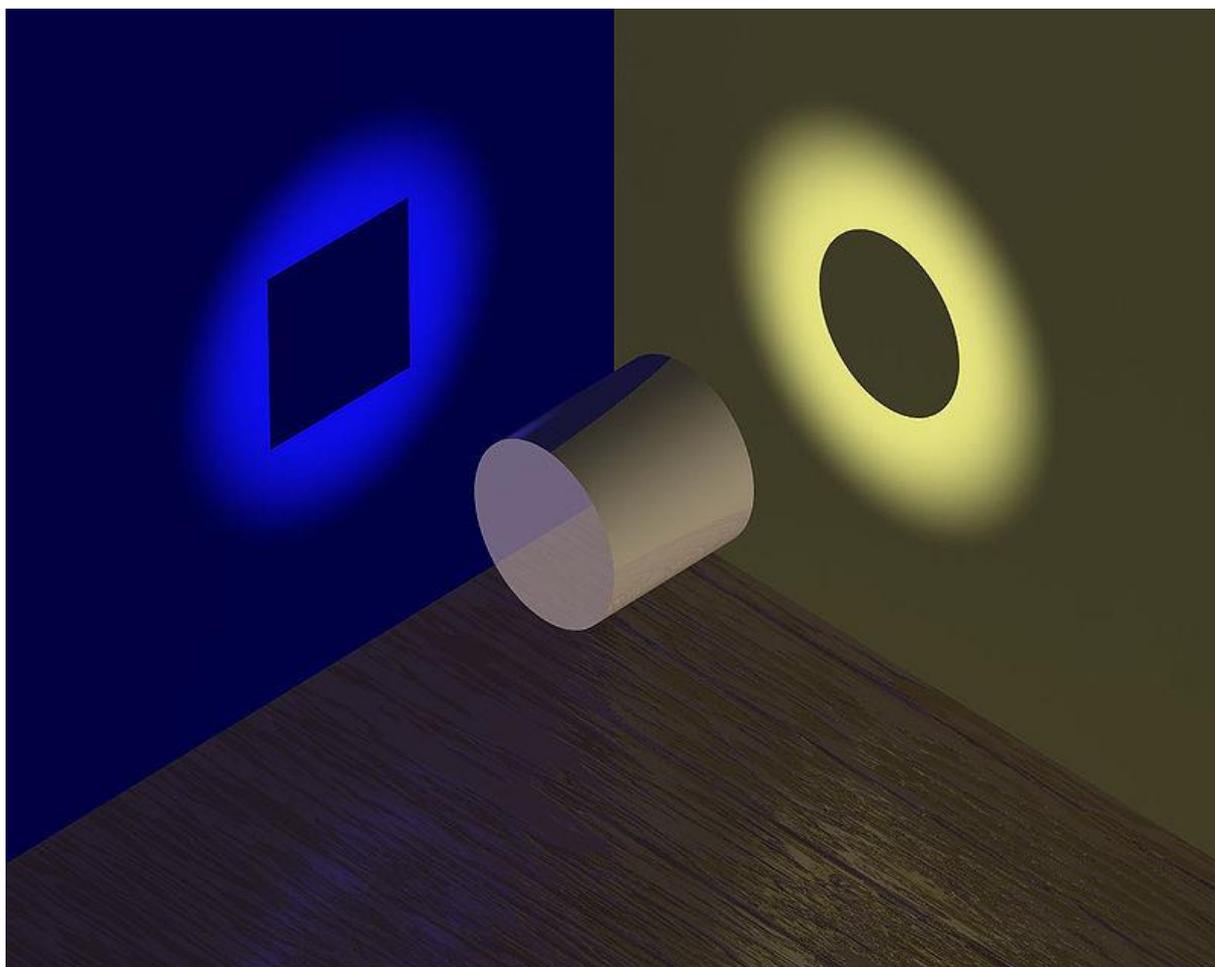


Figure 5 : La dualité onde-particule. La métaphore du cylindre : celui-ci possède à la fois les propriétés d'un cercle et d'un rectangle.

Source de l'image : Wikipédia. Dualité onde-corpuscule. [en ligne], disponible sur : https://fr.wikipedia.org/wiki/Dualit%C3%A9_onde-corpuscule (consulté le 15/06/17).

3) La théorie quantique

D'après la **mécanique quantique**, toute **particule** se caractérise par un comportement ondulatoire, comme les ondes à la surface de l'eau : on parle de la **dualité onde-particule**, au cœur de la théorie quantique. Cette particularité, *a priori* paradoxale, explique le comportement des **électrons** autour du noyau atomique et ainsi la stabilité et l'étendue spatiale des **atomes**.

La version relativiste de la **mécanique quantique**, appelée **théorie quantique des champs**, va encore plus loin en affirmant qu'un **champ** est un objet physique qui possède une valeur en tout point de l'espace : le **champ** magnétique terrestre par exemple, dont la valeur dépend de l'emplacement sur Terre, ou encore le **champ** gravitationnel terrestre, dont la valeur augmente au voisinage de la Terre. Une **particule** n'est en réalité que la manifestation d'une petite vibration des ondes d'un **champ** quantique, que l'on qualifie également d'excitation de ce **champ** : ainsi, les **photons**, qui sont les particules associées au **champ** électromagnétique, sont les excitations de ce **champ**. De manière plus rigoureuse, on dit qu'une **particule** est décrite dans les équations mathématiques par un **champ**. Cette théorie est également valable pour les **particules élémentaires** de matière : ainsi, il existe un **champ** d'**électrons**, un **champ** de **quarks** up, etc. On dit que les **particules** sont des « **quanta** » (au singulier : « **quantum** ») de chaque **champ** associé. On retrouve dans l'approche de la **théorie quantique des champs** la **dualité onde-particule**, une **particule** étant la manifestation des variations d'une onde composant un **champ**.

En outre, la dualité « onde-particule » implique que plus une particule est énergétique, plus sa longueur d'onde est petite, c'est-à-dire qu'elle occupe moins d'espace. Cette propriété est à la base du concept des accélérateurs de particules : pour sonder la matière à des échelles toujours plus petites, il faut envoyer des particules toujours plus énergétiques. Par exemple, les expériences du LHC sont capables d'étudier la matière à une échelle d'environ 10^{-20} mètre, soit un centième de milliardième de milliardième de mètre.

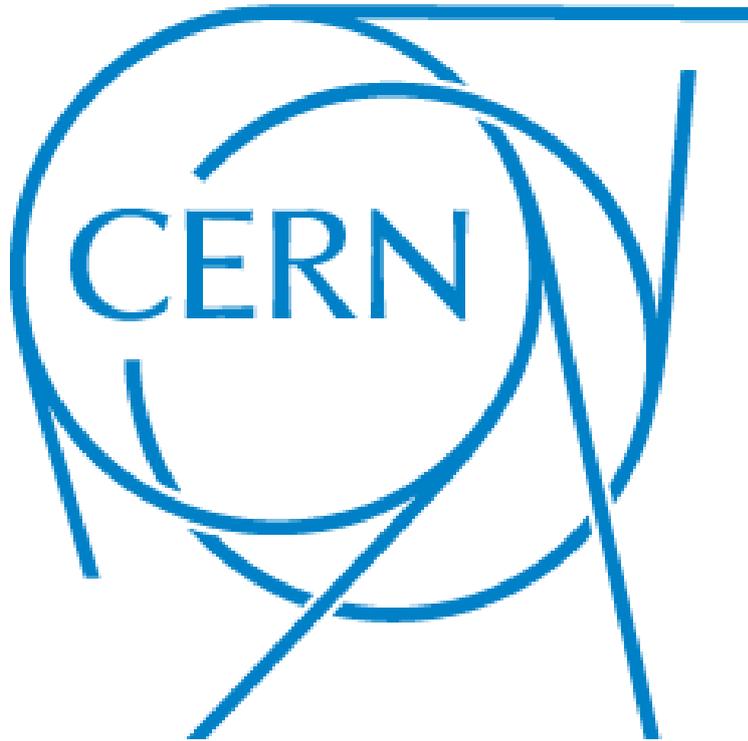


Figure 6 : Logo du CERN, le Laboratoire européen de physique des particules. Cette organisation regroupe des milliers de chercheurs de nombreux pays différents dont l'objectif est de percer les mystères de l'Univers.

Source de l'image : The CERN directory [en ligne], disponible sur : <http://directory.web.cern.ch/directory/> (consulté le 08/06/17).

II. Le boson BEH et sa découverte au LHC

1) Présentation du CERN et du LHC

L'acronyme CERN désigne à l'origine le Conseil européen pour la recherche nucléaire, renommé par la suite Organisation européenne pour la recherche nucléaire (bien que l'acronyme soit resté). On nomme aussi cet organisme le Laboratoire européen de physique des particules. Le CERN est l'une des premières organisations à l'échelle européenne. Les pays membres de ce projet sont les suivants : l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, la Bulgarie, le Danemark, l'Espagne, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Italie, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, la République tchèque, le Royaume-Uni, la Slovaquie, la Suède et la Suisse. Le CERN a pour objectif la compréhension de l'Univers et l'étude de la physique fondamentale.

Situé à 100 m sous terre, le LHC est un tunnel de forme cylindrique de 27 km de long. Le tunnel reprend en fait les infrastructures du LEP. Le LEP, dont les initiales signifient *Large Electron-Positron Collider*, ou Grand **collisionneur électron-positon** en français, a été inauguré en 1989. Installée à Genève, cette immense machine souterraine passant sous la frontière franco-suisse était alors le plus grand **accélérateur électron-positon** jamais construit. Le chantier, gigantesque, a duré trois ans et représente la plus grande construction européenne. Durant sa période de fonctionnement, il a permis de confirmer de nombreuses prédictions concernant la **force électrofaible**, c'est-à-dire la théorie dont la formulation mathématique décrit à la fois la **force électromagnétique** et la **force faible**.

Cet **accélérateur** est bientôt remplacé par le LHC, dont le projet est esquissé dès 1980, mais dont la construction n'est approuvée qu'en 1994. Commence alors la mise en œuvre d'un projet titanesque. Le LHC représente la machine la plus grande et la plus complexe jamais construite par l'Homme. Le LHC est finalement inauguré le 21 octobre 2008 et il démarre en 2009. Actuellement, près de 10 000 personnes y travaillent, les équipes se relayant en permanence ! Avec un coût total de construction de 7 milliards d'euros, il est censé fonctionner plusieurs dizaines d'années.

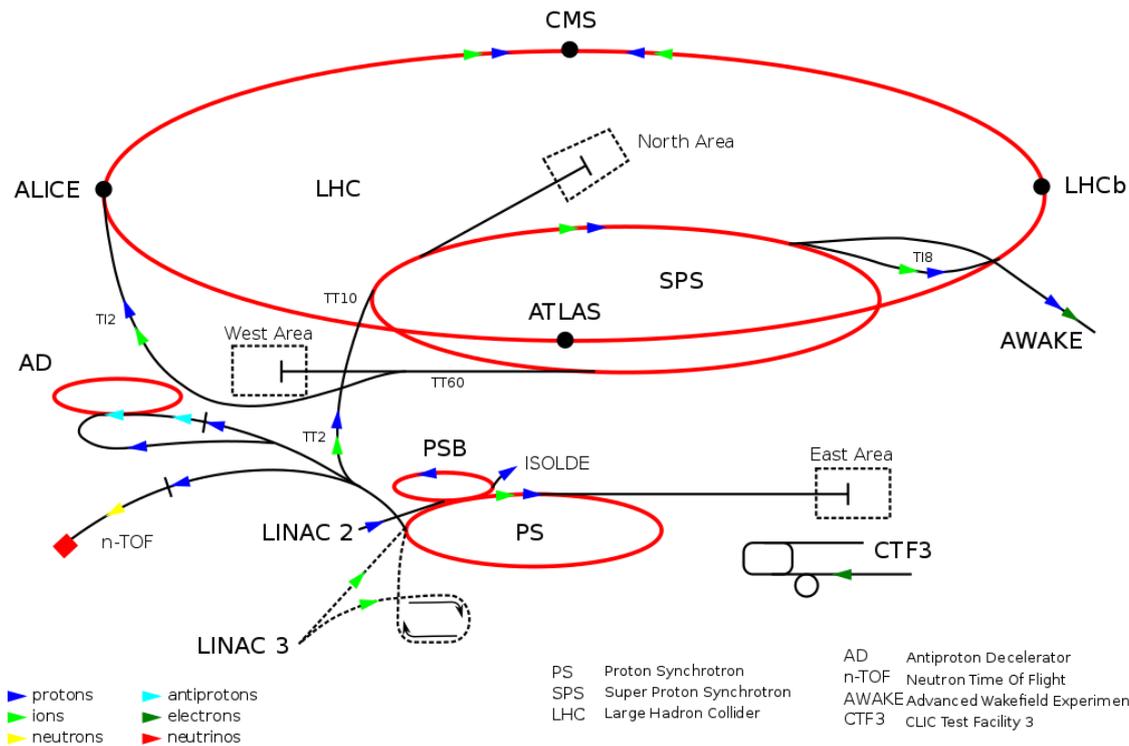


Figure 7 : Schéma de la structure du LHC. Les faisceaux de protons sont accélérés dans différents accélérateurs avant d'être envoyés dans le tunnel du LHC. Les quatre expériences (ATLAS, CMS, ALICE et LHCb) sont situées à des points différents de l'accélérateur.

Source de l'image : Wikipédia. CERN [en ligne], disponible sur : <https://en.wikipedia.org/wiki/CERN> (consulté le 08/06/17).

Les expériences du LHC tentent de percer les mystères de la matière en s'approchant de l'infiniment petit. Les physiciens sont allés tellement loin dans la physique des particules qu'à présent, pour la moindre découverte, il est nécessaire de disposer de machines de plus en plus puissantes et précises.

2) Le fonctionnement du LHC

Le LHC est une machine gigantesque produisant des niveaux d'énergie qu'aucun **accélérateur** n'a atteints auparavant. En effet, l'objectif du LHC est de provoquer des collisions de **particules** à haute énergie afin d'étudier les produits de la collision. Les **particules** se déplacent à l'intérieur du tunnel à des vitesses vertigineuses : jusqu'à 99,9999991 % de la vitesse de la lumière, effectuant ainsi 11 245 fois le tour de l'**accélérateur** par seconde. Plus une **particule** atteint une vitesse élevée, plus son énergie augmente, d'après les lois de la relativité d'Einstein. Par conséquent, au sein du LHC, les **protons** voyagent à une énergie pouvant aller jusqu'à 7 TeV (sachant que 1 TeV ou téra-électron-volt équivaut à $1,602\ 177 \times 10^{-7}$ Joules), ce qui engendre des collisions libérant une énergie allant jusqu'à 14 TeV. Il se produit au sein de l'accélérateur quelque 600 millions de collisions par seconde.

Tous les **protons** circulant dans le LHC proviennent d'une simple bouteille d'hydrogène qui libère des **particules** dès que nécessaire. Une fois envoyés à l'intérieur du tunnel sous forme de faisceaux de **protons**, ceux-ci sont accélérés tout en suivant une trajectoire curviligne afin de ne pas se fracasser sur les parois du tunnel. Les **protons** passent donc par une série d'**accélérateurs** avant d'entrer dans le LHC proprement dit. Des aimants **supraconducteurs** produisent un **champ** électrique qui agit sur les **protons** (ceux-ci étant chargés, ils interagissent avec les **champs** électromagnétiques) afin de les accélérer. Ensuite, d'autres aimants agissent sur les **particules** grâce à un **champ** magnétique afin de les guider le long d'une trajectoire circulaire dans le tunnel.

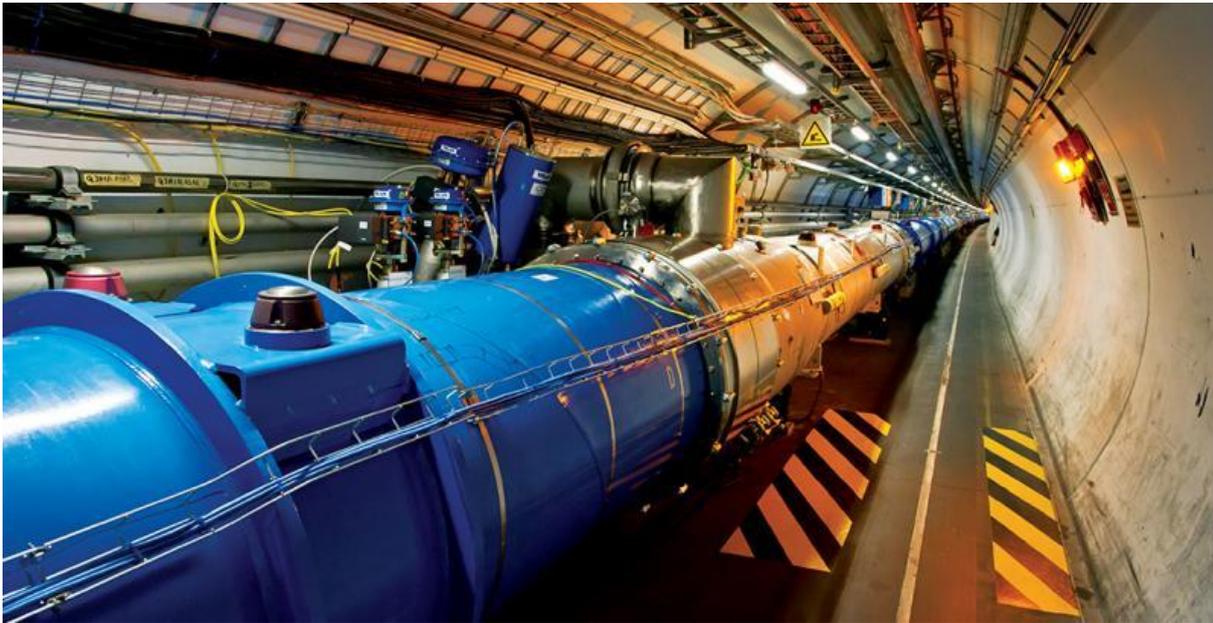


Figure 8 : Le tunnel du Grand collisionneur de hadrons, le plus puissant accélérateur de particules au monde.

Source de l'image : CERN. The Large Hadron Collider [en ligne], disponible sur : <<http://home.cern/topics/large-hadron-collider>> (consulté le 08/06/17).

Lancés à pleine vitesse, les **protons** acquièrent une énergie considérable, et les faisceaux de **protons** entrent alors en collision. Les collisions ont lieu à des points précis de l'**accélérateur**, afin d'être étudiées par les différentes expériences. Si l'énergie libérée lors d'une collision est suffisante, on assiste à la production de **particules** plus lourdes que les **particules** de départ. En effet, les **protons** voyageant à une vitesse proche de celle de la lumière, l'équation $E=mc^2$ nous montre que l'énergie totale libérée lors d'une collision peut se transformer en matière. Par ailleurs, les masses des **particules** étant très faibles, on préfère souvent parler de leur énergie au repos afin de simplifier les calculs. Ainsi, on dit que le **boson BEH^{F03}** a une « masse » de $125,3 \pm 0,6$ GeV ce qui signifie qu'il faut atteindre ce seuil d'énergie si l'on souhaite créer un **boson BEH^{F03}**.

Et parce que la recherche nécessite d'anticiper les projets de nombreuses années à l'avance, les chercheurs imaginent déjà l'**accélérateur** de **particules** du futur, toujours plus puissant et plus performant. Plusieurs sont à l'étude dont deux **accélérateurs** linéaires : *International Linear Collider* (ILC) ou Collisionneur linéaire international, et *Compact Linear Collider* (CLIC) ou Collisionneur linéaire compact. En effet, le principal inconvénient d'un **accélérateur** circulaire réside dans la perte d'énergie nécessaire pour courber le faisceau de **protons**. Par ailleurs, les chercheurs cherchent à améliorer la **luminosité** du LHC, un facteur essentiel qui est proportionnel au nombre de **particules** entrant en collision en un temps donné. Ce projet, le « LHC haute **luminosité** », devrait permettre d'améliorer les performances de l'actuel **accélérateur**. Enfin, le CERN étudie un projet de nouveau **collisionneur** de 80 ou 100 kilomètres de circonférence, le *Future Circular Collider* (FCC), dont le LHC constituerait un maillon de la chaîne d'accélération.

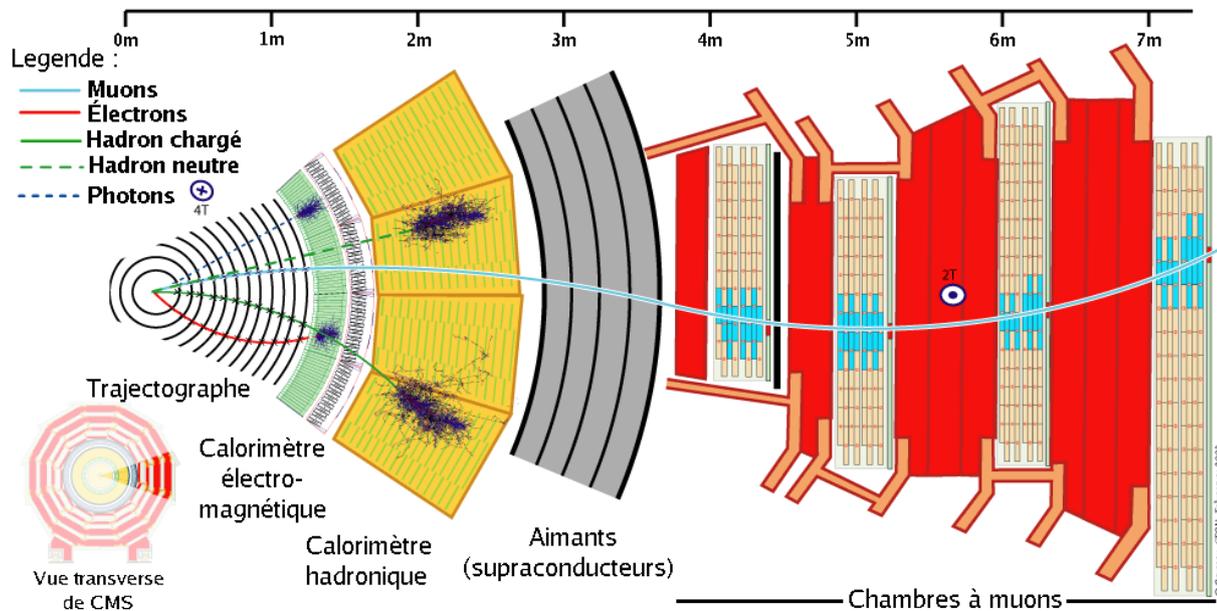


Figure 9 : Coupe transversale du détecteur de l'expérience CMS. Les protons entrent en collision à l'intérieur du tube (à gauche) et les produits de désintégration sont détectés, selon leur nature, par une des différentes couches concentriques.

Source de l'image : Wikipédia. CMS (expérience) [en ligne], disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/CMS_\(exp%C3%A9rience\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/CMS_(exp%C3%A9rience)) (consulté le 09/06/17).

3) Les expériences du LHC ayant permis la découverte du boson BEH

Les physiciens recherchent les « signatures » des **particules**, c'est-à-dire les traces laissées par chaque **particule** entre son apparition et sa désintégration.

Les deux expériences principales du CERN sont ATLAS et CMS, situées à deux points opposés de l'anneau. Les enregistrements au sein de ces expériences se font de manière indépendante, afin d'améliorer les chances de découvrir de nouvelles **particules**. L'expérience ATLAS (*A Teoridal LHC Apparatus*, ou Un appareil toroïdal du LHC) mesure 40 m de long pour une masse totale de 7 700 tonnes (approximativement le poids total de la Tour Eiffel !). CMS (*Compact Muon Solenoid* ou Solénoïde compact à **muons**) mesure quant à lui 20 m de long et pèse 13 800 tonnes.

Ces expériences, dont les objectifs sont d'étudier le **boson de Higgs**^{F03}, la **matière noire**, les dimensions supplémentaires de l'**espace-temps** ainsi que les particules symétriques, sont de gigantesques détecteurs composés de différents sous-systèmes de détection disposés en couches concentriques autour du tube à vide qui entoure le point de collisions des **particules**. Chaque sous-système est équipé pour la détection et la mesure de la position, la charge, la vitesse, la trajectoire, la masse et l'énergie d'un type de **particules**. L'analyse de ces résultats permet de déterminer la nature des **particules** produites suite aux collisions de **protons**. Ces détecteurs polyvalents à hautes performances permettent aussi l'étude d'autres phénomènes encore inconnus qui seraient susceptibles d'apporter un nouveau regard sur le **modèle standard**^{F05}, en particulier la **supersymétrie**. Le LHC mène d'autres expériences secondaires, comme LHCb qui étudie l'asymétrie entre matière et **antimatière**, ou encore l'expérience ALICE, où les physiciens étudient la collision d'ions de plomb.

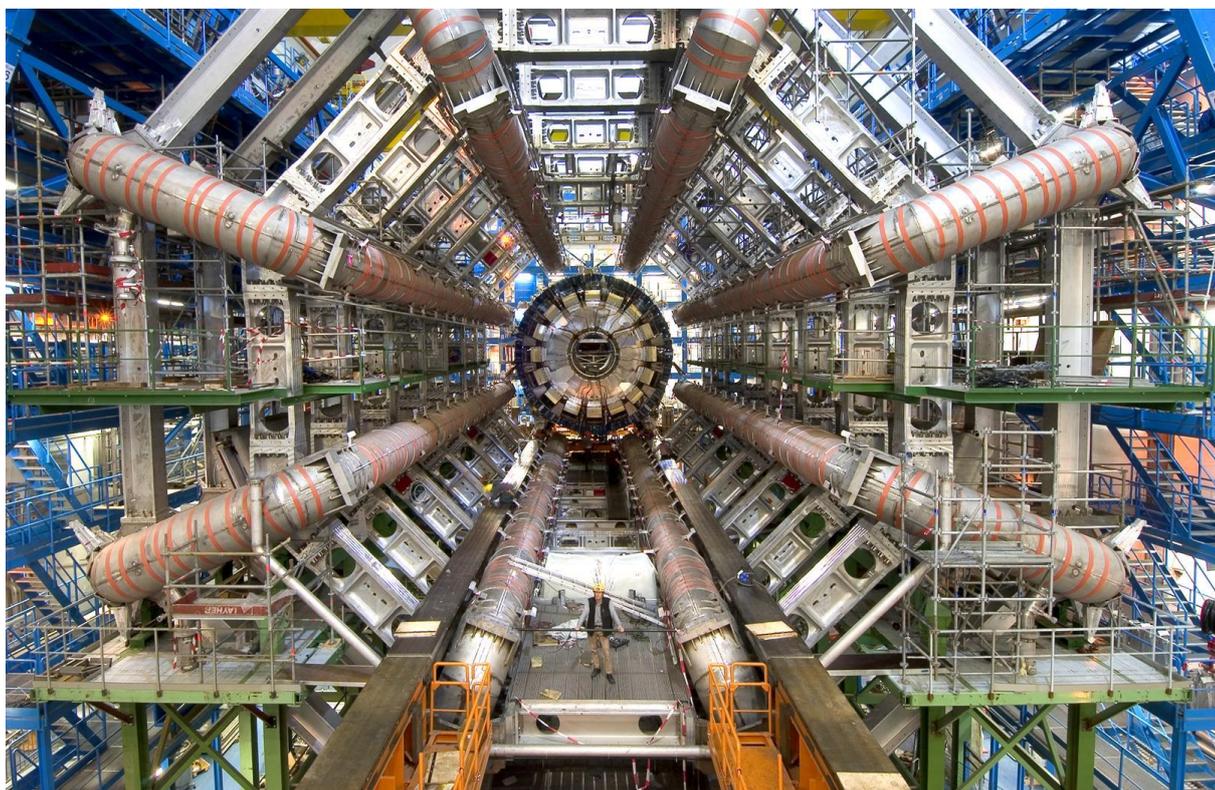


Figure 10 : Photo de l'expérience ATLAS. La personne en bas de l'image permet d'avoir une idée de la taille de cette machine gigantesque.

Source de l'image : CERN. ATLAS [en ligne], disponible sur : <https://atlas.cern/sites/atlas-public.web.cern.ch/files/0511013_01-A4-at-144-dpi_0.jpg> (consulté le 08/06/17).

On a vu qu'il était possible de créer des **particules** lourdes à partir de **particules** légères lors des collisions à haute énergie. De la même manière, il est possible de créer des **particules** massives à partir de **particules** de masse nulle. Le **boson BEH^{F03}**, pour sa part, résulte de la collision de deux **gluons**. Seulement, étant donné qu'il faut que l'énergie totale de collision soit supérieure à la masse du **boson BEH^{F03}**, et que celle-ci est supérieure à la masse de 100 **protons**, il est difficile à créer.

C'est la collaboration ATLAS + CMS qui a permis la découverte du **boson BEH^{F03}**. En théorie, celui-ci est pratiquement impossible à observer. Cependant, les collisions de **protons** à haute énergie augmentent les chances de créer un **boson BEH^{F03}**, et donc de pouvoir l'observer. Néanmoins, la « découverte » du **boson** ne correspond pas aux résultats de calculs suite à une unique collision entre **protons**. Les physiciens effectuent en réalité de nombreuses mesures et calculs suite aux collisions de **protons** dans le LHC, en étudiant l'énergie (c'est-à-dire la masse), la position, la charge, la vitesse et la trajectoire des produits de désintégration. Il est nécessaire de réaliser un grand nombre de collisions afin de procéder à des statistiques et de réduire les facteurs d'incertitude.

Un autre problème concernant l'observation du **boson BEH^{F03}** réside dans le fait que son existence est très brève, il se désintègre très rapidement en d'autres éléments (souvent deux **photons** ou quatre **électrons**). Ainsi, le grand nombre de collisions de protons lancés à pleine vitesse augmente les chances d'observer les produits de désintégration d'un **boson BEH^{F03}** à haute énergie. Cependant, le **boson BEH^{F03}** n'est pas la seule particule à se désintégrer de cette manière. De plus, il est essentiel de séparer les données intéressantes du « bruit de fond », c'est-à-dire les soubresauts d'énergie générés par les autres désintégrations et événements. La découverte du **boson BEH^{F03}** correspond donc au moment où l'analyse des résultats des produits de désintégration révèle la présence d'un **boson BEH^{F03}**, avec une probabilité que cet événement ne soit que du bruit de fond inférieure à une chance sur dix millions pour chacune des expériences (ce qui correspond au seuil minimal en physique des particules avant de prétendre à la moindre découverte).

	masse →	charge →	spin →																		
QUARKS	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	u up	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	c charm	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	t top	0	0	1	g gluon	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$	0	0	0	H boson de Higgs
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	d down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	b bottom	0	0	1	γ photon					
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	-1	$1/2$	e électron	$106.7 \text{ MeV}/c^2$	-1	$1/2$	μ muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	-1	$1/2$	τ tau	0	0	1	Z^0 boson Z^0					
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	0	$1/2$	ν_e neutrino électronique	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	0	$1/2$	ν_μ neutrino muonique	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	0	$1/2$	ν_τ neutrino tauique	± 1	0	1	W^\pm boson W^\pm					
LEPTONS																					BOSONS DE JAUGE

Figure 11 : Le modèle standard des particules. Les particules sont classées par nature et par génération (pour les quarks et les leptons). Le boson de Higgs forme une catégorie à part. Il constitue la clé de voûte de la théorie des particules.

Source de l'image : Wikipédia. Modèle standard (physique des particules) [en ligne], disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A8le_standard_\(physique_des_particules\)>](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A8le_standard_(physique_des_particules)>) (consulté le 15/06/17).

III. Le boson BEH et sa place dans le modèle standard de la physique

1) La pièce manquante

Nous avons vu qu'il existait deux types de **particules élémentaires** : les **particules** qui forment la matière (**fermions** élémentaires) et les **particules** d'interaction (**boson de jauge**^{F02} ou **médiateur**^{F02}). Le **boson BEH**^{F03} forme une catégorie à part et constitue le chaînon manquant du **modèle standard**^{F05}. On dit que c'est un **boson** scalaire, car son **spin** est égal à zéro, contrairement aux autres **bosons** dont le spin est de 2 pour les **gravitons** (selon les théories) et de 1 pour les autres (le **spin** étant une propriété mathématique de chaque **particule** décrivant le comportement de celle-ci sous l'effet d'une rotation). Au repos, son énergie est de $125,3 \pm 0,6$ GeV. Il s'agit d'une **particule** très instable, donc difficile à produire et à observer car elle se désintègre presque immédiatement. Son symbole est H^0 pour les **bosons BEH**^{F03} standards, cette notation indiquant une charge électrique nulle.

Les physiciens considèrent que le **boson BEH**^{F03} est la pièce manquante qui complète le **modèle standard**^{F05}. En effet, ils ont tenté d'imaginer d'autres modèles qui l'excluraient et ils sont arrivés à la conclusion qu'un Univers cohérent dans lequel le **boson BEH**^{F03} n'existerait pas est tout à fait possible, mais que cet Univers ne correspondrait pas à notre réalité. Le **boson BEH**^{F03} s'étant imposé comme une nécessité, le grand défi du CERN était alors de prouver son existence pour valider la théorie du **modèle standard**^{F05}. Dans le cas où le **boson BEH**^{F03} n'aurait pas été découvert, ou si une autre **particule** était apparue dans les expérimentations du LHC, il aurait fallu revoir tout le **modèle standard**^{F05} pour que celui-ci coïncide avec le monde que nous connaissons.

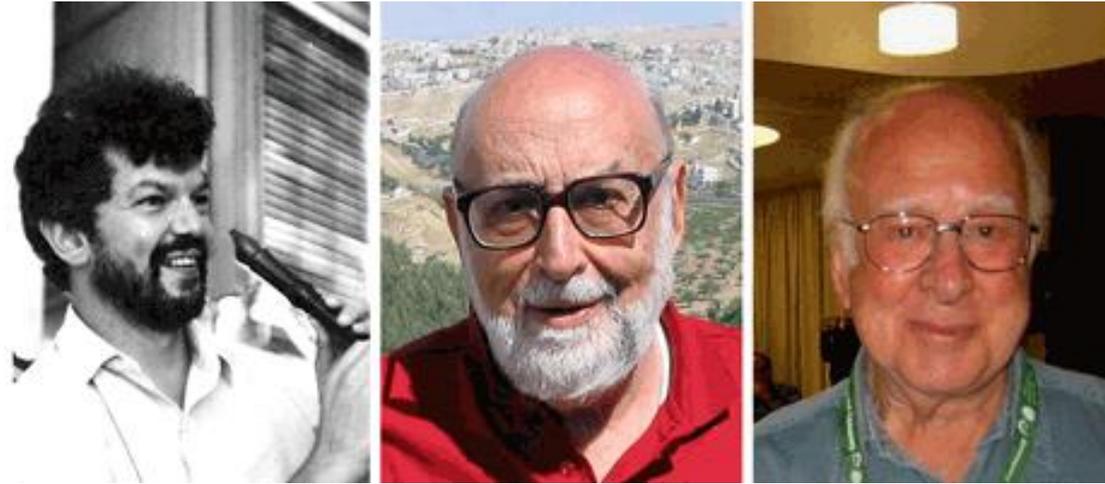


Figure 12 : De gauche à droite : Robert Brout, François Englert et Peter Higgs. Ces trois physiciens ont décrit en 1964 le mécanisme BEH et le boson du même nom. Celui-ci ne sera découvert que plusieurs décennies plus tard.

Source de l'image : Slate. Nobel de Physique 2013 : pourquoi il pourrait encore échapper au boson de Higgs [en ligne], disponible sur : <<http://www.slate.fr/life/78596/nobel-de-physique-faites-vos-jeux>> (consulté le 08/06/17).

Le **boson BEH^{F03}** est, comme toutes les **particules**, la représentation des oscillations d'un **champ** : le « **champ BEH** ». C'est tout d'abord l'existence de ce **champ** qui a été postulée par les physiciens dans le but de trouver une solution cohérente aux équations. Par la suite, le **boson BEH^{F03}** associé à ce **champ** a fait son apparition dans les calculs mathématiques. Il faut garder à l'esprit que, même si le **champ BEH**, et *a fortiori* le **boson BEH^{F03}**, sont issus de calculs mathématiques théoriques, il n'en reste pas moins que ces théories tentent de décrire la nature et ne sont pas de simples élucubrations destinées à faire fonctionner un modèle. C'est d'ailleurs ce qu'ont prouvé les physiciens du CERN en mettant en évidence l'existence du **boson BEH^{F03}**.

2) Expliquer la masse

L'origine de la masse a longtemps été une des grandes énigmes de la physique. Plusieurs théories avaient été émises, sans qu'aucune ne soit satisfaisante. Les calculs théoriques avaient par ailleurs poussé les physiciens à attribuer une masse nulle aux **bosons W** et **Z**. Or, les expériences ont révélé que ces **bosons** étaient en réalité très massifs. C'est alors que les chercheurs ont développé la théorie d'un mécanisme physique expliquant ce phénomène. Cette théorie est aujourd'hui connue sous le nom de « **mécanisme de Brout-Englert-Higgs** » ou « **mécanisme de BEH** » (ce qui valut le Prix Nobel de Physique à Peter Higgs et à François Englert en octobre 2013, Robert Brout étant décédé quelques années auparavant). On parle également de « mécanisme de brisure de symétrie ».

Le mécanisme de BEH postule l'existence d'un champ dans lequel baignerait tout l'Univers et qui donnerait une masse aux particules. C'est ce champ que l'on appelle champ BEH. Pour décrire ce phénomène, on prend souvent comme analogie l'exemple d'une foule ou d'une mélasse : à très basse température, les bosons W et Z interagissent avec le champ BEH qui les entoure, un peu comme si une personne tentait de traverser une foule compacte ou de nager à travers une mélasse épaisse. C'est cette interaction, c'est-à-dire cette dépense d'énergie, qui confère leur masse aux particules.

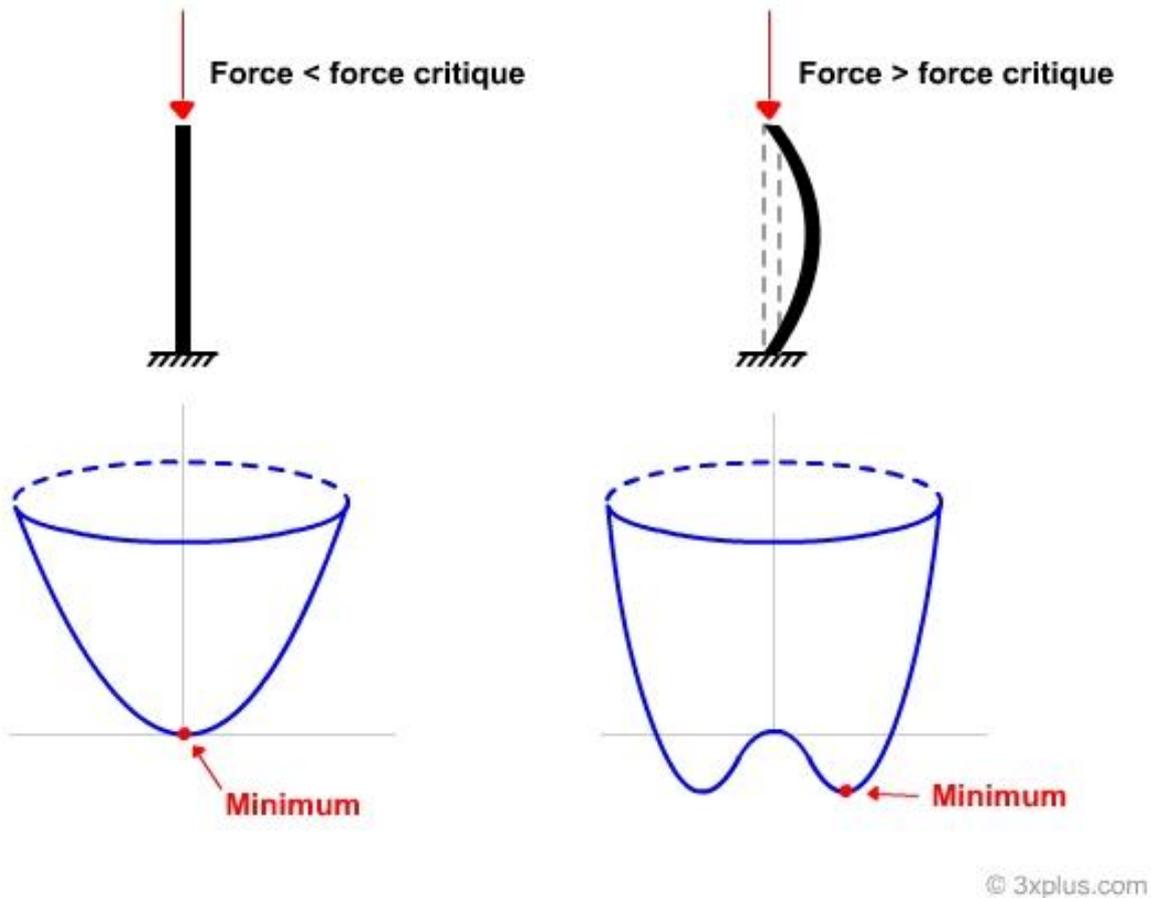


Figure 13 : Le flambage, un exemple de brisure spontanée de symétrie. Si l'on applique une force sur une barre placée verticalement, le système est symétrique par rotation par rapport à l'axe de la barre jusqu'à ce que la force appliquée dépasse une certaine valeur critique. À ce moment, la barre se tord dans une certaine direction. Les courbes représentent l'énergie potentielle de la barre.

Source de l'image : Voyage vers l'infiniment petit. Théorie électrofaible [en ligne], disponible sur <<http://www.diffusion.ens.fr/vip/pageF02.html>> (consulté le 15/06/17).

De ce fait, plus une particule interagit avec le **champ BEH**, plus sa masse est élevée. De même, les **particules élémentaires** de matière (**quarks** et **électrons**) acquièrent leur masse par couplage avec les **bosons BEH^{F03}**, donc par interaction avec le **champ BEH**. Sans ce **champ**, les **particules élémentaires** de matière n'auraient pas de masse et se déplaceraient à la vitesse de la lumière. Il serait donc impossible de former de la matière.

Ainsi, le **boson BEH^{F03}** est un **boson** particulier dans le sens où la masse ne résulte pas d'un échange de **bosons** comme c'est le cas pour les autres interactions. C'est le **champ** dont il est issu et son interaction avec les **particules élémentaires** qui donne à celles-ci leur masse. Par ailleurs, le **champ BEH** est identique en tout point de l'espace, ce qui implique que la masse des **particules** au repos est identique où qu'elles se trouvent.

3) La brisure spontanée de symétrie et la transition électrofaible

Le **mécanisme de BEH** ainsi que le **boson** associé sont responsables d'une **brisure spontanée de symétrie^{F04}** ainsi que d'une **transition de phase** électrofaible. On parle de **transition de phase** pour décrire un changement d'état d'un système (c'est par exemple ce qui se produit à 0 °C lorsque l'eau liquide devient solide). La **transition de phase** électrofaible décrit le moment, juste après le Big Bang, où les **particules élémentaires** ont acquis une masse, par le mécanisme vu précédemment.

Or, cette **transition de phase** résulte d'une **brisure spontanée de symétrie^{F04}**. La **symétrie** en physique est une notion plus large que la symétrie en géométrie car elle désigne la capacité des objets, mais également des lois de la physique, à rester insensibles à certaines transformations. La **symétrie** en physique simplifie donc les équations et rend le **modèle standard^{F05}** cohérent. Bien plus qu'un souci d'esthétisme, la **symétrie** répond à un besoin d'unification. Une **brisure de symétrie** correspond à un phénomène pour lequel la **symétrie** n'est pas respectée. L'adjectif « spontanée » indique que cette **brisure de symétrie** n'est influencée par aucun événement extérieur au système, seule la densité d'énergie (c'est-à-dire la température) gouverne la transition.

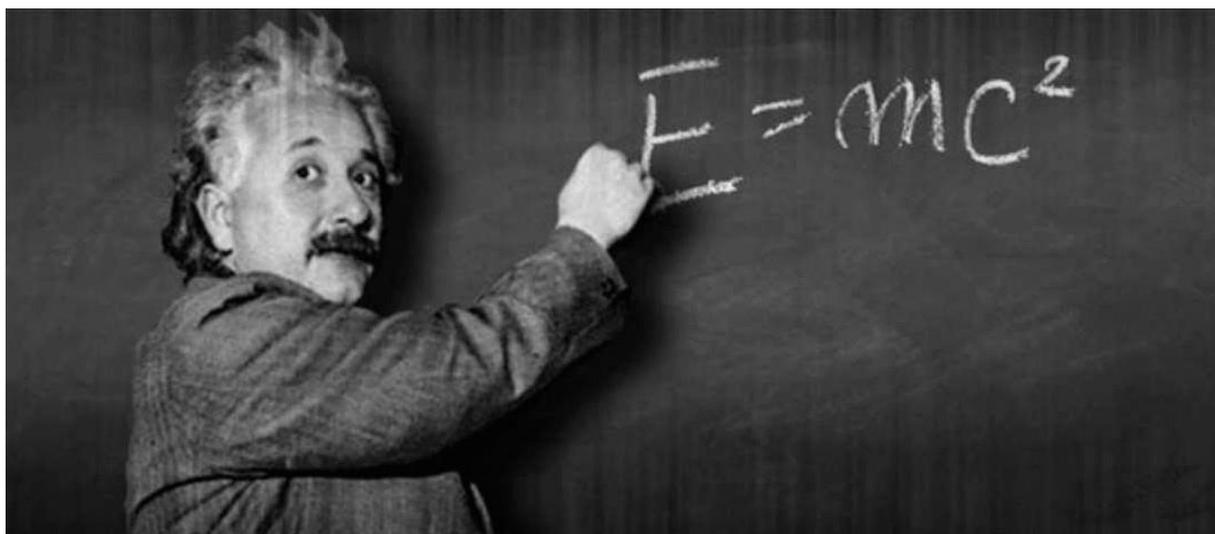


Figure 14 : Albert Einstein et sa célèbre formule qui exprime l'équivalence entre la masse et l'énergie. D'après cette équation, l'énergie peut, dans certains cas, se transformer en masse.

Source de l'image : KOBERLEIN Brian. Heart of the matter [en lign], disponible sur : <https://briankoberlein.com/2015/05/08/heart-of-the-matter/> (consulté le 08/06/17).

On a vu que le **champ BEH** confère une masse aux **bosons W** et **Z** ainsi qu'aux **quarks**. Cependant, ce phénomène n'est valable que pour des niveaux d'énergie faible. En effet, en thermodynamique, l'énergie d'un système est égale à $E=kT$ (k étant une constante et T la température exprimée en Kelvin). Or, on sait également que $E=mc^2$. On en conclut donc que la masse d'une particule est liée à la température du milieu dans lequel elle baigne. Ainsi, juste après le Big Bang, l'Univers primordial avait une température supérieure à la température équivalente à la masse du **boson BEH**^{F03}. L'Univers s'est cependant rapidement refroidi, atteignant une valeur critique à partir de laquelle le **champ BEH** a acquis une valeur non nulle. À partir de cet instant, les **bosons W** et **Z** ainsi que les **quarks** ont commencé à interagir avec le **champ** et ont acquis leur masse. C'est ce phénomène que l'on nomme **transition de phase électrofaible**. Il s'agit bien d'une **brisure de symétrie** : l'état du système juste avant la transition de phase est différent de l'état juste après.

De plus, si le **mécanisme de BEH** confère une masse aux **bosons W** et **Z**, les **photons** eux n'en ont pas. La **symétrie** entre les **bosons W** et **Z** et les **photons**, que l'on appelle **symétrie de jauge**, et qui découle d'une théorie mathématique fondamentale, est donc brisée. À très haute température cependant (c'est-à-dire pour des très forts niveaux d'énergie), la « mélasse » que constitue le **champ BEH** se fluidifie, et les **bosons W** et **Z** se déplacent plus aisément. Ils perdent leur masse, ce qui restaure la **symétrie** avec les **photons**.

On remarque par ailleurs que le **champ BEH** se comporte de façon très différente par rapport aux autres **champs**, ce qui correspond à une autre **brisure de symétrie**. En effet, on sait que les **champs** ont tendance, au repos, à se trouver à des valeurs moyennes nulles. Pour qu'un **champ** soit « au repos », il faut qu'il ait une énergie nulle, c'est-à-dire qu'il se trouve dans le vide (on parle de « valeur moyenne » d'énergie nulle car à l'échelle quantique, le **champ** présente toujours quelques soubresauts). Cependant, le **champ BEH** présente pour sa part, au repos, une valeur moyenne non nulle, ce qui signifie que son niveau d'énergie est plus élevé quand sa valeur moyenne est nulle. Ainsi, dans le vide, c'est-à-dire à un niveau d'énergie nulle, l'Univers baigne en permanence et en tout point dans le **champ BEH** : on parle de **brisure de symétrie des interactions faibles**.

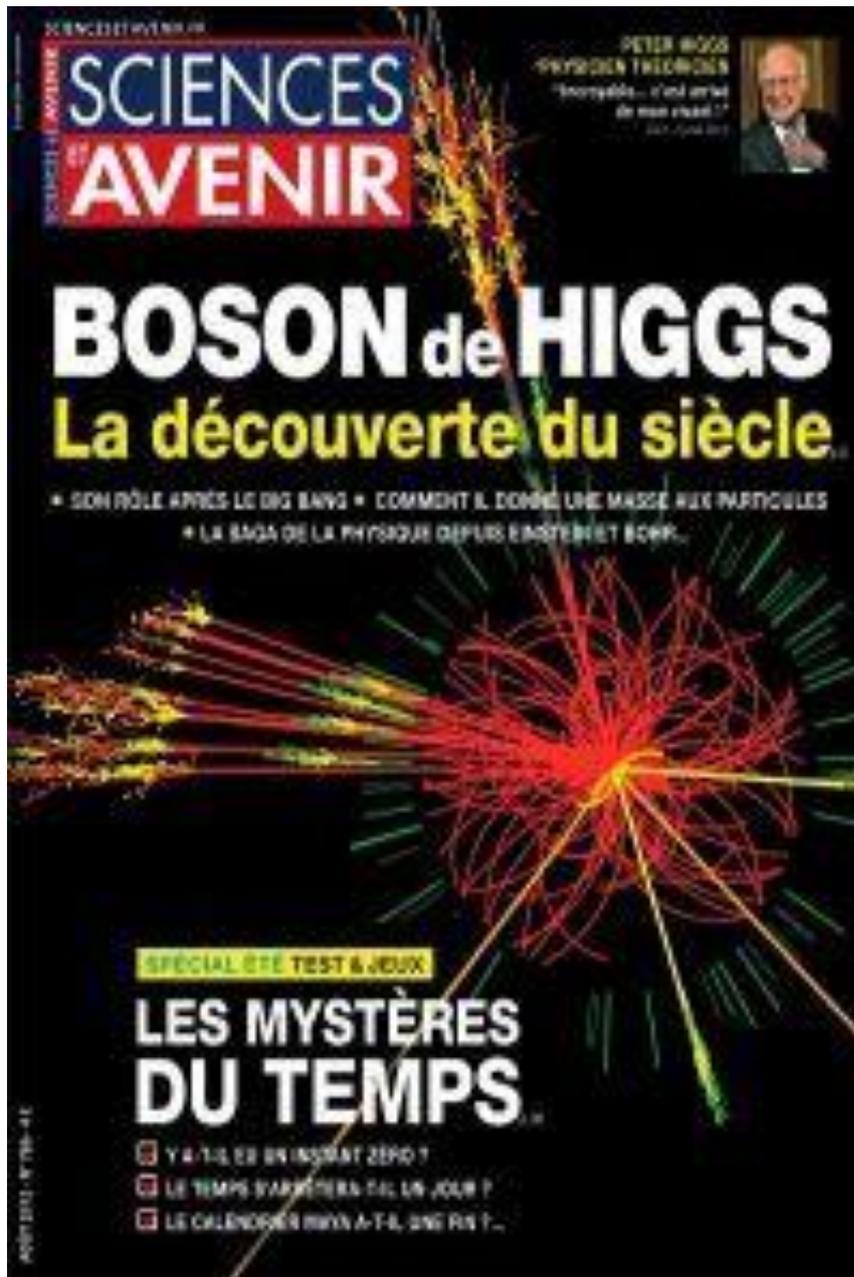


Figure 15 : Couverture du magasin Science et Avenir n°786, août 2012. La découverte du boson de Higgs constitue l'événement scientifique de l'année.

Source de l'image : Liberty Land [en ligne], disponible sur : http://libertyland.co/image/ebooks_co/sciences-et-avenir-n-786-la-decouverte-du-siecle-39962.jpg (consulté le 08/06/17).

Conclusion et ouvertures

Ainsi, la découverte du **boson BEH^{F03}** au LHC correspond à un véritable tournant en physique des particules. De nombreux chercheurs s'attendaient plutôt à découvrir d'autres particules, ou un **boson** présentant des caractéristiques différentes, ce qui les aurait conduits à revoir le **modèle standard^{F05}** et à construire de nouvelles théories. Néanmoins, s'il valide la théorie du **modèle standard^{F05}**, cet événement ne signifie pas la fin de la recherche en physique des particules, bien au contraire ! Elle ouvre la voie à d'autres théories, déjà élaborées, mais encore incomplètes à ce jour. Ces théories dépassent le cadre du **modèle standard^{F05}**, il reste donc encore beaucoup à découvrir.

Pour les théoriciens de la **supersymétrie** par exemple, il existerait pas moins de cinq **bosons BEH^{F03}** supersymétriques (dont trois chargés et deux neutres). En effet, la **supersymétrie** postule qu'à chacune des 17 **particules** connues correspond une superparticule, de même charge mais de masse différente. La **supersymétrie** va bien au-delà du **modèle standard^{F05}**, elle explique par exemple pourquoi les forces naturelles possèdent des intensités différentes. Ainsi, un des nouveaux défis du LHC sera maintenant de découvrir un partenaire supersymétrique à chacune des **particules** du **modèle standard^{F05}**. Les **bosons BEH^{F03}** supersymétriques, aussi appelés higgsinos, seraient beaucoup plus massifs et donc bien plus difficiles à créer et à détecter. Le LHC n'est donc peut-être pas suffisamment puissant pour observer ce type de particules.

Matière Noire dans les Galaxies

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

Les courbes de rotation fournissent une estimation de la Masse d'une galaxie

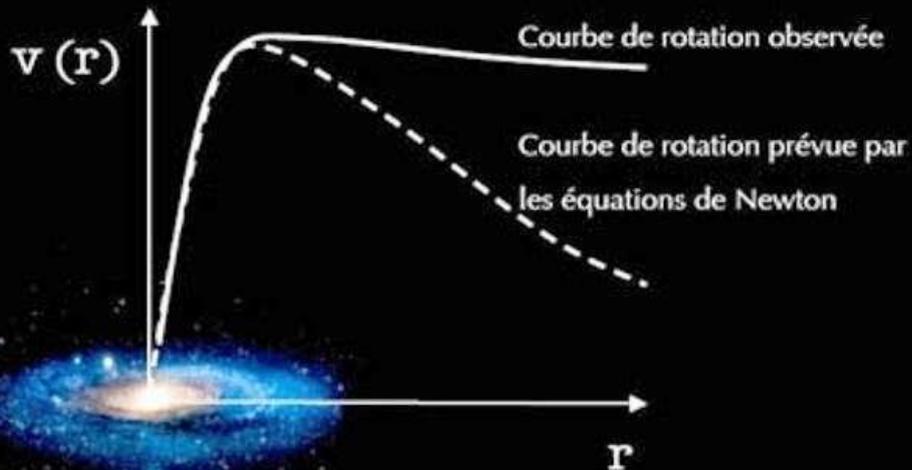


Figure 16 : La matière noire. Les observations astrophysiques laissent à penser que la matière telle que nous la connaissons n'est pas le seul constituant de l'Univers. Reste à déterminer la nature de cette mystérieuse matière inobservable par définition...

Source de l'image : Futura Sciences. Matière noire : le premier filament entre galaxies enfin observé [en ligne], disponible sur : <<http://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/astronomie-matiere-noire-premier-filament-galaxies-enfin-observe-39938/>> (consulté le 15/06/17).

De plus, le mystère de l'**antimatière** n'est pas encore totalement résolu. L'**antimatière**, composée d'antiparticules de charges opposées aux **particules** (un anti-électron par exemple, que l'on appelle aussi un positron, est une sorte d'**électron** chargé positivement), aurait été créée en même temps que la matière, dans des proportions égales, au moment du Big Bang. Or, force est de constater que notre Univers ne contient aujourd'hui pratiquement que de la matière. On sait également que lorsque qu'une **particule** de matière rencontre son homologue d'**antimatière**, les deux particules se désintègrent, libérant de l'énergie. En théorie donc, toute la matière et l'**antimatière** aurait dû s'annihiler aux prémices de l'Univers, laissant celui-ci composé uniquement d'énergie. On suppose donc que c'est l'interaction du **champ BEH** avec lui-même qui aurait permis de créer un excès de matière à l'origine d'une **brisure de symétrie** entre la matière et l'**antimatière**.

Par ailleurs, le **modèle standard**^{F05} ne décrit pas la **matière noire**. Cette dernière est par définition indétectable car elle n'émet aucun rayonnement. Et pourtant on estime que 25 % de la matière qui compose l'Univers est en réalité de la **matière noire**. Cette hypothèse est née à la suite de plusieurs observations concernant la vitesse de rotation de certaines galaxies qui tournent bien plus vite que leur masse ne le laissait suggérer. La théorie ne permet pas non plus d'expliquer ce que l'on appelle l'**énergie noire** : d'autres observations astrophysiques, comme l'accélération de l'expansion actuelle de l'Univers, suggèrent que 70 % de l'énergie de l'Univers est de nature totalement inconnue. En résumé, la matière que nous connaissons ne constitue que 5 % de la matière totale de l'Univers ! Le **modèle standard de la physique**^{F05} ne semble donc pas être la théorie ultime pour décrire la Nature...

TEXTE-SUPPORT ET SA TRADUCTION

Avertissement au lecteur

Dans la partie qui suit, le texte source (en anglais) est présenté sur la page de gauche et la traduction (en français) sur la page de droite.

Tous les passages faisant l'objet d'une explication dans la partie « Stratégie de traduction » sont surlignés en gris.

Références du texte-support

BIETENHOLZ Wolfgang. *The Higgs Particle: what it is, and why did it lead to a Nobel Prize in Physics?* 2014 [en ligne], disponible sur : <<https://arxiv.org/abs/1304.2423v2>> (consulté le 26/08/16)

The **Higgs Particle**^{F03}: what is it, and why did it lead to a Nobel Prize in Physics?

Wolfgang Bietenholz
Instituto de Ciencias Nucleares
Universidad Nacional Autónoma de México
A.P. 70-543, C.P. 04510 Distrito Federal, Mexico

*Back in 1964, the theoretical physicists François Englert and Robert Brout, as well as Peter Higgs, suggested an explanation for the fact that most **elementary particles** – such as the **electron** – have a mass. This scenario predicted a new **particle**, which has been observed experimentally only just now at **CERN (the European Organization for Nuclear Research)**. This discovery led to the Physics Nobel Prize 2013. Here we sketch in simple terms the concept of the **Higgs mechanism**, and its importance in particle physics.*

To the best of our knowledge, the world consists of only very few types of elementary particles, the smallest entities of matter, which are indivisible. They are described successfully by the Standard Model (**SM**^{F05}) of particle physics, a great scientific achievement of the 20th century. All phenomena observed so far with **elementary particles** are compatible with the **SM**^{F05}, which made a large number of correct predictions.

Le boson **BEH**^{F03} et pourquoi sa découverte a conduit à un prix Nobel en physique

Wolfgang Bietenholz

Instituto de Ciencias Nucleares

Universidad Nacional Autónoma de México

A.P. 70-543, C.P. 04510 Distrito Federal, Mexico

*En 1964, les théoriciens François Englert et Robert Brout, ainsi que Peter Higgs, ont formulé une hypothèse expliquant pourquoi la plupart des **particules élémentaires**, comme l'**électron**, ont une masse. Ce scénario prédisait l'existence d'une nouvelle **particule**, qui vient d'être observée expérimentalement au **CERN** (de l'acronyme initial Conseil européen pour la recherche nucléaire, maintenant dénommé Laboratoire européen pour la physique des particules), une découverte qui a conduit à l'attribution du prix Nobel de physique en 2013. Dans cet article, nous expliquerons de manière simple le concept du **mécanisme BEH** ainsi que son importance pour la physique des particules.*

Selon l'état des connaissances actuelles, le monde est constitué d'un nombre réduit de **particules élémentaires**, qui désignent les plus petites entités de la matière et qui sont indivisibles. Le **modèle standard de la physique des particules**^{F05}, grande réussite scientifique du XX^e siècle, les décrit avec succès. Il a également formulé de nombreuses prédictions qui se sont révélées correctes : tous les phénomènes relatifs aux **particules élémentaires** observés jusqu'à présent sont compatibles avec ce **modèle standard**^{F05}.

There is one particle that the SM^{F05} needs in order to work, which has been observed only very recently: the famous **Higgs particle^{F03}**. After intensive and careful work, the collaborations ATLAS and CMS, working at the **Large Hadron Collider** at CERN near Geneva (Switzerland), reported in December 2011 first hints of its observation. These hints were further substantiated in 2012, and the discovery of the **Higgs particle^{F03}** is now generally accepted. Therefore Englert and Higgs have been awarded the 2013 Nobel Prize in Physics for their correct prediction (Brout passed away in 2011).

Hence the **Higgs particle^{F03}** is now in the focus of interest in physics, and also in popular science. Unfortunately, the latter often denotes it as the “**particle of god^{F03}**”, which sounds spectacular, but which does not make any sense whatsoever. If one assumes the creation of the Universe by some kind of god, then all **particles** are “particles of god”, and otherwise none is linked to theology, but there is no way to assign this rôle specifically to the **Higgs particle^{F03}**. Here we hope to disseminate a better view what this myth-enshrouded **particle** is about.



*Figure 1: François Englert (on the left), Peter Higgs (center-left) and CERN director Rolf-Dieter Heuer (on the right) celebrating the discovery of the **Higgs boson^{F03}**, and the consequential Nobel Prize. The existence of this **particle** had been predicted in 1964. It was finally confirmed in 2011/2 at CERN.*

Il existe *une* particule dont le modèle standard a besoin pour fonctionner : le fameux *boson de Higgs*^{F03}, qui vient tout juste d'être observé. Les collaborations scientifiques ATLAS et CMS du **Grand collisionneur de hadrons (LHC, pour *Large Hadron Collider*)** au CERN près de Genève (Suisse) ont annoncé en décembre 2011 avoir détecté les premiers indices de sa présence, au terme de recherches intensives et minutieuses. Ces indices ont ensuite été confirmés en 2012. Aujourd'hui, la découverte du **boson de Higgs**^{F03}, ou plutôt **boson BEH**^{F03} pour **Brout-Englert-Higgs**, est largement admise. François Englert et Peter Higgs ont reçu le prix Nobel de physique en 2013 pour leurs prévisions (Robert Brout étant décédé en 2011)

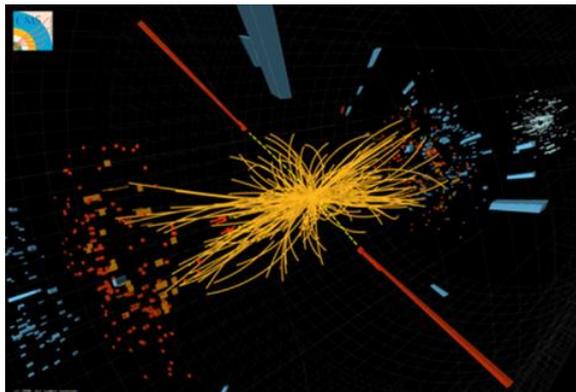
Par conséquent, le **boson BEH**^{F03} est à présent au centre des préoccupations du monde de la physique ainsi que de la vulgarisation scientifique. Malheureusement, les auteurs de ce domaine le surnomment souvent la « **particule de Dieu**^{F03} », une appellation spectaculaire mais sans fondement. En effet, si l'on considère que la création de l'Univers est l'œuvre d'une entité divine, alors toutes les **particules** sont des « particules de Dieu » ; autrement, aucune **particule** n'est liée à la théologie. Dans tous les cas, il n'y a aucune raison d'attribuer un tel titre au **boson BEH**^{F03}. Ici, nous souhaitons offrir une vision plus proche de la réalité de cette **particule** auréolée de mystère.



Fig. 1 : François Englert (à gauche), Peter Higgs (à sa droite) et Rolf-Dieter Heuer, directeur du CERN [Ndt :de 2009 à 2015] (à droite) célèbrent la découverte du boson de Higgs et le prix Nobel qui en a découlé. L'existence de cette particule a été prédite en 1964 avant d'être finalement confirmée au CERN en 2011-2012.

The SM^{F05} is formulated as a **Quantum Field Theory**. In physics, **fields** are abstract functions of space and time, i.e. on each point and at any time some **field** value is introduced¹. This could be the temperature or the pressure in each point of a hall during one hour, or in an ocean during one year. A **field** may also have several components, which can be of a more abstract kind than real numbers² If we assign a specific **field** value to each **space-time** point under consideration, we obtain one configuration.

The occurrence of **elementary particles** is described by various types of **fields**. Their properties and dynamics are characterized by a function of the **field** configurations involved, known as the **action**. Classical field theory only considers one specific configuration of each **field**, the one that minimizes the **action**. For instance, if one performs this minimization for the electromagnetic **fields**, one obtains the Maxwell equations.



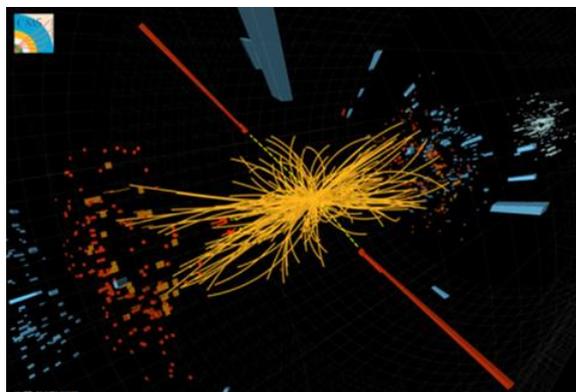
*Figure 2: Tracks of **elementary particles** detected by the CMS Experiment at CERN in Geneva. The picture shows an **event**, which could give a hint about the **Higgs particle**^{F03}, with two high energy **photons** (red bars) and other **particles** (yellow lines), generated in a powerful **proton-proton** collision.*

¹ Here we refer to the “functional integral formulation” of **Quantum Field Theory**. Alternatively, the “canonical formulation” deals with operator valued fields, but the resulting physics is the same.

² **Field** values can also be given by vectors, tensors or matrices (representing group elements), and their components could be complex numbers, or anti-commuting “Grassmann numbers”.

Le **modèle standard**^{F05} est une **théorie quantique des champs**. En physique, les **champs** sont des fonctions abstraites de l'espace et du temps, c'est-à-dire qu'à chaque point de l'espace et à chaque instant correspond une valeur de **champs**¹. Il peut s'agir par exemple de la température ou de la pression en tout point d'une salle pendant une heure, ou dans un océan durant une année. Un **champ** peut également être constitué de plusieurs composantes, qui peuvent le rendre plus abstrait qu'un simple nombre réel². Si l'on attribue une valeur particulière de **champ** à chaque point de l'**espace-temps** considéré, on obtient une configuration globale du **champ**.

L'état des **particules élémentaires** est décrit par différents types de champs. Leurs propriétés et leurs dynamiques sont données par une fonction qui intègre les différents états d'un **champ** et qu'on appelle l'**action**. La **théorie des champs** classiques ne prend en compte qu'une seule configuration pour chaque **champ**, celle qui minimise l'**action**. L'application de cette minimisation aux **champs** électromagnétiques par exemple conduit aux équations de Maxwell.



*Fig. 2 : Trajectoires des **particules élémentaires** détectées par l'expérience CMS au CERN à Genève. Cette image représente un **événement** candidat dans la recherche du **boson BEH**^{F03}. Il s'agit d'une puissante collision **proton-proton** dont les produits sont deux **photons** à haute énergie (lignes rouges) et d'autres **particules** (courbes jaunes).*

¹ Ici, nous faisons appel à la méthode des « intégrales de chemin » de la théorie quantique des champs. À défaut, la quantification « canonique », qui revient à considérer les champs comme des opérateurs, conduit aux mêmes prédictions physiques.

² Les valeurs de **champs** peuvent également être exprimées sous forme de vecteurs, tenseurs ou matrices (qui représentent des ensembles d'éléments) et leurs composantes peuvent être des nombres complexes ou des « nombres de Grassmann » anticommutants [Ndt : c'est-à-dire tels que $E_1 \times E_2 = -E_2 \times E_1$, contrairement à l'algèbre classique.]

Quantum Field Theory, however, keeps track of the sum over all possible configurations. The one with minimal **action** or energy³ – it could be the zero **fields** – corresponds to the absence of particles, the vacuum. The additional energy that it takes for a fluctuation around this vacuum to generate just one **particle** is the mass of this **particle**.

Various **fields** – and the associated **particles** – may feel each other, i.e. they can interact, if the **action** contains a product of distinct **fields** that occur at the same point. In our understanding of the emergent complicated systems, **symmetries** play a key rôle. A **symmetry** is a group of transformations of the **fields**, which do not alter the action, so they are in general not observable. We distinguish **global** and **local symmetries**. A **global symmetry** allows us to change a **field** in the same way all over space and time – like an Aerobic session where many people move simultaneously in the same manner. **Local symmetries** are even more stringent: here the **field** can be changed in each space-time point in a different way, and still the **action** remains invariant. That appears like a chaotic Aerobic session, where everyone moves as he or she likes.

If one requires such a **local symmetry** to hold, a huge a number of **field** transformations are allowed, and it is a delicate challenge to maintain invariance under all of them. For the actions that one usually starts with, this is not the case – they do change under most local **field** transformations. However, one can repair the invariance by introducing additional **fields**, which transform exactly such that these changes are compensated. These are the **gauge fields**, which transmit an interaction between the “matter **fields**” that we had before. Moreover they represent own kinds of **particles**, such as the **photon** (the **particle** of light). In fact, the dominant interactions among the SM^{F05} particles are transmitted by a set of **gauge fields**. This only works if the **local symmetry** is preserved exactly.

³ For simplicity, our discussion treats the **action** and energy as equivalent properties of a given **field** configuration. A transition to “imaginary time” is – for equilibrium states – a mathematically allowed transformation, which justifies this identification.

La **théorie quantique des champs**, pour sa part, garde une trace de la somme de toutes les configurations possibles. Celle dont l'**action** ou l'énergie est minimale³ (il peut s'agir du cas où la valeur des **champs** est nulle) correspond à l'absence de **particules**, c'est-à-dire le vide. L'énergie supplémentaire dont une fluctuation quantique a besoin pour créer une **particule** correspond à la masse de cette **particule**.

Différents **champs**, ainsi que leurs **particules** associées, peuvent ressentir leurs présences mutuelles, c'est-à-dire qu'ils peuvent interagir entre eux, si l'**action** fait intervenir le produit de différents **champs** présents au même point. Pour les systèmes complexes, la notion de **symétrie** est fondamentale. Une **symétrie** désigne un ensemble de transformations d'un champ qui ne modifie pas l'**action**, c'est pourquoi elle n'est généralement pas observable. On distingue les **symétries globales** des **symétries locales**. Une **symétrie globale** affecte tous les points de l'espace-temps d'un champ de la même manière, un peu comme une session d'aérobic où tous les participants bougent en même temps et de la même façon. Une **symétrie locale** est encore plus contraignante : tous les points de l'espace-temps d'un **champ** peuvent varier différemment sans que l'**action** ne soit modifiée. Cette situation est similaire à une session d'aérobic où chaque participant bougerait selon ses envies.

Afin de préserver la **symétrie locale**, il est possible de modifier un grand nombre de paramètres du **champ**. Néanmoins, il devient alors difficile de faire en sorte que le **champ** global soit invariant. Les transformations auxquelles on peut penser spontanément ne permettent pas de préserver la **symétrie locale**. Cependant, il est possible de rétablir l'invariance en introduisant des **champs** supplémentaires qui agissent de telle sorte que les changements provoqués sont exactement compensés. Il s'agit des **champs de jauge**, qui transmettent des interactions entre les « **champs de matière** » existants dans le système de départ. Par ailleurs, ces **champs** correspondent eux-mêmes à des **particules**, comme le **photon** (la **particule** de la lumière). Il s'avère que les principales interactions entre les particules du **modèle standard**^{F05} sont transmises par un ensemble de **champs de jauge**. Cependant, il est nécessaire que la **symétrie locale** soit préservée.

³ Pour simplifier, nous considérons ici que l'**action** et l'énergie sont des propriétés équivalentes pour une configuration de champ donnée. En effet, le passage en « temps imaginaire » est, à l'équilibre, une transformation mathématique qui justifie cette identification.

When this concept was developed, people noticed its virtues, but also a severe problem: the requirement of a **local symmetry** does not allow us to include any term in the **action**, which would simply specify some energy that it costs to “switch on the **field**”, i.e. to deviate from a zero configuration, and therefore to represent a *particle mass* in its simplest form. Still we know that **particles** like the **electron** do have a mass. This was the puzzle that physics was confronted with in the 1950s, and which was later overcome by the famous **Higgs mechanics**.

The idea of this mechanism is that one does not necessarily need to refer to the zero **field** configuration. Instead one couples for instance the **electron field** to a new *Higgs field*, which is endowed with a self-interaction such that it takes its energy minimum for non-zero configurations. Then fluctuations away from this minimum require some energy, specifying a **particle mass**, while fully preserving the **local symmetry**. Now there is a whole set of non-zero **field** configurations corresponding to the minimal energy. The configurations in this set are related by **local symmetry** transformations, so physics is indeed invariant, and they all correspond to the same vacuum.

To provide an intuitive picture, we refer to a historic Gedankenexperiment (a “thought experiment”), known as “Buridan’s donkey”. Jean Buridan was a French scholastic philosopher of the 14th century, who was interested in logic, mechanics, optics, and in the existence and meaning of a “free will”.

[...]

.

Lorsque les physiciens ont développé ce concept, ils ont tout de suite perçu ses vertus mais aussi son grand défaut : la nécessité d'avoir une **symétrie locale** empêche l'introduction d'un nouveau terme dans le calcul de l'**action** qui permettrait de définir clairement le type d'énergie nécessaire pour « allumer » le **champ**, c'est-à-dire lui faire acquérir une valeur non nulle. La théorie ne permettait donc pas de donner une représentation simple de la masse d'une **particule**, or nous savons qu'il existe des **particules**, comme l'**électron**, qui possèdent effectivement une masse. Les physiciens ont été confrontés à cette énigme dans les années cinquante, avant qu'elle ne soit résolue par le célèbre **mécanisme BEH**.

Celui-ci repose sur le principe qu'il n'est pas nécessaire de partir de la configuration où le **champ** est nul, mais qu'il est possible par exemple de coupler le **champ** d'**électrons** à un nouveau **champ**, le **champ de Higgs**, ou **champ BEH**, qui interagit avec lui-même. Ainsi, son énergie minimale est atteinte pour une valeur de **champ** non nulle. Toute fluctuation différente de cette valeur a besoin d'énergie, laquelle correspond à la masse d'une **particule**, rétablissant ainsi la **symétrie locale**. Il existe un vaste ensemble de valeur non nulle pour lesquelles l'énergie est minimale. Ces différentes configurations sont liées entre elles par des transformations de **symétries locales**. Elles présentent donc les mêmes propriétés physiques et correspondent au même état de vide.

Afin de mieux visualiser ce concept, nous allons nous livrer à la célèbre *Gedankenexperiment* (« expérience de pensée ») connue sous le nom de « l'âne de Buridan ». Jean Buridan, philosophe scolastique du XIV^e siècle, s'est intéressé à la logique, la mécanique, l'optique ainsi que l'existence et la signification de la notion de « libre arbitre ».

[...]

As a general background, even before classical mechanics was worked out mathematically⁴, scholars often had an entirely deterministic view of the world. In fact, mechanics seems to suggest that the course of any future evolution is strictly determined by the present state of the Universe, given by the current positions and velocities of all objects. Then the future should follow an inevitable pattern, like a huge machine proceeding step by step in a fully predictable way. Without knowledge about **quantum physics** (and discarding sudden jumps against the Laws of Nature), it is not obvious to find an objection against this picture.

However, its strict application would even capture mental processes in the brains of animals and human beings. This conclusion appeared confusing, since it implies that our “free will” is a plain illusion. In the context of this discussion, Buridan’s donkey was invented as a fictitious, extreme example.⁵ One imagines a hungry donkey, to whom one offers two piles of hay. However, they are fully identical and placed at exactly the same distance to its left and to its right. Hence the donkey has to make a decision for one direction in order to be able to eat. If nothing favors one of the piles, and its mind is fully deterministic, the poor donkey will stay in the middle and finally starve to death, although its salvation is so close. Taking a sudden decision corresponds to a process, which is denoted as “**Spontaneous Symmetry Breaking**^{F04}” in **Quantum Field Theory**. Upon arrival at one of the piles, the donkey does not perceive the left/right symmetry (or “parity”) anymore.

⁴ Buridan himself worked on a theory of “impetus”, which is similar to our modern term “momentum”

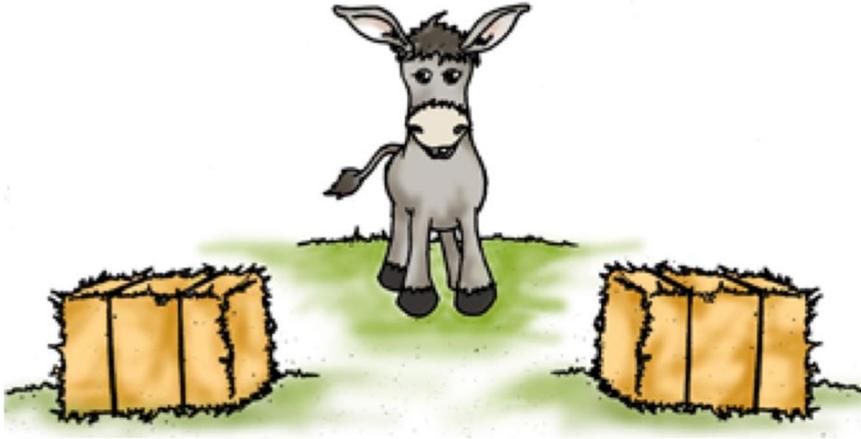
⁵ According to some sources, it was actually invented by Buridan’s opponents to ridicule the deterministic point of view, by *reductio ad absurdum*

En règle générale, les théoriciens de l'époque avaient une vision du monde entièrement déterministe, et ce avant même que la mécanique classique ne soit formulée mathématiquement.⁴ En effet, la mécanique laisse à penser que l'évolution de l'Univers est strictement déterminée par la position et la vitesse de tous ses composants à l'instant présent. Ainsi, l'Univers serait condamné à un inéluctable destin, tel une immense machine fonctionnant de manière entièrement prévisible. Si l'on ignore la **physique quantique**, il est difficile de contredire ce raisonnement sans violer les lois de la Nature.

Cependant, l'application stricte de cette théorie devrait également concerner les processus mentaux se déroulant dans le cerveau des animaux et des humains. Cette troublante conclusion impliquerait que notre « libre arbitre » n'est qu'une simple illusion. L'exemple de l'âne de Buridan constitue un cas fictif et extrême concernant cette question⁵. Il s'agit d'un âne affamé placé en face de deux bottes de foin. Or, celles-ci sont strictement identiques et parfaitement équidistantes de l'âne, l'une à sa gauche, l'autre à sa droite. L'âne doit alors décider quelle direction choisir afin de pouvoir se rassasier. Si aucune botte ne présente d'avantage comparé à l'autre, et que l'esprit de l'âne est entièrement déterministe, le pauvre animal restera immobile jusqu'à mourir de faim, alors même que son salut est tout près. Une soudaine prise de décision correspond à un phénomène appelé « **brisure spontanée de symétrie**^{F04} » en **théorie quantique des champs**. Une fois arrivé à l'une des deux bottes, l'âne ne perçoit plus la symétrie gauche/droite (la « parité »).

⁴ Buridan lui-même a développé la théorie de « l'impetus », une notion similaire à la « quantité de mouvement » de la physique moderne.

⁵ D'après certaines sources, cet exemple aurait été inventé par les adversaires de Buridan afin de tourner en ridicule le point de vue déterministe par un raisonnement par l'absurde.



*Figure 4: Buridan's donkey between two piles of hay, faced with the dilemma if it should walk to the left or to the right in order to eat. Taking a decision corresponds to the process of **Spontaneous Symmetry Breaking**^{F04}.*

To translate this setting into the **Higgs mechanism**, we should better talk about a thirsty donkey in the center of a circular water ditch. Now there is a continuous set of favored positions – corresponding to the energy minimum – anywhere next to the ditch. If we sum over all possible positions (all possible “donkey **field** configurations”), these favored positions provide the statistically dominant contributions. So if we evaluate the expectation value of its water supply, we conclude that the quantum donkey is better off than its classical cousin: it is able to drink. This reveals the importance of **Quantum Field Theory**⁶: in fact, it can be live saving!

⁶ Even in **Quantum Mechanics** – the theory that preceded **Quantum Field Theory** in the first half of the 20th century – the phenomenon of **Spontaneous Symmetry Breaking**^{F04} does not occur

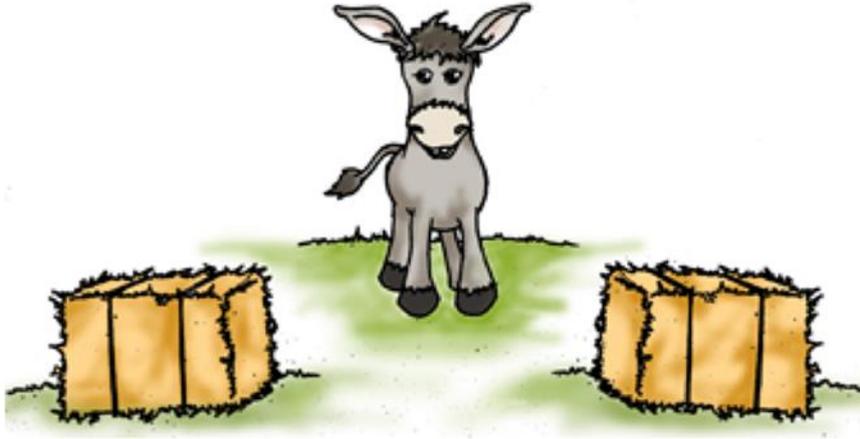
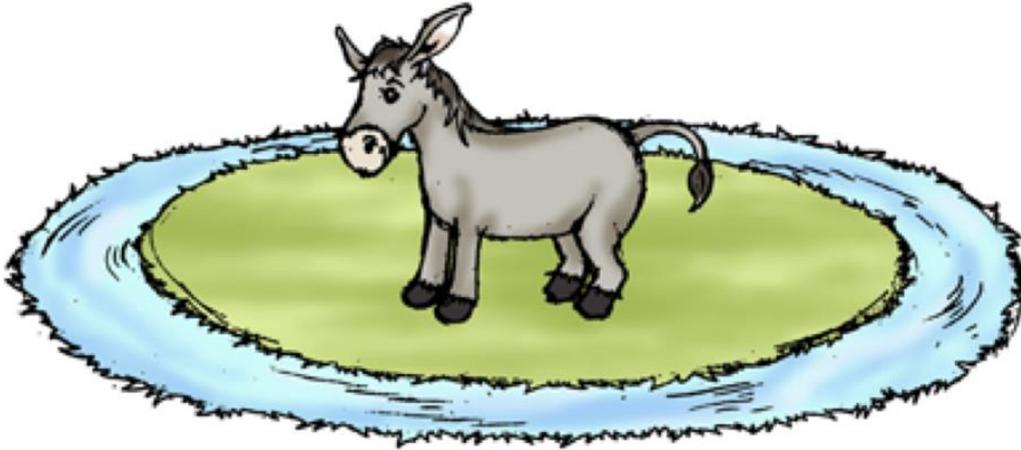


Fig. 4 : L'âne de Buridan entre deux bottes de foin en proie à un dilemme : doit-il aller à gauche ou à droite s'il veut manger ? La prise d'une décision correspondrait au phénomène de **brisure spontanée de symétrie**^{F04}.

Cette analogie permet également d'expliquer le **mécanisme BEH**, mais cette fois en prenant un âne assoiffé situé au centre d'un cours d'eau circulaire. Ici, il existe un ensemble continu de positions privilégiées, c'est-à-dire associée à un minimum d'énergie pour étancher sa soif, et qui correspondent à tous les points du cours d'eau selon l'orientation initiale de l'âne. Si l'on fait la somme de toutes les positions possibles, c'est-à-dire toutes les configurations du **champ** « âne » possibles, ces positions privilégiées sont statistiquement dominantes. On peut ainsi calculer la valeur de l'espérance quantique de son approvisionnement en eau pour en conclure que l'âne quantique s'en sort mieux que son cousin classique : au final, il peut boire. On voit bien là l'importance de la **théorie quantique des champs**⁶ : elle peut vous sauver la vie !

⁶ Dans la **mécanique quantique** (théorie développée pendant la première moitié du XX^e siècle et dont est issue la **théorie quantique des champs**), le phénomène de **brisure spontanée de symétrie**^{F04} ne se produit pas non plus.



*Figure 5: A modified donkey, now thirsty and surrounded by a water ditch. There is an infinite number of directions where it could go in order to drink. Its preferred positions are displaced from the starting point (at zero), next to the water. If it arrives there somehow, a motion along the ditch corresponds to a massless **particle**, known as a **Nambu-Goldstone boson**.*

Once the donkey has attained the water, it can freely move along the ditch and keep on drinking. This kind of motion keeps the energy at its minimum. The corresponding fluctuation of the donkey field configuration does not cost any energy, hence it corresponds a massless **particle**, known as a **Nambu-Goldstone boson**.

If we now couple the donkey **field** – which takes the rôle of the **Higgs field** – to other **fields**, such as the one of the **electron**, the shift of the favored position away from the center (i.e. away from the zero configuration) yields the **electron** mass.



*Fig. 5 : Un autre âne, assoiffé cette fois et entouré par un cours d'eau circulaire. Le nombre de directions possibles pour aller boire est infini. L'âne se trouve au point de départ (zéro), tandis que les positions privilégiées sont situées sur les bords du cours d'eau, équidistantes de zéro. Si l'âne y parvient d'une façon ou d'une autre, il peut se déplacer le long du ruisseau. Ce déplacement correspond à une **particule** dépourvue de masse, le **boson de Nambu-Goldstone**.*

Une fois que l'âne a atteint l'eau, il peut se déplacer librement le long du ruisseau et continuer à boire. Ce déplacement permet de garder l'énergie à son niveau minimal. La variation de la configuration du **champ** « âne » résultante ne nécessite aucun apport d'énergie, ainsi ce champ correspond à une **particule** de masse nulle, connue sous le nom de **boson de Nambu-Golstone**.

À présent, si le **champ** « âne », qui joue le rôle du **champ BEH**, est couplé à un autre **champ**, le **champ d'électrons** par exemple, le déplacement depuis le centre (c'est-à-dire la valeur de champ nulle) vers la position privilégiée correspond à la masse d'un **électron**.

With gauge fields included, all positions at the ditch (with the energy minimum) are physically identical, since they are now related by **local symmetry** transformations. Thus a walk along the ditch is not a real motion anymore, and the **Nambu-Goldstone bosons** disappear again. Instead some of the **gauge particles** pick up a mass, in a subtle indirect way, which fully preserves the **local symmetry**.⁷

This happens for a suitable system at low temperature (in an infinite volume). The situation at high temperature could be sketched as pouring a lot of water into the area, hence the donkey does not need to move in order to drink. Then the procedure works with respect to its zero position, and no **symmetry breaking** occurs.

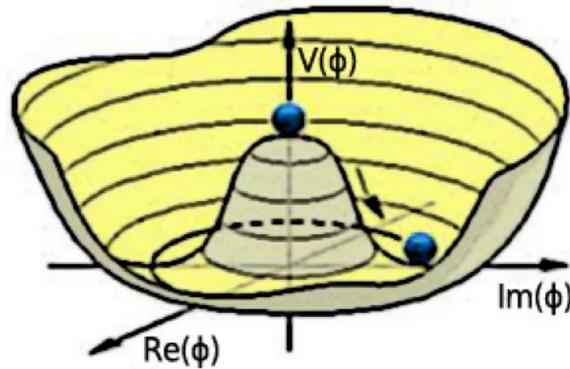


Figure 6: A potential $V(\phi)$ for a complex scalar **field** ϕ , which takes its minimal energy for non-zero **field** configurations $|\phi| > 0$. There is a continuous set of minima. Fluctuations within this set correspond to a **Nambu-Goldstone boson**. Once the **field** is gauged, all minima are physically identical, the **Nambu-Goldstone boson** disappears, but the **gauge field** picks up a mass.

⁷ The literature often calls this process a “spontaneous gauge symmetry breaking”, although any **local symmetry** (or **gauge symmetry**) transformation preserves the physical state, which solely describes the donkey’s proximity to the water. Therefore, strictly speaking the **gauge symmetry** does not break. In the **SM^{F05}** this process provides masses for the three **gauge bosons**^{F02} of the **weak interactions** (**W[±]** et **Z⁰**), and for all the **fermions** (**quarks** and **leptons**), but not for the **photon** and the **gluons**, which transmit the **electromagnetic** and the **strong interaction**, respectively.

Si l'on prend en compte les **champs de jauge**, toutes les positions au bord du ruisseau (c'est-à-dire les positions d'énergie minimale) sont identiques d'un point de vue physique, étant donné qu'elles sont liées entre elles par des transformations de **symétrie locale**. Ainsi, le mouvement le long du ruisseau ne constitue plus un déplacement à proprement parler, et les **bosons de Nambu-Goldstone** disparaissent au profit de certaines **particules de jauge** qui acquièrent ainsi une masse de manière indirecte et détournée, tout en préservant la **symétrie locale**⁷.

Ce mécanisme se produit pour des systèmes à basse température et pour un volume infini. À température élevée, la situation est un peu différente : cette fois, l'endroit où se trouve l'âne est recouvert d'eau, il n'a donc pas besoin de se déplacer pour boire. Ainsi, **aucune brisure de symétrie** ne se produit car il reste à sa position zéro.

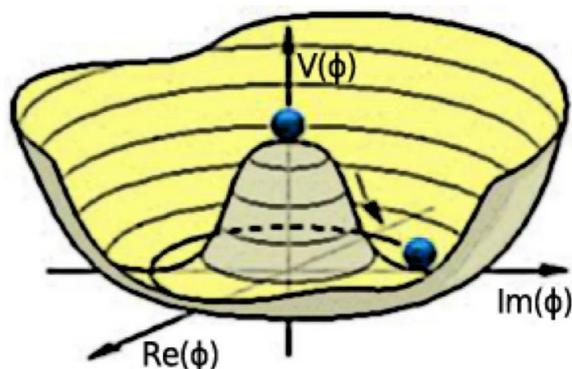


Fig. 6 : Un potentiel $V(\phi)$ correspondant à un **champ** scalaire complexe ϕ , dont le minimum d'énergie est atteint pour une valeur non nulle du **champ**, soit $|\phi| > 0$. Il existe un continuum d'état d'énergie minimale. Des fluctuations au niveau de ces états correspondent à un **boson de Nambu-Goldstone**. Une fois que le **champ** a atteint sa valeur minimale, tous les autres états d'énergie minimale sont identiques. Le **boson de Nambu-Goldstone** disparaît alors, mais le **champ de jauge** acquiert une masse.

⁷ Dans la littérature spécialisée, ce mécanisme est souvent appelé « brisure spontanée de symétrie de jauge ». Cependant, toute transformation de **symétrie locale** (ou **symétrie de jauge**) conserve l'état physique, dans ce cas la proximité de l'âne par rapport à l'eau. Ainsi, la **symétrie de jauge** n'est pas brisée à proprement parler. Dans le **modèle standard**^{F05}, c'est ce phénomène qui donne une masse aux trois **bosons de jauge**^{F02} de l'**interaction faible** (W^\pm et Z^0) et à tous les **fermions** (les **quarks** et les **leptons**), mais pas aux **photons** ni aux **gluons**, qui portent respectivement l'**interaction électromagnétique** et l'**interaction forte**.

Let us repeat that any deviation away from the vacuum state costs energy, and here we capture the masses, for the **electron** and for other **particles**, without breaking the sacred principle of **local symmetry**. Several physicist noticed this property in the early 1960s. A corresponding mechanism was known in solid state physics, and applied also to particle physics by François Englert and Robert Brout (in Bruxelles, Belgium), and independently by Peter Higgs. In particular, it was Peter Higgs – at that time a young lecturer at the University of Edinburgh (Scotland) – who (encouraged by Yoichiro Nambu) pointed out that this mechanism, when applied to particle physics, brings about a new **particle**, which should be observable. Its mass, however, could not be predicted⁸ and the emerging mass of the other **SM^{F05} particles** neither. This may be considered as a short-coming of the **SM^{F05}**: it contains a number of free parameters (about 26, neutrino masses included), which one would like to reduce. On the other hand, for describing practically the whole Universe, this number is not alarming. For comparison, many fashionable **theories beyond the SM** (like “**supersymmetry**”) do not only lack any observational support, but they introduce in addition an avalanche of further free parameters.

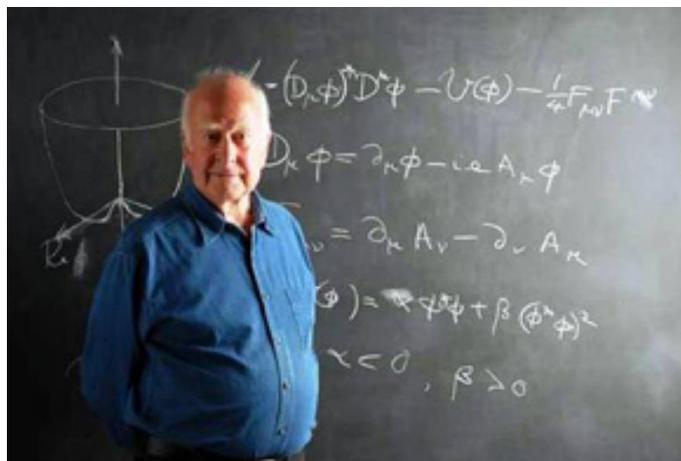


Figure 7: Peter Higgs, explaining the theory that predicts the famous **particle** named after him.

⁸ The “triviality” of the Higgs model (see below) implies at least an upper limit for the theoretically possible mass of the **Higgs particle^{F03}**.

N'oublions pas que toute variation par rapport à l'état de vide requiert de l'énergie. Celle-ci se retrouve sous la forme de la masse des **électrons** et des autres **particules** sans que le principe sacré de **symétrie locale** ne soit brisé. Les physiciens avaient remarqué cette propriété dès le début des années soixante. En physique des solides, un mécanisme similaire était déjà connu. À Bruxelles (Belgique), François Englert et Robert Brout l'ont appliqué à la physique des particules. C'est également ce qu'a fait, de manière indépendante, Peter Higgs, à l'époque jeune chargé de cours à l'université d'Édimbourg (Écosse). C'est surtout ce dernier qui, encouragé par Yoichiri Nambu, a remarqué que ce mécanisme, appliqué à la physique des particules, entraînait l'apparition d'une nouvelle **particule** qui devait être observable. Cependant, il était impossible de prévoir sa masse⁸ ainsi que la masse résultante des autres **particules** du **modèle standard**^{F05}. D'aucuns diront que c'est là une des lacunes du **modèle standard**^{F05}, qui compte un certain nombre de paramètres libres (environ 26, si l'on inclut la masse des neutrinos), un nombre que les physiciens souhaiteraient réduire. D'un autre côté, cette théorie décrivant quasiment l'ensemble de l'Univers, on peut considérer que ce nombre n'a rien d'inquiétant. De nouvelles **théories au-delà du modèle standard** (comme la « **supersymétrie** »), introduisent quant à elles une multitude de paramètres libres supplémentaires, en plus de n'avoir pas été confirmées expérimentalement.

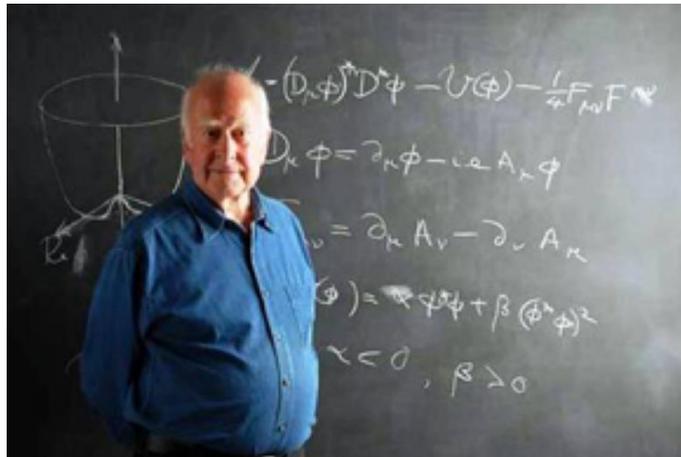


Fig. 7 : Peter Higgs expliquant la théorie prédisant l'existence de la célèbre **particule** qui porte son nom.

⁸ La « trivialité » du modèle de Higgs (voir plus loin) implique qu'il existe au moins une limite supérieure à la masse théorique possible du **boson BEH**^{F03}.

Now the observation of the **Higgs particle**^{F03} has been confirmed, so we can feel proud of a very well-established and elegant theory that describes all the **elementary particles** that we know of. So are we then done, and physicist will end up unemployed?

Not really, even the great **SM**^{F05} has its short-comings, that we still have to work on:

- It does not capture all interactions: the most obvious one in contemporary life, **gravity**, is not included. Intensive attempts (over several decades) to incorporate it have failed. **Gravity** is described successfully by a different theoretical framework, Einstein's Theory of General Relativity, which seems simply incompatible with **Quantum Field Theory**. While this is an outstanding challenge, for practically all issues in particle physics it can be ignored, since gravitational effects are usually negligible in the microscopic context (an exception was the very early Universe).
- We have nowadays indirect but clear evidence of further ingredients to the Universe, denoted as **Dark Matter** and **Dark Energy**. Their nature is mysterious, and the **SM**^{F05} cannot capture them – another tremendous challenge to work on.
- Even with known matter – consisting of the **SM**^{F05} **particles** – complex structures, as they occur for instance in biology, are not simply understood based on the **SM**^{F05} as the fundamental theory. Here a deep understanding of the collective behavior of many **particles** has to be supplemented, which has been accomplished only in part.

L'annonce de l'observation du **boson BEH^{F03}** confirme une théorie solide et élégante qui décrit toutes les particules élémentaires connues. Les physiciens ont de quoi se réjouir. Mais cette découverte sonne-t-elle en même temps le glas de la physique moderne ?

Pas tout à fait. Et pour cause, le fameux **modèle standard^{F05}** présente encore quelques lacunes à combler :

- Il reste une force qu'il ne parvient pas à décrire : la **gravité**, celle-ci étant pourtant l'**interaction** qui nous est la plus familière. Des décennies de recherches intensives n'ont pas réussi à l'intégrer à la théorie. La **gravité** s'explique formidablement grâce à un autre cadre théorique, la théorie de la relativité générale d'Einstein, qui semble être tout bonnement incompatible avec la **théorie quantique des champs**. Bien qu'il s'agisse d'un incontestable défi pour les physiciens, la **gravité** peut être ignorée dans quasiment toutes les questions de physique des particules, car ses effets sont généralement négligeables à l'échelle microscopique (hormis au moment de l'Univers primordial).
- Il existe aujourd'hui des preuves indirectes mais irréfutables de l'existence d'ingrédients supplémentaires constituant l'Univers : la **matière noire** et l'**énergie noire**. Leur nature reste cependant mystérieuse, et le **modèle standard^{F05}** n'est pas en mesure de les décrire. Une nouvelle page de la physique qui reste à écrire.
- Par ailleurs, si le **modèle standard^{F05}** décrit les constituants de la matière telle que nous les connaissons, il ne permet pas d'expliquer certaines structures complexes que l'on retrouve par exemple en biologie. Pour ce faire, une meilleure compréhension du comportement collectif d'un grand ensemble de **particules** est nécessaire. Beaucoup reste encore à faire dans ce domaine balbutiant.

- Finally the SM^{F05} has an intrinsic reason for being incomplete. A naïve treatment of **Quantum Field Theories** yields infinities in quantities that we want to compute. They diverge when we take **field** fluctuations at all energy scales into account. We can render them finite by introducing an energy cutoff, which should be done in a subtle way, preserving again the **local symmetries**. In some cases we can later – in the final result for physical observables – remove this cutoff by sending it to infinity. However, in case of the Higgs sector of the SM^{F05} this does not work: it would lead to a decoupling of the **Higgs field** from all other **fields**, and therefore again to vanishing **particle** masses; that property is known as triviality.

So we have to live with such an energy cutoff, which is acceptable as long as it is far above the **Higgs particle**^{F03} mass, but not high enough to render the **Higgs field** “trivial”, i.e. free of interactions. This implies that the validity of the SM^{F05} is limited to a certain energy range – at even higher energies it requires the extension to a superior theory, that we do not know yet. The specialized literature suggests candidate theories in abundance, but so far none has been substantiated.

Nevertheless, even if we find one day corrections to the SM^{F05} (under extreme conditions), it will always remain the appropriate description of particle physics in the energy range, which is most relevant to us – just like Newton’s theory of gravity, or the continuous description of thermodynamic systems, remain highly useful, although they are not exact.

I am indebted to Aline Guevara and Eduardo Serrano for their assistance with the illustrations. A shorter Spanish version of this article has been published | together with Daniella Ayala García – in the Boletín de la Sociedad Mexicana de Física, vol. 26 no. 3 (2012) pp. 161-166.

- Enfin, le **modèle standard**^{F05} est incomplet pour une raison intrinsèque. Si l'on applique la **théorie quantique des champs** de manière trop simpliste, on obtient des valeurs infinies pour les quantités à calculer. En effet, celles-ci divergent lorsque l'on prend en compte les fluctuations du **champ** pour tous les niveaux d'énergies. On peut les obliger à prendre des valeurs finies grâce à des échelles de renormalisation qui correspondent à des « coupures » d'énergie, mais cette astuce nécessite de prendre des précautions en veillant à ce que les symétries locales soient conservées. Dans certains cas, il est possible de faire disparaître ces coupures des résultats finaux en les faisant tendre vers l'infini, afin que ces résultats correspondent à la réalité observable. Cependant, dans le cas du **boson BEH**^{F03}, cette stratégie ne fonctionne pas, car elle obligerait à découpler le **champ BEH** des autres **champs**, or si c'était le cas, les **particules** n'auraient pas de masse : il s'agit de la propriété de « trivialité ». Ainsi, il faut accepter prendre en compte cette « coupure » d'énergie dans les calculs, qui doit être bien supérieure à la masse du boson **BEH**^{F03}, sans être trop élevée car le **champ BEH** deviendrait alors « trivial », c'est-à-dire qu'il n'interagirait plus. Le **modèle standard**^{F05} est donc valide uniquement en-dessous d'un certain seuil d'énergie. Au-delà, une nouvelle théorie est nécessaire, reste à savoir laquelle. La littérature spécialisée propose de très nombreuses théories candidates, mais aucune d'entre elles n'a encore été confirmée.

Cependant, même si nous parvenons un jour à élaborer une théorie qui complèterait, aux conditions extrêmes, le **modèle standard**^{F05}, celui-ci continuerait à décrire la physique des particules pour les niveaux d'énergie qui nous sont le plus utiles. De la même manière, la théorie de la gravité de Newton ou la thermodynamique restent très utiles, même si elles ne sont pas exactes.

Je suis très reconnaissant envers Aline Guevara et Eduardo Serrano pour leur aide concernant les illustrations. Une version espagnole résumée de cet article a été publiée en collaboration avec Daniella Ayala García dans le *Boletín de la Sociedad Mexicana de Física*, vol. 26 n° 3 (2012), p. 161-166.

STRATÉGIE DE TRADUCTION

I. Le texte support : présentation et choix

Mon choix s'était tout d'abord porté sur un article de Gordon Kane publié dans la revue *Scientific American* et intitulé « The Dawn of Physics Beyond the Standard Model ». Ce texte, publié en juin 2003, présentait encore le boson de Higgs comme une particule hypothétique qu'il restait encore à découvrir expérimentalement, néanmoins, il présentait de manière exhaustive et simple les particules du modèle standard ainsi que les énigmes que ce dernier ne parvenait pas à résoudre. Ce n'est qu'au terme de mon travail de traduction que je me suis rendu compte que cet article avait déjà été traduit en français et publié dans le numéro de septembre 2003 du magazine *Pour la Science*...

Je me suis donc plongée dans un autre texte ayant pour titre « The Higgs Particle: what is it, and why did it lead to a Nobel Prize in Physics? » et écrit par Wolfgang Bietenholz, professeur de physique à l'Institut des sciences nucléaires de l'Université nationale autonome du Mexique. Il s'agit d'un article publié dans la *Revista Cubana de Fisica* vol. 30, n° 2, 2013, p. 109-112 et disponible sur arXiv.org (<https://arxiv.org/abs/1304.2423v2>), un site qui répertorie de nombreux articles techniques dans différents domaines (mathématiques, physique, statistiques, etc.). Le nombre de mots de cet article étant un peu trop élevé, ma directrice de mémoire m'a conseillé de couper le passage concernant la biographie de Jean Buridan, qui n'apporte de toute façon pas d'éléments essentiels à la compréhension des mécanismes physiques.

Ce texte m'a été proposé par M. Rosnet, mon spécialiste-référent, car il décrit le mécanisme BEH et les implications de la découverte du boson BEH de manière simple sans que ce soit un article de vulgarisation. En effet, il est nécessaire de posséder une certaine connaissance préalable du sujet, à savoir la physique des particules, afin d'en saisir les tenants et les aboutissants. L'utilisation d'illustrations et d'analogies permet une meilleure compréhension. Il faut néanmoins toujours garder à l'esprit qu'une analogie en physique, d'autant plus en physique quantique, doit être manipulée avec soin car elle comporte toujours

des limites. Elle doit être utilisée dans un cadre strict et ne doit pas être extrapolée à d'autres applications. Ici, l'exemple de l'âne de Buridan permet de comprendre le mécanisme de brisure de symétrie en faisant appel à la philosophie déterministe de la mécanique, ce qui est plutôt intéressant.

Cet article, bien qu'il soit rédigé en anglais, a été écrit par un germanophone, qui plus est professeur dans une université mexicaine. Cependant, la plupart des physiciens communiquent entre eux et publient leurs articles en anglais. En effet, une publication rédigée en espagnol ou en allemand aurait eu une portée moindre qu'une publication en anglais, c'est la raison pour laquelle la plupart des textes portant sur des sujets scientifiques spécialisés sont directement écrits en anglais. Par ailleurs, les équipes de chercheurs sont souvent des collaborations internationales (comme au CERN par exemple), l'usage de l'anglais est donc la norme. Les articles sont parfois traduits s'ils sont ultérieurement publiés dans des revues à échelle nationale (comme cela a été le cas de mon premier texte source, ou comme c'est le cas de ce texte, dont un résumé est disponible en espagnol). Même s'ils ne rédigent pas dans leur langue maternelle, les auteurs de ces publications restent des spécialistes du domaine, la terminologie et la phraséologie sont donc celles utilisées dans les milieux des experts.

Enfin, concernant la date de publication (2014), celle-ci est ultérieure à la date de l'annonce officielle de la découverte du boson de Higgs au CERN. Ainsi, les théories et les idées exposées sont récentes. Bien sûr, les connaissances des chercheurs concernant ce boson et les autres particules sont sans cesse enrichies par les nouvelles études et expériences, mais depuis 2012, aucune grande découverte n'est venue infirmer les théories du modèle standard. Ce texte est donc tout à fait d'actualité et reprend les idées exposées dans la première partie du présent mémoire.

II. Méthode de travail

Comme pour toute traduction, j'ai commencé par chercher des textes en lien avec le sujet afin de mieux cerner la terminologie et la phraséologie nécessaires. J'ai constaté que les recherches que j'avais dû effectuer pour la traduction du texte de Gordon Kane n'ont pas été inutiles car elles m'ont permis d'aller plus vite dans ma nouvelle traduction. En effet, j'avais eu l'occasion d'approfondir des notions ou de chercher la traduction et la définition de certains termes qui apparaissaient de nouveau dans l'article de Wolfgang Bietenholz. De plus, j'avais déjà rédigé l'exposé du présent mémoire en amont, ce qui m'a permis de comprendre la plupart des concepts évoqués, même s'il m'a fallu faire quelques recherches complémentaires concernant certains aspects du texte, notamment les passages traitant de mécanique quantique ou des théories mathématiques sous-jacentes. Je remercie encore une fois M. Rosnet qui a eu la gentillesse de m'expliquer par courrier électronique certains passages qui me semblaient flous ou pour lesquels je n'étais pas sûre d'avoir bien compris de quoi il retournait. Il m'a également donné quelques précieux conseils concernant la terminologie et la phraséologie scientifiques.¹

J'ai traduit mon texte source en m'aidant du logiciel de traduction assistée par ordinateur Trados, ce qui m'a obligée à explorer les différentes fonctionnalités de ce logiciel. Cet outil est certes intéressant, mais j'ai vite compris qu'il ne me serait pas d'une grande aide pour ce texte étant donné qu'aucun passage ne se répétait (hormis les segments « Figure 1 », « Figure 2 », etc.).

¹ M. Rosnet est professeur de physique à l'UFR Sciences de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand et il travaille à l'expérience ALICE du CERN à Genève.

III. Les problèmes terminologiques

1) Le boson de Higgs... mais pas seulement !

Dans la plupart des publications scientifiques et des ouvrages de vulgarisation, on parle du « boson de Higgs » pour désigner la particule découverte. Le site web du CERN² lui-même utilise cette dénomination, aussi bien en français qu'en anglais (« Higgs boson »). Cependant, les physiciens belges François Englert et Robert Brout ont tout autant contribué que Peter Higgs à la description de ce boson. Leurs articles, publiés la même année (1964), se complètent et sont essentiels à la compréhension globale de cette particule. D'autres chercheurs, comme Carl Hagen, Gérard Guralnik et Thomas Kibble ont également contribué à la compréhension du boson et du mécanisme associé (certains parlant alors du « boson BEHHGK »), mais dans une moindre mesure³. Ainsi, la forme la plus juste et la plus logique est « boson BEH ». C'est d'ailleurs ce que Michel Spiro et Gilles Cohen-Tannoudji préconisent⁴ et c'est également ce que m'a conseillé mon spécialiste-référent⁵. J'ai tout de même choisi d'évoquer le terme « boson de Higgs » dans le corps du texte avant d'expliquer pourquoi l'appellation « boson BEH » est plus correcte. Dans le reste du texte, j'ai conservé cette forme. Par souci de cohérence, j'ai choisi les termes « mécanisme BEH » pour « Higgs mechanism » et « champ BEH » pour « Higgs field ».

J'ai cependant remarqué à l'issue du dépouillement que dans les publications rédigées en anglais, les termes « BEH boson » et « BEH mechanism » sont plus rares que leurs équivalents en français, même s'ils apparaissent parfois... L'origine de M. Higgs, de nationalité américaine, y serait-elle pour quelque chose ?

²CERN. Le boson de Higgs [en ligne], disponible sur <<http://home.cern/fr/topics/higgs-boson>> (consulté le 23/02/17).

³BLANCO LASERNA David. Le boson de Higgs. France : RBA, 2017, 168 p. (Voyage dans le cosmos) ISBN 978-2-8237-0398-6.

⁴COHEN-TANNOUDJI Gilles, SPIRO Michel. Le boson et le chapeau mexicain. Paris, France : Gallimard, 2013, 513 p. (Folio Essais) ISBN 978-2-07-0355495.

⁵ROSNET Philippe, Professeur de physique à l'Université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand) et chercheur à l'expérience ALICE du CERN (Genève), rencontres les 26/08/16 et 12/04/17.

Par ailleurs, on notera un problème posé par la traduction vers le français, à savoir s'il est nécessaire d'inclure la préposition « de » : « boson BEH » ou « boson de BEH » ? « mécanisme BEH » ou « mécanisme de BEH » ? La forme anglaise n'aide pas à trancher... À nouveau, le dépouillement a permis de montrer que si « boson BEH » était la forme usitée⁶, les formes « mécanisme BEH » et « mécanisme de BEH » étaient toutes deux utilisées. On voit aussi couramment une formulation explicite, du type « mécanisme de Brout-Englert-Higgs ou mécanisme BEH », ce qui permet d'alléger le reste du texte.

Enfin, j'ai choisi de traduire « particule » par « boson » (dans le titre notamment), et ce pour deux raisons. D'une part, le terme « particule BEH » n'est jamais utilisé et il m'aurait fallu écrire « particule de Higgs », une formulation correcte mais que j'ai voulu éviter pour les raisons évoquées précédemment. D'autre part, le terme « particule » est moins précis que « boson » car il peut désigner soit d'une particule élémentaire (boson, électron, quark...) soit une particule composée de ces particules élémentaires (neutron, atome...). Il me semblait donc plus logique d'apporter le maximum de précision dès le titre, même si le terme « particule » peut être utilisé plus loin dans le texte en guise de synonyme.

2) La traduction de « CERN » et de « LHC »

L'acronyme CERN se réfère à l'origine au Conseil européen pour la recherche nucléaire, renommé ultérieurement Observatoire européen pour la recherche nucléaire⁷. Cependant, cette appellation prête à confusion car on pourrait penser qu'il s'agit d'un organisme de recherche sur l'énergie nucléaire, or ce n'est absolument pas le cas. Ainsi, M. Rosnet m'a conseillé une appellation plus complète et davantage utilisée dans les milieux d'experts, à savoir le **Laboratoire européen pour la physique des particules**.

Pour le LHC, le sigle n'est pas indiqué dans le texte source, qui se contente de citer « **Large Hadron Collider** ». Or, les scientifiques et le grand public ont l'habitude de lire cet

⁶ BLANCO LASERNA David. *op. cit.*

⁷ CERN. Le CERN en bref [en ligne], disponible sur <<http://home.cern/fr/about>> (consulté le 12/06/17).

acronyme, il me semblait donc plus judicieux de le citer, ainsi que sa signification en anglais et sa traduction en français.

3) Le modèle standard... tout court ?

Une difficulté concerne la façon de nommer le modèle standard de la physique des particules. Dans la version anglaise, le « **Standard Model of particle physics** » est très vite remplacé par « **SM** ». Or, en français, il est peu habituel d'utiliser le sigle « MS », hormis dans les articles très spécialisés ou les thèses où ce terme apparaît un grand nombre de fois. Pour ce texte, je craignais que l'utilisation de ce sigle ne perturbe la compréhension. De plus, il existe plusieurs modèles standards : le modèle standard de l'atome par exemple. Un « modèle standard » désigne un ensemble de théories. Ici, on se réfère au modèle standard de la physique des particules, ou encore le modèle standard des interactions fondamentales, qui décrit la matière à son niveau le plus élémentaire. En effet, les théories concernant les particules élémentaires et les interactions fondamentales sont cohérentes entre elles et se complètent, c'est pourquoi elles forment un seul et même ensemble de théories les décrivant⁸ : les interactions fondamentales sont portées par des particules élémentaires, à savoir les bosons de jauge. Cependant, il était bien entendu hors de question de garder une expression aussi longue. Sans compter que dans la plupart des publications ou ouvrages, le terme « modèle standard » fait généralement référence à cet ensemble de théorie sans autre précision. Ainsi, à la fin du premier paragraphe du corps du texte, j'ai choisi de préciser « **ce modèle standard** », l'adjectif démonstratif servant à indiquer que dans la suite du texte, on se référera à ces théories.

4) L'intégrale de chemin de Feynman

Dans la note de bas de page n° 1, le texte source évoque la « **functional integral formulation** ». La formulation quantique ou quantification permet de construire une théorie

⁸ BLANCO LASERNA David. Le modèle standard des particules. France : RBA, 2017, 159 p. (Voyage dans le cosmos) ISBN 978-2-8237-0398-6.

quantique des champs à partir d'une théorie classique. Pour ce faire, les théoriciens ont recours à des intégrales fonctionnelles, c'est-à-dire des intégrales dont l'intégrand est une fonction et non un réel. On pourrait donc traduire cette expression par « formulation par intégrale fonctionnelle ». Cependant, dans la littérature spécialisée française, les auteurs parlent plus volontiers des « intégrales de chemin » ou « intégrales de chemin de Feynman », qui sont des intégrales fonctionnelles dont l'intégrand est la fonction caractérisant le « chemin » entre l'état initial et l'état final d'un système⁹. Il peut s'agir par exemple du chemin parcouru par une particule entre un point de départ et un point d'arrivée. En physique classique, un rayon de lumière se propage en ligne droite par exemple, car c'est le chemin le plus court pour se déplacer : il s'agit du principe de Fermat¹⁰. Cette constatation simple et intuitive que l'on enseigne dès le collège en cours de physique-chimie n'est pourtant pas applicable en physique quantique. Les intégrales de chemin permettent de prendre en compte toutes les différentes possibilités. Cette notion est liée à celles « d'action » et de « minimisation » que l'on retrouve plus loin dans la traduction. Ainsi, j'ai préféré introduire dès le début cette précision concernant les « intégrales de chemin » plutôt que de laisser une formulation vague.

5) Les fluctuations quantiques

Dans la partie traitant du « vide », l'auteur écrit : « Quantum Field Theory, however, keeps track of the sum over all possible configurations. The one with minimal action or energy – it could be the zero fields – corresponds to the absence of particles, the vacuum. The additional energy that it takes for a fluctuation around this vacuum to generate just one particle is the mass of this particle ». Il s'agit là d'un raccourci pour ne pas rentrer dans les détails d'une théorie difficile à visualiser (comme c'est souvent le cas en mécanique quantique) : le vide n'est pas tout à fait vide. Le vide quantique correspond bien à une absence globale de particules, mais en réalité, des paires particules-antiparticules apparaissent et disparaissent en s'annihilant sans

⁹ CERN. Le CERN en bref [en ligne], disponible sur <<http://home.cern/fr/about>> (consulté le 12/06/17).

¹⁰ GOUGOUSSIS Christos, POILVERT Nicolas. Mes premiers pas en mécanique quantique. Paris, France : Ellipses, 2007, 185 p. ISBN 978-2-7298-3141-7.

arrêt. Ces particules peuvent être de toute nature et de toute masse : électron-antiélectron, quark-antiquark, etc. Cependant, ces phénomènes étant extrêmement courts et inobservables, on parle de particules virtuelles. Toujours est-il que le vide quantique bouillonne d'énergie en permanence¹¹. Ces fluctuations d'énergies peuvent, si leur valeur est assez importante, conduire à l'émergence de nouvelles particules : du rien peut surgir quelque chose. Ainsi, le terme approprié pour désigner ce phénomène est bien, dans ce contexte, « fluctuation quantique », sous-entendu les fluctuations d'énergie dans le vide quantique.

6) Les « cut-offs » et les « coupures » d'énergie

À la fin du texte, l'auteur nous explique en quoi la théorie du modèle standard reste insatisfaisante pour décrire l'ensemble de l'Univers, notamment parce que : « A naïve treatment of Quantum Field Theories yields infinities in quantities that we want to compute. They diverge when we take field fluctuations at all energy scales into account. We can render them finite by introducing an energy cutoff, which should be done in a subtle way, preserving again the local symmetries. » La traduction du terme « cutoff » (que l'on voit également écrit « cut-off ») a été un problème car je ne comprenais pas à quelle notion il se rapportait. Il s'agit en fait d'une méthode mathématique permettant de faire en sorte que les valeurs ne divergent pas vers l'infini, donc qu'elles restent finies. Le terme consacré en théorie quantique des champs est « échelle de renormalisation », mais en pratique, cette méthode consiste à introduire une « coupure » dans les calculs afin d'empêcher la divergence¹². Dans ma traduction, j'ai choisi d'introduire le terme consacré tout en gardant le terme simplifié : « Si l'on applique la théorie quantique des champs de manière trop simpliste, on obtient des valeurs infinies pour les quantités à calculer. En effet, celles-ci divergent lorsque l'on prend en compte les fluctuations du champ pour tous les niveaux d'énergies. On peut les obliger à prendre des valeurs finies

¹¹ Futura Sciences. Mécanique quantique et fluctuations du vide [en ligne], disponible sur : <<http://www.futura-sciences.com/sciences/dossiers/physique-singularites-trou-ver-voyage-spatiotemporel-614/page/8/>> (consulté le 10/06/17).

¹² ROSNET Philippe, Professeur de physique à l'Université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand) et chercheur à l'expérience ALICE du CERN (Genève).

grâce à des échelles de renormalisation qui correspondent à des « coupures » d'énergie, mais cette astuce nécessite de prendre des précautions en veillant à ce que les symétries locales soient conservées. »

IV. La reformulation

1) Le titre

Comme bien souvent lorsqu'il s'agit de traduction d'articles ou de publication, la première difficulté rencontrée se situe au niveau du titre. La double question en anglais est difficile à rendre en français et peu habituelle dans un titre. La traduction du segment « **what is it** » conduit souvent à des formulations lourdes et peu naturelles. Il m'a donc semblé plus simple de laisser uniquement « **Le boson BEH** » au début, ce qui indique indirectement que l'article portera en premier lieu sur la définition de cette particule.

2) Des champs qui se ressentent

Dans la partie traitant de la théorie quantique des champs, l'auteur introduit un paragraphe par : « **Various fields – and the associated particles – may feel each other, *i.e.* they can interact** ». Lorsque j'ai commencé la traduction, j'ai pensé qu'une traduction littérale, à savoir « Les champs peuvent se sentir les uns les autres » serait peu appropriée à un texte de ce niveau scientifique : donner un caractère trop « humain » aux champs ne servait pas vraiment le propos du texte. En réalité, c'est bien de cela dont il s'agit : les champs « ressentent leur présence mutuelle », c'est-à-dire qu'ils peuvent « savoir » si un autre champ est présent au point où ils sont. Ce concept fait référence au principe d'exclusion de Pauli, qui énonce que deux fermions ne peuvent pas se situer au même endroit au même moment¹³. Ce principe ne s'applique pas aux bosons, c'est-à-dire aux champs d'interaction. Il peut paraître difficile

¹³ CNRS. Glossaire [en ligne], disponible sur : <<http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbig/glossaire/global.htm>> (consulté le 23/02/17).

d'imaginer que des champs puissent « savoir » qu'un autre champ a une valeur non nulle au même point, mais en fait, cela revient à dire qu'ils sont capables d'interagir entre eux. C'est exactement ce qui est dit dans la deuxième partie de la phrase : « they can interact ». De plus, l'auteur utilise de nombreuses autres analogies et comparaisons avec le comportement humain, j'ai donc choisi de laisser la même structure et le même type de métaphore qu'en anglais, à savoir : « Différents champs, ainsi que leurs particules associées, peuvent ressentir leurs présences mutuelles, c'est-à-dire qu'ils peuvent interagir entre eux ».

3) Le casse-tête des symétries

Le passage « If one requires such a local symmetry to hold, a huge number of field transformations are allowed, and it is a delicate challenge to maintain invariance under all of them. For the actions that one usually starts with, this is not the case – they do change under most local field transformations. » m'a particulièrement posé problème. La formulation est lourde et peut être trompeuse, il m'a fallu faire des recherches plus approfondies concernant les symétries locales afin de bien saisir le sens de cette phrase. En réalité, lorsque l'on modifie un champ de manière différente en chaque point de l'espace mais que l'on souhaite conserver l'invariance entre le système de départ et le système d'arrivée, il faut jongler entre les différents paramètres et différentes propriétés pour que les modifications se « compensent » entre elles, et que la symétrie, locale dans ce cas, soit préservée : c'est le sens du passage « it is a delicate challenge to maintain invariance ». Quant aux « actions that one usually starts with », il s'agit des calculs et des opérations auxquelles on pourrait spontanément penser, comme la transformation de charge ou inversion du temps. Il ne s'agit pas ici de la notion « d'action » présentée au-dessus ! Ainsi, les transformations permettant de conserver la symétrie sont les transformations de jauge, introduites par les champs de jauge¹⁴, et c'est d'ailleurs la suite du paragraphe : « However, one can repair the invariance by introducing additional fields, which transform exactly such that these changes are compensated. These are the *gauge fields* ». J'ai

¹⁴ BLANCO LASERNA David. Le boson de Higgs. France : RBA, 2017, 168 p. (Voyage dans le cosmos) ISBN 978-2-8237-0398-6.

donc tenté de reformuler cette partie de façon plus compréhensible, à savoir : « Afin de préserver la symétrie locale, il est possible de modifier un grand nombre de paramètres du champ. Néanmoins, il devient alors difficile de faire en sorte que le champ global soit invariant. Les transformations auxquelles on peut penser spontanément ne permettent pas de préserver la symétrie locale. Cependant, il est possible de rétablir l'invariance en introduisant des champs supplémentaires qui agissent de telle sorte que les changements provoqués sont exactement compensés. Il s'agit des *champs de jauge* ».

4) Âne quantique et mécanisme BEH

Un autre passage pour lequel j'ai eu beaucoup de mal est le suivant : « To translate this setting into the Higgs mechanism, we should better talk about a thirsty donkey in the center of a circular water ditch. Now there is a continuous set of favored positions – corresponding to the energy minimum – anywhere next to the ditch. If we sum over all possible positions (all possible “donkey field configurations”), these favored positions provide the statistically dominant contributions. So if we evaluate the expectation value of its water supply, we conclude that the quantum donkey is better off than its classical cousin: it is able to drink » Il s'agit d'expliquer le phénomène de brisure de symétrie dans le cas du boson BEH. À nouveau, la manière dont est formulé cet extrait peut prêter à confusion et à des interprétations erronées. L'auteur compare en fait la situation où un âne se trouve au centre du ruisseau circulaire à la situation d'une boule se situant au sommet d'une structure similaire à un « chapeau mexicain » et représentant le potentiel du champ de Higgs (voir figure 6 de la traduction). L'âne, tout comme la boule, est en situation instable : l'âne a très envie de boire, il va donc naturellement se diriger vers le ruisseau, tandis que la boule va rouler le long de la pente et se retrouver en bas (au niveau minimal d'énergie). Une fois l'âne au bord du ruisseau, il doit se déplacer le long de celui-ci et continuer à boire, tout comme la boule peut continuer à rouler de façon circulaire le long de la ligne représentant le niveau d'énergie minimale. Ainsi, il n'y a pas de brisure de symétrie à

proprement parler car une fois l'objectif atteint (le ruisseau ou la ligne d'énergie minimale), le déplacement restaure la symétrie qui aurait été brisée par la prise de décision initiale.¹⁵

En mécanique quantique, on ne peut pas déterminer avec certitude l'issue d'une expérience, car si elle est réitérée plusieurs fois, les résultats ne seront jamais les mêmes. Il est par exemple impossible de connaître précisément la position d'une particule à un instant t_1 même si l'on connaît toutes les caractéristiques du système à un instant t_0 : il s'agit du principe d'incertitude d'Heisenberg. Cependant, il est possible de déterminer avec quelle probabilité cette particule pourra se situer en chaque point de l'espace, ce qui permet d'associer une fonction de probabilité à chaque point de l'espace. Les points le long du ruisseau sont les points que l'âne a le plus de chance de choisir s'il veut boire, donc les points où la probabilité est la plus élevée : ces positions sont donc bien « statistiquement dominantes ». Le calcul de « l'espérance quantique » (qui correspond à « expectation value » et qui rejoint la notion d'espérance mathématique en probabilités classiques) nous montre alors que l'âne a de grandes chances de se retrouver d'une manière ou d'une autre le long du ruisseau, et donc de boire.¹⁶

L'analogie avec l'âne oblige à préciser que la direction choisie par l'âne au départ dépend seulement de son orientation de départ : il va tout droit. On voit là la limite de la comparaison, car la boule n'a aucune « direction de départ ». J'ai néanmoins choisi d'inclure cette précision dans ma traduction : « Cette analogie permet également d'expliquer le mécanisme BEH, mais cette fois en prenant un âne assoiffé situé au centre d'un cours d'eau circulaire. Ici, il existe un ensemble continu de positions privilégiées, c'est-à-dire associée à un minimum d'énergie pour éteindre sa soif, et qui correspondent à tous les points du cours d'eau selon l'orientation initiale de l'âne. Si l'on fait la somme de toutes les positions possibles, c'est-à-dire toutes les configurations du champ « âne » possibles, ces positions privilégiées sont statistiquement dominantes. On peut ainsi calculer la valeur de l'espérance quantique de son approvisionnement en eau pour en conclure que l'âne quantique s'en sort mieux que son cousin classique : au final, il peut boire. »

¹⁵ COHEN-TANNOUJDI Gilles, SPIRO Michel. Le boson et le chapeau mexicain. Gallimard, 2013, 513 p. (Folio Essais).

¹⁶ BLANCO LASERNA David. Le modèle standard des particules. France : RBA, 2017, 159 p. (Voyage dans le cosmos) ISBN 978-2-8237-0398-6.

Conclusion

Comme souvent en traduction, le texte source présentait davantage de difficultés qu'il n'y paraissait de prime abord. Si les images aident à la compréhension, les analogies doivent être maniées avec prudence afin de ne pas se « perdre » dans les explications. Certains concepts ainsi que certains termes m'ont demandé de longues recherches, bien que la plupart des notions aient déjà fait l'objet de recherches dans le cadre de l'exposé. La reformulation a demandé de nombreux remaniements, car le texte anglais était parfois très elliptique ou vague.

Par ailleurs, ce type de texte est rarement abordé à l'ESIT, d'une part car il s'agit d'un thème purement scientifique, d'autre part car il est beaucoup plus long que la plupart des textes donnés en examen ou en contrôle continu. L'enjeu est donc de rester cohérent d'un bout à l'autre du document, tant sur le plan terminologique que stylistique.

Enfin, la rédaction de la partie de stratégie de traduction implique un travail de recherche plus approfondi et plus systématique, ainsi qu'une remise en question des choix de phraséologie. Cet exercice, bien que long et fastidieux, conduit donc, à mon sens, à une traduction de meilleure qualité et plus aboutie.

ANALYSE TERMINOLOGIQUE

Fiches terminologiques

Comment lire une fiche terminologique

Les fiches terminologiques ci-après sont constituées de tout ou partie des champs suivants :

- VE : VEedette (terme faisant l'objet de la fiche et ses synonymes)
- EN : ENglish
- FR : FRançais
- DOM : DOMaine (en français, source : www.granddictionnaire.com)
- CTX : ConTeXte
- COL : COLlocations
- ID : IDentification de l'auteur
Bureau émetteur (organisme pour lequel la fiche a été rédigée) : ESIT
Collection terminologique à laquelle appartient la fiche : MEM17 pour un mémoire soutenu en 2017
Auteur de la fiche : LBE = Lise BErnard
- Notes :
EXP = renseignements encyclopédiques qui ne font pas partie de la définition
USG = indications relatives à l'USaGe, au niveau de la langue, au registre, à la région, etc.
GRM = indications GRaMmaticales
DER = mots DERivés
HOM = HOMonyme
ANT = ANToyme
SPE = termes SPÉcifiques
GEN = termes GÉNÉriques
REL = renvois associatifs à d'autres termes
- RF : RéFérences (sources bibliographiques)

Listes des fiches

Vedette anglaise	Numéro	Vedette française
fundamental interaction	F01	force fondamentale
gauge boson	F02	boson de jauge
Higgs boson	F03	boson de Higgs
spontaneous symmetry breaking	F04	brisure spontanée de symétrie
Standard Model	F05	modèle standard

Fiche terminologique anglais-français

F01

VE EN	fundamental interaction [1] fundamental force [2]
DF	Physical process by which particles interact.
DOM	physique atomique et nucléaire
CTX	Any force you can think of -- friction, magnetism, gravity, and so on -- is caused by one of these four fundamental interactions.
ID	ESIT MEM17 LBE
Notes	<p>EXP1 There are four fundamental interactions: the weak interaction, the strong interaction, the electromagnetic interaction and the gravitational interaction, each one carried by a gauge boson.</p> <p>EXP2 Although the gravitational interaction is the most familiar, it is not described by the Standard Model, unlike the three other interactions.</p> <p>EXP3 The Standard Model predicts that, at very high energy, the weak and the electromagnetic interactions blend in a unified interaction: the electroweak interaction. Physicists are now trying to unify all fundamental interactions.</p> <p>USG [2] “force” can be used instead of “interaction”, although “interaction” is more correct.</p>
RF	CERN. The Standard Model [online], available at: < https://home.cern/about/physics/standard-model > (consulted on 22/05/17) [1][2][EXP1][EXP2]; BERKELEY LAB. The particle adventure [online], available at: < http://www.particleadventure.org/4interactions.html > (consulted on 29/05/17) [SEC DF][CTX]; KANE Gordon. The Dawn of Physics Beyond the Standard Model. Scientific America, June 2003, p. 68-75 [EXP3]

Fiche terminologique anglais-français

F01

VE FR	force fondamentale [1] interaction fondamentale [2] force d'interaction fondamentale [3]
DF	Action par laquelle les particules de matière interagissent entre elles.
DOM	physique atomique et nucléaire
CTX	Chaque force fondamentale a son boson correspondant : la force forte est véhiculée par le gluon, la force électromagnétique par le photon, tandis que les bosons W et Z sont responsables de la force faible.
ID	ESIT MEM17 LBE
Notes	<p>EXP1 Les quatre forces fondamentales sont : la force électromagnétique, la force faible, la force forte et la force gravitationnelle.</p> <p>EXP2 Bien que la force gravitationnelle soit la plus familière, elle n'est pas décrite par le modèle standard.</p> <p>EXP3 Tous les processus physiques, chimiques ou biologiques connus peuvent être expliqués à l'aide de ces quatre interactions fondamentales.</p> <p>EXP4 À de très hauts niveaux d'énergie, les interactions faible et électromagnétique s'unissent en une seule interaction appelée interaction électrofaible.</p>
RF	<p>CERN. Le modèle standard [en ligne], disponible sur : <http://home.cern.fr/about/physics/standard-model> (consulté le 20/03/17) [1][2][EXP1][EXP2][CTX] ; CNRS. Glossaire [en ligne] force d'interaction fondamentale, disponible sur : <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbig/glossaire/global.htm> (consulté le 23/02/17) [3]; ARNAUD Nicolas, DESCOTES-GENON Sébastien, KERHOAS-CAVAT Sophie et al. Passeport pour les deux infinis. 2^{ème} édition. Paris : Dunod, 2013, 192 p., p. 8 [SEC DF][EXP3] ; CNRS. Les forces électromagnétique et faible. [en ligne], disponible sur : <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbig/decouv/xchrono/separ/niv1_1.htm> (consulté le 27/02/17) [EXP4]</p>

Fiche terminologique anglais-français

F02

VE EN	gauge boson [1] vector boson [2] force mediator [3] force carrier [4] force particle [5] carrier particle [6] force-carrier particle [7]
DF	Force-carrying elementary particle.
DOM	physique atomique et nucléaire
CTX	As well as dark matter, there are many other ideas to test, such as supersymmetry, new gauge bosons, quantum black holes and heavy neutrinos, all of which we could reconstruct from the LHC collisions.
ID	ESIT MEM17 LBE
Notes	EXP1 There are different kinds of gauge bosons: gluons, photons and W^- , W^+ and Z^0 bosons, as well as the hypothetical graviton. EXP2 The bosons family includes all gauge bosons and the Higgs boson. REL boson, interaction
RF	Scientific American. Higgs Boson Looks “Standard,” but Upgraded LHC May Tell a Different Tale [online], available at: https://www.scientificamerican.com/article/higgs-boson-looks-standard-but-upgraded-lhc-may-tell-a-different-tale1/ (consulted on 22/05/17) [SEC DF][1]; CERN. Opinion: The CERN effect [online], available at: https://home.cern/about/opinion/2016/04/cern-effect (consulted on 22/05/17) [2]; VANIER Jacques. The Universe: A Challenge To The Mind. London: Imperial College Press, 2011, 516 p., p. 470-471 [3][4]; KANE Gordon. The Dawn of Physics Beyond the Standard Model. Scientific America, June 2003, p. 71 [5]; CERN. The Standard Model [online], available at: https://home.cern/about/physics/standard-model (consulted on 22/05/17) [6][7][EXP1][EXP2]; Scientific American. Proton Smashing Resumes at the World’s Largest Particle Accelerator [online], available at: https://www.scientificamerican.com/article/proton-smashing-resumes-at-the-world-s-largest-particle-accelerator/ (consulted on 22/05/17) [CTX]

Fiche terminologique anglais-français

F02

VE FR	boson de jauge [1] boson d'interaction [2] boson intermédiaire [3] boson vecteur intermédiaire [4] médiateur [5] particule porteuse [6]
DF	Particule élémentaire messagère d'une interaction.
DOM	physique atomique et nucléaire
CTX	Depuis 1964 et les articles de Brout, Englert et Higgs, on sait que le mécanisme de brisure spontanée d'une symétrie de jauge, qu'ils ont imaginé, pourrait permettre de rendre massifs les bosons de jauge, tout en préservant, comme cela a été montré en 1971, la renormalisabilité de la théorie.
ID	ESIT MEM17 LBE
Notes	EXP1 Il existe plusieurs types de bosons de jauge, à savoir les photons, les gluons, les bosons W^+ , W^- et Z^0 , et l'hypothétique graviton. EXP2 La famille des bosons regroupe les bosons de jauge et le boson de Higgs.
	REL boson, interaction
RF	COHEN-TANNOUDJI Gilles, SPIRO Michel. Le boson et le chapeau mexicain. Gallimard, 2013, 513 p. (Folio Essais) p. 263 [1][3][CTX] ; COHEN-TANNOUDJI Gilles, SPIRO Michel. Particules élémentaires et cosmologie : les lois ultimes ? Paris, France : Le Pommier/Cité des Sciences et de l'industrie, 2008, 63 p. p. 41 [2][4] ; BLANCO LASERNA David. Le boson de Higgs. France : RBA, 2017, 168 p. (Voyage dans le cosmos, vol. 4) p. 134 [5] ; CERN. Le Modèle standard [en ligne], disponible sur : < http://home.cern/fr/about/physics/standard-model > (consulté le 20/03/17) [6][EXP2] CNRS. Glossaire [en ligne] boson, disponible sur : < http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbig/glossaire/global.htm > (consulté le 26/12/16) [SEC DF][EXP1]

Fiche terminologique anglais-français

F03

VE EN	Higgs boson [1] Higgs particle [2] Higgs [3] BEH boson [4] particle of God [5]
DF	Fundamental particle that gives other particles a mass.
DOM	physique atomique et nucléaire
CTX	Discovered in 2012, the Higgs boson was the last missing piece of the Standard Model puzzle. It is a different kind of force carrier from the other elementary forces, and it gives mass to quarks as well as the W and Z bosons. Whether it also gives mass to neutrinos remains to be discovered.
ID	ESIT MEM17 LBE
Notes	<p>USG [1] form that should be avoided, although it is the most frequent one ; [3] most recommended form because it includes the names of the physicists Robert Brout and François Englert ; [5] form that should be avoided absolutely, even if it is still to be found in some popular science publications.</p> <p>EXP Unlike others bosons, the Higgs boson is a scalar boson, which means its spin is equal to 0.</p> <p>COL discovery of *</p> <p>REL BEH mechanism, BEH field</p>
RF	KANE Gordon. The Dawn of Physics Beyond the Standard Model. Scientific America, June 2003, p. 68-7 [1][3][SEC DF]; BIETENHOLZ Wolfgang. The Higgs Particle: what it is, and why did it lead to a Nobel Prize in Physics? 2014 [2][5]; CHECCIA Paolo. BEH Boson (CMS), presented at 5 th International Conference on New Frontiers in Physics, 6-14 July 2016, Kolymbari (Greece). Geneva: CERN, 2016, 13 p. [4][EXP]; Fermilab, SLAC. The Standard Model of Particle Physics [online], available at: < http://www.symmetrymagazine.org/standard-model/ > (consulted on 14/05/16) [CTX]

Fiche terminologique anglais-français

F03

VE FR	boson de Higgs [1] boson BEH [2] Higgs [3] particule de Higgs [4] particule de Dieu [5]
DF	Particule fondamentale qui permet d'expliquer comment les particules acquièrent une masse.
DOM	physique atomique et nucléaire
CTX	Lorsque les physiciens évoquent des particules, par exemple un électron ou un boson de Higgs, ils se réfèrent en réalité à des phénomènes se produisant au sein de champs.
ID	ESIT MEM17 LBE
Notes	USG [1] à éviter, même si son usage reste le plus répandu ; [2] forme recommandée car elle inclut les noms des physiciens Robert Brout et François Englert ; [5] à éviter absolument, même si on le retrouve dans certaines publications de vulgarisation scientifique EXP Contrairement aux autres bosons, le boson de Higgs est un boson scalaire, c'est-à-dire de spin nul. COL découverte du * REL mécanisme BEH, champ BEH
RF	CERN. Le boson de Higgs en bref [en ligne], disponible sur : < http://home.cern/fr/about/updates/2013/05/basics-higgs-boson > (consulté le 26/12/2016) [1][SEC DF] ; COHEN-TANNOUJDI Gilles, SPIRO Michel. Le boson et le chapeau mexicain. Gallimard, 2013, 513 p. (Folio Essais) p. 307 [2] ; BLANCO LASERNA David. Le boson de Higgs. France : RBA, 2017, 168 p. (Voyage dans le cosmos, vol. 4) p. 12 [3][4] Source 3 et 4, p. 100 [EXP] ; CARROLL Sean. Higgs le boson manquant. Paris, France : Belin, 2013, 400 p. (Pour la science) p. 35 [5] ; Source 5, p. 13 [CTX]

Fiche terminologique anglais-français

F04

VE EN	spontaneous symmetry breaking [1]
DF	Physical process in which the physical system does not exhibit the symmetry present in the underlying dynamics.
DOM	physique atomique et nucléaire
CTX	Nambu has already correctly identified the relatively light pions as approximate Goldstone bosons, but if spontaneous symmetry breaking occurs generally in particle physics, where were all the other Goldstones?
ID	ESIT MEM17 LBE
Notes	EXP1 A symmetry is a group of transformations of the fields, which do not alter the action, so they are in general not observable. EXP2 The term “spontaneous” means that the system doesn’t originally exhibit asymmetry. REL symmetry breaking, gauge symmetry, symmetry violation DER spontaneously
RF	LYKKEN Joseph, SPIROPULU Maria. The future of the Higgs boson. Physics today, December 2013, p. 28-33. [1][SEC DF][CTX][EXP2]; BIETENHOLZ Wolfgang. The Higgs Particle: what it is, and why did it lead to a Nobel Prize in Physics? 2014 [EXP1]

Fiche terminologique anglais-français

F04

VE FR	brisure spontanée de symétrie [1] brisure spontanée d'une symétrie [2] brisure spontanée de la symétrie [3]
DF	Processus physique à l'issue duquel l'état fondamental d'un système physique possède moins de symétrie que les équations du mouvement qui décrivent la dynamique du système.
DOM	physique atomique et nucléaire
CTX	Inspiré par la vision de photons obtenant une masse apparente dans les entrailles d'un supraconducteur, Nambu tenta de transposer la brisure spontanée de symétrie au terrain des particules élémentaires.
ID	ESIT MEM17 LBE
Notes	EXP1 En physique, le terme « symétrie » décrit une invariance. EXP2 Le terme « spontanée » indique que le système de départ ne présente pas d'asymétrie. REL brisure de symétrie, symétrie de jauge, violation de symétrie
RF	ILIOPOULOS Jean. Aux origines de la masse : particules élémentaires et symétries fondamentales. Les Ulis, France : EDP Sciences, 2014, 117 p. (Une introduction à...) ISBN 978-2-7598-1158-8 p. 58 [1][2][3][SEC DF] ; BLANCO LASERNA David. Le boson de Higgs. France : RBA, 2017, 168 p. (Voyage dans le cosmos, vol. 4) p. 59 [EXP1] Source EXP1, p. 123 [CTX] ; Source 1, p. 47 [EXP2]

Fiche terminologique anglais-français

F05

VE EN	Standard Model [1] SM [2] Standard Model of Particle Physics [3] Standard Model of Elementary Particles [4] Theory of Almost Everything [5]
DF	Set of theories of fundamental particles and interactions.
DOM	physique atomique et nucléaire
CTX	The standard model predicts the electron magnetic moment to an astonishing accuracy of one part in a trillion.
ID	ESIT MEM17 LBE
Notes	<p>EXP1 The Standard Model is a theory that describes all fundamental particles that make up the known matter and carry the weak, electromagnetic and strong forces.</p> <p>EXP2 The Theory of Everything would be a theory that describes all physical phenomena. To date, the Standard Model does not meet this requirement, as it doesn't describe gravity or dark matter for example.</p> <p>EXP3 Some theories beyond Standard Model try to describe the phenomena that are not predicted by the Standard Model, but to date, none of them has been confirmed experimentally.</p> <p>EXP4 Physicist are now thinking of a theory beyond Standard Model that would unify the electromagnetic, weak, strong and even gravitational interaction into one single interaction at high energy. This theory is referred to as "Grand Unified Theory"</p> <p>USG [1] most frequent form, although there also exists a standard model of astronomy, a standard model of atom, etc.; [3][4] most complete and correct form; [5] refers to the expression "Theory of Everything" introduced by Stephen Hawking in the 80s.</p>
RF	BIETENHOLZ Wolfgang. The Higgs Particle: what it is, and why did it lead to a Nobel Prize in Physics? 2014 [1][2][EXP3]; Fermilab, SLAC. The Standard Model of Particle Physics [online], available at: < http://www.symmetrymagazine.org/standard-model/ > (consulted on 14/05/16) [3]; OERTER Robert. The Theory of Almost Everything. New York: Penguin Group, 2006, 240 p. p. 10 [4][5]; BERKELEY Lab. The particle adventure [online], available at: < http://www.particleadventure.org/standard_model.html > (consulted on 26/12/16) [SEC DF] GABRIELSE Gerald, The standard model's greatest triumph. Physics today, December 2013, p. 64-65. [CTX][EXP1][EXP2]; CERN. Unified forces [online], available at: < http://home.cern/about/physics/unified-forces > (consulted on 29/05/17) [EXP4]

Fiche terminologique anglais-français

F05

VE FR	modèle standard [1] modèle standard de la physique des particules [2] modèle standard des particules [3] modèle standard des interactions fondamentales [4] MS [5]
DF	Ensemble de théories intégrant toutes les connaissances actuelles sur les particules et les forces fondamentales.
DOM	physique atomique et nucléaire
CTX	Le succès du modèle standard repose sur le fait que toutes les particules qu'il inclut furent découvertes au fur et à mesure des progrès expérimentaux : trois générations de quarks et de leptons, les bosons W et Z^0 dont la masse correspondait à la valeur prédite et pour finir, en 2012, la découverte de l'hypothétique boson de Higgs.
ID	ESIT MEM17 LBE
Notes	<p>EXP1 Le modèle standard décrit les particules constituant la matière ainsi que les particules porteuses des forces faible, forte et électromagnétique.</p> <p>EXP2 Le modèle standard n'est pas la théorie ultime car il ne décrit pas la force gravitationnelle ou d'autres phénomènes comme la matière noire par exemple.</p> <p>EXP3 Il existe plusieurs théories au-delà du modèle standard permettant de combler les lacunes de celui-ci, mais pour l'instant aucune n'a été vérifiée expérimentalement.</p> <p>EXP4 Les physiciens sont à la recherche d'une théorie au-delà du modèle standard permettant d'unir les forces électromagnétique, faible, forte, voire gravitationnelle et appelée « théorie de grande unification »</p> <p>USG [1] forme la plus fréquente, bien qu'il existe également un modèle standard de l'atome, un modèle standard de l'astronomie, etc. [5] utilisé uniquement dans des publications lorsque le terme apparaît de nombreuses fois</p>
RF	CERN. Le Modèle standard [en ligne], disponible sur : < http://home.cern/fr/about/physics/standard-model > (consulté le 20/03/17) [1][2][EXP1][EXP2][EXP3] ; BLANCO LASERNA David. Le modèle standard des particules. France : RBA, 2017, 159 p. (Voyage dans le cosmos, vol. 14) p. 12 [3] ; Source 3, p. 9 [4][5] ; Source 3, p. 139 [CTX] Source 3, p. 142 [EXP2] CERN. Guide du LHC. 2009 CERN-Brochure-2009-003-Fre p. 6 [DF] ; Futura Sciences. GUT [en ligne], disponible sur : http://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-gut-4707/ > (consulté le 29/05/17) [EXP4]

Glossaire français-anglais

accélérateur	accelerator
DF	Machine géante utilisée par les physiciens afin d'accélérer des corpuscules de matière à des vitesses ultrarapides, proches de celle de la lumière et dont l'analyse des résultats permet d'explorer la structure intime des particules et des forces de la nature.
RF	CNRS. Glossaire [en ligne] accélérateur, disponible sur : < http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbig/glossaire/global.htm > (consulté le 23/02/17)

action	action
DF	Minimisation d'une fonction permettant d'obtenir les équations du mouvement d'un système.
RF	BLANCO LASERNA David. Le modèle standard des particules. France : RBA, 2017, 159 p. (Voyage dans le cosmos, vol. 14) ISBN 978-2-8237-0398-6

antimatière	antimatter
DF	Sorte de double de la matière ordinaire dont la masse et l'attraction gravitationnelle sont identiques, mais dont la charge électrique et la couleur quantique de l'interaction forte sont opposées et avec laquelle elle s'annihile.
RF	CNRS. Glossaire [en ligne] antimatière, disponible sur : < http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbig/glossaire/global.htm > (consulté le 23/02/17)

atome	atom
DF	Entité électriquement neutre composée d'un noyau et d'électrons qui gravitent autour du noyau.
RF	FUTURA SCIENCES. Atome [en ligne], disponible sur : < http://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-atome-1990/ > (consulté le 23/02/17)

boson	boson
DF	Particule élémentaire dont le nombre quantique de rotation est un entier.
RF	CNRS. Glossaire [en ligne] boson, disponible sur : < http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbig/glossaire/global.htm > (consulté le 23/02/17)
ETY	du nom du physicien indien Satyendranath Bose

boson de Nambu-Goldstone, boson de Goldstone	Nambu-Goldstone boson, Goldstone boson
DF	Boson scalaire de masse nulle impliqué dans le mécanisme de brisure spontanée de symétrie.
RF	BLANCO LASERNA David. Le boson de Higgs. France : RBA, 2017, 168 p. (Voyage dans le cosmos, vol. 4) ISBN 978-2-8237-0398-6 p. 123

boson W, W	W boson, W
DF	Particule élémentaire chargée négativement ou positivement, porteur de la force faible.
RF	CERN. Boson W : soleils et poussières d'étoiles [en ligne], disponible sur : < http://home.cern/fr/about/physics/w-boson-sunshine-and-stardust > (consulté le 23/02/17)

boson Z, Z	Z boson, Z
DF	Particule élémentaire neutre, porteur de la force faible.
RF	CERN. Le boson Z [en ligne], disponible sur : < https://home.cern/fr/about/physics/z-boson > (consulté le 23/02/17)

brisure de symétrie, violation de symétrie	symmetry breaking, symmetry violation
DF	Phénomène au cours duquel la symétrie entre des objets physiques n'est pas respectée.
RF	Pour la science.fr. Brisure de symétrie chez les particules. [en ligne], disponible sur < http://www.pourlascience.fr/ewb_pages/a/article-brisures-de-symetrie-chez-les-particules-18492.php > (consulté le 21/05/17)

champ	field
DF	Fonction mathématique, définie sur tout ou partie de l'espace, qui associe à chacun de ses points la valeur d'une grandeur physique en ce point.
RF	BLANCO LASERNA David. Le boson de Higgs. France : RBA, 2017, 168 p. (Voyage dans le cosmos, vol. 4) ISBN 978-2-8237-0398-6 p. 23

champ de Higgs, champ BEH	Higgs field, BEH field
DF	Champ omniprésent dans l'Univers responsable du mécanisme de BEH.
RF	CERN. L'origine du mécanisme Brout-Englert-Higgs [en ligne], disponible sur : < https://home.cern/fr/topics/higgs-boson/origins-brout-englert-higgs-mechanism > (consulté le 21/05/17)

champ de jauge	gauge field
DF	Champ qui reste invariant sous l'effet des transformations de jauge.
RF	Futura Sciences. Champs de jauge [en ligne], disponible sur : < http://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/matiere-champs-jauge-3855/ > (consulté le 22/05/17)

collisionneur	collider
DF	Machine dans laquelle des faisceaux très énergétiques circulant en sens opposés entrent en collision.
RF	CERN. Guide du LHC. 2009 CERN-Brochure-2009-003-Fre p. 18

dualité onde-particule, dualité onde-corpuscule	wave-particle duality, wave-corpuscule duality
DF	Concept à la base de la mécanique quantique et selon lequel les objets physiques peuvent présenter à la fois des propriétés d'ondes et de corpuscules.
RF	Futura Sciences. Dualité onde-corpuscule [en ligne], disponible sur : < http://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/mecanique-quantique-dualite-onde-corpuscule-16331/ > (consulté le 21/05/17)

électron	electron
DF	Particule élémentaire stable et massive de charge électrique négative formant la matière.
RF	ARNAUD Nicolas, DESCOTES-GENON Sébastien, KERHOAS-CAVAT Sophie et al. Passeport pour les deux infinis (Vers l'infiniment petit). 2 ^{ème} édition. Paris : Dunod, 2013 p. 79

électronvolt, électron-volt	electronvolt
DF	Unité d'énergie correspondant à l'énergie d'un électron accéléré par une différence de potentiel de un volt.
RF	CERN. Guide du LHC. 2009 CERN-Brochure-2009-003-Fre p. 3

énergie noire, énergie sombre	dark energy
DF	Forme d'énergie qui semble associée au vide de l'espace, qui constituerait environ 70 % de l'Univers et que la physique ne parvient pas encore à décrire.
RF	CERN. Guide du LHC. 2009 CERN-Brochure-2009-003-Fre p. 23

espace-temps	spacetime
DF	Vision globale et synthétique de l'espace et du temps.
RF	CNRS. Glossaire [en ligne] espace-temps, disponible sur : http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbig/glossaire/global.htm (consulté le 23/02/16)
EXP	Concept issu de la relativité d'Einstein, l'espace-temps constitue le « matériau » de base, la trame, qui sous-tend l'Univers.

évènement	event
DF	Désintégration d'une particule ou collision de deux particules ou plus, observée dans un détecteur.
RF	ARNAUD Nicolas, DESCOTES-GENON Sébastien, KERHOAS-CAVAT Sophie et al. Passeport pour les deux infinis (Vers l'infiniment petit). 2 ^{ème} édition. Paris : Dunod, 2013 p. 79

fermion	fermion
DF	Particule élémentaire de spin entier qui constitue la matière.
RF	CNRS. Glossaire [en ligne], disponible sur : < http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbig/glossaire/global.htm > (consulté le 23/02/17)
SPE	électron, quark
EXP	Les fermions sont soumis au principe d'exclusion de Pauli
ETY	Du nom du physicien italien Enrico Fermi

fonction d'onde	wave function
DF	Outil mathématique permettant de calculer la densité de probabilité de présence d'une particule en certains points.
RF	Sciences et Avenir. Mécanique quantique : nouvelle définition de la fonction d'onde [en ligne], disponible sur : < https://www.sciencesetavenir.fr/fondamental/mecanique-quantique-nouvelle-definition-de-la-fonction-d-onde_22853 > (consulté le 23/02/17)

force électrofaible, interaction électrofaible	electroweak interaction, electroweak force
DF	Force résultant de l'union de la force faible et de la force électromagnétique.
RF	CNRS. Les forces électromagnétique et faible. [en ligne], disponible sur : < http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbig/decouv/xchrono/separ/niv1_1.htm > (consulté le 27/02/17)

force électromagnétique, interaction électromagnétique	electromagnetic interaction, electromagnetic force
DF	Interaction fondamentale répulsive ou attractive qui agit sur les objets ayant une charge électrique.
RF	CALVET David. Voyage au cœur de la matière. Les interactions fondamentales [en ligne], disponible sur : < http://voyage.in2p3.fr/interactions.html#elec > (consulté le 23/02/17)

force faible , interaction faible, force nucléaire faible, interaction nucléaire faible	weak interaction, weak nuclear interaction, weak force, weak nuclear force
DF	Interaction fondamentale dont la portée est limitée au noyau atomique et responsable de la radioactivité β .
RF	Futura Sciences. Interaction faible [en ligne], disponible sur : < http://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-particules-interaction-faible-15342/ > (consulté le 23/02/17)

force forte , interaction forte, force nucléaire forte, interaction nucléaire forte	strong interaction, strong nuclear interaction, strong force, strong nuclear force
DF	Interaction fondamentale dont la portée est limitée au noyau atomique et responsable de la cohésion des noyaux atomiques.
RF	Futura Sciences. Interaction forte [en ligne], disponible sur : < http://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-particules-interaction-forte-15340/ > (consulté le 23/02/17)

force gravitationnelle , interaction gravitationnelle, gravitation, gravité	gravitational interaction, gravitational force, gravitation, gravity
DF	Interaction fondamentale de très longue portée par laquelle deux corps massifs s'attirent.
RF	BLANCO LASERNA David. Le boson de Higgs. France : RBA, 2017, 168 p. (Voyage dans le cosmos, vol. 4) ISBN 978-2-8237-0398-6 p. 19

gluon	gluon
DF	Particule messagère de l'interaction nucléaire forte.
RF	CNRS. Glossaire [en ligne] gluon, disponible sur : < http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbig/glossaire/global.htm > (consulté le 23/02/17)

graviton	graviton
DF	Particule messagère supposée porter l'interaction de gravité mais qui n'a encore jamais été observée.
RF	CNRS. Glossaire [en ligne] graviton, disponible sur : < http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbig/glossaire/global.htm > (consulté le 23/02/17)

hadron	hadron
DF	Particule qui entre en jeu dans l'interaction nucléaire forte et composée de quarks.
RF	CNRS. Glossaire [en ligne] hadron, disponible sur : < http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbig/glossaire/global.htm > (consulté le 23/02/17)
SPE	baryon, méson

intégrale de chemin, intégrale de chemin de Feynman	path integral formulation, Feynman path integral formulation
DF	Méthode mathématique qui consiste à effectuer la somme de tous les chemins possibles entre l'état initial et l'état final d'un système en pondérant chaque chemin.
RF	BLANCO LASERNA David. Le modèle standard des particules. France : RBA, 2017, 159 p. (Voyage dans le cosmos, vol. 14) ISBN 978-2-8237-0398-6 p. 80

lepton	lepton
DF	Particule élémentaire insensible à l'interaction nucléaire forte.
RF	CNRS. Glossaire [en ligne] lepton, disponible sur : < http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbig/glossaire/global.htm > (consulté le 23/02/17)
SPE	électron, muon, neutrino

luminosité	luminosity
DF	Quantité qui mesure le taux de collisions dans un accélérateur.
RF	ARNAUD Nicolas, DESCOTES-GENON Sébastien, KERHOAS-CAVAT Sophie et al. Passeport pour les deux infinis (Vers l'infiniment petit). 2 ^{ème} édition. Paris : Dunod, 2013 p. 83

matière noire , matière sombre, masse manquante, masse cachée, masse invisible	dark matter, missing mass
DF	Matière différente de la matière ordinaire insensible à la force électromagnétique et qui constituerait environ 27 % de l'Univers.
RF	CERN. Matière noire [en ligne], disponible sur : < https://home.cern/fr/about/physics/dark-matter > (consulté le 21/05/17)

mécanique quantique , mécanique ondulatoire	quantum mechanics
DF	Théorie physique fondamentale qui décrit l'infiniment petit et les particules élémentaires.
RF	CNRS. Glossaire [en ligne] mécanique quantique, disponible sur : < http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbig/glossaire/global.htm > (consulté le 23/02/17)

mécanisme de BEH , mécanisme BEH, mécanisme de Higgs, mécanisme de Brout-Englert-Higgs, mécanisme Brout-Englert-Higgs	BEH mechanism, Higgs mechanism, Brout-Englert-Higgs mechanism
DF	Mécanisme physique qui brise la symétrie entre les photons et les bosons W et Z.
RF	CERN. L'origine du mécanisme Brout-Englert-Higgs [en ligne], disponible sur : < https://home.cern/fr/topics/higgs-boson/origins-brout-englert-higgs-mechanism > (consulté le 21/05/17)

muon	muon
DF	Lepton qui porte une charge électrique négative et beaucoup plus massif qu'un électron.
RF	CNRS. Glossaire [en ligne] muon, disponible sur : < http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbig/glossaire/global.htm > (consulté le 23/02/17)

neutron	neutron
DF	Particule subatomique de charge neutre constituant le noyau.
RF	ARNAUD Nicolas, DESCOTES-GENON Sébastien, KERHOAS-CAVAT Sophie et al. Passeport pour les deux infinis (Vers l'infiniment petit). 2 ^{ème} édition. Paris : Dunod, 2013 p. 85
GEN	nucléon

nucléon	nucleon
DF	Particule constituant le noyau atomique.
RF	CNRS. Glossaire [en ligne] nucléon, disponible sur : < http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbig/glossaire/global.htm > (consulté le 23/02/17)
SPE	proton, neutron

particule	particle
DF	Composant de la matière.
RF	CNRS. Glossaire [en ligne] particule, disponible sur : < http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbig/glossaire/global.htm > (consulté le 23/02/17)

particule élémentaire, particule fondamentale	elementary particle, fundamental particle,
DF	Constituant fondamental de la matière ou de la lumière ou messenger d'une interaction.
RF	ARNAUD Nicolas, DESCOTES-GENON Sébastien, KERHOAS-CAVAT Sophie et al. Passeport pour les deux infinis (Vers l'infiniment petit). 2 ^{ème} édition. Paris : Dunod, 2013 p. 87
SPE	boson, électron, neutrino, photon, quark

photon	photon
DF	Particule élémentaire de la lumière et porteur de l'interaction électromagnétique.
RF	ARNAUD Nicolas, DESCOTES-GENON Sébastien, KERHOAS-CAVAT Sophie et al. Passeport pour les deux infinis (Vers l'infiniment petit). 2 ^{ème} édition. Paris : Dunod, 2013 p. 87
GEN	particule élémentaire

proton	proton
DF	Particule subatomique de charge positive constituant le noyau.
RF	ARNAUD Nicolas, DESCOTES-GENON Sébastien, KERHOAS-CAVAT Sophie et al. Passeport pour les deux infinis (Vers l'infiniment petit). 2 ^{ème} édition. Paris : Dunod, 2013 p. 88
GEN	nucléon

quantum	quantum
DF	Paquet d'énergie ou de particules élémentaires échangés entre des particules de matière.
RF	BLANCO LASERNA David. Le boson de Higgs. France : RBA, 2017, 168 p. (Voyage dans le cosmos, vol. 4) ISBN 978-2-8237-0398-6 p. 32
GRM	au pluriel : quanta

quark	quark
DF	Particule élémentaire sensible à l'interaction forte et constituant les hadrons
RF	Futura Sciences. Quark [en ligne] disponible sur : < http://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/matiere-quark-73/ > (consulté le 23/02/17)
GEN	fermion

renormalisation	renormalization
DF	Méthode mathématique qui consiste à redéfinir les paramètres du lagrangien afin d'éliminer les contributions infinies dans les calculs basés sur l'électrodynamique quantique.
RF	BLANCO LASERNA David. Le modèle standard des particules. France : RBA, 2017, 159 p. (Voyage dans le cosmos, vol. 14) ISBN 978-2-8237-0398-6 p. 82-84

spin	spin
DF	Propriété intrinsèque d'une particule liée à son comportement dans les transformations de rotation au niveau quantique.
RF	ILIOPOULOS Jean. Aux origines de la masse : particules élémentaires et symétries fondamentales. Les Ulis, France : EDP Sciences, 2014, 117 p. (Une introduction à...) ISBN 978-2-7598-1158-8 p. 41

supersymétrie, SUSY	supersymmetry, SUSY
DF	Théorie au-delà du modèle standard qui prédit l'existence d'une particule partenaire supersymétrique pour chacune des particules du modèle standard.
RF	CERN. La supersymétrie [en ligne], disponible sur : < http://home.cern/fr/about/physics/supersymmetry > (consulté le 14/05/17)

supraconducteur	supraconductor
DF	Qui ne présente aucune résistance électrique à très basse température.
RF	ARNAUD Nicolas, DESCOTES-GENON Sébastien, KERHOAS-CAVAT Sophie et al. Passeport pour les deux infinis (Vers l'infiniment petit). 2 ^{ème} édition. Paris : Dunod, 2013 p. 92

symétrie	symmetry
DF	Invariance d'un système lorsque les paramètres de son environnement évoluent.
RF	BLANCO LASERNA David. Le boson de Higgs. France : RBA, 2017, 168 p. (Voyage dans le cosmos, vol. 4) ISBN 978-2-8237-0398-6 p. 59
SPE	symétrie globale, symétrie locale

symétrie de jauge	gauge symmetry
DF	Invariance d'un système physique sous l'action des transformations de jauge.
RF	BLANCO LASERNA David. Le boson de Higgs. France : RBA, 2017, 168 p. (Voyage dans le cosmos) ISBN 978-2-8237-0398-6 p. 70

théorie au-delà du modèle standard	theory beyond Standard Model, post-Standard Model theory
DF	Cadre théorique permettant de combler les lacunes du modèle standard.
RF	ARNAUD Nicolas, DESCOTES-GENON Sébastien, KERHOAS-CAVAT Sophie et al. Passeport pour les deux infinis (Vers l'infiniment petit). 2 ^{ème} édition. Paris : Dunod, 2013 p. 34

théorie quantique des champs, QFT	quantum field theory, QFT
DF	Théorie de physique fondamentale dans laquelle les particules sont les excitations élémentaires d'un champ.
RF	ARNAUD Nicolas, DESCOTES-GENON Sébastien, KERHOAS-CAVAT Sophie et al. Passeport pour les deux infinis (Vers l'infiniment petit). 2 ^{ème} édition. Paris : Dunod, 2013 p. 93

transition de phase	phase transition
DF	Phénomène de changement d'état de la matière.
RF	Futura Sciences. Transition de phase [en ligne], disponible sur : < http://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-transition-phase-4710/ > (consulté le 27/02/17)

Lexique anglais-français

Vedette EN	Synonymes	Vedette FR
accelerator		accélérateur
action		action
antimatter		antimatière
antiparticle		antiparticule
atom		atome
BEH boson^{F03}	Higgs boson, Higgs particle, Higgs, particle of God	boson de Higgs, boson BEH, Higgs, particule de Higgs, particule de Dieu
BEH mechanism	Higgs mechanism, Brout-Englert-Higgs mechanism	mécanisme de BEH, mécanisme BEH, mécanisme de Higgs, mécanisme de Brout-Englert-Higgs, mécanisme Brout-Englert-Higgs
BEH field	Higgs field	champ BEH, champ de Higgs
beam		faisceau
boson		boson
Brout-Englert-Higgs mechanism	Higgs mechanism, BEH mechanism	mécanisme de BEH, mécanisme BEH, mécanisme de Higgs, mécanisme de Brout-Englert-Higgs, mécanisme Brout-Englert-Higgs
carrier particle^{F02}	vector boson, force mediator, force carrier, force particle, gauge boson, force-carrier particle	boson de jauge, boson d'interaction, boson intermédiaire, boson vecteur intermédiaire, médiateur, particule porteuse
collider		collisionneur
dark energy		énergie noire, énergie sombre
dark matter	missing mass	matière noire, matière sombre, masse manquante, masse cachée, masse invisible

decay		désintégration
early Universe		Univers primordial
electromagnetic force	electromagnetic interaction	force électromagnétique, interaction électromagnétique
electromagnetic interaction	electromagnetic force	interaction électromagnétique, force électromagnétique
electron		électron
electronvolt		électronvolt, électron-volt
electroweak force	electroweak interaction	force électrofaible, interaction électrofaible
electroweak interaction	electroweak force	interaction électrofaible, force électrofaible
elementary particle	fundamental particle	particule élémentaire, particule fondamentale
event		événement
expectation value		espérance quantique
fermion		fermion
Feynman path integral formulation	path integral formulation	intégrale de chemin, intégrale de chemin de Feynman
field		champ
force carrier^{F02}	vector boson, force mediator, gauge boson, force particle, carrier particle, force-carrier particle	boson de jauge, boson d'interaction, boson intermédiaire, boson vecteur intermédiaire, médiateur, particule porteuse
force-carrier particle^{F02}	vector boson, force mediator, force carrier, force particle, carrier particle, gauge boson	boson de jauge, boson d'interaction, boson intermédiaire, boson vecteur intermédiaire, médiateur, particule porteuse
force mediator^{F02}	vector boson, gauge boson, force carrier, force particle, carrier particle, force-carrier particle	boson de jauge, boson d'interaction, boson intermédiaire, boson vecteur intermédiaire, médiateur, particule porteuse

force particle ^{F02}	vector boson, force mediator, force carrier, gauge boson, carrier particle, force-carrier particle	boson de jauge, boson d'interaction, boson intermédiaire, boson vecteur intermédiaire, médiateur, particule porteuse
free parameters		paramètres libres
fundamental force ^{F01}	fundamental interaction	force fondamentale, force d'interaction fondamentale, interaction fondamentale
fundamental interaction ^{F01}	fundamental force	interaction fondamentale, force d'interaction fondamentale, force fondamentale
fundamental particle	elementary particle	particule fondamentale, particule élémentaire
fundamental physics	particle physics	physique fondamentale, physique des particules
gauge boson ^{F02}	vector boson, force mediator, force carrier, force particle, carrier particle, force-carrier particle	boson de jauge, boson d'interaction, boson intermédiaire, boson vecteur intermédiaire, médiateur, particule porteuse
gauge field		champ de jauge
gauge symmetry		symétrie de jauge
general relativity		relativité générale
global symmetry		symétrie globale
gluon		gluon
Goldstone boson	Nambu-Goldstone boson	boson de Goldstone, boson de Nambu-Goldstone
Grassmann number		nombre de Grassmann
gravitation	gravitational force, gravitational interaction, gravity	gravitation, force gravitationnelle, interaction gravitationnelle, gravité
gravitational force	gravitation, gravitational interaction, gravity	force gravitationnelle, gravitation, interaction gravitationnelle, gravité
gravitational interaction	gravitation, gravitational force, gravity	interaction gravitationnelle, force gravitationnelle, gravitation, gravité
graviton		graviton

gravity	gravitation, gravitational force, gravitational interaction	gravité, interaction gravitationnelle, force gravitationnelle, gravitation
hadron		hadron
Higgs^{F03}	Higgs boson, Higgs particle, BEH boson, particle of God	boson de Higgs, boson BEH, Higgs, particule de Higgs, particule de Dieu
Higgs boson^{F03}	BEH boson, Higgs particle, Higgs, particle of God	boson de Higgs, boson BEH, Higgs, particule de Higgs, particule de Dieu
Higgs field	BEH field	champ de Higgs, champ BEH
Higgs mechanism	BEH mechanism	mécanisme de BEH, mécanisme BEH, mécanisme de Higgs, mécanisme de Brout-Englert-Higgs, mécanisme Brout-Englert-Higgs
Higgs particle^{F03}	Higgs boson, BEH boson, Higgs, particle of God	boson de Higgs, boson BEH, Higgs, particule de Higgs, particule de Dieu
ion		ion
lepton		lepton
light speed		vitesse de la lumière
linac	linear accelerator	accélérateur linéaire
linear accelerator	linac	accélérateur linéaire
local symmetry		symétrie locale
luminosity		luminosité
matter		matière
matter field		champ de matière, champ matériel
Maxwell equations		équations de Maxwell
missing mass	dark matter	masse manquante, matière noire, matière sombre, masse cachée, masse invisible
momentum		quantité de mouvement
muon		muon
Nambu-Goldstone boson	Goldstone boson	boson de Nambu-Goldstone, boson de Goldstone
neutrino		neutrino
neutron		neutron

nucleon		nucléon
nucleus		noyau
parity		parité
particle		particule
particle of God^{F03}	Higgs boson, Higgs particle, Higgs, BEH boson	boson de Higgs, boson BEH, Higgs, particule de Higgs, particule de Dieu
particle physics	fundamental physics	physique des particules, physique fondamentale
path integral formulation	Feynman path integral formulation	intégrale de chemin, intégrale de chemin de Feynman
phase transition		transition de phase
photon		photon
positron		positron, positon
post-Standard Model theory	theory beyond Standard Model	théorie au-delà du modèle standard
proton		proton
QFT	Quantum Field Theory	QFT, théorie quantique des champs
quantum		quantum
quantum mechanics	quantum physics	mécanique quantique, mécanique ondulatoire, physique quantique
quantum physics	quantum mechanics	physique quantique, mécanique quantique, mécanique ondulatoire
quark		quark
Quantum Field Theory	QFT	théorie quantique des champs, QFT
renormalization		renormalisation
signature		signature
SM^{F05}	Standard Model, Standard Model of Particle Physics, Standard Model of Elementary Particles, Theory of Almost Everything	modèle standard, modèle standard de la physique des particules, modèle standard des particules, modèle standard des interactions fondamentales, MS
solenoid		solénoïde
space-time		espace-temps
spin		spin

spontaneous symmetry breaking^{F04}		brisure spontanée de symétrie, brisure spontanée d'une symétrie, brisure spontanée de la symétrie
Standard Model^{F05}	SM, Standard Model of Particle Physics, Standard Model of Elementary Particles, Theory of Almost Everything	modèle standard, modèle standard de la physique des particules, modèle standard des particules, modèle standard des interactions fondamentales, MS
Standard Model of Elementary Particles^{F05}	SM, Standard Model of Particle Physics, Standard Model, Theory of Almost Everything	modèle standard, modèle standard de la physique des particules, modèle standard des particules, modèle standard des interactions fondamentales, MS
Standard Model of Particle Physics^{F05}	SM, Standard Model, Standard Model of Elementary Particles, Theory of Almost Everything	modèle standard, modèle standard de la physique des particules, modèle standard des particules, modèle standard des interactions fondamentales, MS
strong force	strong interaction, strong nuclear interaction, strong nuclear force	force forte, force nucléaire forte, interaction forte, interaction nucléaire forte,
strong interaction	strong nuclear interaction, strong force, strong nuclear force	interaction forte, interaction nucléaire forte, force forte, force nucléaire forte
strong nuclear force	strong nuclear interaction, strong force, strong interaction	force nucléaire forte, force forte, interaction nucléaire forte
strong nuclear interaction	strong nuclear force, strong force, strong interaction	interaction nucléaire forte, force nucléaire forte, force forte, interaction forte
superparticle	supersymmetric particle	superparticule, particule supersymétrique
supersymmetric particle	superparticle	particule supersymétrique, superparticule
supersymmetry	SUSY	supersymétrie, SUSY
supraconductor		supraconducteur
SUSY	supersymmetry	SUSY, supersymétrie
symmetry		symétrie

symmetry breaking	symmetry violation	brisure de symétrie, violation de symétrie
symmetry violation	symmetry breaking	violation de symétrie, brisure de symétrie
theory beyond the Standard Model	post-Standard Model theory	théorie au-delà du modèle standard
Theory of Almost Everything ^{F05}	SM, Standard Model, Standard Model of Particle Physics, Standard Model of Elementary Particles	modèle standard, modèle standard de la physique des particules, modèle standard des particules, modèle standard des interactions fondamentales, MS
thermodynamics		thermodynamique
triviality		trivialité
vacuum		vide
vector boson ^{F02}	gauge boson, force mediator, force carrier, force particle, carrier particle, force-carrier particle	boson de jauge, boson d'interaction, boson intermédiaire, boson vecteur intermédiaire, médiateur, particule porteuse
W	W boson	W, boson W
W boson	W	boson W, W
wave		onde
wave-corpuscule duality	wave-particle duality	dualité onde-corpuscule, dualité onde-particule
wave function		fonction d'onde
wavelength		longueur d'onde
wave-particle duality	wave-corpuscule duality	dualité onde-particule, dualité onde-corpuscule
weak force	weak interaction, weak nuclear force, weak nuclear interaction	force faible, interaction faible, force nucléaire faible, interaction nucléaire faible
weak interaction	weak force, weak nuclear force, weak nuclear interaction	interaction faible, interaction nucléaire faible, force faible, force nucléaire faible
weak nuclear force	weak force, weak interaction, weak nuclear interaction	force nucléaire faible, interaction nucléaire faible, force faible, interaction faible

weak nuclear interaction	weak force, weak interaction, weak nuclear force	interaction nucléaire faible, force nucléaire faible, interaction faible, force faible
Z	Z boson	Z, boson Z
Z boson	Z	boson Z, Z

Lexique français-anglais

Vedette FR	Synonymes	Vedette EN
accélérateur		accelerator
accélérateur linéaire		linear accelerator, linac
action		action
antimatière		antimatter
antiparticule		antiparticle
atome		atom
boson		boson
boson BEH^{F03}	boson de Higgs, Higgs, particule de Higgs, particule de Dieu	BEH boson, Higgs boson, Higgs particle, Higgs, particle of God
boson de Goldstone	boson de Nambu-Goldstone	Goldstone boson, Nambu-Goldstone boson
boson de Higgs^{F03}	boson BEH, Higgs, particule de Higgs, particule de Dieu	BEH boson, Higgs boson, Higgs particle, Higgs, particle of God
boson de jauge^{F02}	boson d'interaction, boson intermédiaire, boson vecteur intermédiaire, médiateur, particule porteuse	gauge boson, vector boson, force mediator, force carrier, force particle, force-carrier particle
boson de Nambu-Goldstone	boson de Goldstone	Nambu-Goldstone boson, Goldstone boson
boson d'interaction^{F02}	boson de jauge, boson intermédiaire, boson vecteur intermédiaire, médiateur, particule porteuse	gauge boson, vector boson, force mediator, force carrier, force particle, force-carrier particle, carrier particle
boson intermédiaire^{F02}	boson de jauge, boson d'interaction, boson vecteur intermédiaire, médiateur, particule porteuse	gauge boson, vector boson, force mediator, force carrier, force particle, force-carrier particle, carrier particle
boson vecteur intermédiaire^{F02}	boson de jauge, boson intermédiaire, médiateur, particule porteuse	gauge boson, vector boson, force mediator, force carrier, force particle, force-carrier particle, carrier particle
boson W	W	W boson, W

boson Z	Z	Z boson, Z
brisure de symétrie	violation de symétrie	symmetry breaking, symmetry violation
brisure spontanée de la symétrie^{F04}	brisure spontanée de symétrie, brisure spontanée d'une symétrie	symmetry breaing
brisure spontanée de symétrie^{F04}	brisure spontanée de la symétrie, brisure spontanée d'une symétrie	symmetry breaking
brisure spontanée d'une symétrie^{F04}	brisure spontanée de la symétrie, brisure spontanée de symétrie	symmetry breaking
champ		field
champ BEH	champ de Higgs	BEH field, Higgs field
champ de Higgs	champ BEH	Higgs field, BEH field
champ de jauge		gauge field
champ de matière	champ matériel	matter field
champ matériel	champ de matière	matter field
collisionneur		collider
désintégration		decay
dualité onde-corpuscule	dualité onde-particule	wave-corpuscule duality, wave-particle duality
dualité onde-particule	dualité onde-corpuscule	wave-particle duality, wave-corpuscule duality
électron		electron
électronvolt	électron-volt	electronvolt
électron-volt	électronvolt	electronvolt
énergie noire	énergie sombre	dark energy
énergie sombre	énergie noire	dark energy
équations de Maxwell		Maxwell equations
espace-temps		space-time
espérance quantique		expectation value
événement		event
faisceau		beam
fermion		fermion
fonction d'onde		wave function
force d'interaction fondamentale^{F01}	force fondamentale, interaction fondamentale	fundamental force, fundamental interaction
force électrofaible	interaction électrofaible	electroweak force, electroweak interaction
force électromagnétique	interaction électromagnétique	electromagnetic force, electromagnetic interaction

force faible	force nucléaire faible, interaction faible, interaction nucléaire faible	weak force, weak nuclear force, weak interaction, weak nuclear interaction
force fondamentale^{F01}	force d'interaction fondamentale, interaction fondamentale	fundamental force, fundamental interaction
force forte	force nucléaire forte, interaction forte, interaction nucléaire forte	strong force, strong nuclear force, strong interaction, strong nuclear interaction
force gravitationnelle	gravitation, interaction gravitationnelle, gravité	gravitational force, gravitation, gravitational interaction, gravity
force nucléaire faible	force faible, interaction faible, interaction nucléaire faible	weak nuclear force, weak force, weak interaction, weak nuclear interaction
force nucléaire forte	force forte, interaction forte, interaction nucléaire forte	strong nuclear force, strong force, strong interaction, strong nuclear interaction
gluon		gluon
gravitation	gravité, force gravitationnelle, interaction gravitationnelle	gravitation, gravity, gravitational force, gravitational interaction
gravité	gravitation, force gravitationnelle, interaction gravitationnelle	gravity, gravitation, gravitational force, gravitational interaction
graviton		graviton
hadron		hadron
Higgs^{F03}	boson BEH, boson de Higgs, particule de Higgs, particule de Dieu	BEH boson, Higgs boson, Higgs particle, Higgs, particle of God
intégrale de chemin	intégrale de chemin de Feynman	path integral formulation, Feynman path integral formulation
intégrale de chemin de Feynman	intégrale de chemin	Feynman path integral formulation, path integral formulation
interaction électrofaible	force électrofaible	electroweak interaction, electroweak force
interaction électromagnétique	force électromagnétique	electromagnetic interaction, electromagnetic force

interaction faible	interaction nucléaire faible, force faible, force nucléaire faible	weak interaction, weak nuclear interaction, weak force, weak nuclear force
interaction fondamentale^{F01}	force fondamentale	fundamental interaction, fundamental force
interaction forte	interaction nucléaire forte, force forte, force nucléaire forte	strong interaction, strong nuclear interaction, strong force, strong nuclear force
interaction gravitationnelle	gravitation, gravité, force gravitationnelle	gravitational interaction gravitation, gravitaty, gravitational force
interaction nucléaire faible	interaction faible, force faible, force nucléaire faible	weak nuclear interaction, weak interaction, weak force, weak nuclear force
interaction nucléaire forte	interaction forte, force forte, force nucléaire forte	strong nuclear interaction, strong interaction, strong force, strong nuclear force
ion		ion
lepton		lepton
longueur d'onde		wavelength
luminosité		luminosity
masse cachée	matière noire, matière sombre, masse manquante, masse invisible	missing mass, dark matter
masse invisible	matière noire, matière sombre, masse cachée, masse manquante	missing mass, dark matter
masse manquante	matière noire, matière sombre, masse cachée, masse invisible	missing mass, dark matter
matière		matter
matière noire	matière sombre, masse manquante, masse cachée, masse invisible	dark matter, missing mass
matière sombre	matière noire, masse manquante, masse cachée, masse invisible	dark matter, missing mass
mécanique ondulatoire	mécanique quantique, physique quantique	quantum mechanics, quantum physics
mécanique quantique	mécanique ondulatoire, physique quantique	quantum mechanics, quantum physics

médiateur^{F02}	boson de jauge, boson intermédiaire, boson vecteur intermédiaire, particule porteuse	gauge boson, vector boson, force mediator, force carrier, force particule, force-carrier particle, carrier particle
mécanisme BEH	mécanisme Brout-Englert-Higgs, mécanisme de BEH, mécanisme de Brout-Englert-Higgs, mécanisme de Higgs	BEH mechanism, Brout-Englert-Higgs mechanism, Higgs mechanism
mécanisme Brout-Englert-Higgs	mécanisme BEH, mécanisme de BEH, mécanisme de Brout-Englert-Higgs, mécanisme de Higgs	Brout-Englert-Higgs mechanism, BEH mechanism, Higgs mechanism
mécanisme de BEH	mécanisme BEH, mécanisme Brout-Englert-Higgs, mécanisme de Brout-Englert-Higgs, mécanisme de Higgs	BEH mechanism, Brout-Englert-Higgs mechanism, Higgs mechanism
mécanisme de Brout-Englert-Higgs	mécanisme BEH, mécanisme de BEH, mécanisme Brout-Englert-Higgs, mécanisme de Higgs	Brout-Englert-Higgs mechanism, BEH mechanism, Higgs mechanism
mécanisme de Higgs	mécanisme BEH, mécanisme de BEH, mécanisme de Brout-Englert-Higgs, mécanisme de Brout-Englert-Higgs,	Higgs mechanism, Brout-Englert-Higgs mechanism, BEH mechanism
modèle standard^{F05}	modèle standard de la physique des particules, modèle standard des interactions fondamentales, modèle standard des particules, MS	Standard Model, Standard Model of Particle Physics, Standard Model of Elementary Particles, SM, Theory of Almost Everything
modèle standard de la physique des particules^{F05}	modèle standard, modèle standard des interactions fondamentales, modèle standard des particules, MS	Standard Model of Particle Physics, Standard Model, Standard Model of Elementary Particles, SM, Theory of Almost Everything
modèle standard des interactions fondamentales^{F05}	modèle standard, modèle standard de la physique des particules, modèle standard des particules, MS	Standard Model, Standard Model of Particle Physics, Standard Model of Elementary Particles, SM, Theory of Almost Everything

modèle standard des particules^{F05}	modèle standard, modèle standard de la physique des particules, modèle standard des interactions fondamentales, MS	Standard Model of Elementary Particles, Standard Model of Particle Physics, Standard Model, SM, Theory of Almost Everything
MS^{F05}	modèle standard, modèle standard de la physique des particules, modèle standard des interactions fondamentales, modèle standard des particules	SM, Standard Model, Standard Model of Elementary Particles, Standard Model of Particle Physics, Standard Model, Theory of Almost Everything
muon		muon
neutrino		neutrino
neutron		neutron
nombre de Grassmann		Grassmann number
noyau		nucleus
nucléon		nucleon
onde		wave
paramètres libres		free parameters
parité		parity
particule		particle
particule de Dieu^{F03}	boson de Higgs, boson BEH, Higgs, particule de Higgs	BEH boson, Higgs boson, Higgs particle, Higgs, particle of God
particule de Higgs^{F03}	boson de Higgs, boson BEH, Higgs, particule de Dieu	BEH boson, Higgs boson, Higgs particle, Higgs, particle of God
particule élémentaire	particule fondamentale	elementary particle, fundamental particle
particule fondamentale	particule élémentaire	fundamental particle, elementary particle
particule porteuse^{F02}	boson de jauge, boson intermédiaire, boson vecteur intermédiaire, médiateur	gauge boson, vector boson, force mediator, force carrier, force particle, force-carrier particle, carrier particle
particule supersymétrique	superparticule	supersymmetric particle, superparticle
photon		photon
physique des particules	physique fondamentale	particle physics, fundamental physics

physique fondamentale	physique des particules	fundamental physics, particle physics
physique quantique	mécanique quantique, mécanique ondulatoire	quantum physics, quantum mechanics
positon	positron	positron
positron	positon	positron
proton		proton
QFT	théorie quantique des champs	QFT, Quantum Field Theory
quantité de mouvement		momentum
quark		quark
relativité générale		general relativity
renormalisation		renormalization
signature		signature
solénoïde		solenoid
spin		spin
superparticule	particule supersymétrique	superparticle, supersymmetric particle
supersymétrie	SUSY	supersymmetry, SUSY
supraconducteur		superconductor
SUSY	supersymétrie	SUSY, supersymmetry
symétrie		symmetry
symétrie de jauge		gauge symmetry
symétrie globale		global symmetry
symétrie locale		local symmetry
théorie au-delà du modèle standard		theory beyond Standard Model, post-Standard Model theory
théorie quantique des champs	QFT	Quantum Field Theory, QFT
thermodynamique		thermodynamics
transition de phase		phase transition
trivialité		triviality
Univers primordial		early Universe
vide		vacuum
violation de symétrie	brisure de symétrie	symmetry violation, symmetry breaking
vitesse de la lumière		light speed
W	boson W	W, W boson
Z	boson Z	Z, boson Z

BIBLIOGRAPHIE CRITIQUE

Bibliographie sélective et commentée : sources en anglais

Ouvrage papier :

VANIER Jacques. *The Universe: A Challenge To The Mind*. London: Imperial College Press, 2011, 516 p.

⇒ *Un ouvrage qui permet une première approche des théories physiques et des principaux concepts. Je me suis surtout penchée sur les parties traitant des particules élémentaires et des forces fondamentales ainsi que de la relativité en physique, les autres chapitres portant davantage sur la cosmologie. Datant de 2011, ce livre présente encore le boson BEH comme une particule hypothétique.*

Articles et publications :

BIETENHOLZ Wolfgang. *The Higgs Particle: what it is, and why did it lead to a Nobel Prize in Physics?* 2014 [online], disponible sur : <<https://arxiv.org/abs/1304.2423v2>> (consulté le 26/08/16)

⇒ *Le texte-support de ma traduction, qui m'a néanmoins également servi à la rédaction de mon exposé, car il explique de manière simple et imagée le mécanisme BEH et la brisure de symétrie.*

GABRIELSE Gerald. *The standard model's greatest triumph*. Physics today, December 2013, p. 64-65.

⇒ *Un court article publié dans un magazine scientifique réputé et qui présente une des dernières découvertes en physique des particules (la mesure du moment magnétique de l'électron). Assez technique, ce texte contient de nombreux calculs dont la*

compréhension nécessite une certaine connaissance des outils mathématiques. Il a cependant l'avantage de présenter des illustrations expliquant les mécanismes impliqués. La conclusion, qui porte sur le fait que le modèle standard de la physique des particules n'est pas une théorie ultime, m'a incitée à en savoir plus sur cet aspect.

KANE Gordon. *The Dawn of Physics Beyond the Standard Model*. Scientific American, June 2003, p. 68-75.

⇒ *Le premier texte que j'avais choisi pour ma traduction (avant de me rendre compte que ce texte avait déjà été traduit en français). Cet article, très complet et accompagné de schémas explicatifs, présente toutes les particules et interactions du modèle standard. Les illustrations sont très utiles car elles permettent de mieux visualiser le rôle et la place de chaque particule au sein de la théorie. Une grande partie est consacrée aux limites du modèle standard, c'est-à-dire les phénomènes physiques qu'il ne parvient pas à expliquer et pour lesquels d'autres théories sont nécessaires, ce qui m'a permis de mieux comprendre la portée du modèle standard. La date de publication, antérieure à la découverte expérimentale du boson de Higgs, permet de mesurer les progrès réalisés depuis.*

LYKKEN Joseph, SPIROPULU Maria. *The future of the Higgs boson*. Physics today, December 2013, p. 28-33.

⇒ *Un article passionnant, quoiqu'un peu difficile, qui explique de manière exhaustive le mécanisme associé au boson BEH, en particulier le fait que les particules acquièrent une masse. Une grande partie est également consacrée à la découverte du boson BEH au CERN à proprement parler, ce qui m'a également beaucoup servi pour l'exposé du présent mémoire. À nouveau, l'article se termine sur les théories au-delà du modèle standard, principalement concernant la supersymétrie et la matière noire.*

MALDACENA Juan. *The symmetry and simplicity of the laws of physics and the Higgs Boson*. Institute for Advanced Study, Princeton, United States, 2015.

⇒ *Un article très intéressant en cela qu'il compare la symétrie en physique au taux de conversion entre des monnaies en économie. Cette comparaison, surprenante de prime abord, est en fait très utile pour comprendre le mécanisme physique. L'appendice consacré à un approfondissement mathématique des concepts étudiés est intéressant pour les férus de calculs.*

ORGANTINI Giovanni. *Unveiling the Higgs mechanism to students*. European Journal of Physics, 2012, vol. 33, p. 1397-1406.

⇒ *Cet article, qui se veut accessible aux étudiants et aux lycéens, requiert cependant selon moi un certain bagage scientifique afin d'être bien compris. Les explications sont accompagnées de calculs et d'équations plutôt abscons pour quelqu'un ne connaissant pas grand-chose à la physique. Néanmoins, cet article présente l'avantage de démontrer de manière théorique l'existence du boson BEH et du champ associé.*

Rapport de conférence :

CHECCIA Paolo. *BEH Boson (CMS)*, presented at the 5th International Conference on New Frontiers in Physics, 6-14 July 2016, Kolymbari (Greece). Geneva: CERN, 2016, 13 p.

⇒ *Ce rapport de conférence prononcée par un chercheur de l'expérience CMS du CERN m'a permis de trouver la terminologie utilisée effectivement par cette collaboration et de percevoir les enjeux auxquels font face les scientifiques du CERN.*

Sites web :

BERKELEY Lab. The particle adventure [online], disponible sur : <http://www.particleadventure.org/index.html> (consulté le 26/12/16)

⇒ *Ce site, auquel collabore le Laboratoire national Lawrence-Berkeley, présente les principaux concepts de la physique des particules de manière très simple et bien expliquée. Régulièrement actualisé, il dispose d'un glossaire très fourni.*

CERN. Accelerating Sciences [online], disponible sur : <http://home.cern/> (consulté le 22/03/17)

⇒ *Le site du CERN a bien entendu été la première source que j'ai consultée. Les informations publiées sur cette page sont de première main car elles émanent directement des équipes du CERN. De plus, ce site présente l'avantage d'être à la fois en anglais et en français, ce qui m'a été d'une grande aide pour la terminologie et la recherche d'équivalents. Le site est agréable et facile d'utilisation et j'ai puisé de nombreuses informations sur les articles spécifiques : « The basics of the Higgs boson » (<http://home.cern/about/updates/2013/05/basics-higgs-boson>), « The Large Hadron Collider » (<http://home.cern/topics/large-hadron-collider>), etc.*

Fermilab, SLAC. Symmetry Magazine [online], disponible sur : <http://www.symmetrymagazine.org/> (consulté le 14/05/17)

⇒ *Ce site web, géré par le Fermilab (grand laboratoire de physique des particules à haute énergie près de Chicago) et le SLAC (accélérateur linéaire de Stanford) se décrit comme « Un magazine en ligne sur la physique des particules ». Agréable et facile d'utilisation, il est actualisé régulièrement et présente les dernières avancées en physique des particules.*

Quantum Diaries. *Why do we expect a Higgs boson? Part I: Electroweak Symmetry Breaking* [online], disponible sur : <<http://www.quantumdiaries.org/2011/11/21/why-do-we-expect-a-higgs-boson-part-i-electroweak-symmetry-breaking/>> (consulté le 22/03/17)

⇒ *Quantum Diaries est une sorte de blog collaboratif dans lequel de nombreux scientifiques ont publié des articles dans plusieurs langues jusqu'en 2016. Cet article sur la brisure de symétrie électrofaible était particulièrement intéressant car l'auteur traite ce sujet, technique s'il en est, avec beaucoup d'humour. Les illustrations sont très utiles pour comprendre le lien entre les équations mathématiques très abstraites et les implications concrètes de ce mécanisme.*

Scientific American. *Higgs Boson Looks "Standard," but Upgraded LHC May Tell a Different Tale* [online], disponible sur : <<https://www.scientificamerican.com/article/higgs-boson-looks-standard-but-upgraded-lhc-may-tell-a-different-tale1/>> (consulté le 22/05/17)

⇒ *Comme le titre l'indique, il s'agit d'un article expliquant comment le boson BEH a été découvert et comment cette découverte pourrait infirmer ou confirmer les différentes théories au-delà du modèle standard. Ce texte donne des pistes intéressantes concernant ces théories. L'article propose également plusieurs liens vers d'autres publications du Scientific American.*

Exposition

Museum d'histoire naturelle de Vienne, Autriche. Exposition « *The beginning of everything. about galaxies, quarks and collisions* » (du 19 octobre 2016 au 20 août 2017). Visite le 19 décembre 2016.

⇒ *C'est au cours d'un voyage à Vienne que j'ai visité ce musée, qui présentait à ce moment-là une exposition sur la naissance et l'expansion de l'Univers ainsi que sur les particules le composant. Une salle entière est consacrée au LHC et au boson BEH, avec des explications simples mais toutefois complètes, et des activités interactives.*

Bibliographie sélective et commentée : sources en français

Ouvrages papier :

ARNAUD Nicolas, DESCOTES-GENON Sébastien, KERHOAS-CAVAT Sophie et al. Passeport pour les deux infinis. 2^{ème} édition. Paris : Dunod, 2013, 192 p.

⇒ *Ce livre réversible présente une partie sur « l'infiniment petit » et une autre sur « l'infiniment grand ». Je me suis principalement inspirée de la première, qui décrit par chapitre les différentes interactions ainsi que les particules élémentaires. De nombreuses illustrations et des explications claires rendent la lecture de cet ouvrage agréable. Le glossaire de fin est très utile.*

BLANCO LASERNA David. Le boson de Higgs. France : RBA, 2017, 168 p. (Voyage dans le cosmos, vol. 4) ISBN 978-2-8237-0398-6

⇒ *Le quotidien Le Monde a eu la bonne idée de sortir une collection intitulée « Voyage dans le cosmos » consistant en une série de courts ouvrages traitant chacun d'un sujet en lien avec les lois de l'Univers. Chaque ouvrage, d'un prix raisonnable, est agrémenté d'illustrations et se veut grand public, même si au fil de la lecture, l'auteur entre rapidement dans les détails et les calculs mathématiques. Ce numéro, dont le sujet est le boson de Higgs, retrace la généalogie de sa découverte ainsi que ses implications dans le modèle standard.*

BLANCO LASERNA David. Le modèle standard des particules. France : RBA, 2017, 159 p. (Voyage dans le cosmos, vol. 14) ISBN 978-2-8237-0398-6

⇒ *Même collection que précédemment. Ce numéro, consacré au modèle standard des particules, est une bonne synthèse.*

COHEN-TANNOUJDI Gilles, SPIRO Michel. Le boson et le chapeau mexicain. Paris, France : Gallimard, 2013, 513 p. (Folio Essais) ISBN 978-2-07-0355495

⇒ *Un livre très dense et complet écrit par deux théoriciens reconnus (Michel Spiro a été élu président du Conseil du CERN en 2009). Cet ouvrage a pour objectif de présenter l'évolution de la pensée dans le domaine de la physique quantique au fil des découvertes théoriques et expérimentales. On y apprend comment l'existence du champ BEH a été postulée bien avant la découverte du boson associé.*

COHEN-TANNOUJDI Gilles, SPIRO Michel. Particules élémentaires et cosmologie : les lois ultimes ? Paris, France : Le Pommier/Cité des Sciences et de l'industrie, 2008, 63 p. ISBN 978-2-74650380-9

⇒ *Cet ouvrage, rédigé par les mêmes auteurs que le livre précédent, est très court mais il reprend l'essentiel des théories concernant l'infiniment petit et l'infiniment grand. Une sorte de condensé, sans équation ni formule mathématique, très utile pour y voir plus clair.*

GOUGOUSSIS Christos, POILVERT Nicolas. Mes premiers pas en mécanique quantiques. Paris, France : Ellipses, 2007, 185 p. ISBN 978-2-7298-3141-7

⇒ *Ce livre se veut grand public et accessible même aux non-initiés, mais à nouveau, il me semble que de solides connaissances préalables sont nécessaires pour aborder cet ouvrage. S'il ne m'a pas vraiment servi pour la rédaction de l'exposé, il m'a permis de me familiariser avec la philosophie et les fondamentaux de la mécanique quantique.*

ILIOPOULOS Jean. Aux origines de la masse : particules élémentaires et symétries fondamentales. Les Ulis, France : EDP Sciences, 2014, 117 p. (Une introduction à...) ISBN 978-2-7598-1158-8

⇒ *Un ouvrage bien illustré et complet présentant le modèle standard et la découverte du boson BEH, mais aussi le CERN et les théories au-delà du modèle standard. Un livre assez complet donc, sur lequel je me suis appuyée pour la rédaction de l'exposé du présent mémoire, mais les idées sont parfois exposées de façon peu compréhensible ou prêtant à confusion.*

Brochure papier :

CERN. Guide du LHC. 2009 CERN-Brochure-2009-003-Fre

⇒ *Cette brochure se présente sous la forme d'une « Foire aux questions ». Elle explique le fonctionnement global du LHC du CERN et elle présente de manière très brève les particules et les forces du modèle standard. Une bonne entrée en matière pour comprendre le fonctionnement d'un accélérateur et les défis que celui-ci a dû (et doit) relever.*

Mémoire de traduction de l'ESIT :

FRUIT Virginie. La matière noire. Mémoire de traduction de l'ESIT. Paris : Université Sorbonne Nouvelle, 2011, 126 p.

⇒ *Peu d'étudiants consacrent leur mémoire de traduction de l'ESIT à un sujet scientifique. Le mémoire de Virginie Fruit est l'exception qui confirme la règle. Le thème est en lien avec le sujet du présent mémoire, puisque la matière noire fait l'objet d'études pour des théories au-delà du modèle standard.*

Sites web :

CERN. Accélérateur de sciences [en ligne], disponible sur : < <http://home.cern/fr>>

⇒ *Voir la partie « Bibliographie sélective et commentée : sources en anglais » et la sous-partie « Sites webs »*

Futura Sciences. Sciences [en ligne], disponible sur : <<http://www.futura-sciences.com/sciences/>>

⇒ *Ce site internet répertorie de nombreux articles relatifs à tous les sujets de physique. Une section « Définition » permet d'avoir accès à des explications rapides sur de nombreux concepts. Les articles, parfois un peu courts, donnent de bonnes pistes de recherche.*

Sciences et Avenir. Mécanique quantique : nouvelle définition de la fonction d'onde [en ligne], disponible sur : <https://www.sciencesetavenir.fr/fondamental/mecanique-quantique-nouvelle-definition-de-la-fonction-d-onde_22853> (consulté le 23/02/17)

⇒ *Cet article de Sciences et Avenir, relativement technique, permet de comprendre la notion de fonction d'ondes et de comprendre son utilité dans la mécanique quantique. Le magazine Sciences et Avenir contient par ailleurs de nombreux autres articles concernant l'actualité scientifique et les dernières découvertes en physique des particules.*

Pour la science.fr. Brisure de symétrie chez les particules. [en ligne], disponible sur <http://www.pourlascience.fr/ewb_pages/a/article-brisures-de-symetrie-chez-les-particules-18492.php> (consulté le 21/05/17)

⇒ *Un article complet qui explique le concept, difficile à visualiser, de brisure de symétrie en physique des particules, en en donnant une définition claire. Le site Pour la science.fr permet d'accéder à d'autres articles scientifiques sur des sujets connexes.*

CALVET David. Voyage au cœur de la matière. [en ligne], disponible sur : <<http://voyage.in2p3.fr/>>

⇒ *Ce site internet, d'aspect peu engageant voire complètement amateur, est en réalité un projet réalisé par David Calvet, chercheur en physique corpusculaire à l'IN2P3, un centre de calcul lié au CNRS. Les différentes pages de ce site présentent de manière simple les différentes particules et interactions du modèle standard, en donnant des définitions précises. Il est parfois compliqué de se repérer sur le site.*

Glossaire :

CNRS. Glossaire [en ligne], disponible sur :

<<http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbig/glossaire/global.htm>> (consulté le 26/12/16)

⇒ *Un glossaire très complet donnant la définition de la plupart des termes relatifs à la physique des particules. Certaines définitions sont cependant incomplètes.*

Exposition :

Musée du Palais de la découverte, Paris (France). Exposition permanente, étage de Physique, salle Nucléaire. (visite le 01/09/2016)

⇒ *La partie concernant la physique nucléaire et des particules est une des plus récentes et des mieux présentées du Palais de la découverte. Les informations sont affichées de manière claire et illustrées de nombreux schémas. Des activités interactives et des quizz rendent la visite agréable et instructive.*

Spécialiste :

ROSNET Philippe, Professeur de physique à l'Université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand) et chercheur à l'expérience ALICE du CERN (Genève), rencontres les 26/08/16 et 12/04/17

⇒ *J'ai rencontré M. Rosnet à l'époque où j'étais étudiante en section Sciences et Langues à l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, il était alors chargé des cours de mécanique. Nous avons échangé de nombreux mails, et ses conseils ainsi que ses recommandations de lecture m'ont été d'une aide précieuse.*

INDEX

A

accélérateur, 5, 17, 18, 19, 20, 21, 97, 103, 109, 112, 117, 130, 134
action, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 75, 78, 92, 97, 107, 109, 117
antimatière, 23, 37, 97, 109, 117
antiparticule, 109, 117
atome, 7, 8, 9, 73, 74, 95, 97, 109, 117

B

Big Bang, 31, 33, 37
boson BEH, 1, 5, 9, 17, 21, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 31, 33, 34, 35, 43, 45, 47, 61, 63, 65, 69, 70, 72, 73, 77, 78, 79, 85, 89, 91, 93, 95, 98, 99, 102, 106, 107, 109, 112, 113, 117, 119, 122, 127, 128, 129, 131, 132, 134
boson d'interaction. *Voir* boson de jauge
boson de Higgs. *Voir* boson BEH
boson de jauge, 11, 27, 85, 89, 109, 110, 111, 115, 117, 121, 122
boson de Nambu-Goldstone, 57, 59, 98, 111, 112, 117
boson intermédiaire. *Voir* boson de jauge
boson vecteur intermédiaire. *Voir* boson de jauge
boson W, 13, 98, 115, 117, 123
boson Z, 13, 98, 116, 118, 123
brisure de symétrie, 29, 31, 33, 37, 59, 70, 79, 93, 98, 115, 118, 123, 127, 131, 136
brisure spontanée de symétrie, 1, 30, 31, 53, 55, 59, 85, 89, 93, 98, 114, 118

Brout, Robert, 5, 28, 29, 42, 43, 44, 45, 60, 61, 72, 73, 89, 90, 91, 104, 109, 112, 121
Buridan, Jean, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 69, 70

C

champ, 15, 19, 29, 31, 33, 37, 47, 49, 51, 55, 57, 59, 65, 72, 76, 77, 78, 79, 80, 91, 99, 108, 109, 110, 111, 112, 118, 129, 133
champ BEH, 29, 31, 33, 37, 51, 57, 65, 72, 79, 91, 99, 109, 112, 118, 133
champ de Higgs. *Voir* champ BEH
champ de jauge, 59, 99, 111, 118
CMS, 5, 18, 22, 23, 25, 44, 45, 46, 47, 90, 129
collisionneur, 5, 17, 20, 21, 45, 99, 109, 118

D

désintégration, 13, 22, 23, 25, 110, 118
dualité onde-corpuscule. *Voir* dualité onde-particule
dualité onde-particule, 14, 15, 99, 115, 118

E

Einstein, Albert, 10, 11, 19, 32, 62, 63, 100
électron, 13, 17, 19, 37, 43, 51, 57, 73, 76, 91, 100, 101, 103, 104, 105, 110, 118, 127
électron-volt, 19, 100, 110, 118
énergie, 1, 13, 19, 21, 23, 25, 27, 29, 30, 31, 32, 33, 37, 47, 49, 51, 55, 57, 59, 61, 63, 65, 73, 76, 77, 79, 80, 87, 100, 106, 109, 118, 130

énergie noire, 37, 63, 100, 109, 118
énergie sombre. *Voir* énergie noire
Englert, François, 5, 28, 29, 42, 43, 44, 45, 60, 61, 72, 73, 89, 90, 91, 104, 109, 112, 121
équations de Maxwell, 47, 112, 118
espace-temps, 10, 23, 47, 49, 100, 113, 118
événement, 5, 25, 31, 34, 35, 47, 110, 118

F

Fermi, Enrico, 7, 101
fermion, 101, 106, 110, 118
fonction d'onde, 9, 101, 115, 118, 135
force d'interaction fondamentale. *Voir* force fondamentale
force électrofaible, 17, 87, 101, 110, 118, 119
force électromagnétique, 9, 11, 13, 17, 59, 87, 101, 104, 105, 110, 118, 119
force faible, 9, 12, 13, 17, 59, 87, 98, 101, 102, 115, 116, 119, 120
force fondamentale, 85, 87, 111, 118, 119, 120
force forte, 7, 9, 13, 59, 87, 97, 102, 103, 106, 114, 119, 120
force gravitationnelle, 9, 10, 11, 63, 65, 87, 95, 102, 103, 111, 112, 119, 120
force nucléaire forte. *Voir* force forte

G

gluon, 87, 102, 111, 119
gravitation. *Voir* force gravitationnelle

gravité. *Voir* force gravitationnelle
graviton, 11, 88, 89, 103, 111, 119

H

hadron, 20, 103, 112, 119, 130
Higgs, Peter, 5, 28, 29, 41, 42, 43,
44, 45, 46, 50, 54, 56, 60, 61,
62, 64, 69, 72, 73, 79, 85, 88,
89, 90, 91, 92, 94, 99, 104, 109,
112, 113, 117, 118, 119, 121,
122, 127, 128, 129, 130, 131

I

intégrale de chemin de Feynman,
1, 74, 103, 110, 113, 119
interaction électrofaible. *Voir* force
électrofaible
interaction électromagnétique. *Voir*
force électromagnétique, *Voir*
force électromagnétique
interaction faible. *Voir* force faible
interaction fondamentale. *Voir*
force fondamentale
interaction forte. *Voir* force forte
interaction gravitationnelle. *Voir*
force gravitationnelle
interaction nucléaire faible. *Voir*
force faible
interaction nucléaire forte. *Voir*
force forte

L

lepton, 103, 112, 120
LHC, 1, 5, 15, 17, 18, 19, 21, 23,
25, 27, 35, 45, 73, 88, 95, 99,
100, 131, 134
luminosité, 21, 103, 112, 120

M

masse cachée. *Voir* matière noire
masse invisible. *Voir* matière noire
masse manquante. *Voir* matière
noire
matière, 1, 6, 7, 13, 15, 19, 21, 23,
27, 31, 36, 37, 43, 49, 63, 74,

87, 95, 97, 100, 101, 104, 105,
106, 108, 109, 112, 118, 120,
128, 134, 136
matière noire, 23, 36, 37, 63, 95,
104, 109, 112, 120, 128, 134
matière sombre. *Voir* matière noire
mécanique ondulatoire. *Voir*
physique quantique
mécanique quantique. *Voir*
physique quantique
mécanisme BEH, 2, 28, 29, 31, 33,
43, 51, 55, 69, 72, 73, 79, 80,
91, 99, 104, 109, 112, 121, 127
médiateur. *Voir* boson de jauge
modèle standard de la physique
des particules, 1, 5, 7, 9, 10, 23,
26, 27, 31, 35, 37, 43, 45, 47,
49, 59, 61, 63, 65, 69, 70, 74,
76, 80, 85, 87, 95, 97, 103, 106,
107, 113, 114, 115, 121, 122,
128, 131, 132, 134, 136
muon, 103, 104, 112, 122

N

neutron, 13, 73, 105, 112, 122
nucléon, 105, 106, 113, 122

P

particule, 5, 13, 15, 19, 23, 25, 27,
31, 33, 37, 43, 45, 49, 51, 57,
61, 69, 72, 73, 75, 77, 80, 100,
101, 105, 106, 107, 109, 110,
111, 112, 113, 114, 115, 117,
118, 119, 121, 122, 123, 127,
128
particule de Dieu. *Voir* boson BEH
particule de Higgs. *Voir* boson BEH
particule élémentaire, 5, 73, 105,
110, 111, 122
particule porteuse. *Voir* boson de
jauge
photon, 48, 49, 58, 87, 105, 113,
122
physique quantique, 9, 15, 53, 55,
70, 71, 75, 80, 99, 104, 113,
120, 123, 133, 135
proton, 13, 46, 47, 88, 105, 106,
113, 123

Q

QFT. *Voir* théorie quantique des
champs

R

relativité générale, 63, 111, 123
renormalisation, 65, 76, 106, 113,
123

S

spin, 27, 90, 91, 101, 106, 113, 123
supersymétrie, 23, 35, 61, 107,
114, 123, 128
supraconducteur, 93, 107, 114, 123
SUSY. *Voir* supersymétrie
symétrie, 31, 33, 49, 51, 53, 59, 61,
78, 79, 93, 98, 104, 107, 111,
112, 114, 115, 118, 123, 129,
136
symétrie de jauge, 33, 59, 93, 107,
111, 123

T

théorie au-delà du modèle
standard, 95, 107, 113, 115, 123
théorie quantique des champs, 15,
47, 49, 53, 55, 63, 65, 75, 76,
77, 108, 113, 123
transition de phase, 31, 33, 108,
113, 123

U

Univers, 5, 16, 17, 27, 29, 33, 36,
37, 45, 53, 61, 63, 76, 99, 100,
104, 110, 123

V

violation de symétrie. *Voir* brisure
de symétrie
vitesse de la lumière, 123

Résumé du mémoire : ce mémoire de traduction vise à donner au lecteur les clés essentielles de la physique des particules (forces et particules) pour comprendre l'importance de la découverte du boson de Higgs, ou boson BEH, au sein de la théorie. Il permet également de comparer l'utilisation des termes français et anglais dans des textes scientifiques spécialisés, et il donne la définition des principaux termes relatifs à cette discipline.

Mots-clés : physique des particules ; boson de Higgs ; CERN ; modèle standard ; particule élémentaire ; traduction scientifique