



The mystery of the Higgs particle/Le mystère de la particule de Higgs

Foreword

The Higgs particle is the last missing ingredient of the theory of strong, weak and electromagnetic interactions, called the Standard Model. Its experimental search is one of the main goals of the LHC (Large Hadron Collider) experiment which will start operation at CERN (the European Organization for Nuclear Research), in Geneva, in 2008. In contrast to all other known elementary particles, it is scalar, i.e. without spin, and thus remains invariant under space time Lorentz transformations. Ordinary matter is composed of quarks and leptons, which are fermions of spin-1/2, while its interactions are mediated by vector bosons of spin-1. All presently known scalar particles are composite; for instance pions are made of quark–antiquark pairs that are bound together due to the strong force they experience.

The main role of the Higgs particle is to generate a mass for the mediators of weak interactions, i.e. the W^\pm and Z^0 bosons, that were discovered at CERN in previous experiments, as well as for all quarks and leptons. The weak force then becomes short range, of the order of 10^{-18} meters, corresponding to the wave length of its mediators.

The Higgs mechanism, described above, was invented independently by Peter Higgs and by Robert Brout and François Englert in 1964; in the first two articles of the present issue, they present the history, their motivations and main ideas. The properties of the Higgs particle in the Standard Model and the present experimental bounds on its mass are summarized in the third article by Michel Davier.

Despite its crucial role, the introduction of the Higgs particle brings a serious theoretical problem. It receives quantum corrections to its mass proportional to the highest mass scale in the theory. The latter is usually very large, about 16 orders of magnitude higher than the electroweak boson masses, if the three forces unify or are coupled to gravity which is the fourth known force but not described by the Standard Model. One is therefore forced to do a severe fine tuning of the parameters of the theory to about 32 decimal places in order to keep the masses of elementary particles at their observed values. This ‘hierarchy’ problem was for decades the driving force for many theoretical extensions of the Standard Model, predicting, in general, new physics related to the Higgs sector. This new physics is therefore expected to be within the reach of LHC or the TEVATRON which is a lower energy particle physics collider in actual operation at Fermilab in USA.

One of the most commonly studied extensions of the Standard Model is supersymmetry, which is a symmetry exchanging fermions and bosons, and thus particles of different spin [1]. It predicts a whole spectrum of new particles, one ‘superpartner’ for each known particle of the Standard Model, with masses in the TeV region, that keep the quantum corrections to the Higgs mass disconnected from high energy scales. The properties of the Higgs sector in the supersymmetric Standard Model are described in two articles by John Ellis, Giovanni Ridolfi and Fabio Zwirner and by Luis Ibáñez and Graham Ross.

A different proposal postulates that the Higgs particle is the Goldstone mode of an approximate global symmetry broken in the TeV scale. In the initial realizations of this idea the Higgs was composite due to new strong interactions, like the ordinary pions, while more realistic proposals were studied recently under the name of ‘little Higgs’ models. Their properties are reviewed in the article of Howard Georgi.

A more radical idea uses large extra dimensions of space that can be used to lower the energy scale of quantum gravity from the traditional Planck scale of 10^{19} GeV down to the TeV region [2]. A theoretical framework of this idea is string theory which replaces the notion of point particles as fundamental entities of nature by extended objects such as strings, and unifies consistently all known forces with gravity. By lowering the string scale in the TeV region

the hierarchy problem is automatically solved since the size of quantum corrections are controlled by this scale. The apparent weakness of gravity can then be accounted for by the existence of large extra dimensions of submillimeter size, transverse to a braneworld where our universe must be confined. This proposal has obviously spectacular consequences at LHC that would change radically our understanding of fundamental laws of nature [3]. The possible realizations of the Higgs sector in such a framework are discussed in the article of Karim Benakli. A variation of this idea uses curved space and ‘warped’ extra dimensions and is described in the article of Roberto Contino and Alex Pomarol. Using large extra dimensions, one can even obtain models without Higgs particle that are presented in the article of Christophe Grojean.

Finally, the last article of this issue by Albert De Roeck and Giacomo Polosiello describes the experimental challenge of search for the Higgs particle and for any possible new physics beyond the Standard Model in the ATLAS and CMS experiments of LHC.

Avant-propos

La particule de Higgs est le dernier élément manquant de la théorie des interactions fortes, faibles et électromagnétiques, appelée Modèle Standard. Sa recherche expérimentale est l'un des buts principaux de l'expérience LHC (Grand collisionneur hadronique) dont la mise en service au CERN, à Genève, aura lieu en 2008. Contrairement à toute autre particule élémentaire, la particule de Higgs est scalaire, c'est-à-dire sans spin, et elle reste donc invariante sous des transformations de Lorentz d'espace-temps. La matière ordinaire est composée de quarks et de leptons, qui sont des fermions de spin-1/2, tandis que ses interactions sont transmises par des bosons vecteurs de spin-1. Toutes les particules scalaires connues actuellement sont composites ; par exemple les pions sont constitués de paires de quark-antiquark dont la cohésion est assurée par la force forte.

Le rôle principal de la particule de Higgs est de générer la masse des médiateurs des interactions faibles, c'est-à-dire les bosons vecteurs W^\pm et Z^0 , découverts au CERN par des expériences antérieures, ainsi que la masse de tous les quarks et les leptons. La force faible devient alors une interaction à courte portée, de l'ordre de 10^{-18} mètre, correspondant à la longueur d'onde de ses médiateurs.

Le mécanisme de Higgs qui vient d'être décrit a été inventé indépendamment par Peter Higgs et par Robert Brout et François Englert en 1964 ; dans les deux premiers articles de ce volume, ces auteurs présentent l'histoire, leur motivations et les idées principales. Les propriétés de la particule de Higgs dans le Modèle Standard et les limites expérimentales actuelles sur sa masse sont résumées dans la troisième article de Michel Davier.

Malgré son rôle crucial, l'introduction de la particule de Higgs soulève un problème théorique sérieux. Sa masse reçoit en effet des corrections quantiques proportionnelles à la plus haute échelle d'énergie de la théorie. Traditionnellement, cette échelle est très élevée, à peu près 16 ordres de grandeur de plus que les masses des bosons vecteurs des interactions électrofaibles ; c'est du moins l'échelle d'énergie qui apparaît naturellement si les trois forces s'unifient ou si elles sont couplées à la gravité, quatrième force fondamentale de la nature, mais non incorporée au Modèle Standard. Ces corrections quantiques imposent d'ajuster avec une précision de 32 chiffres significatifs les paramètres de la théorie afin de préserver les valeurs observées des masses des particules élémentaires. Ce problème, dit de ‘hiérarchie’, a été pendant plusieurs décades la raison principale de l'élaboration de plusieurs extensions théoriques du Modèle Standard, conduisant toutes en général à une nouvelle physique dans le secteur de Higgs. La découverte de cette nouvelle physique est très attendue au LHC ou au TEVATRON, un accélérateur de particules fonctionnant à plus basse énergie et actuellement en opération au Fermilab aux Etats Unis.

Une des extensions du Modèle Standard les plus couramment étudiées est basée sur la notion de supersymétrie, une symétrie échangeant bosons et fermions c'est-à-dire des particules de spin différent [1]. Elle prédit un monde entier de nouvelles particules : chaque particule connue du Modèle Standard est accompagnée d'une super-partenaire ayant une masse de l'ordre du TeV et dont le rôle est en particulier d'assurer que les corrections quantiques à la masse du Higgs restent insensibles aux échelles de haute énergie de la théorie. Les propriétés du secteur de Higgs dans le Modèle Standard supersymétrique sont décrites dans deux articles de John Ellis, Giovanni Ridolfi et Fabio Zwirner, et de Luis Ibáñez et Graham Ross.

Une approche différente consiste à postuler que la particule de Higgs est un état de Goldstone associé à une symétrie globale approchée et brisée à l'échelle du TeV. Dans les réalisations initiales de cette idée, le Higgs était un objet composite résultant de nouvelles interactions fortes, tout comme les pions des interactions fortes du Modèle

Standard. Ces dernières années, des constructions plus réalistes ont vu le jour sous le nom de modèles de « petit Higgs ». Les propriétés de ces modèles sont présentées dans l'article de Howard Georgi.

Une approche plus radicale repose sur l'idée de dimensions d'espace supplémentaires de grande taille, qui pourraient permettre d'abaisser l'échelle caractéristique de la gravitation quantique de la masse de Planck traditionnelle, 10^{19} GeV, jusqu'à des énergies de l'ordre du TeV [2]. Un cadre théorique où cette idée est réalisée est fourni par la théorie des cordes : les entités fondamentales de la nature ne sont plus des particules ponctuelles mais des objets étendus, notamment des cordes. On parvient ainsi à unifier de façon cohérente toutes les forces fondamentales avec la gravité. Si l'échelle caractéristique des cordes est de l'ordre du TeV, le problème de hiérarchie disparaît automatiquement car la taille des corrections quantiques est précisément fixée par cette échelle. La faiblesse apparente des forces de gravitation est alors expliquée par l'existence de dimensions supplémentaires de grande taille, pouvant même atteindre une fraction de millimètre, transverses à un univers branaire où notre monde serait confiné. Cette proposition a évidemment des conséquences spectaculaires pour le LHC, qui pourraient changer radicalement notre conception des lois fondamentales de la nature [3]. Les réalisations possibles du secteur de Higgs dans ce cadre sont discutées dans l'article de Karim Benakli. Une variation de cette idée basée sur un espace courbe et des dimensions supplémentaires 'warpées' est décrite dans l'article de Roberto Contino et Alex Pomarol. En présence de dimensions supplémentaires, on peut même obtenir des modèles sans particule de Higgs qui sont présentés dans l'article de Christophe Grojean.

Enfin, Albert De Roeck et Giacomo Polosielo, dans le dernier article de ce volume, décrivent les enjeux expérimentaux, au sein des expériences ATLAS et CMS du LHC, de la recherche de la particule de Higgs et d'une nouvelle physique éventuelle au delà du Modèle Standard.

Ignatios Antoniadis¹

Department of Physics

CERN – Theory Division

CH-1211 Geneva 23, Switzerland

E-mail address: ignatios.antoniadis@cern.ch

References

- [1] For a review see P. Fayet, Supersymmetry: a serious way, La Recherche 338 (2001) 29.
- [2] For a review see I. Antoniadis, The hidden dimensions of the Universe, La Recherche 343 (2001) 25.
- [3] For a review see Extra dimensions in Physics and Astrophysics, C. R. Physique 4 (3) (2003) 311–417.

¹ On leave from Centre de Physique Théorique (UMR du CNRS 7644), École polytechnique, 91128 Palaiseau cedex, France.