

Prix Nobel de Physique 2013

Jean Orloff (orloff@in2p3.fr)

Laboratoire de physique corpusculaire, IN2P3/CNRS, Université Blaise Pascal, 24 av. des Landais, BP 80026, 63171 Aubière Cedex

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

Le prix Nobel de Physique 2013 couronne la découverte en 1964 d'un mécanisme théorique par Robert Brout et François Englert de l'Université Libre de Bruxelles, et indépendamment par Peter Higgs de l'Université d'Edimbourg. Ce mécanisme dit de Brout-Englert-Higgs (ou BEH) permet d'exprimer la masse de certaines particules, non comme une propriété intrinsèque de chaque particule, mais comme le produit d'un couplage et d'un champ :

$$(Masse) = (\text{couplage}) \times$$

$$(\text{champ de Brout-Englert-Higgs}) \quad (1).$$

La physique offre de nombreux exemples de telles relations, où l'effet d'un champ générique est démultiplié par un couplage caractéristique de l'objet sensible à ce champ, par exemple :

$$(\text{Force électrostatique}) =$$

$$(\text{charge électrique}) \times (\text{champ électrique}),$$

ou encore :

$$(\text{Poids}) = (\text{masse gravitationnelle}) \times (\text{champ de pesanteur}).$$

On peut ainsi croire que le poids d'un objet en est une caractéristique fondamentale, jusqu'à ce qu'on soit capable de modifier le champ de pesanteur, par exemple en transportant l'objet dans l'espace ou sur la Lune. On s'aperçoit alors que ce qui reste fondamentalement attaché à l'objet est sa masse gravitationnelle, et que le poids n'est qu'un concept dérivé. De même, la masse de certaines particules élémentaires⁽¹⁾ pourrait disparaître si l'on pouvait modifier et annuler le champ BEH, ce qui est extrêmement difficile et n'a peut-être été réalisé que dans l'univers primordial, à une température supérieure à quelques centaines de GeV.

Si la forme que prend l'équation (1) nous est familière, le mécanisme de Brout-Englert-Higgs n'en est pas moins révolutionnaire à plus d'un titre.

Tout d'abord, parce que c'est la masse qui devient dans certains cas un concept dérivé, alors que, comme on vient de le voir, cette masse joue elle-même le rôle de couplage fondamental pour la gravitation.

Ensuite, parce que le mécanisme de BEH permet de faire rentrer les interactions à courte portée dans le cadre fondamental des interactions de jauge, véhiculées par des particules de *spin* 1, comme le photon dans le cas de l'interaction électromagnétique. Pour leur description quantique et relativiste, ces interactions sont basées sur une symétrie, dite de jauge, qui exige la nullité de la masse des particules intermédiaires, et implique une interaction de portée infinie. Le mécanisme de BEH permet de concilier portée finie, et donc masse non nulle, avec symétrie, en faisant appel au concept de brisure spontanée de symétrie, caractéristique du ferromagnétisme, et importé en physique des particules par Yoichiro Nambu en 1961.

Pour visualiser ce concept, prenons une bouteille de vin avec un fond convexe (fig. 1a) : mise à part l'étiquette, elle est invariante par rotation. Et pourtant, lorsqu'on la vide, qu'on la pose sur une table et que l'on y introduit une bille, celle-ci ne reste pas dans l'axe de la bouteille, mais descend au fond en choisissant une position qui définit une direction arbitraire par rapport à l'axe de la bouteille (fig. 1b). Son état d'énergie minimale ne respecte pas la symétrie de rotation de la bouteille : on dit que cette symétrie est « spontanément brisée ». La présence de cette symétrie se manifeste cependant par le fait que déplacer la bille au fond de la bouteille ne coûte aucune énergie. Qui dit énergie nulle dit masse nulle, et Nambu explique ainsi que certaines particules, appelées pions, ont une masse quasi nulle. Ces pions sont associés à la brisure spontanée de rotation dans un espace interne, c'est-à-dire dans des bouteilles vivant à l'intérieur de chaque point de l'espace-temps.

Dans le mécanisme de BEH, la symétrie brisée n'est pas une **symétrie globale**, faisant tourner toutes les billes en chaque point par un même angle, mais une **symétrie de jauge ou locale**, faisant tourner chaque bille indépendamment d'un angle quelconque.

(1) Les protons et neutrons, qui constituent l'essentiel de notre masse, ne sont pas élémentaires. La masse des quarks qui les constituent ne participe en fait qu'à 1% de notre masse, le reste provenant des interactions fortes entre les quarks.

(2) Ces résultats négatifs ont d'ailleurs valu le surnom de « satanée particule » (*goddamned particle*), initialement donné par Léon Lederman, directeur du Fermilab. Les médias ont préféré amplifier « particule de Dieu », qui est pourtant un magnifique contresens.

(3) Voir l'article « Découverte du boson de Higgs au LHC ? », *Reflets de la physique*, 31 (2012), pp.17-19.

La distance de la bille à l'axe de la bouteille est l'analogie du champ de BEH, dont la valeur non nulle brise spontanément la symétrie de jauge et permet de donner une masse aux particules intermédiaires, sans pour autant compromettre les avantages de cette symétrie. Appliqué au photon, le mécanisme de BEH serait ainsi une généralisation dans le cadre relativiste de l'effet Meissner, par lequel la force magnétique voit sa portée réduite à une distance finie dans un supraconducteur. La pertinence de ce mécanisme pour les interactions faibles de courte portée, suggérée par Brout, Englert et Higgs, a été démontrée en 1967 par Steven Weinberg. Dans son modèle, aujourd'hui appelé « modèle standard », les bosons intermédiaires W et Z ont une masse dictée par l'équation (1), qui est, de plus, étendue aux particules élémentaires constitutives de la matière, comme les électrons, puis les quarks.

Enfin, le dernier aspect original du mécanisme BEH n'est pas le moindre. Comme la masse et les couplages sont des invariants relativistes, qui restent par exemple inchangés lors d'une rotation d'espace, le champ de Brout-Englert-Higgs doit l'être également. C'est donc nécessairement un **champ scalaire**, associé à une particule de *spin* 0, habituellement appelée « boson de Higgs », dont l'analogie est une excitation radiale de la bille au fond de la bouteille. Ce mécanisme est en fait la seule motivation fondamentale exigeant l'existence d'une telle particule, à côté des particules élémentaires de matière ayant un *spin* 1/2, comme l'électron ou les quarks, et des particules de *spin* 1 véhiculant les diverses interactions (photons, gluons, W , Z).

Ce statut particulier explique l'importance de la recherche de cette particule, qui s'est poursuivie pendant plus de 20 ans, malgré de nombreux résultats négatifs⁽²⁾. La découverte par les collaborations ATLAS et CMS au CERN⁽³⁾ d'une nouvelle particule ayant jusqu'ici toutes les propriétés de celle du mécanisme de BEH est donc une étape majeure dans notre compréhension de la façon dont les interactions fondamentales sont réalisées dans la Nature.

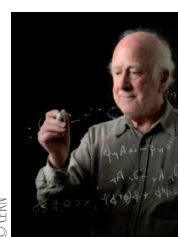
Si le mécanisme BEH offre une nouvelle compréhension de la masse des particules élémentaires, la question de leur grande diversité subsiste : par exemple, pourquoi la masse du quark *up* est-elle cinq ordres de grandeur plus petite que celle du quark *top* ? Même reformulée en termes de couplages, cette question reste entière. ■

► François Englert



François Englert, né en 1932 à Etterbeek (Belgique), est un physicien théoricien belge. Titulaire d'un diplôme d'ingénieur civil mécanicien et électricien, il bifurque vers une thèse de physique soutenue en 1958. Lors d'un séjour à l'Université de Cornell (USA), il rencontre Robert Brout, avec qui il collaborera toute sa vie. Il est nommé professeur à l'Université Libre de Bruxelles en 1964. La même année, il propose avec Robert Brout le mécanisme BEH dans un article publié dans *Physical Review Letters* 13 (1964) 321-322. François Englert est également associé au modèle d'inflation cosmique, avec Robert Brout et Edgard Gunzig.

► Peter W. Higgs

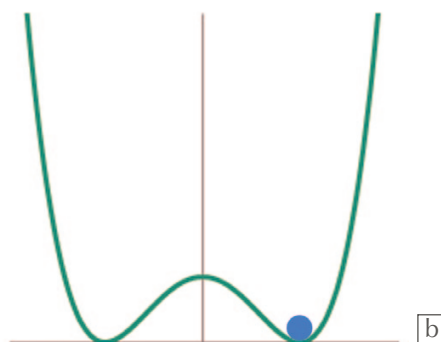


Peter W. Higgs est un physicien théoricien britannique, né en 1929 à Newcastle upon Tyne (Angleterre). Il a soutenu en 1954 une thèse de physique moléculaire au King's College de Londres. Enseignant à l'Université d'Edimbourg depuis 1960, il publie en 1964 son article sur les symétries brisées et les masses des bosons de jauge dans *Physical Review Letters* 13 (1964) 508-509. Il occupe la chaire de physique de l'Université d'Edimbourg, de 1980 à 1996. Il y est maintenant professeur émérite.

► Robert Brout



Robert Brout est un physicien américain puis belge, né à New-York en 1928. Après avoir commencé sa carrière à l'Université de Cornell (USA), il rejoint François Englert à l'Université Libre de Bruxelles, où il devient professeur de physique. Ils y créent ensemble le service de physique théorique en 1980. Coauteur des articles de François Englert sur le mécanisme BEH, il n'a pu recevoir le prix Nobel, étant décédé en 2011.



1. (a) Bouteille de vin avec fond convexe. (b) Position asymétrique de l'état d'énergie minimale d'une bille au fond d'un potentiel en forme de fond de bouteille de vin.