

Le Prix Nobel de Physique 2013



François Englert

Comme chacun le sait maintenant, le prix Nobel de physique 2013 a été attribué aux Professeurs **François Englert** (ULB) et **Peter Higgs** (Université d'Edinbourg) pour leur découverte conjointe du boson. Nous avons demandé au Pr **Pasquale Nardone**, professeur de physique aux Facultés des Sciences et de Médecine de l'ULB de nous résumer les fondements de ce concept très complexe. Nous l'en remercions.

Le boson de Brout-Englert

La physique est une science expérimentale, elle est donc le nécessaire dialogue entre expériences et modèles de description.

Les modèles ne sont validés que s'ils prédisent les valeurs expérimentales obtenues, mais aussi s'ils donnent une meilleure description que les modèles précédents. Par " meilleur ", on entend qu'ils apportent une plus grande puissance mathématique ou qu'ils dévoilent une structure plus générale ou enfin qu'ils éclairent différemment la structure de l'objet traité dans le modèle.

Le modèle de description le plus ancien est newtonien. Les objets sont constitués de " points " matériels et entre eux agissent des forces. Le modèle est alors un ensemble d'équations différentielles qui lient l'accélération de chaque point matériel à la force totale qui agit sur ces points. Deux axes de travail naissent : résoudre ces équations et déterminer les forces. A l'époque de Newton (1643-1727), les physiciens connaissaient la force gravitationnelle, électrique et magnétique.

Un premier saut conceptuel est obtenu par Lagrange (1788) qui transforme les équations de Newton dans un principe de minimisation d'une intégrale que l'on nomme : l'action. Ce que l'on intègre et que l'on baptise lagrangien, est une fonction des positions et des vitesses des points matériels. La trajectoire des corps est alors géométrisée. Elle correspond au minimum de cette intégrale. C'est le principe de *moins action*. Ce changement de point

de vue est extrêmement puissant et reste, encore aujourd'hui en 2013, l'outil de construction idéal. Il permet, entre autres, d'étudier les transformations géométriques qui ne changent pas l'action. On parlera alors de symétries et comme ces transformations forment un " groupe " au sens mathématique du mot, on parlera de groupe de symétries laissant invariant l'action.

Les forces agissent partout, en tout point de l'espace et à tout moment. On nomme de façon générale : " champ " ce concept. La gravitation, la température, la pression et la vitesse de déplacement de l'air sont des exemples de champs.

Vers 1865, Maxwell unifie la force électrique et magnétique. C'est-à-dire qu'il écrit les équations du comportement des forces elles-mêmes et en déduit le comportement de la lumière. La lumière est une onde électromagnétique solution mathématique de ces équations. Expérimentalement, cela se vérifie parfaitement, ce qui valide son modèle. Remarquablement, ces équations résultent aussi d'un principe de moins action. On a donc un modèle complet de points matériels en mouvement et en interaction par la force électromagnétique, le tout écrit dans une action totale somme de l'action des points matériels libres, de l'action des champs électromagnétiques libres et de l'action qui contient l'interaction des champs électromagnétiques et des points matériels. C'est dans cette dernière qu'apparaît la charge électrique qui " couple " donc la position et la vitesse des points aux champs électromagnétiques.

Einstein en 1915, après son introduction révolutionnaire de la relativité restreinte en 1905, donne, comme Maxwell, les équations de la gravitation. C'est la relativité générale. Là encore, la force gravitationnelle est déterminée par un principe de moins action qui porte cette fois sur l'espace-temps lui-même. Einstein montre que la gravitation est une propriété géométrique de notre espace-temps.

En 1918, la mathématicienne Emmy Noether démontre un théorème général qui lie toutes les symétries possibles de cette action à la nécessaire conservation de quantités bien définies. Ce théorème est fondamental comme le disait Einstein lui même : " il est un monument de la pensée mathématique ". Puissant, puisqu'en demandant simplement que l'action ne dépende pas de la position absolue, en demandant donc que rien ne change physiquement si on remplace toutes les positions X des points matériels, par $X+A$, le théorème impose la conservation de la quantité de mouvement totale de ces points. De même si rien ne change si on remplace le temps T par $T+B$, ce même théorème impose la conservation de l'énergie ; enfin

l'invariance pour les rotations va engendrer la conservation du moment angulaire. Les symétries de l'action sont donc fondamentales et produisent des conservations de grandeurs essentielles à la physique.

Expérimentalement, la physique fait aussi des progrès majeurs. La découverte de l'électron date de la fin du 19^e siècle, le proton vers 1919, entre 1930 et 1940, on découvre le neutron, l'antiélectron e^+ , les muons μ , puis un peu avant 1950, les pions π , les kaons K et enfin, après 1950, une quantité impressionnante d'autres particules dites " élémentaires ". Comment structurer tout cela ? Comment modéliser tant de diversité dans l'infiniment petit ?

La mécanique quantique, modèle de description prédictif de la physique au niveau atomique, naît en 1900. L'électron y devient aussi un champ. Il n'y a plus de " point " matériel, l'électron a une probabilité de présence partout. En 1920, Dirac formule la quantification du champ électromagnétique. Le photon est la particule associée au champ. La dualité champ-particule est née et est transposée à toutes les particules. L'électron devient un champ quantifié aussi. Les particules sont donc vues comme des excitations quantiques de champ correspondant. Le " vide " prend un statut particulier et les problèmes physico-mathématiques du modèle (apparition de quantités infinies) qui portent alors le nom de théorie quantique des champs, sont traités et résolus.

Pendant les années 1940, on s'aperçoit qu'en plus des transformations de l'espace-temps qui produisent via le théorème de Noether des lois de conservation, on peut analyser des symétries " internes ". Les champs peuvent être soumis à des transformations entre eux qui laissent inchangée l'action. On découvre alors que l'électromagnétisme n'est rien d'autre qu'une conséquence de l'invariance de l'action si on multiplie les champs par un nombre complexe de longueur un. Cette symétrie engendre un groupe de transformations qui porte le symbole U(1). On découvre donc que les forces sont engendrées par des demandes de symétries internes. Voilà qui est surprenant et révolutionnaire. Les théories dites de jauge sont nées. Pour trouver les forces fortes et faibles entre les particules élémentaires, les physiciens doivent trouver les bons groupes de transformation interne. Le

Modèle Standard est donc créé ; il contient trois groupes de transformations internes : SU(3), SU(2) et U(1) qui génèrent alors les trois forces correspondantes : forte, faible et électromagnétique. L'unification a lieu.

Sauf que pour que ces forces faibles et fortes soient à courtes portées comme le veut l'expérimentation, il faut un terme de masse dans l'action. La masse dans ces modèles de champ est simplement une interaction quadratique du champ avec lui-même, du genre $m^2 \psi^2$. Hélas, ce genre de terme détruit la belle construction basée sur les symétries internes !

C'est ici qu'interviennent Brout, Englert et Higgs en premier lieu, suivis par beaucoup de physiciens. L'idée est puisée dans ce que l'on appelle la " brisure spontanée de symétrie ". Les théoriciens avaient en effet montré que si l'action a des propriétés de symétries, la solution des équations du mouvement pouvait ne pas posséder ces mêmes symétries. Prenez par exemple un spaghetti parfait, mettez le verticalement et appuyez dessus. Il a évidemment une symétrie cylindrique parfaite. Le modèle qui va décrire le comportement de ce spaghetti contient cette symétrie. Pourtant dès que l'on appuie dessus, à partir d'une certaine force, le spaghetti se plie et fléchit. La solution est donc devenue asymétrique, mais la direction du fléchissement est totalement arbitraire.

En 1964, Brout, Englert et Higgs, créent donc un champ, donc une particule, qui se couple à tous les champs et à lui-même de telle sorte que l'action conserve toutes les symétries nécessaires mais avec un couplage à lui-même qui permet une brisure spontanée de symétrie. Ce qu'ils montrent c'est que cette brisure spontanée de symétrie donne la masse nécessaire des autres particules ainsi que la sienne.

En 2012, le CERN détecte une particule et confirme le 14 mars 2013 qu'il s'agit bien du boson de Higgs avec une masse de $125,3 \pm 0,6 \text{ GeV}/c^2$, ce qui correspond bien aux attentes des théoriciens puisque cette valeur devait être dans cette zone pour expliquer d'autres valeurs numériques déjà obtenues auparavant.

Le Modèle Standard est donc conforté !