

## 1964 : vers le Modèle standard de la physique des particules :

### l'hypothèse des quarks et le mécanisme de brisure spontanée de symétrie

(publié in : *La science des Sixties*, sous la dir. de O. Néron de Surgy et S. Tirard, Belin 2014)

Dans le Modèle standard, les « briques » élémentaires de la matière sont organisées en trois familles (et de même pour leurs antiparticules, de manière totalement symétrique) (voir figure).

		fermions (3 générations de la matière)			bosons (forces)	
		I	II	III		
masse →		2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0	électromagnétisme
charge →		$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	
spin →		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
nom →		<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon	
	Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0	interaction forte
		$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon	
	Leptons	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV	interaction faible
		0	0	0	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		<b>ν<sub>e</sub></b> neutrino électronique	<b>ν<sub>μ</sub></b> neutrino muonique	<b>ν<sub>τ</sub></b> neutrino tauique	<b>Z<sup>0</sup></b> boson Z <sup>0</sup>	
		0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV	interaction faible
		-1	-1	-1	±1	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		<b>e</b> électron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> boson W	

source :

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A8le\\_standard\\_%28physique\\_des\\_particules%29](http://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A8le_standard_%28physique_des_particules%29)

Chaque famille compte deux « leptons » et deux « quarks », tous de spin 1/2 : un lepton de charge électrique -1 (respectivement l'électron, le muon et le tau) et un lepton (neutrino) de charge 0 (les neutrinos électronique, muonique et tau) ; un quark de charge +2/3

(respectivement les quarks up, charm et top) et un quark de charge  $-1/3$  (down, strange et bottom). Les neutrinos ne connaissent que les interactions faibles, les leptons chargés connaissent en outre les interactions électromagnétiques, et les quarks connaissent les interactions faibles, électromagnétiques et fortes.

S'y ajoutent des particules de spin 1, qui sont les vecteurs des interactions fondamentales : le photon pour l'interaction électromagnétique, les bosons W et Z pour l'interaction faible, les gluons pour l'interaction forte.

S'y ajoute encore le boson de Brout-Englert-Higgs, de spin 0, responsable de l'acquisition de la masse par les particules élémentaires.

L'année 1964 marque un moment important dans la construction du Modèle standard, qui décrit aujourd'hui avec une précision inégalée en sciences notre compréhension des forces et des constituants fondamentaux de la matière.

## LES QUARKS

### 1. Le bestiaire des particules « élémentaires »

A la veille de la deuxième guerre mondiale, quarante ans après la découverte en 1897 de la première d'entre elles, l'électron, on connaît les quatre particules qui constituent les bases de la première famille des particules élémentaires : l'électron et son neutrino, le proton et le neutron.

Autour de la guerre, de nouvelles particules, instables, sont découvertes en utilisant principalement l'émulsion photographique exposée au rayonnement cosmique à haute altitude (essentiellement des protons). L'une d'entre elles est le « pion », proposé par Yukawa comme vecteur de l'interaction forte entre protons et neutrons dans le noyau atomique. Une autre est le muon, un « électron lourd » auquel est également associé un neutrino, observé en 1962.

On découvre également des particules qui sont toujours produites par paire et ont un temps de vie de l'ordre de  $10^{-10}$  s. Pour décrire ces propriétés, on leur assigne un nouveau nombre quantique : l'« étrangeté », qui doit être conservée dans les interactions fortes (d'où la production associée d'une particule et d'une antiparticule étranges), mais pas dans les interactions faibles (d'où la possibilité de désintégration après un temps relativement long, caractéristique des interactions faibles).

Dans les années 1950, qui marquent le début de la physique des particules comme « big science », le bestiaire s'enrichit considérablement grâce à l'utilisation, auprès des accélérateurs de particules, de chambres à bulles qui permettent d'observer les traces des particules produites et de mesurer leur impulsion grâce à la courbure de leur trajectoire dans un champ magnétique. On peut ainsi reconstruire la masse et le spin de plusieurs dizaines de

particules de temps de vie très court, de l'ordre de  $10^{-23}$  s, qui se désintègrent par interaction forte. On découvre également toute une panoplie de nouvelles particules étranges.

Toutes ces particules sont classées en deux groupes : les mésons (comme le pion ou le kaon étrange), de masse inférieure à celle du proton, et les baryons (dont le baryon étrange  $\Lambda$ ), qui se désintègrent en donnant en fin de compte un proton.

## 2. 1964 : l'hypothèse des quarks

En 1964, Gell-Mann, Zweig et d'autres physiciens parviennent à mettre de l'ordre dans le bestiaire de ces particules, dont il est devenu évident qu'elles ne peuvent être toutes véritablement « élémentaires ».

Ils s'appuient sur l'idée d'« isospin », très fructueuse en physique nucléaire. Puisque le proton et le neutron ont des masses et des propriétés extrêmement proches, on peut les considérer comme deux manifestations d'un même objet et penser qu'ils ne diffèrent que par un nouveau nombre quantique, l'« isospin ». On peut alors les placer dans un même « doublet d'isospin », et calculer les propriétés des interactions entre protons et neutrons en utilisant les règles qui gouvernent la symétrie d'isospin, en l'occurrence le groupe mathématique SU(2).

Gell-Mann et ses collègues généralisent cette idée, en choisissant adéquatement la symétrie sous-jacente, le groupe SU(3). Ils associent dans un même « triplet d'isospin faible » trois « quarks » (u, d, s) de spin 1/2, ne différant entre eux que par la masse (le quark s étant un peu plus lourd que le u et le d), la charge électrique (respectivement 2/3, -1/3, -1/3), et l'étrangeté.

En combinant selon les règles de la symétrie SU(3) un quark et un antiquark, ils construisent un multiplet contenant les 9 mésons de spin 0 (dont le pion, u-anti\_d, et le kaon, u-anti\_s) ainsi qu'un multiplet pour les 9 mésons de spin 1. Les règles de symétrie permettent de rendre compte correctement des (faibles) différences de masse entre les membres d'un même multiplet.

De même, en combinant trois quarks selon les règles de SU(3), ils construisent l'octet des baryons de spin 1/2 (avec le proton uud, le neutron udd, et le  $\Lambda$  uds) et le décuplet des baryons de spin 3/2.

## 3. Les quarks prennent de la réalité...

A ce stade, les quarks restent cependant des objets mathématiques et abstraits, dont la fonction n'est que de générer des propriétés de symétrie entre particules.

Ce qui leur donne de la consistance, leur fait « gagner de l'existence », ce sont les expériences de « diffusion profondément inélastique » menées à partir de 1968. Lors de collisions de haute énergie entre électrons et protons, il apparaît que certains électrons sont très fortement déviés, indiquant qu'ils ont percuté une cible ponctuelle au sein du proton. Ce sont des observations semblables à celles qui ont permis à Rutherford de mettre en évidence l'existence d'un noyau au sein de l'atome.

#### **4. Quatre, cinq, six quarks**

Parallèlement, le travail théorique se poursuit, tout comme la recherche expérimentale.

À partir de 1970, des théoriciens invoquent un deuxième quark de charge  $2/3$ , comme le quark up, pour expliquer notamment la non-observation de la désintégration des kaons neutres en paires muon-antimuon : ce quark « charme » viendrait compenser exactement la contribution du quark up, ce qui annulerait le processus. La découverte en 1974 du méson  $J/\Psi$ , interprété comme charme-anticharme, vient confirmer de manière éclatante cette conjecture. La deuxième famille est désormais au complet...

Mais existe-t-il une troisième famille... ? Sur le plan théorique, certains le prévoient dès 1973, car c'est une manière élégante de rendre compte de ce qu'on appelle la « violation de CP », une propriété des interactions faibles qui a à voir avec l'asymétrie entre la matière et l'antimatière dans l'univers. Surtout, sur le plan expérimental, le lepton tau est découvert dans les années 1974-1977, bientôt suivi du méson Y, bottom-antibottom. Et finalement le quark top, le plus massif de tous, est observé en 1994.

Ceci clôt-il la liste des quarks ? Probablement, car les expériences du LEP au CERN ont montré qu'il n'existe que trois types de neutrinos, et la symétrie entre quarks et leptons est un élément important de la cohérence mathématique du Modèle standard.

#### **LE MECANISME DE BROUT-ENGLERT-HIGGS**

Au début des années 60, l'idée est de plus en plus répandue que, sur le modèle de l'électromagnétisme quantique relativiste, les forces entre particules élémentaires reflètent des symétries de la nature appelées « invariance de jauge » (techniquement : la physique ne doit pas être affectée si la « phase » indétectable de la fonction d'onde décrivant une particule est arbitrairement modifiée de place en place).

Une difficulté sérieuse cependant : cette approche prévoit des interactions à portée infinie, propagées par des bosons sans masse se déplaçant à la vitesse de la lumière, comme le photon. Alors que l'interaction faible, en particulier, est à très courte portée et doit donc être véhiculée, en raison du principe d'indétermination de Heisenberg, par des particules très massives.

En 1964, un mécanisme permettant de résoudre cette contradiction est élaboré par Robert Brout et François Englert à l'Université Libre de Bruxelles, et indépendamment par Peter Higgs à Edimbourg, bientôt suivis par d'autres chercheurs. S'inspirant de la théorie de la supraconductivité, ils comprennent que, dans un cadre où l'interaction électromagnétique et l'interaction faible sont unifiées, les bosons faibles peuvent acquérir une masse.

Pour cela, deux éléments cruciaux : l'existence d'un nouveau champ quantique (qui sera appelé le « champ de Higgs »), et la brisure spontanée de la symétrie électrofaible, qui serait survenue très tôt dans l'existence de l'univers (à une époque se terminant quelque  $10^{-12}$  s après le big bang). On aurait assisté à un processus semblable au ferromagnétisme : en passant sous sa température critique, un métal ferromagnétique se magnétise soudain en définissant de manière imprévue et aléatoire une direction de magnétisation, alors qu'au-dessus de cette température, comme pour la théorie générale, toutes les directions sont équivalentes.

Dès lors, il reste trois bosons électrofaibles massifs (les deux W et le Z), un boson sans masse (le photon), et un nouveau boson scalaire, de spin 0, le boson de Brout-Englert-Higgs. Une théorie électrofaible unifiée complète sera bientôt proposée, et les bosons W et Z seront observés directement au CERN en 1983, avec les propriétés attendues.

Outre la masse des bosons W et Z, le mécanisme de BEH explique également la masse des autres particules élémentaires. Comme il remplit l'univers entier, il donne au « vide quantique » une sorte de viscosité, « engluant » les quarks et les leptons avec lesquels il interagit en permanence, et il les ralentit comme s'ils avaient acquis une masse. La masse serait donc une propriété dynamique des particules et de leur interaction avec le vide, et non une propriété intrinsèque, ce qui constitue une révolution conceptuelle.

C'est ce fameux boson scalaire que, après des décennies de recherche, les expérimentateurs du LHC au CERN ont mis en évidence en 2012-2013.



François Englert et Peter Higgs (Brout est décédé en 2011) lors de l'annonce très médiatisée de la découverte du boson de BEH au CERN en juillet 2012.