

Quarks et Leptons

○ ATLAS

○ DØ

Les particules de matière

Nous savons aujourd'hui que la matière est composée de particules élémentaires dont les quarks et les leptons (voir figure 1). Par exemple l'électron gravitant autour du noyau d'un atome est un représentant des leptons. Quant au noyau, il est formé de protons et de neutrons, deux particules elles-mêmes constituées chacune de 3 quarks. Quarks et leptons sont donc des particules fondamentales de la matière. Elles sont dotées d'un spin demi-entier et donc obéissent au principe d'exclusion de Pauli : elles ne peuvent occuper le même état quantique. Disons d'une manière plus imagée qu'elles constituent les « briques » de la matière, elles « s'entassent ». Quarks et leptons chargés sont massifs ce qui semble naturel pour des particules dites de matière. À chaque particule de matière on peut associer une anti-particule caractérisée par des charges de signe opposé.

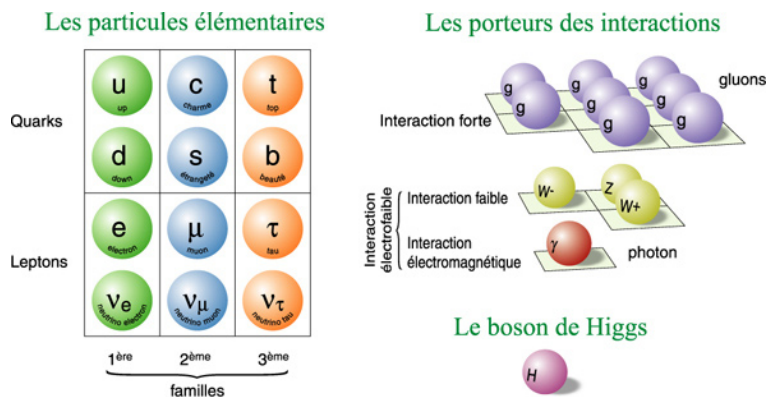


Figure 1 : Tableau des particules élémentaires et des particules liées aux interactions selon le modèle standard.

Les particules d'interaction

Ces particules sont échangées lors de processus d'interaction. Elles permettent l'échange d'énergie ou de la quantité de mouvement ainsi que d'autres caractéristiques en fonction du type d'interaction. On montre que leur spin est entier et on peut les condenser dans leur état fondamental (condensation de Bose-Einstein). Ces particules constituent le « ciment de la matière ». Il existe 4 types d'interactions fondamentales :

1. l'interaction électromagnétique, elle est transmise par l'échange de photons ;
2. l'interaction faible, elle est par exemple responsable de la radioactivité β . Les interactions électromagnétique et faible ont été unifiées en 1967 par Weinberg et Salam qui ont suggéré qu'en plus du photon il existait 3 autres particules de spin 1, les bosons vectoriels W^+ , W^- et Z^0 . Ces bosons ont été mis en évidence au CERN en 1983 et sont donc les médiateurs de l'interaction faible ;
3. l'interaction forte, elle est responsable du confinement des quarks à l'intérieur des hadrons et assure donc leur cohésion. Les gluons sont les médiateurs de cette interaction.
4. l'interaction gravitationnelle. Elle est supposée être véhiculée par un boson de spin 2 appelé graviton qui n'a pas encore été mis en évidence.

Le modèle standard

Le modèle standard décrit les interactions entre toutes les particules actuellement connues. Il met en jeu des symétries abstraites dites de « jauge locale » qui imposent l'existence de champs d'interaction et de leurs bosons associés. En fait ces symétries ne sont réalisées

qu'à très hautes énergies. Les bosons intermédiaires W^+ , W^- et Z^0 sont alors de masse nulle. Lorsque l'on descend en énergie, certaines symétries se brisent spontanément et permettent aux bosons intermédiaires ainsi qu'à toutes les particules de l'univers d'acquérir leur masse. Ce processus permet aussi de conserver le caractère prédictif du modèle, assuré à l'origine par les symétries abstraites. La brisure est en fait provoquée par l'existence d'un doublet de champs scalaires complexes, appelé champs de Higgs qui « structure » le vide. Après la brisure il subsiste un champ scalaire auquel est associé une particule : le boson de Higgs qui est en quelque sorte la « preuve » du mécanisme responsable du phénomène en question. L'observation du boson de Higgs est donc l'un des principaux objectifs de la physique des particules, nous verrons qu'elle fait l'objet d'intenses travaux ou projets de recherche.

Le concept de masse

L'équation d'Einstein $E = mc^2$ traduit le fait qu'énergie et matière sont les 2 faces d'une même entité. La matière étant en quelque sorte une forme « cristallisée » de l'énergie. Toutefois à l'époque d'Einstein, les masses des particules étaient encore interprétées comme des constantes universelles de la nature et donc comme des entités intrinsèques sans aucune justification de leur origine. Ce n'est que depuis l'apparition du modèle standard que la préoccupation du processus physique à l'origine des masses des particules élémentaires s'est réellement fait ressentir. Pourtant la notion de masse effective, largement utilisée par exemple en physique nucléaire, ouvrait une voie à certaines interprétations. Le milieu « d'écrantage » serait dans le cas des particules élémentaires le vide lui-même ou plus exactement le champ de Higgs contenu dans le vide.

Au-delà du modèle standard : modèle standard super-symétrique minimal

La super-symétrie est une nouvelle symétrie qui permet de transformer les bosons (particules d'interaction) en fermions (particules de matière) et vice versa. Elle entraîne l'existence de nombreux partenaires classés en super-multiplets contenant donc à la fois des bosons et des fermions. Cette nouvelle symétrie présente de gros avantages :

1. elle permet l'unification de toutes les interactions, y compris la gravitation ;
2. elle ne contient plus de terme de masse au carré négatif (contrairement au modèle standard) ;
3. elle prévoit l'existence du neutralino en tant que particule stable et massive et donc peut résoudre le problème de la masse cachée de l'univers ;
4. elle ne conduit pas à un désaccord avec certains résultats expérimentaux : valeur de l'angle de Weinberg, durée de vie du proton, convergence en un point unique des constantes d'interaction forte, électromagnétique et faible à haute énergie ;
5. les boucles entre fermions et bosons sont de signes opposés et remédient naturellement aux corrections aux ordres supérieurs qui autrement auraient pour effet de déstabiliser la hiérarchie de jauge, c'est-à-dire la masse des bosons intermédiaires et du Higgs.

L'introduction la plus simple (minimale) de la super-symétrie dans le modèle standard requiert 2 doublets de champs scalaires complexes de Higgs. Après brisure de symétrie elle conduit à l'existence de 5 bosons de Higgs : 2 chargés électriquement et 3 neutres. Néanmoins, à ce jour, aucune particule super-symétrique n'a pu être mise en évidence, sans doute en raison de leur masse élevée ?

Les expériences

La réponse à l'existence du (ou des) boson(s) de Higgs ou des particules super-symétriques ne peut être apportée que par l'expérience. A cette fin il faut disposer d'un accélérateur à haute énergie équipé de détecteurs performants. D'intenses travaux ont été menés au

LEP (collisionneur e^+e^- au CERN) conduisant à une présomption sur l'existence du Higgs avec une masse d'environ 115 GeV, mais ce résultat n'était toutefois pas suffisamment convaincant. Le LEP a été démantelé en 2001 afin de laisser place à un collisionneur proton-proton : le LHC avec 14 TeV d'énergie disponible dans le centre de masse et qui peut donc permettre la matérialisation de nouvelles particules de grande masse. Le domaine d'énergie qui sera sondé est donc encore inexploré et pourra conduire à l'observation du Higgs ou des particules super-symétriques, voire à des découvertes insoupçonnées. ATLAS est l'un des détecteurs de physique des particules qui équiperont le LHC, son démarrage est prévu en 2007. Enfin les États-Unis disposent d'un collisionneur proton anti-proton, le TEVATRON, moins performant que le LHC. Grâce au détecteur DØ qui équipe ce dernier collisionneur, la chasse au Higgs et aux particules super-symétriques est déjà lancée de manière intensive.