

# Quarks, Leptons et Interactions fondamentales

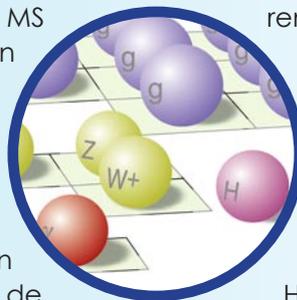
La théorie des particules élémentaires appelée Modèle Standard (MS) s'est élaborée au cours des 30 dernières années. Selon cette description, de la matière sont les leptons et les quarks; ceux-ci sont classés en trois générations, à l'intérieur desquelles les particules ont des propriétés similaires, à l'exception de leur masse. Les interactions entre ces particules sont décrites comme résultant de l'invariance par rapport au groupe de symétrie  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ . Elles sont portées par une autre classe de particules, les bosons de jauge, dont le couplage aux particules de « matière » définit l'intensité de l'interaction.



L'interaction forte est ainsi représentée par le groupe de symétrie de couleur  $SU(3)_C$ , qui décrit les interactions liant les quarks à l'intérieur des protons et neutrons. C'est une symétrie conservée dont les bosons médiateurs sont les gluons, sans masse. L'intensité du couplage fort varie avec l'énergie à laquelle se déroule l'interaction, et se réduit lorsque cette dernière s'accroît. Les deux conséquences notables sont qu'aux faibles énergies les quarks ne peuvent apparaître que dans un état lié à un autre quark, comme c'est le cas à l'intérieur du noyau. En revanche, à de hautes énergies, ces fermions se comportent comme des particules quasi-libres. L'électromagnétisme est porté par un boson de masse nulle, le photon, qui couple les particules de charge électrique non nulle. L'intensité de ce couplage n'est pas constante mais, à l'opposé de l'interaction forte, s'accroît avec l'énergie de l'interaction. Enfin, l'interaction faible, responsable par exemple de la radioactivité  $\beta$ , est portée par des bosons neutre et chargé, les bosons Z et W observés pour la première fois en 1983 au CERN, après la mise en évidence de l'existence du courant neutre faible par l'expérience Gargamelle dix ans auparavant. Ces bosons étant très massifs, la force faible n'opère qu'à de courtes distances, contrairement à l'électromagnétisme, de portée infinie. Les deux interactions électromagnétique et faible sont réunies dans l'interaction électrofaible décrite par le groupe  $SU(2)_L \times U(1)_Y$ . Cette symétrie est cependant spontanément brisée à une énergie de l'ordre de  $\sim 200$  GeV et ne conserve que le groupe  $U(1)_{EM}$  de l'électromagnétisme comme symétrie résiduelle. Ce mécanisme de brisure de symétrie est l'élément central de toute théorie prétendant décrire le secteur électrofaible et n'est à ce jour pas encore identifié.

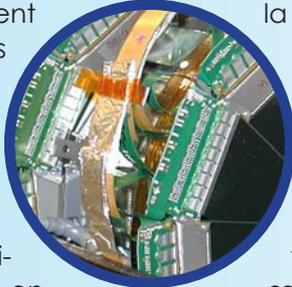


Dans le MS, le mécanisme de brisure de symétrie est le mécanisme de Higgs. Techniquement, il nécessite l'introduction d'un doublet de champs scalaires dont une composante neutre développe une valeur moyenne non nulle dans le vide. Trois composantes sont absorbées sous forme de degrés de liberté longitudinaux des bosons W et Z, leur permettant d'acquérir une masse. La dernière survit sous la forme d'une particule scalaire neutre, le boson de Higgs. Les autres particules du MS acquièrent leur masse par un couplage de type particulier au champ de Higgs, le couplage de Yukawa. À ce jour, le MS rend compte de tous les phénomènes de hautes énergies, à l'exception notable, sous sa forme actuelle en tout cas, de la masse non nulle des neutrinos. Élaboré selon une théorie renormalisable, le MS permet de décrire de manière précise l'ensemble des observables à tous les ordres de correction, à partir d'un ensemble fini de paramètres. Ce pouvoir prédictif s'est révélé notamment dans l'annonce de l'existence du 6<sup>ème</sup> quark, (FNAL, Chicago), dans la gamme de masse prévue. Toutefois le boson de Higgs n'a toujours pas été mis en évidence: les recherches directes conduites auprès des collisionneurs  $e^+e^-$  au LEP (CERN, Genève) et à SLAC (Stanford, USA) ont permis d'établir une limite inférieure sur sa masse à  $114$  GeV/ $c^2$ ; les recherches indirectes, utilisant la mesure précise de quantités mesurables bien déterminées conduisent à une limite supérieure de  $260$  GeV/ $c^2$  pour sa masse.



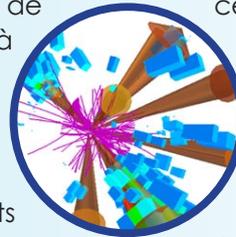
L'importance de la recherche indirecte apparaît dans le choix des activités des groupes DØ (TeVatron) et ATLAS (LHC) du LPSC, fortement impliqués dans les mesures de précision associées au W et au top.

Si le MS est actuellement il n'apparaît toutefois valide (aux basses énergies) les constantes semblent converger à trois interactions  $10^{16}$  GeV. Les corrections à cette échelle d'unification nécessitent la mise en œuvre de mécanismes de compensation sur plus de 20 ordres de grandeurs: c'est le problème de hiérarchie de jauge. Plusieurs approches permettent de résoudre ces problèmes, et sont étudiés par les groupes DØ et ATLAS du LPSC.



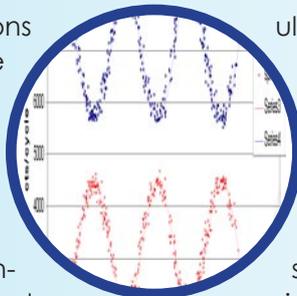
la théorie de référence pour le secteur électrofaible, aujourd'hui que comme une description effective (à très haute énergie, suggérant une unification des interactions radiatives (quadratiques) à la masse du Higgs) d'une théorie plus fondamentale. En de couplage introduites précédemment sembleraient très haute énergie, suggérant une unification des interactions radiatives (quadratiques) à la masse du Higgs sont dès lors remarquablement élevées et nécessitent la mise en œuvre de mécanismes de compensation sur plus de 20 ordres de grandeurs: c'est le problème de hiérarchie de jauge. Plusieurs approches permettent de résoudre ces problèmes, et sont étudiés par les groupes DØ et ATLAS du LPSC.

L'extension la plus répandue du MS repose sur une nouvelle symétrie, la supersymétrie (SUSY). Intégrant le secteur électrofaible dans sa description standard, la SUSY en offre un cadre étendu en prédisant le doublement du nombre de particules. Aucune de ces particules n'ayant à ce jour été mise en évidence, la SUSY est brisée à notre échelle, mais les mesures de précision et des considérations théoriques permettent cependant d'établir une limite supérieure de quelques TeV sur leur masse. Le groupe DØ du LPSC est impliqué dans la recherche de certaines de ces particules, les s-quarks et les gluinos. Dans le cadre SUSY, le secteur de Higgs est enrichi: nécessitant l'introduction de deux doublets scalaires, le modèle prévoit la présence de cinq bosons de Higgs, trois neutres (h, H et A) et deux chargés ( $H^+$ ,  $H^-$ ). Le spectre en masse de ces bosons est prédit et de fortes contraintes imposent que le Higgs neutre le plus léger soit de masse inférieure à  $150 \text{ GeV}/c^2$ . Le groupe ATLAS du LPSC est impliqué dans les recherches directe et indirecte des bosons de Higgs chargés.



D'autres théories au-delà du MS ont été élaborées depuis près de trente ans, et sont étudiées au LPSC: elles mettent en jeu soit une extension du groupe de symétrie interne – ce sont les modèles basés sur les théories des cordes ou sur la restauration de la symétrie droite/gauche, soit une extension du groupe de symétrie externe – par le biais de modèles à dimensions supplémentaires d'espace-temps. Ces modèles ont en commun de prédire l'existence de nouveaux bosons de jauge neutres supplémentaires, appelés  $Z'$ , dont les propriétés, fixées par la structure du groupe de symétrie sous-jacent dépendent du modèle considéré. Le groupe du LPSC se propose ainsi, au-delà de la détection d'un boson  $Z'$ , d'en identifier l'origine par le développement d'analyses discriminantes.

Enfin, le groupe de recherche sur les neutrons explore les théories fondamentales de la physique des particules par une approche distincte: la mesure du moment magnétique dipolaire du neutron. Un moment dipolaire non nul du neutron implique des violations conjointes de la symétrie de parité (P) et d'inversion du temps (T). La valeur attendue dans le cadre du MS est donc extrêmement faible, et probablement hors portée des mesures expérimentales. Cependant, certaines extensions du MS dont des modèles de violation de T qui engendrent des valeurs plus élevées du moment magnétique dipolaire du neutron. C'est dans ce cadre que s'insèrent les activités du groupe du LPSC au sein de l'expérience nEDM au PSI. ■



ultra-froids complète cette exploration de la physique des particules par la mesure du moment dipolaire du neutron. Un moment dipolaire non nul du neutron ne peut résulter que des violations conjointes de la symétrie de parité (P) et d'inversion du temps (T). La valeur attendue dans le cadre du MS est donc extrêmement faible, et probablement hors portée des mesures expérimentales. Cependant, certaines extensions du MS dont des modèles de violation de T qui engendrent des valeurs plus élevées du moment magnétique dipolaire du neutron. C'est dans ce cadre que s'insèrent les activités du groupe du LPSC au sein de l'expérience nEDM au PSI. ■