

Groupe de Travail No 1

Modèle Standard, mesures de précision, brisure électrofaible

Le groupe de travail 1 dresse l'état des lieux et les perspectives des recherches sur le modèle standard (MS) de la physique des particules, en particulier sur le mécanisme de brisure de symétrie électrofaible.

Le MS décrit les fermions (rangés en 3 familles d'un lepton chargé, un neutrino, 2 quarks et les antiparticules associées) et leurs interactions via 12 bosons vecteurs (8 gluons, le photon, les bosons Z et W) résultant de l'invariance de la physique sous le groupe de jauge $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$. La symétrie de couleur (groupe $SU(3)_C$) est exacte, la symétrie électrofaible est brisée (laissant exacte $U(1)_{EM}$ comme symétrie résiduelle). Le MS contient des paramètres libres (les masses des fermions et des bosons, les constantes de couplage, les angles de mélanges et la phase du secteur des quarks) auxquels l'expérience donne accès via des observables en plus grand nombre (les masses et les largeurs des bosons de jauge, des quarks lourds, les sections efficaces totales et différentielles du boson Z, les couplages). Le système est donc surcontraint.

Malgré ses succès, le MS présente des limites. D'une part, il n'incorpore pas des faits expérimentaux indéniables comme l'existence de la matière noire et l'asymétrie baryonique dans l'univers. Au niveau conceptuel, de nombreuses questions restent ouvertes : pourquoi trois familles de quarks et de leptons? Pourquoi tant de paramètres libres et présentant une telle variété? Pourquoi la symétrie électrofaible est-elle brisée? Pourquoi la gravité n'est-elle pas incluse? Certaines de ces questions pourraient trouver une explication ou une origine dynamique dans une théorie plus fondamentale. Les faiblesses du MS incitent les physiciens d'une part, à tester ce modèle de façon intensive et à mettre en évidence expérimentalement des incohérences, et d'autre part à développer des modèles résolvant ces problèmes. Les mesures de précision permettent de prédire les paramètres encore inconnus du modèle ainsi que de tester sa cohérence, les observables expérimentales permettant de remonter à ces paramètres de manière redondante. Elles permettent de sonder la physique à des échelles d'énergie bien plus grandes que les énergies en jeu dans les expériences, à travers les processus faisant intervenir des particules virtuelles dans des corrections radiatives (excitations quantiques).

Des mesures de précision de ces observables permettent différentes approches :

- tester la cohérence interne du modèle via un ajustement global, cohérence vérifiée à ce jour à deux écarts standard.
- confronter les calculs et les mesures, des écarts signaleraient la présence de nouvelle physique.
- via des mesures de précision, contraindre indirectement les briques manquantes (masse du boson de Higgs MH, paramètre non prédit par le modèle, et nature de la brisure de symétrie).

Ce à quoi s'ajoute évidemment la recherche directe du boson de Higgs standard.

Les analyses de physique sont menées auprès des collisionneurs.

Etat des lieux et perspectives en fonction des moyens expérimentaux

- Auprès du LEP, collisionneur e^+e^- (1989-2000), ont été faites des mesures du secteur électrofaible à des précisions qui vont être difficiles à dépasser, des paramètres du Z en particulier. Une limite inférieure de 114.4 GeV sur la masse du boson de Higgs a été posée.
- Tevatron, collisions $p\bar{p}$ (1992-2010), avec \sqrt{s} jusqu'à 2 TeV. Des mesures extensives dans tous les domaines concernant le MS ont été faites, notamment des mesures de précisions dans le secteur du W, la découverte du quark top avec une mesure de sa masse au GeV près et une exclusion de certains domaines de masses possibles du Higgs du MS (et une possible confirmation d'un signal à 125 GeV suggérée par le LHC).
- LHC. Prise de données en cours et en deux phases. La première phase, entre 2010 et fin 2012, est à $\sqrt{s} = 7$ TeV (8 TeV en 2012) 5 fb⁻¹ par expérience (entre 20 et 25 fb⁻¹ prévus par expérience d'ici fin 2012). Le domaine autorisé pour un boson de Higgs léger est réduit à l'intervalle 115-127 GeV (et un possible signal à 125 GeV)

Avec la statistique qui sera accumulée pendant la prise de donnée 2012, les collaborations ATLAS et CMS pourront découvrir ou exclure totalement un boson de Higgs standard de masse inférieure à 600 GeV, et en cas de découverte commencer les mesures des rapports de branchement des différents canaux.

En ce qui concerne le MS et la brisure de symétrie, les orientations futures dépendent cruciallement des résultats des analyses LHC 2012.

- LHC. La deuxième phase, nominale, 2014 -2018, sera à $\sqrt{s} = 13$ TeV et $L = 300 \text{ fb}^{-1}$. Dans le secteur du top, la masse sera mesurée à mieux que le GeV, les sections efficaces de production à quelques % (idem pour le top célibataire). Les sections efficaces différentielles du quark top et des bosons de jauge permettront de poser des contraintes sur les modèles théoriques sous-jacents (pQCD, PDF, PS). La masse du boson W devrait être mesurée à quelques MeV près. Les mesures des couplages multiples des bosons de jauge qui nécessitent à la fois beaucoup de luminosité et de très hautes énergies gagneront en sensibilité mais nécessiteront des outils futurs.

En cas de découverte d'un boson de Higgs léger, sa masse pourra être déterminée avec une précision de l'ordre de 0.1% et ses autres propriétés (largeur, nombres quantiques, rapports de branchement) pourront être estimées. En cas de non découverte, il faudra quand même mener les analyses de recherche dans chaque canal de désintégration possible afin de savoir si un boson de Higgs léger n'existe pas avec des propriétés non standard. Dans le cas d'une absence de découverte, il sera extrêmement important de comprendre quel est le mécanisme de brisure de symétrie et concentrer le travail d'analyse sur les couplages multiples de bosons de jauge.

- HL-LHC. La version haute luminosité du LHC pourrait démarrer après 2020, avec une luminosité attendue de 300 fb^{-1} par an. Cette option permet l'étude de processus rares, donc des couplages trilineaires et quadrilineaires des bosons, dont l'étude est cruciale en l'absence de découverte du boson de Higgs standard dans la mesure où elle donne des informations sur le mécanisme de brisure de symétrie et le comportement du MS au-delà du TeV. Il faut néanmoins souligner que certains de ces couplages (impliquant plusieurs bosons Z dans l'état final par exemple) nécessitent une énergie dans le centre de masse au niveau du processus dur de l'ordre du TeV et que le HL-LHC ne sera pas suffisant.

- ILC. Le futur collisionneur linéaire électron-positron pourrait voir le jour dans les années post 2020. Plusieurs modes de fonctionnement sont envisagés avec différentes énergies dans le centre de masse et possibilité d'utiliser des faisceaux polarisés : en mode GigaZ i.e. à $\sqrt{s} = M_Z$, au seuil de la production de paires de W ou de paires de quarks top pour les mesures de précisions du MS, en particulier le mode GigaZ polarisé est le seul qui permette une mesure plus précise que la mesure actuelle de l'angle de mélange faible ; en cas de découverte du boson de Higgs standard $\sqrt{s} = M_H + 100$ GeV est l'énergie dans le centre de masse la plus favorable à la détermination précise de tous les paramètres du boson de Higgs ; $\sqrt{s} = 350, 500$ et 800 GeV sont des modes couramment envisagés pour mesurer respectivement M_H , les couplages du boson de Higgs (y compris à lui-même sauf au quark top) et le couplage du boson de Higgs au quark top. L'ILC est donc une option à favoriser dans le cas de la découverte du boson de Higgs standard. Enfin, il faut noter d'une part que certaines mesures nécessitent des collisions à basse énergie comme l'augmentation de la précision sur $\Delta\alpha_{had}$ et g_2 ; d'autre part qu'il existe d'ores et déjà des études sur des projets à plus long terme comme un collisionneur à muons, à photons ou un LHC à très haute énergie qui permettrait des recherches de résonances à très hautes masses et des mesures de certains couplages quadrilineaires de bosons de jauge.

Moyens mis et à mettre en oeuvre

Il est visible que les orientations futures tant en terme de moyens humains que matériels dépendent des résultats du LHC, et ce dès la fin de l'année 2012. Il est clair aussi que la distinction entre les groupe de travail GT1 et GT2 perd ici de sa pertinence et qu'il faut considérer les possibles résultats en terme de nouvelle physique dans son ensemble i.e. en intégrant et le boson de Higgs standard et la nouvelle physique. Toute découverte entrainera la nécessité d'un instrument dédié aux mesures associées et un glissement des personnels vers ces nouvelles mesures. A contrario, en l'absence de découverte, il faudrait s'orienter vers une machine de recherche plus que de mesure.