

données étaient insuffisantes sur le plan statistique pour garantir la validité du résultat. Une nouvelle expérience était nécessaire.

Or, à cette époque, l'attention était surtout tournée vers les grands collisionneurs Tevatron, au Fermilab, et LHC, au Cern. Les physiciens espéraient y découvrir le boson de Higgs et de nouvelles particules, avec notamment la perspective de mettre en évidence la «supersymétrie». Cette extension potentielle du modèle standard prévoit l'existence, pour chaque particule connue, d'un partenaire se distinguant seulement par sa masse et son spin (une grandeur quantique qui correspond au moment cinétique intrinsèque de la particule). Par exemple, un électron, dont le spin vaut 1/2 dans les unités usuelles, serait associé à un «sélectron» de spin nul.

LES LIMITES DU MODÈLE STANDARD

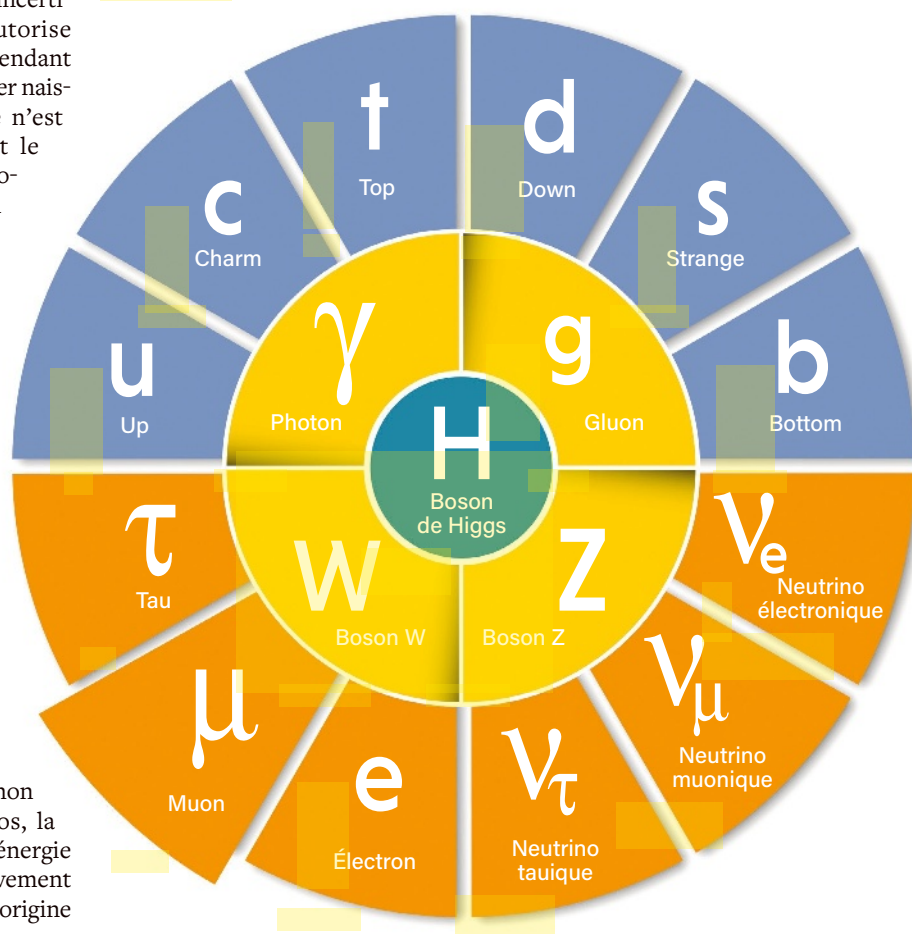
Si la découverte du boson de Higgs au LHC a couronné d'une certaine façon les efforts pour valider le modèle standard, elle a aussi confirmé certains défauts de celui-ci. En effet, pour la majorité des physiciens, une masse de 125 gigaélectronvolts (environ 125 fois la masse d'un proton, en unités d'énergie) pour le boson de Higgs est difficile à expliquer.

Pour comprendre ce problème, il faut s'intéresser aux conséquences du principe d'incertitude de Heisenberg. Ce dernier autorise l'existence de fluctuations d'énergie pendant des temps très courts qui peuvent donner naissance à des particules. Ainsi, le vide n'est jamais vraiment «vide»: l'espace est le théâtre de la formation constante et sporadique de particules (par exemple un photon, ou un quark et son antiquark), qui subsistent un très bref instant et disparaissent en s'annihilant. Une particule n'est alors jamais isolée, mais toujours accompagnée d'un nuage de particules virtuelles qui influent sur ses caractéristiques. Dans le cas du boson de Higgs, ces particules virtuelles contribuent à la valeur de sa masse de façon très significative. Or le modèle standard ne nous explique pas le mécanisme qui empêche des particules virtuelles, qui pourraient intervenir à l'échelle de Planck (environ 10^{19} gigaélectronvolts) par exemple, de rendre cette masse gigantesque, supérieure de quelque 17 ordres de grandeur à la masse mesurée!

Le modèle standard n'explique pas non plus la très faible masse des neutrinos, la nature de la «matière noire» et de l'«énergie sombre» (censées représenter respectivement 25% et 69% du contenu de l'Univers), l'origine

Le modèle standard comprend 17 particules élémentaires. En 1936, en étudiant les rayons cosmiques, les Américains Carl Anderson et Seth Neddermeyer ont découvert le muon, un cousin de l'électron 207 fois plus massif. Son existence était si inattendue que le Prix Nobel de physique Isidor Isaac Rabi aura cette fameuse remarque: «Qui a commandé ça?» Comme l'électron, le muon a un spin égal à 1/2, mais contrairement au premier, il est instable; sa durée de vie moyenne est de 2,2 microsecondes.

- Quarks
- Leptons
- Bosons de jauge
- Boson de Higgs



de l'excès de matière par rapport à l'antimatière observé dans l'Univers, l'organisation en trois familles des particules, etc. Il semble donc raisonnable de considérer le modèle standard comme l'approximation à basse énergie d'une théorie plus fondamentale qui offrirait un cadre plus explicatif. Les physiciens ont exploré de nombreuses pistes et misaient en grande partie sur la supersymétrie. En effet, cette théorie permet de comprendre pourquoi la masse du boson de Higgs n'est pas gigantesque, prévoit des particules dont la matière noire pourrait être constituée, etc.

On pensait que l'énergie des collisions entre protons dans le LHC serait suffisante pour produire des particules supersymétriques. Mais les expériences n'en ont décelé aucune trace. Beaucoup de physiciens commencent donc à abandonner la piste de la supersymétrie et l'espoir de découvrir de nouvelles particules dans les détecteurs du LHC. Dès lors, pour sonder la physique au-delà du modèle standard, la stratégie des mesures de précision semble redevenir la plus prometteuse, notamment avec la mesure du moment magnétique anomal du muon, qui avait fourni des indices encourageants en 2004.



Transporté de New York à Chicago par bateau et par camion, l'anneau de stockage des muons de l'expérience E821, qui mesure 14,2 mètres de diamètre et pèse 700 tonnes, a été réutilisé pour l'expérience Muon $g-2$.

En quoi consiste exactement cette mesure ? Les leptons (la famille qui inclut l'électron, le muon et le tau, une particule encore plus lourde et plus instable que le muon, ainsi que trois neutrinos) ont un spin égal à $1/2$. Ils sont ainsi dotés d'un moment cinétique propre, qui correspond à une version quantique, plus abstraite, du mouvement classique de rotation propre (comme celui de la Terre autour de l'axe des pôles). Et puisque l'électron et le muon sont des particules portant une charge électrique, cette «rotation» engendre un champ magnétique. En conséquence, l'électron et le muon se comportent comme des petits aimants, caractérisés par un «moment magnétique».

DE PETITS AIMANTS

L'expression théorique du moment magnétique de spin contient un facteur sans dimension noté g et nommé facteur de Landé. En 1928, le physicien britannique Paul Dirac a proposé une équation qui porte aujourd'hui son nom et qui généralise au cas de particules relativistes (c'est-à-dire de vitesse non négligeable par rapport à celle de la lumière) et de spin $1/2$ la célèbre équation de Schrödinger de la mécanique quantique. Il a alors montré qu'il pouvait calculer le facteur g de l'électron, ce qu'il qualifiait de «bonus inattendu» de son équation. D'après celle-ci, ce facteur vaut exactement 2.

Or, en 1947, grâce à des mesures spectroscopiques, Polykarp Kusch et Henry Foley, de l'université Columbia, à New York, ont montré que le facteur g de l'électron est légèrement supérieur à 2, de l'ordre de 0,1%. L'anomalie correspondant à la différence entre le facteur de Landé de la particule et la valeur donnée par l'équation de Dirac, soit $g-2$, est nommée, par abus de langage, «moment magnétique anormal» (le terme «anomal» est plus approprié que l'adjectif «anormal» parfois utilisé). Sa

mise en évidence a été le point de départ d'un développement parallèle : les expérimentateurs cherchaient à en affiner la mesure, tandis que les théoriciens s'évertuaient à calculer l'anomalie avec la plus grande précision possible.

Pour les théoriciens, l'équation de Dirac était clairement insuffisante pour calculer le moment magnétique de l'électron, car elle ne prenait pas en compte les effets des particules virtuelles qui remplissent le vide et qui interagissent avec l'électron. En 1948, dans le cadre de la toute jeune théorie quantique des champs décrivant l'interaction électromagnétique, l'électrodynamique quantique (QED), le physicien américain Julian Schwinger a réalisé les premiers calculs des termes correctifs les plus simples. L'anomalie magnétique de l'électron ainsi obtenue était compatible avec les données expérimentales. Dans les décennies qui ont suivi, mesurer le moment anormal de l'électron a servi de test pour la QED et permis de vérifier que les chercheurs calculaient correctement des processus virtuels toujours plus complexes.

La mesure la plus récente (en 2011) du moment magnétique anormal de l'électron, réalisée avec une précision de l'ordre de 10^{-12} , a montré que l'expérience et la théorie sont en accord avec une précision de 10^{-9} ! Cela fait de la QED l'une des théories les mieux testées en physique.

Au cours des années 1960 et 1970, la description des interactions des particules élémentaires s'est cristallisée sous la forme du modèle standard, dont la QED décrit la partie électromagnétique. Il est alors devenu plus intéressant de mesurer l'anomalie magnétique du muon, plutôt que celle de l'électron. Le muon étant près de 200 fois plus lourd que l'électron, il est beaucoup plus sensible aux effets des particules virtuelles (on montre qu'il y a $200^2 = 40000$ fois plus de chances de voir apparaître des particules virtuelles lourdes dans le voisinage du muon) et devrait donc être plus sensible à la présence de particules non incluses dans la théorie.



Le nouveau calcul pourrait rendre caduque la tension entre l'expérience et la théorie

