



Le muon, un accroch dans le modèle standard?

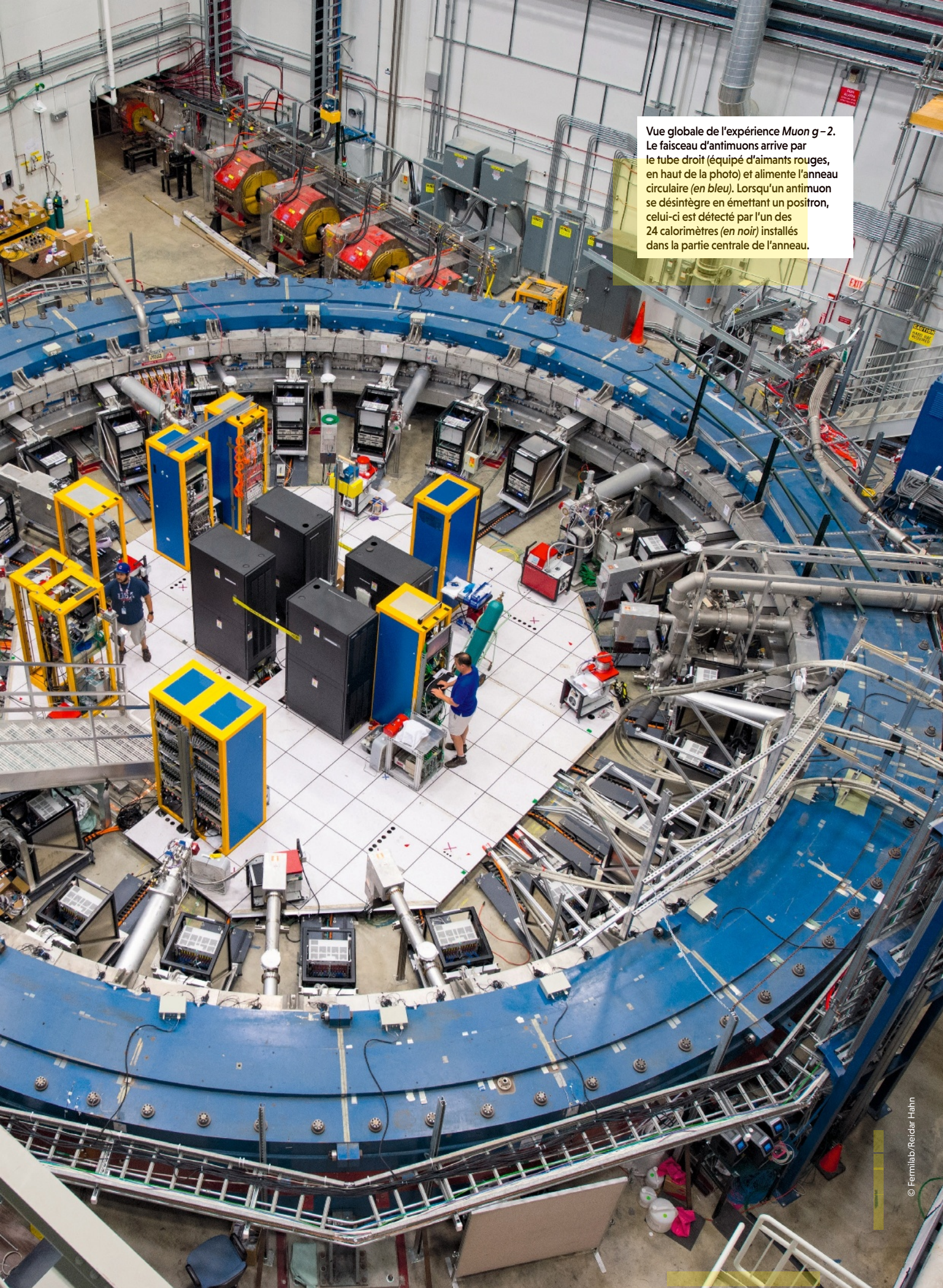
Les mesures récentes d'une propriété du muon semblent incompatibles avec la valeur théorique de référence. Un résultat qui, s'il est confirmé, ferait vaciller le modèle standard de la physique des particules. Mais un nouveau rebondissement sème le trouble dans le trouble.



Le modèle standard de la physique des particules est l'une des plus grandes réussites intellectuelles de l'humanité. Construit progressivement au cours du xx^e siècle, cet édifice théorique décrit les propriétés des particules fondamentales et leurs interactions (à l'exception de la gravitation). Il permet de comprendre les différents types de radioactivité, d'où provient l'énergie du Soleil, comment fonctionnent les lasers ou les panneaux photovoltaïques et bien d'autres phénomènes.

Ce modèle s'est imposé il y a cinquante ans et a été confirmé par des expériences toujours plus précises. Le point d'orgue de cette validation expérimentale est sans doute la détection en 2012 du boson de Higgs au LHC, le Grand collisionneur de hadrons du Cern, situé près de Genève. Cependant, la plupart des physiciens s'accordent à penser que le modèle standard n'est qu'une approximation d'une théorie plus fondamentale restant à découvrir. Mais comment trouver des indices de cette théorie





Vue globale de l'expérience Muon $g-2$.
Le faisceau d'antimuons arrive par
le tube droit (équipé d'aimants rouges,
en haut de la photo) et alimente l'anneau
circulaire (en bleu). Lorsqu'un antimuon
se désintègre en émettant un positron,
celui-ci est détecté par l'un des
24 calorimètres (en noir) installés
dans la partie centrale de l'anneau.

L'ESSENTIEL

> Le modèle standard de la physique des particules décrit les interactions fondamentales qui agissent sur les composants ultimes de la matière.

> Ce modèle est probablement une approximation d'une théorie plus fondamentale. Mais jusqu'ici, tous les tests expérimentaux s'accordaient parfaitement avec ses prédictions.

> Les physiciens tentent de le mettre en défaut avec des mesures très précises du moment magnétique du muon.

> Le résultat de l'expérience *Muon g - 2* semble s'écarter de la valeur prédite par le modèle standard. Mais un nouveau calcul théorique suggère que ce dernier tiendrait encore.

L'AUTEUR



SEAN BAILLY
journaliste
à *Pour la Science*
et docteur
en physique

quand le modèle standard colle si bien aux mesures expérimentales ?

Différentes pistes sont possibles. La découverte de particules non prévues par le modèle standard serait un signe clair et net de la physique qui se cache au-delà. Une autre voie, plus indirecte, consiste à réaliser des mesures les plus précises possible dans des accélérateurs de particules et de comparer ces données expérimentales aux valeurs théoriques calculées dans le cadre du modèle standard. Une différence serait le signe qu'il manque un « ingrédient » dans ce dernier.

Parmi toutes les pistes qui relèvent de cette approche, celle impliquant une propriété du muon retient l'intérêt. Cette particule instable est une version plus massive de l'électron (voir la figure page 27). Le bombardement de l'atmosphère terrestre par les rayons cosmiques en produit en abondance. Les muons sont alors souvent une source de perturbation dans les expériences de physique des particules, car ils pénètrent profondément dans la matière et interagissent avec les détecteurs. Cette capacité à traverser de grands volumes rocheux est néanmoins mise à profit dans des projets qui consistent à sonder la structure des pyramides d'Amérique centrale et d'Égypte ou à suivre l'activité des volcans.

Dans les accélérateurs de particules, les physiciens peuvent aussi produire en grande quantité des muons pour en étudier les propriétés. L'une d'elles, le « moment magnétique anomal », suscite beaucoup d'espoir pour mettre à l'épreuve le modèle standard. L'expérience *Muon g - 2*, au Fermilab, près de Chicago, aux États-Unis, vient de livrer ses premières données sur cette mesure.

Or ces résultats semblent en désaccord avec le modèle standard. Le moment magnétique anomal du muon, noté $g-2$ (on verra plus loin pourquoi), a été mesuré avec une grande précision : $(g-2)/2$ vaut $116592061(41) \times 10^{-11}$; la valeur entre parenthèses correspond à l'incertitude sur les deux derniers chiffres. L'écart avec la valeur théorique de référence est seulement

de 251×10^{-11} , mais c'est suffisant pour parler d'une tension entre la mesure et le calcul théorique, cette différence étant grande par rapport aux incertitudes de la prédiction et de la mesure.

Cependant, tout n'est pas si simple dans le monde de la physique des particules : une équipe européenne vient de publier un résultat théorique compatible avec la mesure de Fermilab. Le muon n'a donc pas fini de défier les physiciens.

La nouvelle mesure réalisée par l'équipe de *Muon g-2* était attendue depuis près de vingt ans. Entre 1997 et 2001, l'expérience *E821*, au laboratoire de Brookhaven, dans la banlieue de New York, avait réalisé une mesure reposant sur le même principe. Des muons étaient injectés



La contribution hadronique au moment magnétique du muon est entachée d'importantes incertitudes



dans un champ magnétique qui faisait osciller leur moment magnétique. En analysant ce mouvement périodique, les chercheurs ont estimé le moment magnétique anomal de la particule. Ils ont annoncé leurs premiers résultats en 2001, puis les définitifs en 2004, livrant une valeur légèrement supérieure à celle prédite par la théorie. Cette nouvelle a suscité beaucoup d'enthousiasme chez les physiciens. Mais les

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.

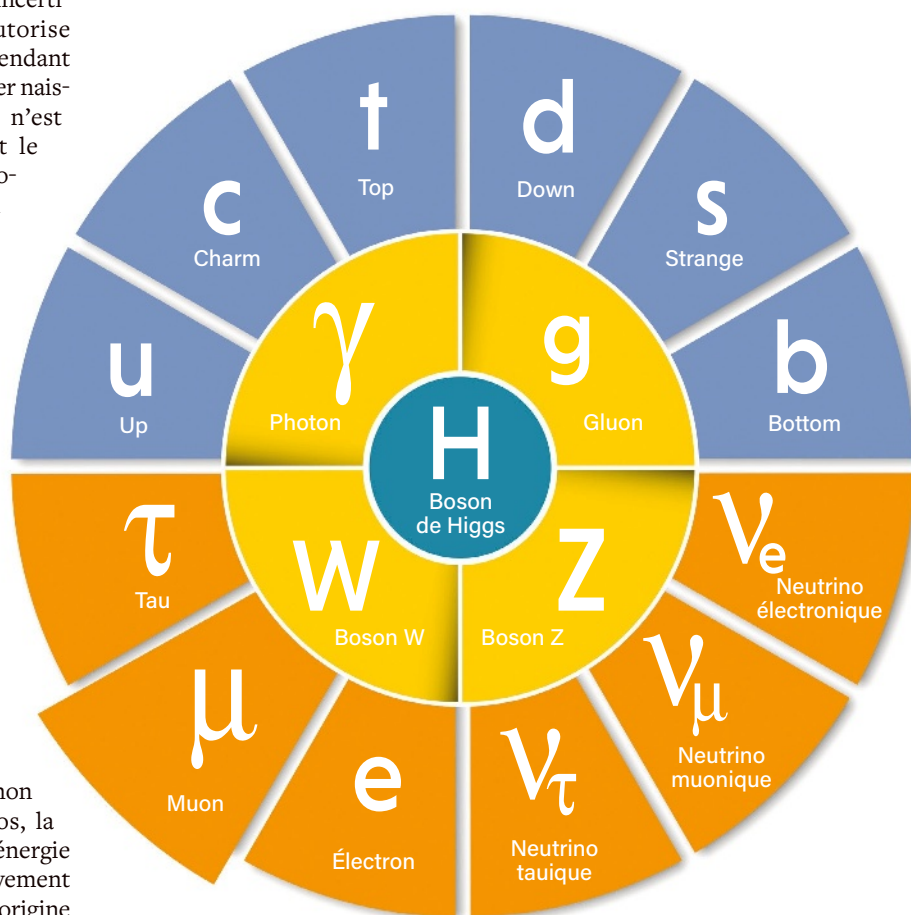
LES LIMITES DU MODÈLE STANDARD

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.



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.