

Une expérience au Fermilab sème le doute : la mesure du moment magnétique du muon ne colle pas avec les calculs théoriques. Sauf que... pas d'accord, objecte une autre équipe. Grain de sable ou pavé dans la mare ?

58

Le muon sur la sellette

Sean Bailly



Gros plan sur un quadrupôle magnétique, élément clé de l'expérience *Muon $g-2$* .

Pour aller au-delà d'une théorie aussi bien établie que l'est le modèle standard, plusieurs pistes sont envisagées. La découverte de particules non prévues serait un signe clair et net qu'une autre physique se cache au-delà. Une autre voie, plus indirecte, consiste à réaliser des mesures le 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. 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

— En bref —

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

> Le résultat de l'expérience *Muon g-2* conduite au Fermilab, près de Chicago, semble s'écarter de la valeur prédite par le modèle standard.

> Mais un nouveau calcul théorique établi par une équipe européenne suggère que ce dernier tiendrait encore.

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 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. 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

L'écart entre la prédiction et la mesure signifierait que des particules virtuelles ou une force non prévues n'ont pas été intégrées dans le calcul théorique

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», l'origine 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 le considérer 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.