

installé au Fermilab et y profiter d'un faisceau de muons plus pur et plus intense. Parti de Long Island près de New York, il a longé la côte Atlantique, le golfe du Mexique, remonté le fleuve Mississippi puis l'Illinois pour arriver à destination, après un périple de près de 5 000 kilomètres (voir la photo page 28). L'expérience *Muon g-2* est donc une version notablement améliorée de celle de Brookhaven. Des modifications importantes vont permettre à terme de gagner un facteur quatre sur la précision de mesure.

L'expérience *Muon g-2* a commencé à réaliser des mesures en 2018. Voyons quel est son principe. Un accélérateur de Fermilab produit un faisceau de protons de haute énergie qui bombarde une cible (voir la figure page 29). De nombreuses particules instables émergent de cette collision, dont des pions qui se désintègrent en produisant des muons (plus exactement des muons positifs, ou antimuons). Ces derniers sont polarisés de telle façon que leur

spin soit aligné avec leur direction de déplacement. Ils sont ensuite injectés dans un « anneau de stockage », une enceinte circulaire de 14,2 mètres de diamètre.

Un ensemble d'aimants produit un puissant champ magnétique vertical de 1,45 tesla qui oblige les particules à circuler dans l'anneau suivant une trajectoire circulaire. Le champ magnétique interagit aussi avec le spin des antimuons; en conséquence, ces spins décrivent un mouvement de précession (comparable au mouvement de précession de la Terre ou d'une toupie, dont l'orientation de l'axe de rotation change au cours du temps et décrit un cône).

Si le facteur de Landé g de l'antimuon était exactement égal à 2, la période de précession du spin serait égale à celle de la circulation des particules dans l'anneau; le spin pointerait alors toujours dans la direction du mouvement de la particule. Mais comme g est légèrement supérieur à 2, le spin change progressivement d'orientation par rapport à la trajectoire et se

PRUDEMMENT ENTHOUSIASTES!

Si l'étude du moment magnétique anomal du muon est une piste pour mettre en défaut le modèle standard, elle n'est pas la seule à s'appuyer sur les mesures de précision. Au LHC, et notamment dans l'expérience *LHCb*, les physiciens analysent de nombreux processus et comparent les données aux calculs théoriques. Ils regardent en particulier comment les mésons B , composés d'un quark b et d'un antiquark d'une autre « saveur » se désintègrent. Ces processus seraient très sensibles à la physique au-delà du modèle standard. Jusqu'à présent, quelques alertes ont mis en avant des désintégrations présentant des anomalies. Mais ces signaux ne sont pas encore assez solides statistiquement et pourraient n'être que de simples artefacts donnant l'impression d'une détection authentique.

Le 22 mars 2021, la collaboration *LHCb* a annoncé sa plus récente mesure de deux canaux particuliers de la désintégration d'un méson B en un méson K (ou kaon) avec, d'une part, une paire électron-positron et, d'autre part, une paire muon-antimuon. En principe, les chercheurs s'attendaient à obtenir un rapport des probabilités de production de ces deux processus égal à 1. En effet, le modèle standard suggère qu'il existe une sorte d'universalité entre les leptons chargés : l'électron, le muon et le tau devraient interagir de la même façon avec les autres particules (à leur différence de masse près). Mais le rapport a été mesuré à 0,846, avec une incertitude de 0,044. Le méson B se désintègre moins souvent en émettant une paire muon-antimuon qu'une paire électron-positron. En 2019, l'équipe de *LHCb* avait déjà



L'expérience LHCb au Cern

obtenu un résultat similaire, mais la robustesse statistique était alors assez faible. La mesure de 2021, avec le double de données exploitées, a réduit l'incertitude : il n'y a qu'une chance sur mille que ce résultat provienne d'une fluctuation statistique ; on parle de « signal à 3σ » (la lettre grecque σ , sigma, désignant l'écart-type). Au LHC, de nombreux signaux ont été identifiés à 3σ .

En général, l'accumulation de données tend à les faire disparaître puisqu'il s'agit dans la plupart des cas d'artefacts. Ce phénomène est attendu car, avec la quantité de données livrées par les détecteurs du collisionneur, la probabilité de trouver des « faux positifs » est non nulle.

Or dans le cas de cette désintégration du méson B , les données récentes n'ont pas gommé l'anomalie. Lors de l'annonce de la collaboration *LHCb*, de nombreux chercheurs sur les réseaux sociaux se sont dits « prudemment enthousiastes ».

En général, pour parler de découverte, les physiciens des particules attendent d'atteindre 5σ (1 chance sur 1,7 million que le signal soit une fluctuation statistique). Il faudra donc encore accumuler des données.

Une confirmation indépendante sera aussi nécessaire. Tous les regards se portent sur l'expérience *Belle II*, au Japon, qui opère depuis 2018 et qui étudie les désintégrations des mésons B produits lors de collisions d'électrons et de positrons de haute énergie.

Et si l'anomalie se confirmait ? Les théoriciens ont déjà imaginé de nombreuses explications faisant intervenir des particules inconnues du modèle standard, par exemple un boson Z' , qui serait le vecteur d'une nouvelle interaction fondamentale très faible, ou un leptoquark, une particule qui combinerait les propriétés des quarks et des leptons.

réaligne avec la direction du mouvement tous les 27 tours environ.

Les antimuons étant des particules instables, ils finissent par se désintégrer en émettant deux neutrinos et un positron (l'antiparticule de l'électron). Ce dernier est émis préférentiellement dans la direction du spin et son énergie est maximale quand le spin est dans la direction du mouvement. Le long de l'anneau, 24 détecteurs sont installés. Le nombre de positrons qu'ils détectent oscille au cours du temps suivant une fréquence dont l'analyse permet de remonter à la valeur du moment magnétique du muon.

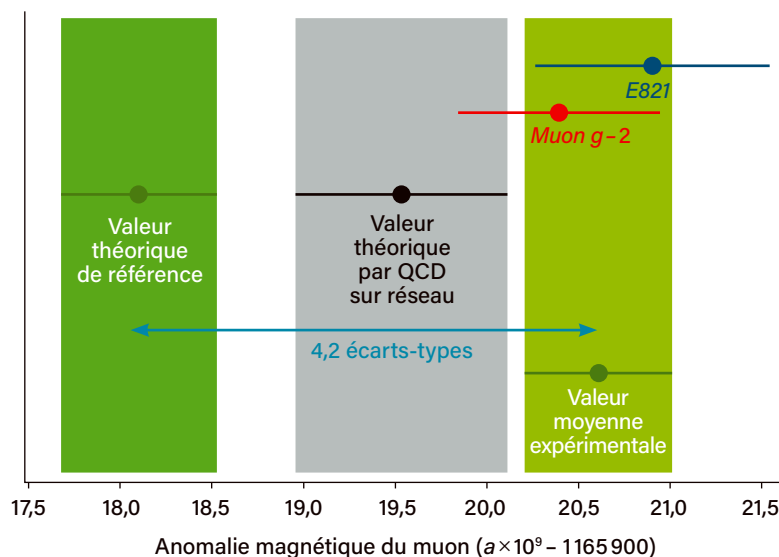
Les physiciens ont réalisé leur analyse en «aveugle». Cette technique couramment utilisée en physique des particules consiste à construire toute la chaîne d'analyse jusqu'au bout sans avoir accès aux vraies valeurs, en l'occurrence la fréquence réelle d'oscillation du flux de positrons. L'idée est de ne pas introduire de biais dans l'exploitation des données, par exemple en ajustant même de façon inconsciente certaines variables pour que le résultat aille dans le sens le plus intéressant. À la fin, une fois la fréquence révélée, l'équipe a calculé la valeur de l'anomalie magnétique : $a_{\text{expérimental}} = 116592061(41) \times 10^{-11}$. Elle confirme le résultat de *E821* et établit un écart de 251×10^{-11} avec la valeur théorique $a_{\text{théorique}}$ calculée en 2020. La tension semble se confirmer.

DÉSACCORD DE 4,2 ÉCARTS-TYPES

D'un point de vue statistique, la différence entre les valeurs expérimentale et théorique est significative à 4,2 écarts-types. Cela signifie que cette différence n'a que 1 chance sur 40000 d'être une fluctuation statistique. En physique des particules, un tel résultat statistique est considéré comme solide, mais en général on fixe arbitrairement à 5 écarts-types le seuil requis pour acter une découverte; le risque d'un artefact n'est alors que de 1 sur 1,7 million.

Il faut cependant souligner que les chercheurs n'ont analysé que 6 % de leurs données. Les mesures de 2019 et 2020 sont en cours de traitement. Avec l'apport de ces dernières, les physiciens augmenteront notablement la précision de leur mesure. Par ailleurs, les expériences *E821* et *Muon g-2* reposant sur le même principe, il sera intéressant de confirmer cette tension avec le modèle standard en mesurant le moment magnétique anomal du muon d'une autre façon. Des physiciens de J-Parc, un centre de recherche au Japon, préparent actuellement une telle expérience, nommée *E34*.

La balle semble donc encore dans le camp des expérimentateurs. Pourtant, une autre équipe de théoriciens, la collaboration «Budapest-Marseille-Wuppertal» (BMW), vient d'annoncer un résultat qui sème le trouble. Pour calculer la contribution



Le calcul théorique de référence donne une valeur de l'anomalie magnétique du muon plus basse que la valeur moyenne des deux expériences (*E821* et *Muon g-2*). En calculant par une méthode différente, la QCD sur réseau, la collaboration BMW a obtenu un résultat plus proche de la valeur expérimentale.

hadronique dominante, elle a mis en œuvre une approche distincte grâce à une méthode nommée «chromodynamique quantique sur réseau». Cette technique est dite *ab initio*, car elle n'utilise que les équations du modèle sans paramètres supplémentaires et sans faire intervenir des données d'autres expériences (voir l'entretien pages 30 et 31). En combinant leur résultat avec les autres contributions du modèle standard, les chercheurs ont ainsi obtenu la valeur $a_{\text{BMW}} = 116591954(57) \times 10^{-11}$.

Cette valeur est plus proche de la mesure expérimentale que la valeur théorique de 2020 (voir la figure ci-dessus). Elle pourrait même rendre caduque la tension entre l'expérience et la théorie! Mais avant d'en tirer des conclusions définitives, il faudra que le résultat de ce calcul soit confirmé par d'autres équipes et il restera à comprendre pourquoi les deux approches théoriques conduisent à des valeurs différentes.

Si la divergence entre la mesure expérimentale et les prédictions théoriques persistait, ce serait probablement le signe de l'existence d'une «nouvelle physique». Il faudra alors comprendre comment avancer au-delà du modèle standard. Quelle théorie explique le moment magnétique anomal mesuré tout en étant compatible avec toutes les autres expériences de physique des particules? Il sera difficile d'y voir vraiment clair avec une seule mesure indiquant un accroc dans le modèle standard. L'espoir se trouve peut-être du côté du LHC. De récentes mesures dans l'expérience *LHCb* laissent entrevoir des signes de faiblesse du modèle standard (voir l'encadré page 32). Mais la robustesse de ce modèle a déjà surpris les physiciens, et risque de le faire encore! ■

BIBLIOGRAPHIE

B. Abi et al. (Collaboration *Muon g-2*), **Measurement of the positive muon anomalous magnetic moment to 0.46 ppm**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 126, article 141801, 2021.

S. Borsanyi et al., **Leading hadronic contribution to the muon magnetic moment from lattice QCD**, *Nature*, en ligne le 8 avril 2021.

R. Aaij et al. (Collaboration *LHCb*), **Test of lepton universality in beauty-quark decays**, prépublication en ligne sur arXiv, 22 mars 2021. <https://arxiv.org/abs/2103.11769>