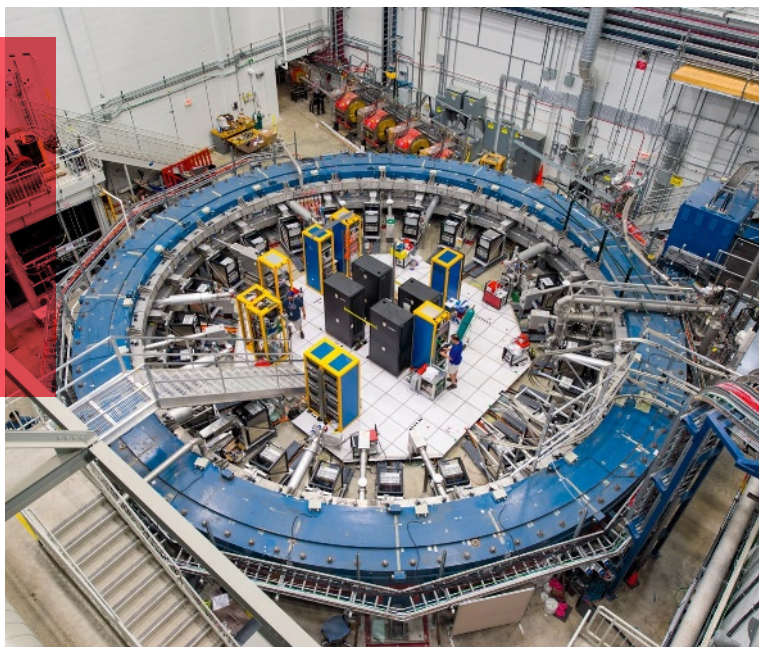


→ Injectés par le tube rouge (en haut à gauche), les antimuons alimentent l'anneau circulaire (en bleu). Les désintégrations d'antimuons émettent des positrons, qui sont détectés par les 24 calorimètres (en noir, collés à l'anneau).



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 anomal» (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 anomal 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 anomal 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 $200^2 = 40\,000$ 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 muon est donc prometteur pour mettre à l'épreuve le modèle standard. Si l'on observait un désaccord entre la prédiction théorique et l'expérience (en prenant en compte leurs incertitudes), ce serait le signe manifeste que le modèle standard est incomplet. Concrètement, cela signifierait que des particules virtuelles ou une force très faible non prévues dans le modèle standard contribuent à la valeur expérimentale, mais n'ont pas été intégrées dans le calcul théorique des termes correctifs.

Le facteur de Landé du muon, calculé à partir de l'équation de Dirac, est égal à 2, comme pour l'électron. L'estimation des corrections quantiques est cependant plus complexe, car il faut prendre en compte non seulement la contribution des

photons et des leptons virtuels (grâce à la QED, comme dans le cas de l'électron), mais aussi celle des bosons virtuels associés à la théorie de l'interaction faible (W, Z et Higgs) et celle du secteur des hadrons, terme qui désigne les particules sensibles à l'interaction forte.

Les hadrons sont décrits par la chromodynamique quantique (QCD), la théorie de l'interaction forte qui est véhiculée par les gluons. Les quarks et les gluons sont les seules particules élémentaires sensibles à cette force, et les quarks s'assemblent en paires quark-antiquark ou en triplets de quarks (le proton et le neutron, composés chacun de trois quarks, sont deux exemples de hadrons). Les calculs de ces effets étant très difficiles, une méthode de calcul indirecte a été développée au début des années 1960 pour évaluer la contribution hadronique dominante au moment magnétique anomal du muon

63

Les physiciens
ont analysé en
«aveugle» pour ne pas
introduire de biais
dans l'exploitation
des données

6%

seulement des
données de l'expérience
Muon g-2 ont été
analysées pour l'heure

64

(voir l'entretien avec L. Lellouch, page 68). Elle est fondée sur une exploitation théorique des données provenant des collisionneurs électron-positron et est limitée par la précision de ces dernières.

Néanmoins, ces vingt dernières années, ce volet théorique a connu d'importants progrès. En 2020, après trois ans de travail de synthèse, une collaboration internationale de plus de 130 chercheurs a évalué ces incertitudes en utilisant en particulier les données récentes et précises des expériences *BaBar*, au Slac, en Californie, et *Kloe*, en Italie. Ils ont publié une valeur théorique de référence pour l'anomalie magnétique du muon : $a_{\text{théorique}} = (g-2)/2 = 116591810(43) \times 10^{-11}$.

DES EXPÉRIENCES QUI ONT DÉBUTÉ DANS LES ANNÉES 1960

De leur côté, les expériences visant à mesurer avec précision l'anomalie magnétique du muon ont débuté dans les années 1960, au Cern, notamment sous l'impulsion de Georges Charpak. Les résultats successifs n'ont montré aucun signe d'incompatibilité avec la théorie... jusqu'en 2001. C'est pourquoi les conclusions de l'expérience *E821*, à Brookhaven, ont été accueillies avec enthousiasme. L'équipe avait obtenu une mesure du moment magnétique significativement différente de la valeur théorique calculable à l'époque. Les physiciens de Brookhaven

avaient-ils trouvé une faille dans le modèle standard ? Face à un enjeu aussi crucial, une confirmation indépendante par une expérience plus précise semblait nécessaire.

En 2013, le cœur de l'expérience *E821*, un aimant de 700 tonnes en forme d'anneau, a été déménagé par bateau et par camion pour être 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. 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 4 sur la précision de mesure.

L'expérience *Muon g-2* a commencé à réaliser des mesures en 2018. Son principe ? Un accélérateur de Fermilab produit un faisceau de protons de haute énergie qui bombarde une cible (voir la figure page ci-contre). De nombreuses particules instables émergent de cette collision, dont des pions qui se désintègrent en produisant 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 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