

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 (voir l'entretien pages 30

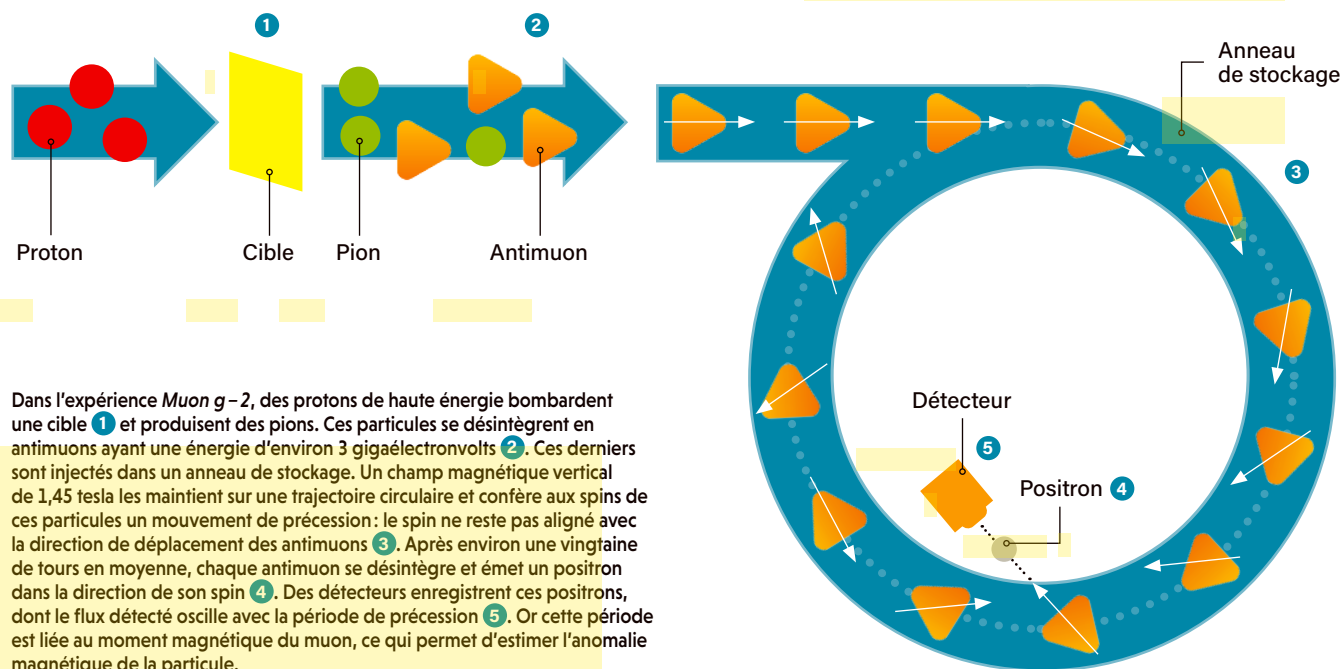
et 31). Elle est fondée sur une exploitation théorique des données provenant des collisionneurs électron-positron et est limitée par la précision de ces dernières.

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



L'ANOMALIE MAGNÉTIQUE DU MUON,
UN DÉFI THÉORIQUE

Propos recueillis par Sean Bailly



LAURENT LELLOUCH est directeur de recherche au CNRS et responsable de l'équipe de physique des particules au Centre de physique théorique (CNRS/Aix-Marseille Université/université de Toulon), à Marseille.

Pourquoi les théoriciens s'intéressent-ils à l'anomalie magnétique du muon ?

Dès le milieu des années 1950, les physiciens se sont rendu compte que l'anomalie du moment magnétique du muon était environ 40 000 fois plus sensible que ne l'est celui de l'électron aux effets de particules virtuelles lourdes qui l'entourent, du fait de sa masse plus élevée. Cela en fait une sonde très sensible pour explorer les propriétés du vide quantique. Depuis cette époque, l'expérience et la théorie ont évolué en tandem autour de ce problème, chacune poussant l'autre à progresser. Cette dynamique est devenue d'autant plus importante en 2004 quand les résultats de l'expérience de Brookhaven n'étaient plus en accord avec le calcul théorique. La mesure de $\mu\text{on } g - 2$, à Fermilab, a renforcé cette tension.

Comment interpréter cette tension ?

Elle pourrait être le signe d'une faille dans le modèle standard. Mais avant de pouvoir conclure, il faut s'assurer qu'il n'y a pas de problèmes dans l'expérience, d'une part, et dans le calcul théorique, d'autre part. Ce dernier fait appel à des techniques de théorie quantique des champs très poussées. Comme évoqué précédemment, à cause de fluctuations quantiques, le muon est entouré d'une sorte de nuage de particules dites virtuelles qui contribuent à ses propriétés, et cela se traduit par des termes correctifs.

Au niveau de précision atteint par l'expérience, il faut inclure toutes les forces et presque toutes les particules décrites par le modèle standard dans le calcul de ces corrections. Par exemple, le muon peut émettre un photon virtuel et le réabsorber. Ce processus et le calcul correspondant peuvent être représentés par un « diagramme de Feynman » simple, dit « du premier ordre » (voir la figure page ci-contre). Mais on peut imaginer que le photon virtuel se transforme en une paire électron-positron qui, très vite, s'annihile et donne un photon. C'est un diagramme du deuxième ordre. La contribution des leptons et des photons est calculée grâce à une théorie développée dans les années 1940, l'électrodynamique quantique (QED).



Le supercalculateur Jean-Zay du CNRS (ci-dessus) et d'autres en France et en Allemagne, ont réalisé les calculs de la valeur théorique du moment magnétique anomal du muon.

Les physiciens savent calculer cette contribution jusqu'au cinquième ordre, ce qui représente près de 13 000 diagrammes de Feynman. On calcule aussi la contribution des bosons W et Z jusqu'au deuxième ordre. Reste le secteur hadronique, avec les quarks et les gluons.

Ce dernier pose-t-il un problème ?

Ses corrections contribuent à une faible partie de l'anomalie magnétique du muon. Mais, parce que les équations de la théorie qui décrivent les interactions des quarks et des gluons sont hautement non linéaires, les calculs sont complexes, les incertitudes associées sont difficiles à contrôler et sont importantes. La composante dominante de cette correction correspond à une situation dans laquelle le muon émet un photon qui disparaît en créant une « bulle hadronique », laquelle se retransforme en un photon qui est absorbé par le muon. Cette bulle hadronique peut être juste une paire quark-antiquark, mais aussi des choses plus riches avec des gluons, plusieurs paires quark-antiquark, qui forment des hadrons...

Comment calcule-t-on cette contribution hadronique ?

Une première approche a été proposée en 1961, bien avant la naissance de la chromodynamique quantique (QCD), la théorie des champs qui décrit les

interactions des quarks et des gluons. L'idée repose sur des principes très fondamentaux et des mesures expérimentales.

Dans les collisionneurs électron-positron, les physiciens observent la formation de nombreux hadrons, des particules composées de quarks, principalement des mésons rho ou des pions. Or un théorème de physique ondulatoire appliqué à la physique quantique, le « théorème optique », combiné à des méthodes d'analyse complexe, permet de relier la section efficace de formation de hadrons donnés (une grandeur associée à la probabilité de produire ces particules) à la contribution virtuelle de ces hadrons à différents processus. À partir des mesures expérimentales des collisionneurs, il est alors possible d'estimer les corrections virtuelles qui entrent dans le calcul du moment magnétique anomal du muon.

Ces mesures ont été faites maintes fois et les calculs, même s'ils sont difficiles, ont été méticuleusement vérifiés, notamment par l'équipe de Michel Davier de l'université Paris-Saclay. L'approche est robuste. Pour cette raison, l'écart entre ce résultat théorique et les mesures expérimentales pourrait vraiment être un indice fort d'une faille dans le modèle standard. Cependant, pour de nombreux physiciens, l'idée de remettre en cause le modèle standard en s'appuyant sur une seule approche théorique n'était pas très rassurante. Il fallait