

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 $\mu g - 2$, 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...

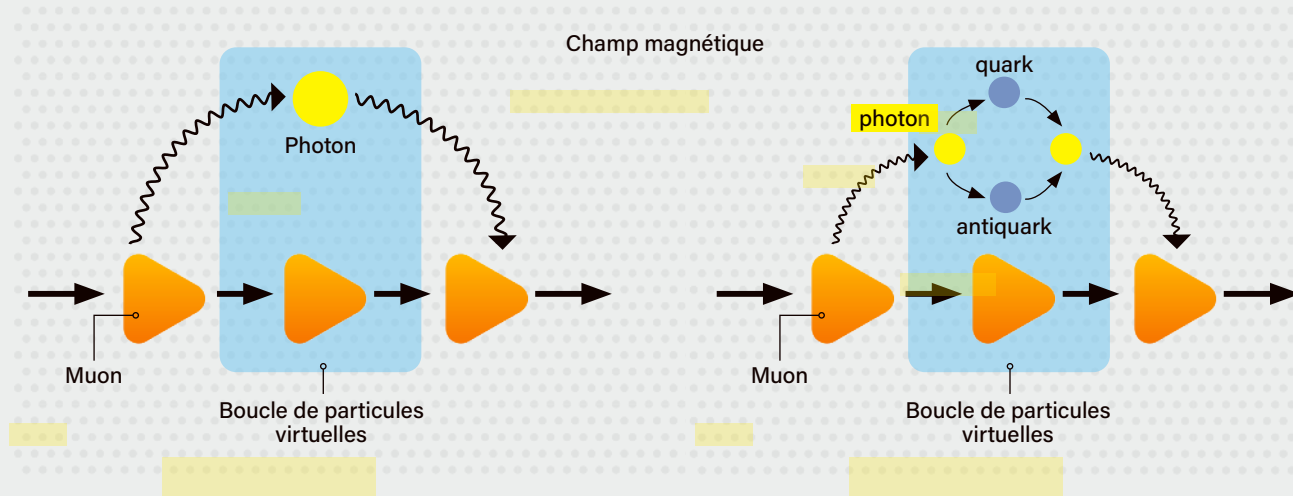
Comment calcule-t-on cette contribution hadronique ?

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



Dans l'expérience *Muon $g-2$* , le moment magnétique anormal du muon est mesuré à partir du mouvement de précession du spin de cette particule plongée dans un champ magnétique. La valeur du moment magnétique dépend en partie des particules virtuelles que le muon émet et absorbe en permanence. Dans le cas le plus simple (à gauche), le muon émet un photon puis l'absorbe. C'est la contribution principale à l'anomalie magnétique du muon. Parfois, le photon émis peut donner naissance à une paire quark-antiquark (à droite). Cette composante hadronique est difficile à calculer et, de ce fait, soumise à d'importantes incertitudes.

donc développer une autre méthode indépendante.

En quoi consiste-t-elle ?

Il s'agit de partir des équations de base de la QCD et de calculer directement les corrections. Dans cette théorie, des champs décrivent en tout point de l'espace-temps les quarks et leurs interactions. C'est la même idée qu'une carte météorologique qui indique la température en chaque endroit, sauf qu'ici chaque point est associé à une centaine de paramètres correspondant aux différentes particules du modèle. Dans un espace-temps continu, on a donc une infinité de valeurs et les calculs sont impossibles à mener. Une approche, la QCD sur réseau, consiste à discrétiser l'espace-temps selon un réseau hypercubique (comprenant les trois dimensions d'espace et une dimension de temps) dont la maille a une certaine longueur a . Les champs associés aux quarks prennent des valeurs uniquement sur les nœuds des mailles et ceux associés aux gluons seulement sur les liens entre deux nœuds voisins. On peut alors exprimer la QCD dans un formalisme de physique statistique, et les calculs deviennent possibles sur ordinateur. Par des méthodes éprouvées, on fait ensuite tendre a vers zéro pour retrouver le cas physique d'un espace-temps continu.

Grâce à cette approche, on passe d'une infinité de variables à un nombre fini, mais qui se compte tout de même en milliards sur les réseaux les plus grands. Il faut alors

une puissance de calcul colossale pour traiter un problème donné.

C'est l'approche que vous avez suivie ?

Avec des collègues de l'université Loránd-Eötvös, à Budapest, en Hongrie, du Centre de physique théorique à Marseille, et de l'université de Wuppertal, en Allemagne, entre autres, nous avons exploré cette piste. En 2008, nous avons d'abord considéré un problème plus simple (le calcul de la masse du proton) pour confirmer que l'approche de la QCD sur réseau fonctionnait. Puis, en 2015, nous avons introduit la QED dans nos simulations pour calculer la petite différence de masse entre le neutron et le proton. Nous nous sommes ensuite concentrés sur le calcul du moment magnétique anormal du muon et la contribution hadronique. Pour cela, nous avons dû prendre en compte de nombreux effets, y compris de petits effets négligés jusque-là. Pour arriver au résultat, nous avons fait tourner nos calculs sur plusieurs supercalculateurs, en Allemagne et en France : Turing et le tout nouveau Jean-Zay de l'Idris du CNRS, et Joliot-Curie du TGCC au CEA.

Quel résultat avez-vous obtenu ?

Nous avons obtenu un moment magnétique anormal du muon très proche de la valeur expérimentale. Ce résultat arrive un peu à contre-courant de celui de référence, dont la valeur est plus faible et en tension avec les expériences. Il suggère que le modèle standard pourrait encore être

compatible avec les mesures de Brookhaven et de Fermilab.

Mais l'équipe de *Muon $g-2$* n'a analysé que 6 % de ses données. En accumulant plus de mesures, elle réduira ses barres d'erreur d'un facteur proche de 4. Selon l'évolution de leur résultat et des progrès théoriques que nous ferons, soit nous resterons compatibles, soit une tension va apparaître. Le suspense est entier. Par ailleurs, la situation théorique reste à éclaircir. Pourquoi les deux approches théoriques ne donnent-elles pas le même résultat ?

Comment y voir plus clair ?

D'autres équipes utilisent la QCD sur réseau pour calculer la correction hadronique. Nous attendons avec impatience leurs conclusions pour voir si elles confirment notre valeur ou si elles se rapprochent du calcul de référence. Dans le cas où ces autres groupes arriveraient à des résultats similaires au nôtre, il restera à comprendre pourquoi les deux méthodes ne s'accordent pas. Même si la comparaison est difficile – il est impossible par exemple de regarder terme par terme les différences –, nous réfléchissons à des stratégies et j'ai bon espoir que nous trouverons au moins une partie de la réponse.

Et la fameuse faille dans le modèle standard ?

Il est trop tôt pour affirmer que le modèle standard a enfin été mis en défaut. Cependant, il est clair que de nombreuses choses nous échappent, car il y a beaucoup de questions fondamentales auxquelles le modèle standard ne répond pas. La physique des particules reste un territoire riche et fascinant à explorer.