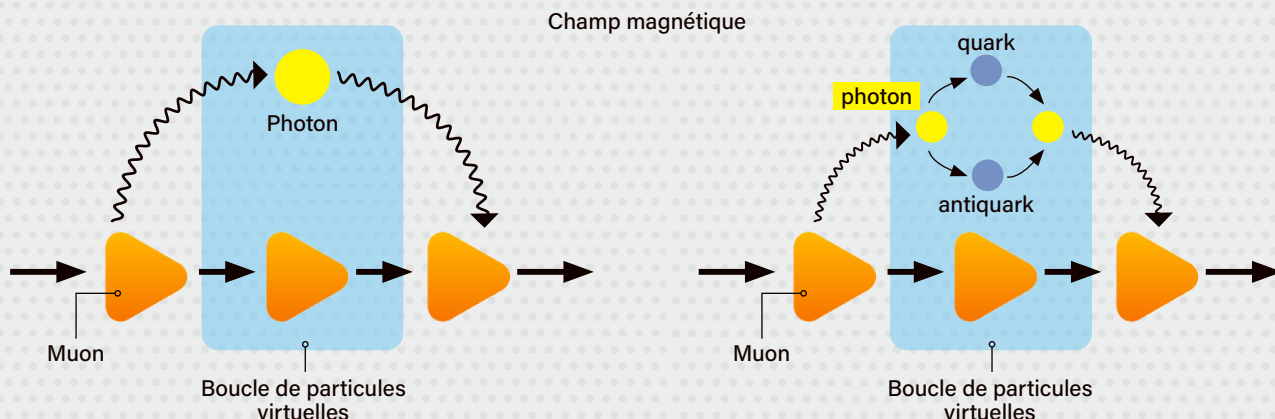




Dans l'expérience *Muon g-2*, le moment magnétique anormal du muon est mesuré à partir du mouvement de précession du spin de cette particule plongée dans un champ magnétique. La valeur du moment magnétique dépend en partie des particules virtuelles que le muon émet et absorbe en permanence. Dans le cas 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.

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!

**S**i 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  $3\sigma$  » (la lettre grecque  $\sigma$ , sigma, désignant l'écart-type). Au LHC, de nombreux signaux ont été identifiés à  $3\sigma$ .

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  $5\sigma$  (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.