

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, 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 anomal 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, des supercalculateurs ont été nécessaires, en Allemagne et en France : notamment Turing et le tout nouveau Jean-Zay, de l'Idris, au CNRS, et Joliot-Curie, du TGCC, au CEA.

Quel résultat avez-vous obtenu ?

Nous avons obtenu un moment magnétique anomal 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.

Soit nous resterons
compatibles avec
« Muon $g-2$ », soit une
tension apparaîtra.
Le suspense est
entier.

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 s'il est impossible de regarder terme à 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 ?

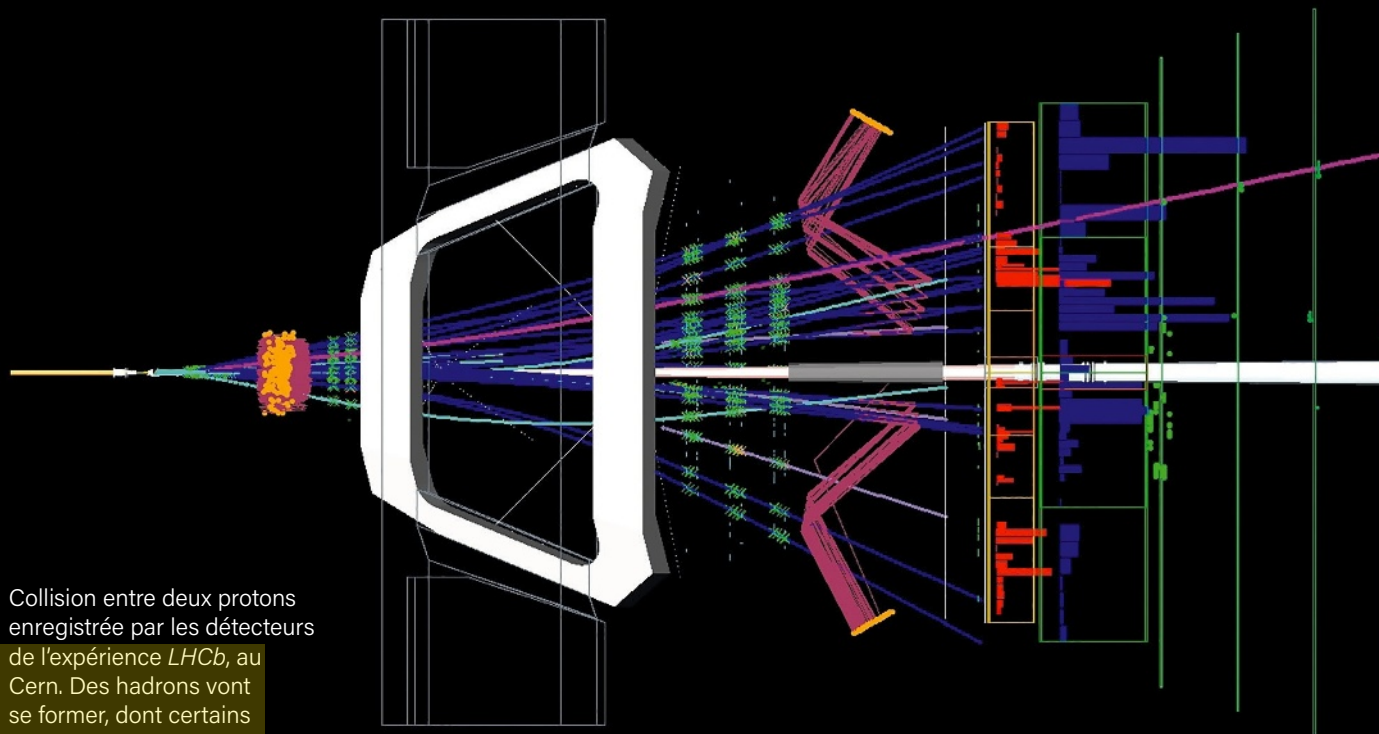
Il est trop tôt pour affirmer que le modèle standard a enfin été mis en défaut. Cependant, il est clair que de nombreuses choses nous échappent, car il y a beaucoup de questions fondamentales auxquelles le modèle standard ne répond pas. La physique des particules reste un territoire riche et fascinant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

Propos recueillis par Sean Bailly

Un quark fait de la résistance

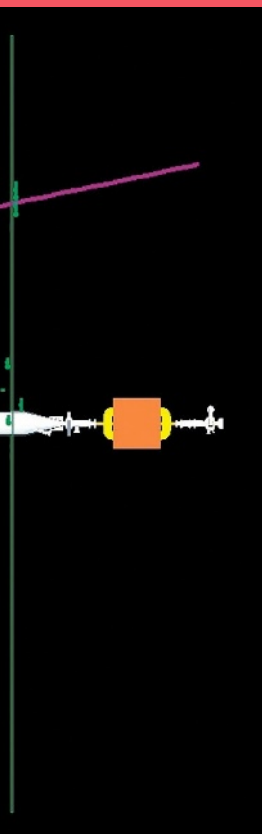
Sébastien Descotes-Genon

72



Collision entre deux protons
enregistrée par les détecteurs
de l'expérience *LHCb*, au
Cern. Des hadrons vont
se former, dont certains
contiendront des quarks *b*.

Depuis une décennie, les soupçons s'accumulent: le quark b ne se désintègre pas comme le prévoit la théorie. Son b de beauté serait-il aussi celui de blagueur? Le modèle standard en sera-t-il bouleversé?



Mardi 19 octobre 2021, près de la frontière franco-suisse. Le Cern entame une semaine de conférences sur les derniers résultats de l'expérience *LHCb*, avec toute une journée consacrée aux «anomalies de saveur». *LHCb* est l'un des quatre détecteurs géants qui ponctuent l'anneau souterrain du vaste collisionneur nommé LHC; le «b» minuscule indique qu'on y traque un gibier de choix, le quark b (comme «beauté», ou «bottom»). Quant aux «anomalies de saveur», elles désignent un processus au cours duquel un quark se désintègre en un quark de type (ou «saveur») différent, en s'écartant des attentes des physiciens. Ce jour-là, donc, près de 600 participants sont inscrits et suivent les sessions, sur place ou en visioconférence. Les résultats annoncés ne font que renforcer un sentiment né voici déjà plusieurs années: certaines désintégrations du quark b s'obstinent à ne pas obéir aux lois du modèle standard. L'enjeu est de taille: peut-on les comprendre? Marquent-elles le début de la fin pour le modèle standard?

UN MODÈLE TOUT EN SYMÉTRIES

Avant d'aller plus loin, attardons-nous sur la nature très régulière, symétrique, du modèle standard. Les particules de matière sont rassemblées en trois familles (voir les Repères, page 6) de structure très similaire (chacune

comprenant deux quarks et deux leptons), de plus en plus massives, mais obéissant de la même manière à trois interactions fondamentales: l'interaction forte, l'interaction faible et l'électromagnétisme. Les leptons chargés (qui existent en trois saveurs: électron, muon et tau) ne sont sensibles qu'aux interactions faible et électromagnétique, et les neutrinos seulement à l'interaction faible. En revanche, les quarks sont sensibles aux trois, et en particulier à l'interaction forte, qui les contraint à rester groupés dans des hadrons comme les protons et les neutrons, des objets composites constitués de quarks, parfois d'antiquarks, et de gluons, ces derniers étant justement les médiateurs de l'interaction forte.

Sur le plan théorique, les équations qui décrivent le comportement de ces particules et leurs interactions s'écrivent en combinant mécanique quantique et relativité. Et en s'appuyant sur des principes mathématiques de symétrie que les théoriciens utilisent pour écrire un objet mathématique unique, le lagrangien, d'où découlent toutes les équations du modèle standard. Si les paramètres initiaux semblent arbitraires (pourquoi des masses différentes? pourquoi ces choix de charges électriques?), ces équations sont parfaitement déterminées sur le plan mathématique... mais parfois difficiles à résoudre en pratique. Un gros obstacle