

Autre écueil à éviter : des erreurs dans les calculs théoriques. Après tout, l'interaction forte intervient pour lier les quarks dans les hadrons, et il est délicat d'estimer correctement son rôle dans les désintégrations expérimentales. Calculs analytiques, simulations numériques... les théoriciens ont redoublé d'efforts pour affiner leurs analyses, confirmant leurs prédictions et diminuant les incertitudes sur leurs calculs. Mieux : ils se sont aperçus que les mesures sur les probabilités de désintégration et la géométrie des produits de désintégration pouvaient être combinées pour former des rapports peu sensibles aux effets de l'interaction forte... mais s'obstinant toujours à dévier par rapport aux attentes. Invoquer des erreurs théoriques n'explique donc pas non plus les déviations observées.

Enfin, des mesures sur des phénomènes quantiques ne sont-elles pas exposées à des fluctuations statistiques ? Certes, mais depuis dix ans, *LHCb* a acquis de plus en plus de données en diminuant les barres d'erreur sur ses mesures : si certaines mesures ont légèrement changé au fil du temps (tout en restant compatibles avec les premières mesures), les déviations ont été confirmées, creusant progressivement l'écart avec le modèle standard.

UN CHANGEMENT, ET TOUT S'EXPLIQUE

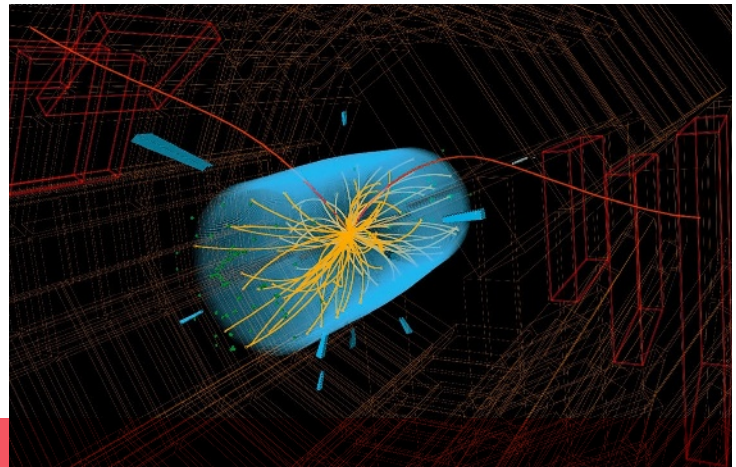
En fin de compte, les explications alternatives visant à faire rentrer dans le cadre les observations semblent de plus en plus artificielles. Tandis que celles en termes d'une « nouvelle physique » n'ont rien perdu de leur attrait, bien au contraire. En effet, on peut décrire l'ensemble des données enregistrées sur les désintégrations de type 1 et 2 en modifiant les équations d'une façon très économique. Il suffit d'ajouter un seul terme au lagrangien du modèle standard. Dès lors, non seulement les déviations observées se comprennent (une dizaine mesurées), mais on garantit aussi que les autres caractéristiques de ces désintégrations dévient très peu du modèle, comme cela est effectivement observé (caractéristiques quantifiées par près de 200 valeurs différentes !). Les écarts de conduite du quark *b* ne sont pas erratiques ; ils forment un motif cohérent en accord avec des extensions simples du modèle standard.

Mais à quel phénomène physique « au-delà du modèle standard » correspondrait ce nouveau terme ? Et pourquoi ne l'a-t-on pas observé plus tôt ? Sur cette deuxième question, les théoriciens

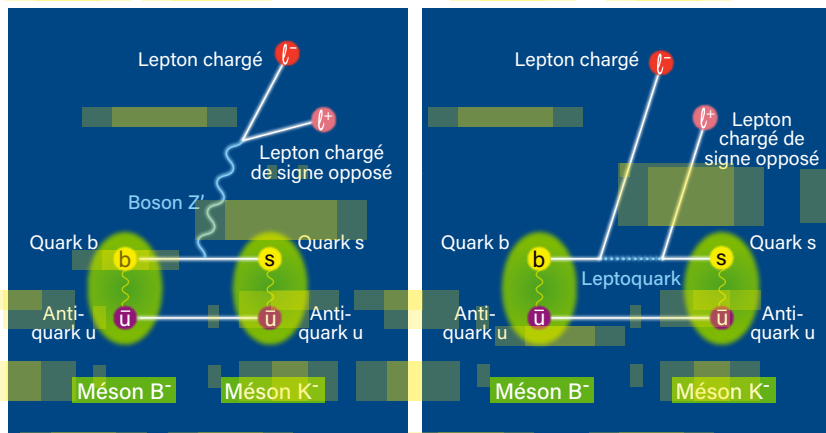
spéculent qu'il affecterait de façon importante les quarks et leptons chargés de la troisième famille (*t*, *b*, *tau*), plus modérément ceux de la deuxième (*c*, *s*, *muon*) et très peu ceux de la première (*u*, *d*, *électron*). Les propriétés de la troisième famille, plus lourde, ont été mesurées plus récemment et moins intensément que celles de la deuxième et surtout de la première famille, ce qui expliquerait que nous ayons dû attendre aussi longtemps pour entrevoir ces phénomènes.

Quant au phénomène en cause, il pourrait s'agir par exemple d'une nouvelle interaction, similaire à l'interaction faible et transmise par des bosons inédits *W'* et *Z'*. Ou encore de leptosquarks, particules hypothétiques se désintégrant en un quark et un lepton chargé – une bizarrerie de plus puisqu'aucune particule du modèle standard ne se transforme ainsi. Bien que très lourds, ils apparaîtraient de façon transitoire dans certaines désintégrations du quark *b* et justifieraient ses frasques récentes. Pour autant, les limitations du modèle standard ne seraient pas gommées. Enfin, pas de manière évidente. De nombreux théoriciens sont ainsi tentés d'incorporer ces particules dans des extensions plus vastes du modèle qui répondraient à d'autres questions ouvertes, comme l'origine de la

77



Bien qu'il n'ait pas été conçu pour cet exercice, le détecteur CMS du Cern épaule occasionnellement son compère *LHCb* dans la chasse aux quarks *b*. Sur cet événement du 25 juillet 2013, un méson *B_s* se désintègre en une paire muon-antimuon (en rouge).



Les anomalies constatées sur les désintégrations de type 1 ou 2 pourraient s'expliquer par l'existence soit d'une nouvelle interaction portée par des bosons inédits (à gauche), soit par des particules nouvelles, les leptoquarks (à droite).

matière noire, la grande diversité des masses de particules ou les causes de l'asymétrie entre matière et antimatière dans l'Univers.

Les paramètres de ces modèles étendus commencent d'ailleurs à être très contraints. Ces nouvelles particules ne peuvent pas être trop massives : on veut que le quark b puisse passer par leur intermédiaire pour se désintégrer, ce qui serait impossible si elles étaient très lourdes. Elles ne peuvent pas non plus être trop légères, car, au fil de décennies de recherche dans des collisions à des énergies toujours plus élevées, on les aurait déjà observées. On sait aussi que ces nouvelles particules et interactions engendrent bien souvent des désintégrations interdites par le modèle standard, par exemple une désintégration de type 2, mais avec deux leptons de charges opposées issus de familles différentes (comme un électron et un antimuon). On cherche activement ces événements prohibés dans les données de *BaBar*, *Belle* et *LHCb*, sans succès pour le moment.

Si les derniers résultats de *LHCb* sont encourageants, les physiciens concernés restent prudents sans claironner trop tôt que leur quark favori a mis en échec le modèle standard. Ils souhaitent encore accumuler des données, améliorer la précision des mesures, affiner les calculs théoriques et renforcer leurs outils d'analyse statistique avant de conclure définitivement sur la nature des déviations observées. Le récent redémarrage du LHC après trois ans d'arrêt va permettre à *LHCb* de modifier ses méthodes de sélection des données et ainsi d'accumuler davantage d'informations pertinentes. Bien qu'elles ne soient pas spécifiquement conçues pour l'étudier, les expériences *Atlas* et *CMS* se sont

elles aussi lancées dans des programmes d'études du quark b , tout en continuant à chercher si de nouvelles particules, W , Z' ou leptoquarks, n'apparaissent pas dans leurs détecteurs.

Enfin, l'expérience *Belle II* qui vient de démarrer au Japon devrait d'ici quelques années livrer ses premiers résultats sur ces désintégrations, dans un contexte expérimental très différent, où l'identification des divers leptons chargés sera facilitée. Il est donc clair qu'expérimentateurs et théoriciens vont continuer à suivre de près ce quark b décidément rétif à la discipline du modèle. Va-t-il se résoudre à rentrer dans le rang, ou mènera-t-il sa rébellion jusqu'à renverser le modèle standard ?

— L'auteur —

> **Sébastien Descotes-Genon** est directeur de recherche au CNRS et directeur adjoint du Laboratoire de physique des 2 infinis Irène Joliot-Curie (IJCLab, Cnrs/université Paris-Saclay).

— À lire —

> **D. Becirevic et al.**, Universalité de la saveur leptonique : les trois leptons ont-ils réellement les mêmes propriétés ? *Reflets de la physique*, n°66, Juillet-août 2020.

> **S. Bifani et al.**, Review of Lepton universality tests in B decays, *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, vol.46, n°2, 2018.

> **Y. Grossman et al.**, Just a Taste: Lectures on flavor physics, in : *Anticipating the next discoveries in particle physics*, <https://arxiv.org/abs/1711.03624>, 2016.