

Obtenir l'une de ces rares désintégrations nécessite de produire en grande quantité des hadrons contenant des quarks *b*, dans des collisions à très haute énergie de protons comme au LHC, ou d'électrons et de positrons comme dans les expériences *BaBar* ou *Belle*. Autre prérequis : bâtir autour du point de collision un détecteur capable d'identifier les particules issues de chaque désintégration et de mesurer leur énergie et leur vitesse. En accumulant ces données, les désintégrations intéressantes sont identifiées et les probabilités qu'elles se produisent calculées. N'oublions pas que la physique des particules vit dans un monde quantique sans déterminisme : tout phénomène a une certaine chance de se produire... encore faut-il le pouvoir la mesurer !

ERREUR OU DÉCOUVERTE ?

Au fil des ans, les résultats se sont accumulés. Les déviations par rapport aux attentes du modèle standard aussi. Pour le type 1 (émission d'un lepton chargé et d'un neutrino), les écarts apparaissent quand un tau apparaît, alors que tout semble normal avec un muon ou un électron. Pour le type 2 (deux leptons de même famille et de charges opposées), des surprises arrivent quand une paire muon-antimuon est produite, alors que rien n'étonne avec une paire électron-antélectron. Ainsi, toutes ces « anomalies » dépendent de la famille de leptons impliquée, ce qui suggère que l'universalité de la saveur leptonique n'est pas respectée dans les deux types de désintégration. On comprend

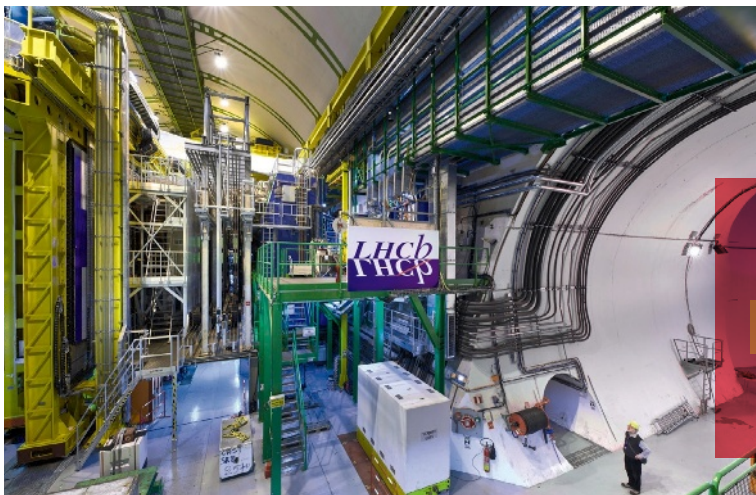
mieux alors l'intérêt des derniers résultats annoncés en octobre 2021. S'ils ne sont pas significatifs par eux-mêmes, ils confirment le caractère obstinément rebelle du quark *b* !

Bien sûr, avant d'affirmer que le modèle standard a vécu, les physiciens doivent s'assurer que les déviations du quark *b* ne proviennent pas de causes plus ordinaires, et donc bien moins excitantes.

Premier biais à écarter : des difficultés expérimentales qui perturberaient l'identification des particules produites, et, en particulier, des leptons chargés. Les physiciens seraient alors confrontés à de « fausses » violations de l'universalité de saveur leptonique. Et il est vrai que cette identification constitue un défi expérimental. Ainsi, les taus ne sont pas identifiés directement dans les détecteurs, mais à partir des particules issues de leur propre désintégration, tandis que les électrons, très légers, ne sont pas toujours faciles à analyser dans l'environnement très agité des collisions entre protons du LHC.

Mais même si la tâche est ardue, il serait très surprenant que les écarts observés résultent d'effets expérimentaux mal maîtrisés. D'une part, les expérimentateurs ont calibré leurs analyses par de nombreuses mesures complémentaires sur des processus déjà bien connus. Ils ont ainsi pu confirmer qu'ils identifiaient correctement les trois types de leptons chargés. D'autre part, les écarts de conduite du quark *b* ne concernent pas seulement l'universalité de la saveur leptonique. En effet, la désintégration de type 2 produisant une paire muon-antimuon contredit aussi par d'autres aspects les attentes fondées sur le modèle standard, et ce avant même de chercher à la comparer au cas électron-antélectron. Or ces muons sont très bien identifiés expérimentalement grâce à des sous-détecteurs spécifiques. Invoquer un problème expérimental est donc difficile.

75

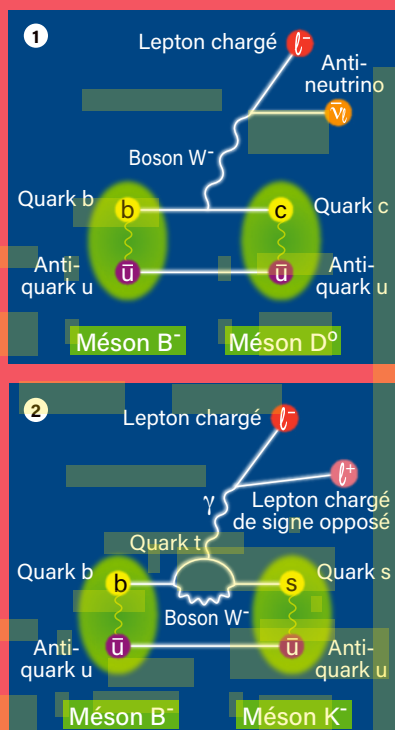


← À 100 mètres sous la ville de Ferney-Voltaire, le détecteur *LHCb* du Cern (5 600 tonnes) braque ses détecteurs et sous-détecteurs sur les quarks *b* nés des collisions entre protons.

ANATOMIE DES ANOMALIES

La « désintégration de type 1 » dont il est question dans l'article est en fait notée en physique $b \rightarrow c \ell^- \bar{\nu}_\ell$. Cela désigne la désintégration d'un quark b en un quark c, un lepton chargé ℓ^- (un électron, un muon, ou un tau) et l'antineutrino associé $\bar{\nu}_\ell$. Dans le modèle standard, elle est possible sous l'effet de l'interaction faible et se produit par l'intermédiaire d'un boson W, médiateur de l'interaction faible, selon le diagramme 1. La « désintégration de type 2 », notée quant à elle $b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$, concerne la désintégration du quark b en un quark s et une paire de leptons chargés de même famille et de signes opposés (soit électron-positron, soit muon-antimuon). Cette désintégration est elle aussi due à l'interaction faible, mais elle nécessite de passer par un état intermédiaire plus compliqué, impliquant un boson W et un quark top 2. Il est possible de passer brièvement par cet état, plus lourd que le quark b initial (le W et le Z sont une vingtaine de fois, et le quark top une quarantaine de fois plus lourds que le quark b), grâce aux propriétés de la mécanique quantique, mais cela rend cette désintégration d'autant plus rare et donc difficile à observer.

Les deux types de désintégration, décrits théoriquement en termes de quarks, sont étudiés expérimentalement en termes de hadrons. Pour le type 1, $b \rightarrow c \ell^- \bar{\nu}_\ell$, on peut par exemple étudier un méson B^- (un quark b et un antiquark $\bar{u}$) qui peut se désintégrer en un méson D^0 (un quark c et



un antiquark $\bar{u}$), un tau et un antineutrino tau : il s'agit alors du mode $B^- \rightarrow D^0 \tau^- \bar{\nu}_\tau$. Mais de nombreux autres modes sont possibles, toujours à partir d'un hadron contenant un quark b vers un hadron contenant un quark c, un lepton chargé et un antineutrino. Dans le cadre du modèle standard, on peut prédire précisément les probabilités de désintégration pour certains de ces modes. Il s'avère qu'expérimentalement la probabilité d'obtenir un tau est 10 à 15 % plus faible que celle attendue. En combinant les résultats de *BaBar*, *Belle* et *LHCb* sur deux modes de désintégration différents et en prenant en compte les barres d'erreur, on aboutit à une déviation

de 3,4 sigmas, soit une probabilité de moins d'un pour mille que cet écart soit dû à une fluctuation statistique des données. Cela suggère que l'universalité de saveur leptonique présente dans le modèle standard n'est pas respectée par les mesures, et que le tau se comporte différemment des muons et des électrons lors de ces désintégrations. Pour le type 2, $b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$, on peut là encore étudier différents modes hadroniques, par exemple $B^- \rightarrow K^- \mu^+ \mu^-$ avec le méson K^- (un quark s et un antiquark $\bar{u}$) et une paire muon-antimuon, mais aussi d'autres désintégrations, toujours à partir d'un hadron contenant un quark b vers un hadron contenant un quark s et une paire de leptons chargés de la même famille, mais de signes opposés. En produisant de très grandes quantités de hadrons contenant des quarks b, la collaboration *LHCb* a fourni de nombreux résultats précis sur les désintégrations, d'une part avec une paire électron-positron, d'autre part avec une paire muon-antimuon. Il est vite apparu que les mesures sur les muons s'écartent des attentes du modèle standard : les probabilités de désintégration sont trop petites par rapport aux prédictions théoriques, et les particules finales (hadrons, muons, antimuons) sont émises selon des géométries (des directions préférées pour les hadrons et leptons produits) en désaccord avec le modèle standard. En revanche, pour les électrons, tout semble se passer comme prévu. L'universalité de saveur leptonique n'est donc pas respectée non plus pour le type 2.

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

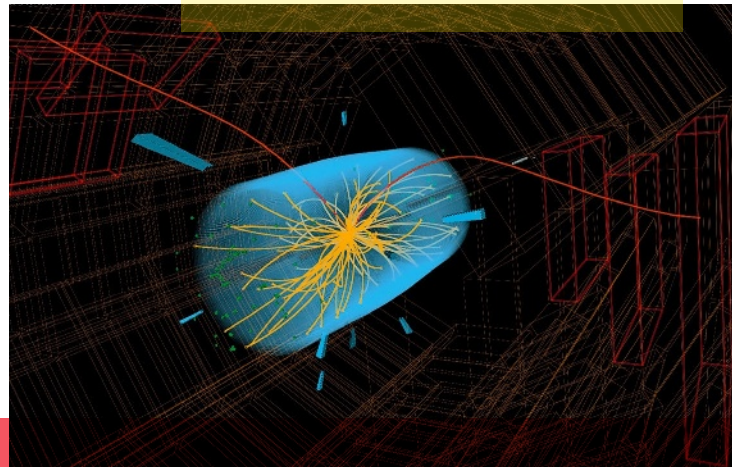
En fin de compte, les explications alternatives visant à faire rentrer dans le cadre les observations semblent de plus en plus artificielles. Tandis que celles en termes d'une « nouvelle physique » n'ont rien perdu de leur attrait, bien au contraire. En effet, on peut décrire l'ensemble des données enregistrées 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).