

En bref

> Le quark b, l'un des six répertoires par le modèle standard, se désintègre en particules plus légères sous l'effet de la force faible.	> Une décennie d'études en Europe, aux États-Unis et au Japon pointe des anomalies persistantes sur deux types de ses désintégrations.	> Ni les difficultés expérimentales, ni la théorie, ni les fluctuations statistiques ne rendent bien compte de ces anomalies.	> Des explications au-delà du modèle standard postulent l'existence d'une nouvelle interaction ou de nouvelles particules, les leptosquarks.
--	--	---	--

théorique concerne l'interaction forte : pour les processus qui font intervenir cette interaction, les solutions actuelles ne sont que partielles.

Même si le modèle standard est parfois retors, on peut s'appuyer sur l'existence de ses symétries et constater que les trois familles ont la même sensibilité aux trois interactions fondamentales. C'est en particulier le cas pour les trois saveurs de leptons chargés (à distinguer des leptons de charge électrique nulle que sont les neutrinos) : l'électron (1^{re} saveur), le muon (2^e saveur) et le tau (3^e saveur) sont de plus en plus massifs, mais tous réagissent de la même façon lorsqu'ils sont soumis aux interactions électromagnétique et faible. C'est l'universalité de la saveur leptonique, testée avec précision et depuis longtemps dans un grand nombre d'expériences. Quoi que...

ENTRE DEUX DÉSINTÉGRATIONS,
MON CŒUR BALANCE

Depuis près d'une décennie, cette universalité de la saveur leptonique est remise en cause suite aux études approfondies de désintégrations du quark b. Ce compagnon du quark top dans la troisième famille, la plus lourde, est devenu un sujet de choix pour la physique des particules. Massif, il se désintègre en particules plus légères sous l'effet de l'interaction faible. Les probabilités de tel ou tel mode de désintégration sont connues et fournissent des renseignements précieux sur la différence entre quarks et antiquarks dans le modèle standard. Cela explique pourquoi les désintégrations du quark b ont été étudiées en détail dans les expériences *BaBar*, aux États-Unis, et

Belle, au Japon, dans les années 2000. Elles ont confirmé que chaque quark du modèle standard et son antiquark associé ont, certes, des comportements légèrement différents, mais que toutes ces différences restent en parfait accord avec le modèle standard.

Au LHC du Cern, les physiciens ont poursuivi ce travail, en particulier à travers l'expérience *LHCb* conçue pour étudier les quarks b (et les antiquarks $\bar{b}$) produits lors de collisions très énergétiques entre deux faisceaux de protons. En produisant ce quark en grande quantité, on mesure précisément la probabilité qu'il se désintègre de telle ou telle manière. C'est ainsi que deux types de désintégration ont commencé à surprendre les physiciens, que nous surnommerons par simplicité type 1 et 2 (voir l'encadré page 76 pour plus de détails). Elles sont peu fréquentes et, à chaque fois, le quark b disparaît au profit d'un quark plus léger, mais aussi d'un lepton chargé et de son neutrino (neutre) associé (type 1) ou bien de deux leptons de la même famille et de charges opposées (type 2).

Pour donner du piquant à l'affaire, le quark b, comme les quarks des autres familles, ne s'observe jamais isolé, mais toujours à l'intérieur d'un hadron, à cause de l'interaction forte. Expérimentalement, on rencontre, par exemple, le méson B^- (un quark b et un antiquark $\bar{u}$), le méson B_d (un quark b et un antiquark $\bar{d}$), ou encore le baryon Λ_b (un quark b, un quark u et un quark d). Lors d'une désintégration du quark b en un quark plus léger, les autres quarks constituant le hadron ne sont pas modifiés, ce qui aboutit à un hadron plus léger contenant le quark final.

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-antiélectron. 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-antiélectron. 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.