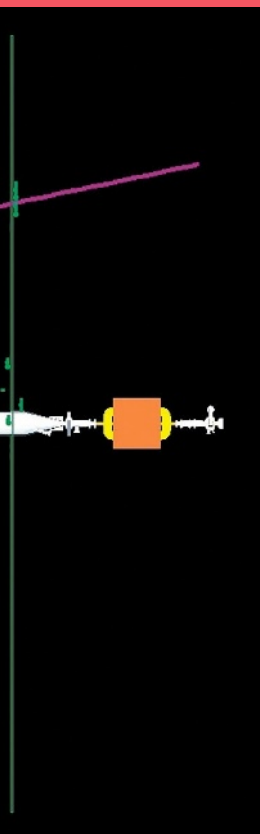


Depuis une décennie, les soupçons s'accumulent: le quark b ne se désintègre pas comme le prévoit la théorie. Son b de beauté serait-il aussi celui de blagueur? Le modèle standard en sera-t-il bouleversé?



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

comportant 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

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, 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 leptokarks.

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.