

> masse comprise entre 145 et 185 GeV. Le quark t a été détecté l'année suivante au Fermilab, aux États-Unis, et sa masse a été établie à 175 GeV.

Les diagrammes que nous avons examinés ne représentent que deux déroulements possibles de ces désintégrations particulières. On peut en imaginer d'autres et, ce qui est extraordinaire, c'est que toutes ces possibilités ont leur importance. D'après les règles de la physique quantique, ce qui se passe dans la nature est imposé par la contribution nette de *toutes* les diagrammes valides que nous puissions dessiner, même si les plus simples et les plus évidents sont ceux qui ont le plus de poids.

Par conséquent, tous les chemins possibles de la désintégration jouent un rôle, et nous devons les prendre en compte dans les calculs effectués pour prédire la probabilité de désintégration, les trajectoires des produits de la désintégration et autres caractéristiques. En d'autres termes, même quand une particule se désintègre selon un processus ne donnant en sortie que des particules membres du modèle standard, elle subit les effets de toutes les particules possibles. Par conséquent, si la mesure d'une désintégration est en désaccord avec nos calculs fondés sur les seuls ingrédients du modèle standard, nous en déduisons qu'il doit y avoir quelque chose d'autre à l'œuvre.

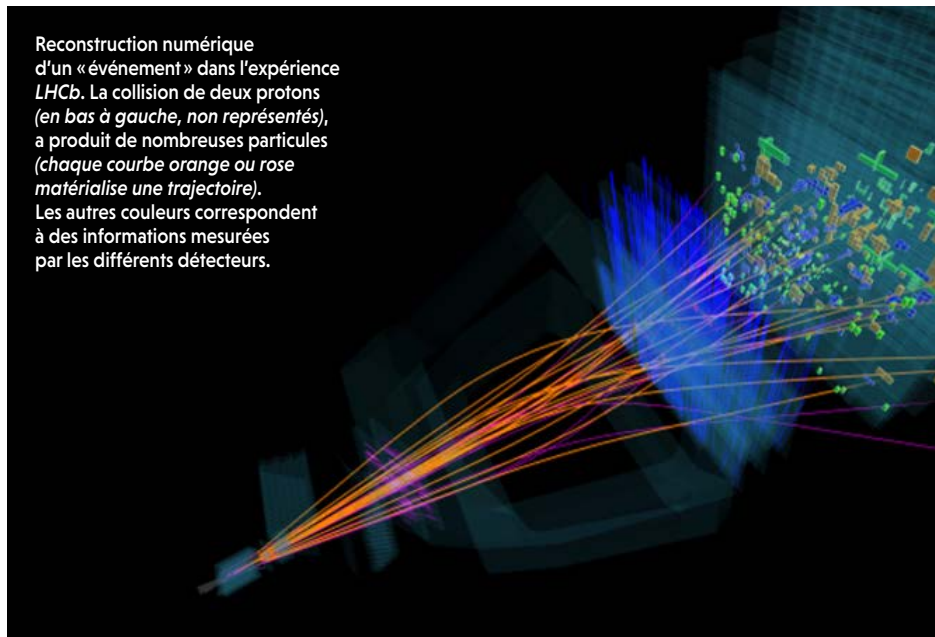
Tel est le principe directeur de la stratégie de recherche indirecte de nouvelles particules et d'une physique nouvelle que nous menons sur *LHCb*. En outre, comme ces particules nouvelles seraient des participantes virtuelles de toutes les désintégrations que nous mesurons, la masse des particules que nous pouvons détecter n'est pas limitée par la capacité énergétique de notre accélérateur. En principe, si nous étudions les bons processus de désintégration avec une précision suffisante, nous pourrions observer les effets de particules encore plus lourdes que celles susceptibles d'être créées et détectées par *Atlas* et *CMS*.

DES FISSURES DANS LE MODÈLE STANDARD

Et, en effet, mes collègues de l'expérience *LHCb* et moi avons déjà mis en évidence des indices suggérant que tout n'est pas parfait dans la description que fait le modèle standard des désintégrations de hadrons beaux. Il est important de souligner qu'avec davantage de données et une meilleure compréhension de la théorie, il n'est pas exclu que nous trouvions que, tout compte fait, le modèle standard est en accord avec nos mesures. Mais même si cela peut être le cas, ces premières indications illustrent comment des fissures pourraient naître et s'élargir dans l'édifice du modèle standard.

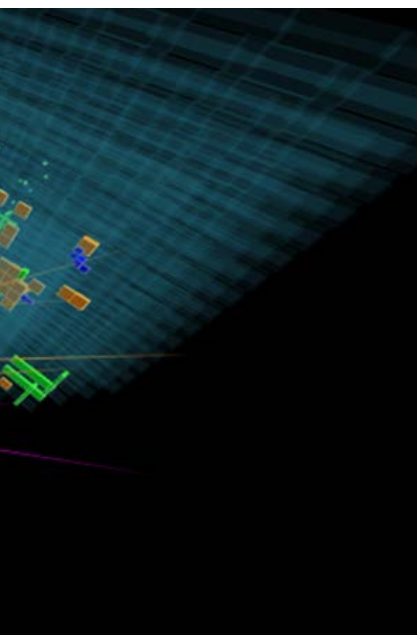
La pièce à conviction numéro un concerne la désintégration $\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+} \tau^- \bar{\nu}_\tau$ que nous avons

Reconstruction numérique d'un « événement » dans l'expérience *LHCb*. La collision de deux protons (en bas à gauche, non représentés), a produit de nombreuses particules (chaque courbe orange ou rose matérialise une trajectoire). Les autres couleurs correspondent à des informations mesurées par les différents détecteurs.



examinée plus haut (voir les figures page 69) et la possible violation de la règle dite d'universalité des leptons. Dans le modèle standard, le boson W a la même probabilité de se désintégrer en un lepton tau et son antineutrino que de se désintégrer en membres des autres générations, celle des muons ou celle des électrons (après prise en compte des masses différentes du tau, du muon et de l'électron). En d'autres termes, les règles de la désintégration du W devraient être universelles pour tous les leptons. Mais dans les données de *LHCb*, après avoir compté les désintégrations dans chaque génération, soustrait tous les processus qui pourraient contrefaire les signatures de ces désintégrations et intégré diverses corrections liées aux détecteurs, nous avons trouvé que les hadrons beaux semblent se désintégrer en taus plus souvent que le modèle standard ne le prévoit.

Nos résultats ne sont pas encore définitifs; le désaccord que nous avons trouvé est « à 2σ », σ (sigma) désignant l'écart-type, une grandeur statistique qui mesure la dispersion des valeurs mesurées par rapport à leur moyenne. Un écart entre une valeur mesurée et la valeur prévue peut être le résultat d'un phénomène nouveau non inclus dans la théorie ou la conséquence de fluctuations statistiques. Du fait de ces dernières, il n'est donc pas rare d'observer des écarts de 2σ . L'accumulation de données permet en général d'éliminer ces effets. Dès lors, les physiciens ne commencent vraiment à réagir que quand ils sont confrontés à des écarts de 3σ . On considère qu'il faut avoir une déviation de 5σ pour être confiant que l'effet n'est pas un artefact statistique et qu'il s'agit bien d'une découverte. Notre effet à 2σ n'a donc rien de remarquable... sauf si l'on prend en compte ce que les physiciens ont trouvé dans d'autres expériences.



D'autres équipes ont cherché des violations de l'universalité des leptons avec *BaBar* et *Belle*, deux expériences de physique des hadrons beaux conduites respectivement en Californie et au Japon. Ces chercheurs ont aussi mis en évidence une préférence pour les taus dans les mêmes désintégrations que celles que nous avons mesurées, ainsi que dans des processus similaires. De plus, sur *LHCb*, nous avons réalisé début 2017 une nouvelle mesure de l'universalité des leptons dans ces désintégrations en utilisant une technique différente, et nous avons encore trouvé que les taus sont légèrement plus nombreux que ne le prédit le modèle standard. En regroupant les données de toutes ces expériences, les mesures livrent un résultat s'écartant de 4σ des prédictions classiques. C'est actuellement l'un des désaccords les plus forts de la physique des particules, ce qui constitue un problème réel pour le modèle standard.

Comment expliquer ces observations? Les théoriciens ont quelques idées. Par exemple, l'existence d'un nouveau type de boson de Higgs, doté d'une charge électrique, pourrait être une piste, car de telles particules ne respectent pas l'universalité des leptons. Elles se désintègrent de préférence en particules de masse assez élevée, favorisant donc la production de leptons taus. Mais les théories les plus simples qui prédisent des bosons de Higgs supplémentaires reproduisent assez mal les détails

années à venir, grâce à *LHCb* ou à l'expérience de nouvelle génération *Belle II*, qui sera bientôt opérationnelle.

Un autre exemple pointant peut-être vers une physique au-delà du modèle standard concerne la désintégration $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \mu^-$, que nous avons déjà évoquée (voir figure page 69). Il est naturel de rechercher d'éventuelles manifestations d'une physique nouvelle dans les processus de ce type, pour deux raisons. Tout d'abord, la présence de boucles dans le diagramme de Feynman correspondant indique que la désintégration dans le cadre du modèle standard est difficile. En revanche, des particules nouvelles pourraient faciliter cette désintégration. Il y aurait alors davantage de désintégrations que ne le prévoient les calculs fondés sur le modèle standard. En second lieu, cette désintégration a de nombreuses propriétés mesurables: la probabilité d'occurrence du processus, les angles et les énergies des produits de désintégration, etc. De ces propriétés, on tire différentes «observables», des quantités que nous pouvons comparer directement avec les prédictions du modèle standard.

UNE TRAQUE MINUTIEUSE

À bien des égards, $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \mu^-$ est la réaction vedette de la physique des hadrons beaux, et ses mérites sont évidents quand on voit l'impressionnant corpus d'articles théoriques produits avant même la mise en route du LHC. La seule chose qui fasse défaut à cette désintégration est une nomenclature à la hauteur: les noms utilisés jusqu'à présent pour les différentes observables laissent franchement à désirer, par exemple « P_5' » (prononcé «p5 prime») qui est le «héros» de notre histoire.

Nous avons fait une première analyse de P_5' avec une partie des premières données de *LHCb*. Nous avons mesuré cette observable en définissant plusieurs catégories à partir des énergies et des directions de la paire de muons produite dans le processus. Pour certaines catégories, nous avons trouvé un désaccord significatif entre les prédictions et nos mesures. Nous étions donc impatients de réaliser l'analyse avec le jeu de données complet de la première campagne de mesures du LHC. Le désaccord persistait-il, ou bien s'agissait-il simplement d'une aberration statistique?

Il a persisté: la taille de l'effet est désormais aux alentours de $3,5\sigma$, ce qui est trop peu pour tirer des conclusions définitives et déboucher le champagne, mais certainement suffisant pour être pris au sérieux. En outre, nous avons trouvé d'autres signaux encourageants en étudiant des observables dans des processus de désintégration similaires. Ces observables présentent aussi de curieux désaccords avec le modèle standard. Globalement, ce désaccord ➤

Ces désaccords entre mesures et théorie sont parmi les plus forts en physique des particules

des désaccords entre nos mesures et le modèle standard. Une autre explication encore plus exotique serait l'existence d'un leptoquark, une particule hypothétique qui partage certaines propriétés des quarks et des leptons.

Enfin, bien sûr, les résultats que nous observons relèvent peut-être d'un effet expérimental lié à un signal mal compris qui aurait la même allure que les désintégrations que nous recherchons. Pour faire le tri entre ces possibilités, de nouvelles mesures plus précises sont nécessaires. Nous en disposerons dans les

> atteint $4,5\sigma$: il semble ainsi que l'on ne puisse plus ignorer le problème.

Les théoriciens ont proposé une foule d'explications potentielles mettant en œuvre une physique nouvelle pour expliquer cet effet. Le leptiquark, déjà invoqué pour la désintégration $\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+} \tau^- \bar{\nu}_\tau$, est une possibilité. Une autre serait une particule Z' («Z prime»), qui serait un cousin exotique plus lourd du boson Z , mais qui se désintégrerait de façon spécifique en quarks ou en leptons (voir les figures ci-contre). Néanmoins, ces spéculations sont soumises à de fortes contraintes. Elles doivent s'accorder avec toutes les mesures réalisées dans les autres expériences du LHC ou ailleurs. Par exemple, la masse et le comportement de ces nouvelles particules hypothétiques doivent être compatibles avec le fait qu'elles n'aient pas été détectées dans les recherches directes d'Atlas et de CMS.

Pour certains physiciens, le problème trouverait sa source dans nos calculs issus du modèle standard. Par exemple, les répercussions d'effets bien connus mais difficiles à calculer et associés à l'interaction forte pourraient être plus importantes qu'on ne le pensait initialement. La bonne nouvelle est qu'il est possible de tester ces effets par des mesures complémentaires. Ces tests nécessiteront une analyse détaillée et davantage de données, que nous collectons déjà au LHC et ailleurs.

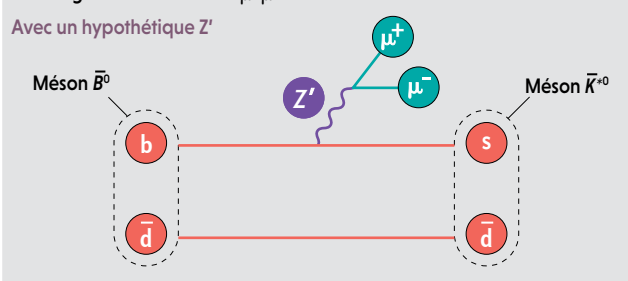
LES INDICES S'ACCUMULENT

La dernière énigme que *LHCb* a fait surgir concerne un double jeu de mesures qui n'est pas sans rapport avec nos deux exemples précédents. Elle pourrait cependant mettre en évidence un effet encore plus intéressant. Ici, nous avons étudié un rapport, noté R_{K^*} , (et prononcé «r k étoile»), qui compare la probabilité du processus $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \mu^-$ à la probabilité d'une désintégration similaire qui produit un électron et un positron (l'antiélectron) à la place de la paire $\mu^+ \mu^-$ de muons. Nous avons également étudié un deuxième rapport, R_K , qui compare les désintégrations où le méson $\bar{K}^{*0}$ a été remplacé par un autre type de hadron (contenant un quark s) nommé tout simplement méson K . Dans ces deux cas, nous essayons encore de tester l'universalité des leptons, mais cette fois entre les deux premières générations de leptons, à savoir électrons et muons.

La prédiction du modèle standard est triviale : les deux désintégrations de chaque rapport devraient se produire avec la même probabilité, en conséquence de quoi les valeurs attendues de R_K et R_{K^*} devraient être pratiquement égales à 1. Là encore, nous nous attendions à ce que l'universalité des leptons soit vérifiée. Les mesures, bien que loin d'être simples, présentent moins de difficultés

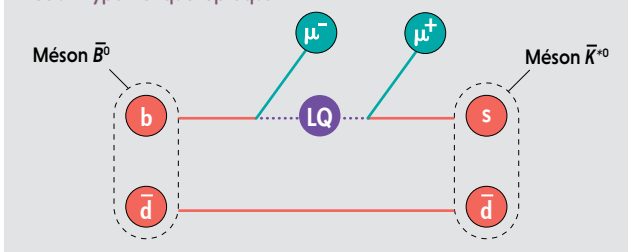
Désintégration 2A : $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \mu^-$

Avec un hypothétique Z'



Désintégration 2B : $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \mu^-$

Avec un hypothétique leptiquark



expérimentales que les analyses précédentes sur l'universalité des leptons ; elles constituent donc un test extrêmement clair du modèle standard.

Nous avons commencé par l'analyse de R_K et avons trouvé une valeur basse, 0,75, avec une précision qui la place à $2,6\sigma$ des prédictions du modèle standard. Cet écart était suffisamment étonnant pour que nous attendions avec impatience la valeur de R_{K^*} . Nous l'avons publiée récemment et nous n'avons pas été déçus : R_{K^*} présentait un comportement remarquablement identique à R_K , avec un rapport égal à 0,69 (à environ $2,6\sigma$ au-dessous de la prédiction du modèle standard). Même s'il n'est pas exclu que ces valeurs plus basses qu'attendu soient dues à de simples fluctuations statistiques, le fait que nous les ayons trouvées dans deux mesures différentes attire l'attention.

Si les mesures de R_K et R_{K^*} sont confirmées, elles indiquent que quelque chose dans la nature favorise les désintégrations qui produisent des électrons plutôt que celles qui créent des muons, et là encore les leptiquarks ou un boson Z' sont des coupables possibles. Si c'est le cas, quel que soit le mécanisme responsable, il n'expliquerait pas seulement les bizarreries de R_K et R_{K^*} , mais aussi la mesure de P_s' relative aux muons. Pour faire bonne mesure, certains théoriciens plus ambitieux ont même proposé des scénarios qui résoudraient également l'énigme $\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+} \tau^- \bar{\nu}_\tau$, mais concevoir une particule ayant les caractéristiques requises pour expliquer les trois mesures est un défi de taille.

Nous en saurons très bientôt davantage. Nous analysons actuellement les données

BIBLIOGRAPHIE

F. Archilli et al., **Flavour-changing neutral currents making and breaking the standard model**, *Nature*, vol. 546, pp. 221-226, 2017.

G. Ciezarek et al., **A challenge to lepton universality in B-meson decays**, *Nature*, vol. 546, pp. 227-233, 2017

G. Kane, **Le modèle standard revisité**, *Pour la Science*, n° 311, septembre 2003.