

nouvelle physique, en d'autres termes des comportements que le modèle standard ne parviendrait pas à expliquer.

Les physiciens théoriciens ont de nombreuses hypothèses sur la forme que pourrait revêtir cette nouvelle théorie. La plupart de ces pistes prévoient l'existence de nouvelles particules qui sont plus lourdes que celles que nous connaissons. Le LHC est particulièrement bien équipé pour les traquer: la grande énergie de ses collisions signifie qu'il peut produire et détecter des particules assez massives, jusqu'à quelques milliers de GeV (pour comparaison, les masses du boson de Higgs et du proton sont respectivement de 125 GeV et de 0,9 GeV).

Les expériences *Atlas* et *CMS* ont été conçues pour rechercher directement ces particules massives au travers des signatures caractéristiques que produiraient leurs désintégrations. Mais une autre approche possible est de détecter la présence de nouvelles particules par l'intermédiaire de leurs effets «virtuels» sur la désintégration des particules du modèle standard.

Pour comprendre la notion de particule virtuelle, nous devons nous pencher sur les diagrammes de Feynman (voir les figures ci-dessous). Le physicien américain Richard Feynman, mort en 1988, a conçu ces diagrammes comme une façon commode de

le LHC, et qu'on nomme un méson $\bar{B}^0$ (prononcé «B zéro barre»). Il s'agit d'un hadron composé d'un quark b et d'un antiquark $\bar{d}$ (les particules d'antimatière sont notées avec le suffixe «barre»). Dans les diagrammes, le temps s'écoule de gauche à droite. Dans le premier cas, nous voyons que le méson initial se désintègre en un méson D^{*+} (constitué d'un quark c et d'un antiquark $\bar{d}$), un lepton tau à charge négative (τ^-) et un antineutrino tauique ($\bar{\nu}_\tau$); par conséquent, on note le processus: $\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+} \tau^- \bar{\nu}_\tau$.

L'autre désintégration, $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \mu^-$, produit un méson $\bar{K}^{*0}$ (constitué d'un quark s et d'un antiquark $\bar{d}$), un muon et un antimuon. La loi de conservation de l'énergie, avec l'équivalence masse-énergie décrite par la célèbre équation $E=mc^2$ d'Albert Einstein, impose que ces particules finales aient une masse totale inférieure à celle du méson beau initial. La différence de masse se retrouve dans l'énergie cinétique des produits de la désintégration.

DES PARTICULES VIRTUELLES

Concentrons-nous maintenant sur ce qui se passe au cœur des diagrammes, là où se produisent les désintégrations. Dans le premier cas, nous voyons le quark b se transformer en un quark c et émettre un boson W , une des particules médiatrices de l'interaction faible. Ce boson W se désintègre à son tour en un lepton τ et son antineutrino associé. Il est *a priori* étonnant de voir apparaître un boson W , qui est environ 16 fois plus massif que le méson $\bar{B}^0$ de départ. Pourquoi sa présence dans le processus de désintégration ne viole-t-elle pas la loi de conservation de l'énergie? Dans la mécanique contre-intuitive de la mécanique quantique, une telle violation est en fait autorisée tant qu'elle ne dure qu'un court instant, en vertu du principe d'incertitude de Heisenberg. Dans ce cas, nous disons que le boson W est virtuel.

Tournons-nous maintenant vers la désintégration $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \mu^-$. On constate que le processus est plus compliqué. Il présente une structure en forme de boucle et, outre un boson W , plusieurs autres particules virtuelles participent à la désintégration: un quark t virtuel et un boson Z virtuel, tous deux beaucoup plus massifs que le méson de départ. L'idée de particules virtuelles peut sembler fantaisiste, mais les règles de la physique quantique nous autorisent à établir de tels diagrammes, et les physiciens ont démontré que ces processus sont indispensables pour calculer correctement la probabilité d'occurrence des désintégrations considérées. De fait, c'est par l'influence de quarks t virtuels dans certaines mesures que les physiciens néerlandais Gerard 't Hooft et Martinus Veltman ont estimé, dès 1994, que le quark t avait une

GLOSSAIRE

HADRON

Particule composite constituée de quarks, liés par des gluons.

HADRON BEAU

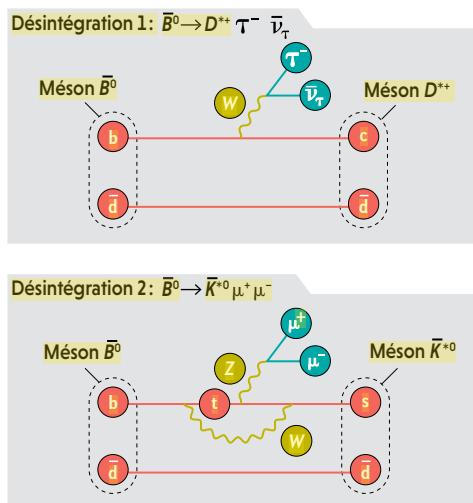
Hadron contenant au moins un quark b ou un antiquark $\bar{b}$

MÉSON

Hadron formé d'un quark et d'un antiquark. Un méson beau est formé d'au moins un quark b ou d'un antiquark $\bar{b}$

BARYON

Hadron formé de trois quarks. Le proton est ainsi un hadron formé de deux quarks u et d'un quark d .



visualiser et calculer les probabilités de désintégration et d'interaction des particules subatomiques. Nous allons ici examiner les diagrammes de Feynman de deux chaînes de désintégration possibles pour des hadrons beaux (des particules qui, malheureusement, sont en général désignées par des agrégats assez malcommodes de lettres grecques et de symboles).

Dans les deux exemples, nous partons d'une particule particulière, qui peut être produite lors de la collision de deux protons dans

► 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.

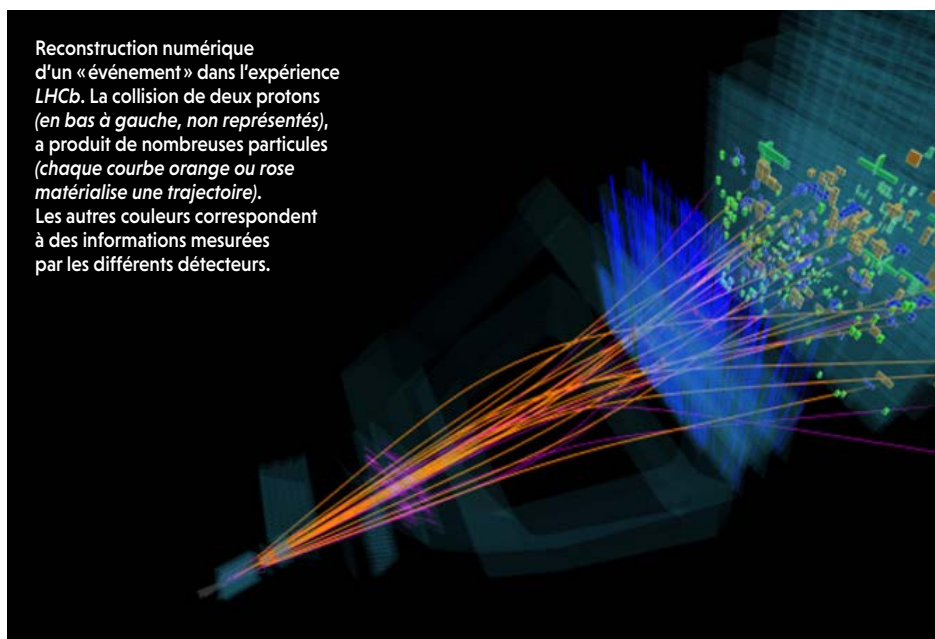
Tel est le principe directeur de la stratégie de recherche indirecte de nouvelles particules et d'une physique nouvelle que nous menons sur *LHCb*. En outre, comme ces particules nouvelles seraient des participantes virtuelles de toutes les désintégrations que nous mesurons, la masse des particules que 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.