



LES DELTAS DE LAVE MODIFIENT SANS CESSER LE TRAIT DE CÔTE

Le 3 janvier 2017, l'imageur OLI (*Operational Land Imager*) du satellite *Landsat 8* révéla le nouveau trait de côte créé par l'effondrement du delta de lave de Kamokuna (*ci-dessous*). Le lieu de l'effondrement est indiqué (*flèche rouge*). Non loin de lui, une nouvelle coulée se signale par un panache de vapeur. L'ensemble de la côte est marqué par des effondrements successifs reconnaissables à leurs formes en arc de cercle. Ci-dessus, la même côte en voie de transformation prise en novembre 2017, c'est-à-dire avant que la période d'effondrement ne débute.



BIBLIOGRAPHIE

M. Detay, **Traité de volcanologie physique**, Lavoisier, 2017.

G. Marie, **Processus préparant la construction et l'érosion des deltas de lave formés par les coulées du volcan Kilauea (Pu'u 'O'o-Kupaianaha, Hawaï)**, *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 12(2), pp. 75-90, 2006.

T. N. Mattox et M. T. Mangan, **Littoral hydrovolcanic explosions : A case study of lava-seawater interaction at Kilauea Volcano**, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 75, pp. 1-17, 1997.

L'ESSENTIEL

> Dans l'expérience *LHCb*, au collisionneur LHC du Cern, les physiciens recherchent notamment des indices de l'existence de particules non prévues par la théorie en vigueur, le « modèle standard ».

> Au lieu de viser la production directe de ces nouvelles particules, les chercheurs

de *LHCb* espèrent détecter leur influence indirecte, sous la forme de particules « virtuelles » servant d'intermédiaires dans certaines désintégrations.

> Certains des résultats obtenus semblent incompatibles avec le modèle standard. Il s'agit peut-être d'indices d'une physique non décrite par le modèle standard.

L'AUTEUR



GUY WILKINSON
physicien des particules
à l'université d'Oxford, en
Grande-Bretagne, et ancien
porte-parole de l'expérience
LHCb au Cern, à Genève

Beauté hors-norme au LHC

Malgré ses succès, tels que la prédiction et la découverte du boson de Higgs, le modèle standard de la physique des particules est incomplet. Au Cern, l'expérience *LHCb*, qui étudie les désintégrations des « particules de beauté », a-t-elle fourni les premiers indices d'une théorie plus fondamentale ?

Il est rare que le journal télévisé s'ouvre avec un reportage sur la recherche en physique, comme cela a été le cas le 4 juillet 2012. Ce jour-là, toutes les chaînes du monde ont consacré une partie de leur émission à une nouvelle en provenance de Genève : des recherches entamées il y a près d'un demi-siècle venaient d'aboutir avec la découverte du boson de Higgs au LHC (Large Hadron Collider), le Grand collisionneur de hadrons du Cern.

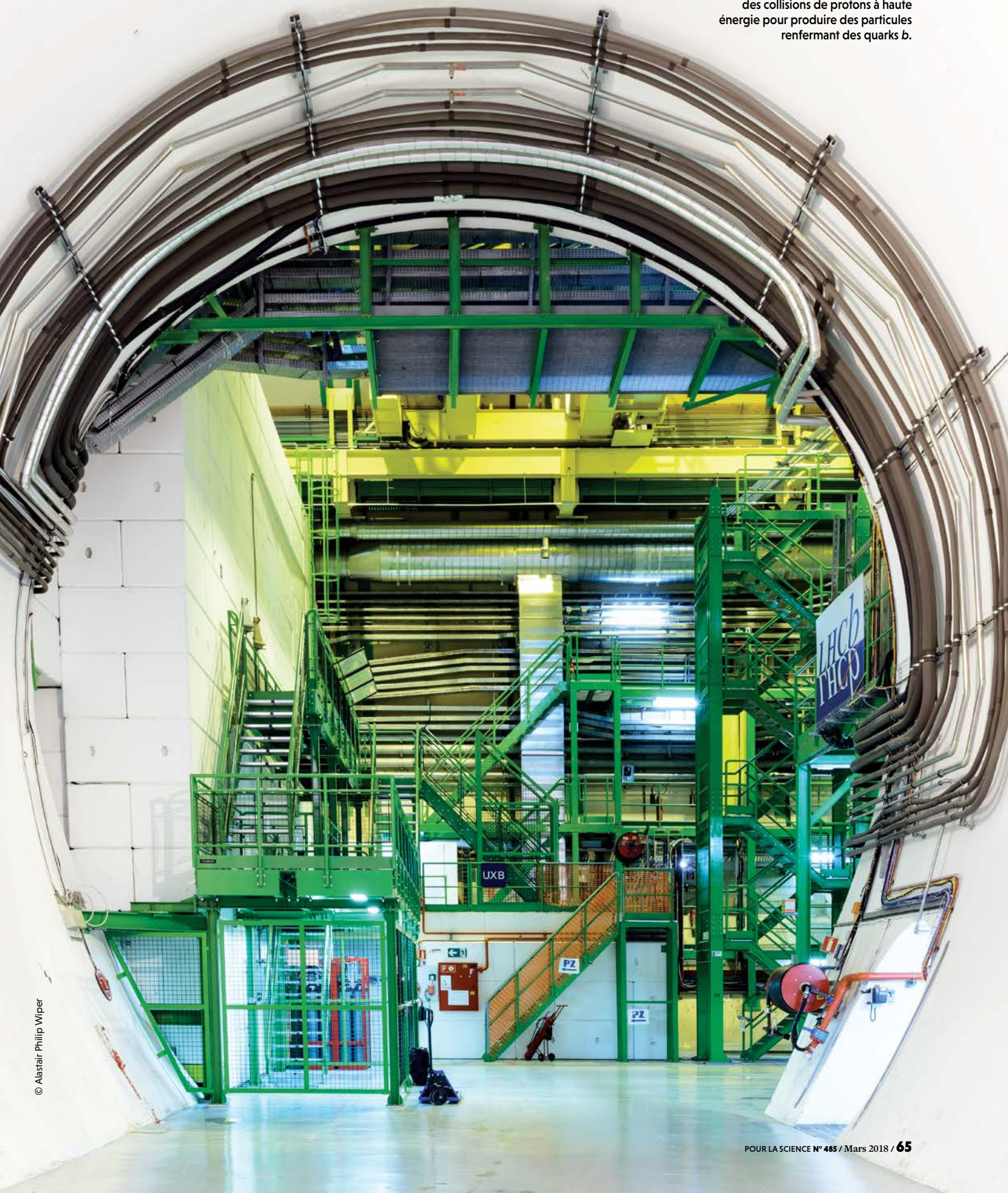
Pour les physiciens, l'événement était historique. Cette particule était en effet la dernière pièce manquante dans le modèle standard de la physique des particules ; plus même : le boson de Higgs est un élément essentiel de cette théorie, qui décrit les particules connues de l'Univers et les forces qu'elles exercent les unes sur les autres.

Pourtant, les physiciens pensent qu'il existe d'autres particules élémentaires que celles du modèle standard ; cette nouvelle traque, encore plus difficile, a déjà débuté.

Les complexes expérimentaux *Atlas* et *CMS*, qui ont permis de découvrir le boson de Higgs, joueront encore un rôle important dans cette nouvelle quête. Ils tenteront de produire directement ces nouvelles particules lors de collisions énergétiques entre protons. Mais une autre expérience du LHC, moins connue et plus modeste, contribuera aussi à cette recherche d'une nouvelle physique.

Ainsi, l'expérience *LHCb*, sur laquelle je travaille, aborde cette traque avec une stratégie différente : mettre en évidence des effets indirects de ces particules inconnues sans les produire directement. Pour ce faire, nous nous focalisons sur la production de certaines >

Aperçu de la caverne qui abrite l'expérience *LHCb*, 100 mètres sous terre. Au cœur de cet assemblage de détecteurs, les physiciens réalisent des collisions de protons à haute énergie pour produire des particules renfermant des quarks *b*.



> particules, les hadrons dits beaux, et nous cherchons à voir comment ces particules inconnues influent sur les caractéristiques de ces hadrons. Plus précisément, nous analysons ce qui se passe quand des hadrons beaux sont créés au LHC puis se désintègrent en d'autres particules. Les hadrons beaux font d'excellents objets d'étude, car ils se désintègrent de très nombreuses façons différentes; et nous disposons de prédictions très précises sur la façon dont ces réactions devraient se dérouler. Toute déviation par rapport à ces prédictions laisse alors soupçonner une manifestation de particules encore jamais observées.

Une telle recherche est complexe et requiert une grande précision. Mais elle a le potentiel de découvrir des particules qui pourraient rester hors de portée d'*Atlas* ou de *CMS*. Or l'expérience *LHCb* a d'ores et déjà donné plusieurs résultats qui ne sont pas en accord avec les prédictions du modèle standard. Si ces résultats sont confirmés, nous avons peut-être entre nos mains les premiers éléments pour comprendre les lois du monde à un niveau plus fondamental encore que tout ce que l'humanité a pu entrevoir jusqu'ici.

UN MODÈLE À SUCCÈS

Le modèle standard, élaboré dans les années 1960 et 1970, a été extrêmement efficace pour décrire le comportement des particules élémentaires et les forces qui agissent sur elles. Il a été testé avec succès dans le cadre de nombreuses expériences.

Pour résumer, dans ce modèle, les particules élémentaires dont la matière est constituée sont rangées en deux catégories: les quarks et les leptons (voir l'encadré page 68). Il existe six quarks répartis par paires dans trois groupes, nommés générations: *u* (ou *up*) et *d* (ou *down*), *c* (ou *charm*) et *s* (ou *strange*), *b* (ou *bottom*) et *t* (ou *top*). Les deux derniers ont eu plusieurs noms; le quark *b* a été un temps nommé *beauty* ou «beau».

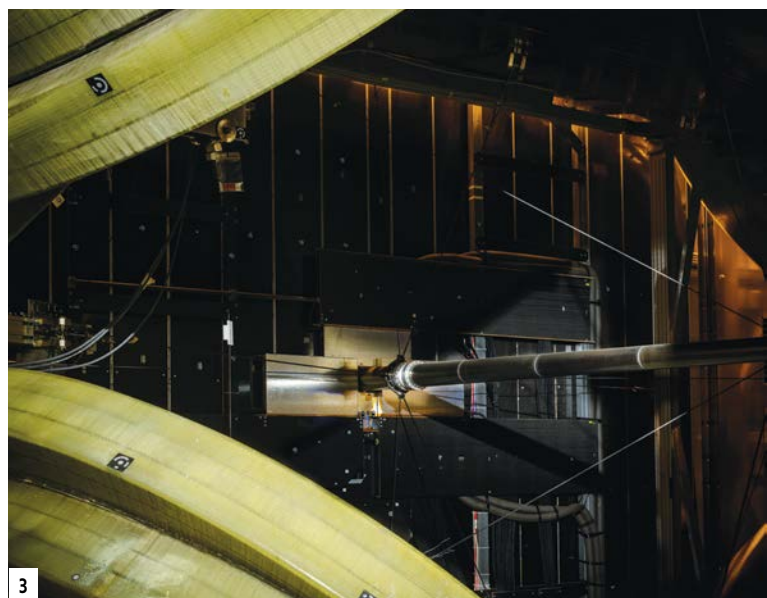
Nous n'observons jamais ces quarks individuellement; ils se regroupent pour former des hadrons. Ainsi, les hadrons «beaux» mettent en jeu un ou plusieurs quarks *b*.

De façon analogue, il existe trois «générations» de leptons, chacune incluant deux particules: la première regroupe l'électron (*e*) et le neutrino électronique (ν_e), la deuxième le muon (μ) et le neutrino muonique (ν_μ), la troisième le tau (τ) et le neutrino tauique (ν_τ).

Les quarks *u* et *d* ainsi que l'électron (tous de la première génération) sont les constituants des atomes, c'est-à-dire de la matière ordinaire. Les particules des deux autres générations sont instables: elles ont une durée de vie très courte et se désintègrent en particules de la première génération; ces particules fugaces sont cependant produites en grands nombres dans les accélérateurs de particules.



1

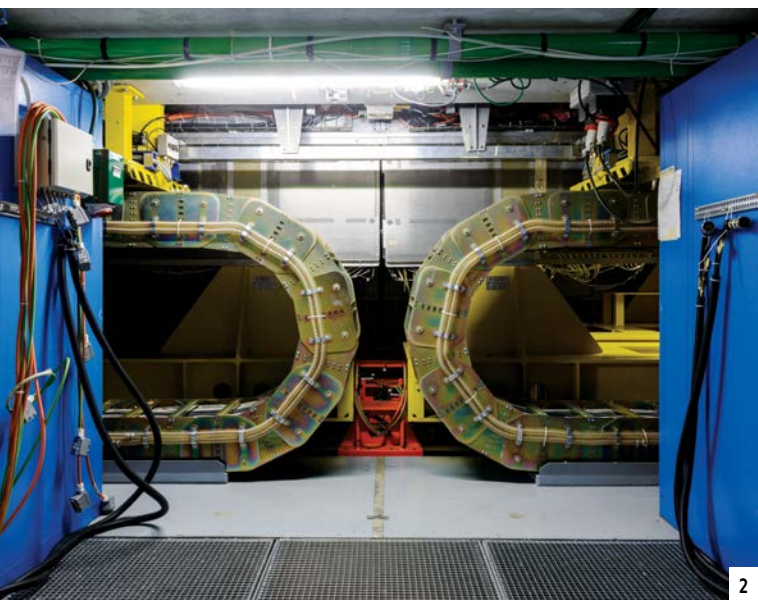


3



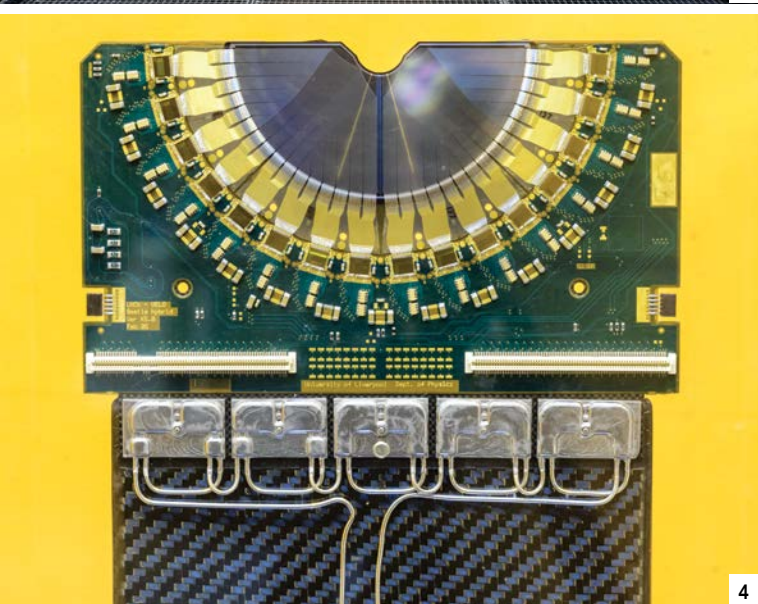
5

LES DIVERSES FACETTES DE LHCb



2

Le dispositif expérimental pèse 5 600 tonnes et implique près de 700 scientifiques. Il est vu ici de côté (1) et de dessous (2). Des protons sont accélérés dans un tube (3) à des vitesses proches de celle de la lumière avant de pénétrer au cœur du dispositif où ils entrent en collision. Des détecteurs traquent les particules produites. L'un d'eux, nommé Velo (Vertex locator), utilise des capteurs en silicium (4) pour traquer les hadrons beaux. Pour limiter la quantité d'information stockée et à analyser, des processeurs sélectionnent les réactions les plus intéressantes (5). À l'intérieur de la salle de contrôle (6), les physiciens assurent le suivi des opérations.



4

Les hadrons sont des particules soumises à la force électromagnétique, à l'interaction faible et à l'interaction forte (la force gravitationnelle est aussi présente, mais à l'échelle subatomique elle est négligeable). Chacune de ces forces fondamentales est véhiculée par une particule: le photon est l'agent de l'interaction électromagnétique, les bosons W et Z sont les porteurs de l'interaction faible et les gluons sont les médiateurs de l'interaction forte. Le boson de Higgs a un rôle particulier, mais crucial: il est associé à un mécanisme qui confère une masse non nulle à certaines des particules citées précédemment.

Malgré les succès du modèle standard, les physiciens pensent que ce modèle est incomplet. Il serait une approximation, à faible énergie, d'une théorie plus fondamentale. En effet, le modèle standard rend très bien compte de certaines observations et mesures, mais il ne contient aucun élément de réponse pour d'autres. À l'échelle cosmique, il n'est pas en mesure d'expliquer pourquoi l'Univers est essentiellement constitué de matière, alors qu'au moment du Big Bang, la matière et l'anti-matière ont dû être créées en proportions égales. Il ne nous renseigne pas davantage sur la nature de la matière noire. Cet excédent de masse dans l'Univers nous est invisible, mais son existence semble indispensable pour expliquer la dynamique des galaxies et des amas de galaxies.

LE MODÈLE STANDARD, UN TABLEAU INCOMPLÉT

Et même dans le monde des particules subatomiques connues, il subsiste de nombreuses énigmes. Le boson de Higgs s'est révélé avoir une masse qui n'est pas beaucoup plus élevée que celle des bosons W et Z, alors que le modèle standard suggère qu'il devrait être environ 10^{16} fois plus lourd! Et nous ne savons pas pourquoi les particules de matière se rangent en trois générations. Celles-ci semblent être des copies les unes des autres, mais avec une impressionnante hiérarchie des masses, depuis les quarks *u* et *d* qui ne «pèsent» presque rien, jusqu'au quark *t*, qui est presque aussi lourd qu'un noyau d'or.

Sur ces questions et beaucoup d'autres, le modèle standard ne dit rien. Ainsi, malgré une longue histoire de réussites éclatantes, le ➤



6

© Alastair Philip Wipier

> modèle standard n'est clairement qu'une approximation, la face visible d'une théorie plus fondamentale dont nous espérons qu'elle apportera des solutions à toutes ces énigmes. L'objectif de l'expérience *LHCb*, comme celui d'*Atlas*, de *CMS* et de nombreuses autres dans le monde, est de découvrir des éléments de cette théorie plus complète sous la forme de nouvelles particules non incluses dans le modèle standard, mais prédites par cette théorie plus fondamentale.

Le Grand collisionneur de hadrons, qui abrite l'expérience *LHCb*, est un accélérateur circulaire de 27 kilomètres de long où deux faisceaux de protons de haute énergie circulent en sens opposés, à des vitesses proches de celle de la lumière. Dans *LHCb*, ces faisceaux entrent en collision jusqu'à 40 millions de fois par seconde. L'énergie accumulée quand les protons s'écrasent l'un sur l'autre peut donner naissance à des particules très différentes des protons de départ, par exemple des particules contenant des quarks *b*. Même si ces particules sont très éphémères, elles voient le jour et se désintègrent en d'autres particules plus stables, que les instruments de *LHCb* détectent tout en mesurant leurs caractéristiques (nature, énergie, etc.).

Bien que de taille modeste comparé à ses grands frères répartis sur l'anneau du LHC, le détecteur *LHCb* mesure tout de même une vingtaine de mètres de long et une dizaine de mètres de haut. Sa configuration allongée lui confère une apparence très différente des géométries cylindriques d'*Atlas* et de *CMS*. Cette géométrie étirée a été choisie pour optimiser l'étude des hadrons beaux.

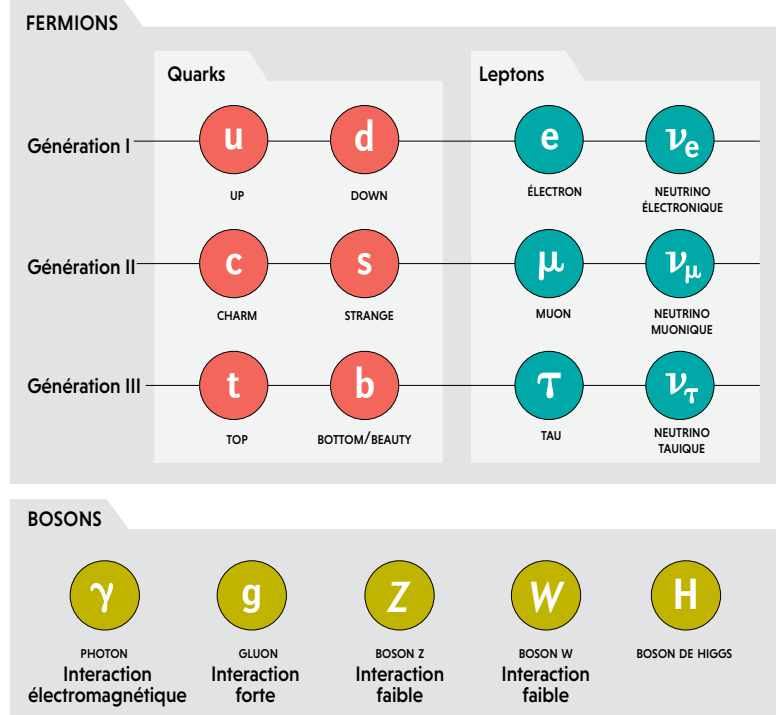
En effet, quand des hadrons beaux se forment au LHC, seule une petite partie de l'énergie accumulée dans la collision des protons est convertie en masse, car les hadrons beaux sont relativement légers (en unités d'énergie, autour de 5 GeV, ou gigaélectronvolts, ce qui est juste un peu plus lourd qu'un noyau d'hélium). L'excédent d'énergie tend à projeter les hadrons beaux nouvellement créés vers l'avant par rapport au point de collision, sur une trajectoire très proche des faisceaux de protons, d'où cette configuration allongée vers l'avant des détecteurs de l'expérience.

Même si son agencement est inhabituel, on retrouve dans *LHCb* beaucoup de composants utilisés dans les autres expériences : un gros aimant, des trajectographes pour reconstituer la trajectoire des particules produites lors des collisions et des calorimètres pour mesurer l'énergie des particules.

Plusieurs attributs sont cependant uniques à *LHCb* et ont été conçus spécifiquement pour la physique des particules de beauté. Par exemple, un détecteur au silicium de précision placé à juste 8 millimètres du

LE MODÈLE STANDARD

Le modèle standard décrit les particules élémentaires et leurs interactions (hors gravitation). Il inclut six quarks et six leptons (qui sont des « fermions », des particules de matière), ainsi que cinq bosons, qui véhiculent les forces fondamentales. Mais les physiciens pensent qu'il existe d'autres particules que celles du modèle standard ; ils tentent de les détecter grâce à des projets ambitieux tels que l'expérience *LHCb* (Large Hadron Collider beauty).



point de collision des protons permet de reconstituer avec précision le point de l'espace où les particules instables se désintègrent, un outil utile parce que les hadrons beaux se propagent typiquement vers l'avant sur un centimètre seulement avant de se désintégrer en un ensemble de particules plus légères. *LHCb* est également équipé d'un système Rich (Ring-Imaging Cherenkov), des détecteurs permettant d'identifier les particules produites lors de la désintégration des hadrons beaux. La nature des particules est déterminée à partir des motifs lumineux que nombre d'entre eux émettent en traversant ces détecteurs.

LA QUÊTE D'UNE NOUVELLE PHYSIQUE

Au cours de la première période d'exploitation du LHC, de 2010 à 2012, l'accélérateur a produit de l'ordre de 10^{12} hadrons beaux dans l'expérience *LHCb*. Ces particules se sont désintégrées de diverses façons, suivant des processus plus ou moins intéressants pour nous. En effet, nous recherchons des désintégrations susceptibles de servir de « poteaux indicateurs » d'une

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 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

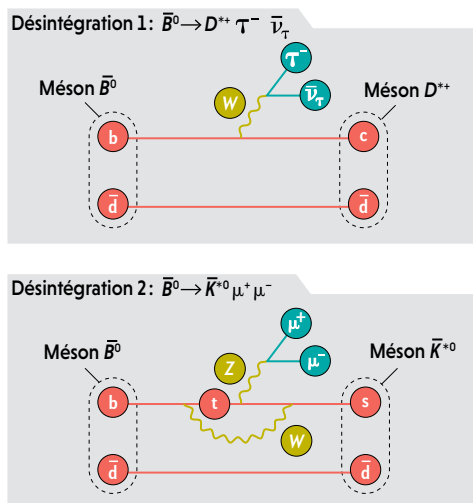
Hadron contenant au moins un quark b ou un antiquark $\bar{b}$

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.

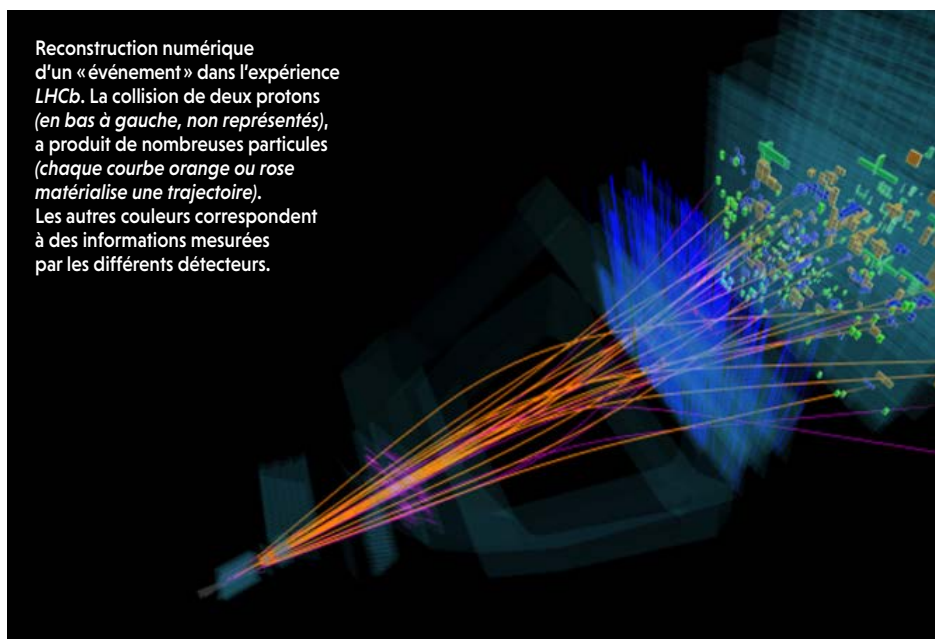
Tel est le principe directeur de la stratégie de recherche indirecte de nouvelles particules et d'une physique nouvelle que nous menons sur *LHCb*. En outre, comme ces particules nouvelles seraient des participantes virtuelles de toutes les désintégrations que nous mesurons, la masse des particules que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

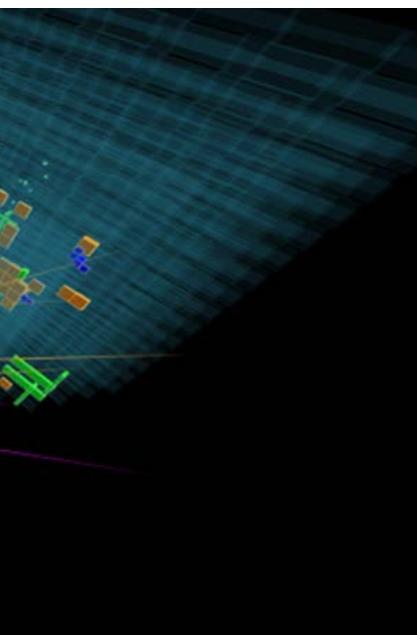
La pièce à conviction numéro un concerne la désintégration $\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+} \tau^- \bar{\nu}_\tau$ que nous avons

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.



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.

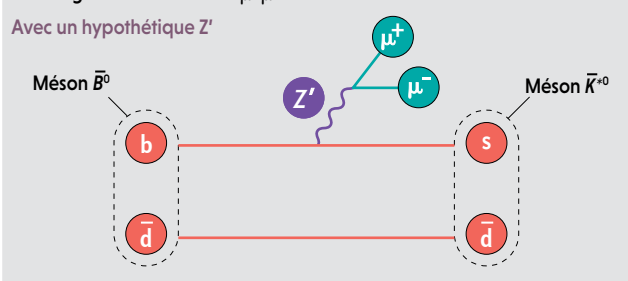
LES INDICES S'ACCUMULENT

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

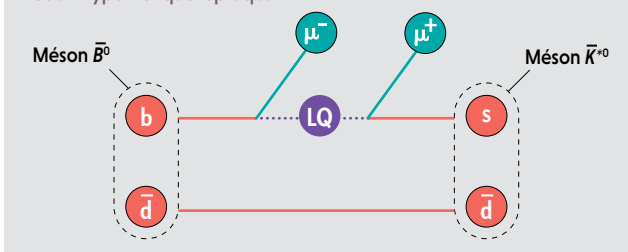
Désintégration 2A : $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \mu^-$

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.

produites lors de la seconde campagne du LHC. Notre connaissance des valeurs de R_K et R_{K^*} pourrait très vite s'améliorer. Soit l'importance des désaccords augmentera, et ces anomalies passeront sur le devant de la scène de la physique actuelle. Soit ces anomalies se révéleront dues aux fluctuations statistiques, et il nous restera à rechercher la nouvelle physique dans d'autres processus.

ATTENDRE PRUDEMMENT LA SUITE

Les résultats dont nous avons fait état ici ne sont que les exemples les plus saillants d'une multitude de mesures intéressantes ayant émergé récemment dans le domaine des hadrons beaux. Ils suscitent à juste titre beaucoup d'enthousiasme parmi les physiciens des particules, mais les plus vieux et sages d'entre nous ont déjà vu dans le passé de tels engouements surgir puis s'évanouir. Attendons donc prudemment la suite.

Quelles seraient les implications si une ou plusieurs de ces anomalies passaient de la catégorie « indice très intéressant » à « contradiction claire du modèle standard » ? Sans aucun doute, ce serait l'un des développements les plus importants en physique des particules depuis plusieurs décennies. Une fenêtre

s'ouvrirait sur le paysage qui se cache au-delà des limites du modèle standard et de ce que nous comprenons des lois régissant l'Univers. Dans un premier temps, il faudrait alors découvrir ce qui est responsable des désaccords avec le modèle standard. S'il s'agit de l'influence virtuelle de particules de la nouvelle physique (qu'il s'agisse d'un boson de Higgs exotique, d'un leptoquark, d'un Z' ou d'autre chose encore), leurs effets devraient apparaître dans d'autres désintégrations de hadrons beaux et nous livrer des indices supplémentaires. En outre, à moins d'être très lourdes, ces nouvelles particules pourraient également apparaître directement dans des collisions d'*Atlas* ou *CMS*, ou dans un futur accélérateur de plus haute énergie encore.

Sans savoir ce que l'avenir nous réserve, l'extrême sensibilité du LHC et les perspectives de progrès considérables dans les années à venir sont encourageantes. Nous ignorons si le chemin vers la nouvelle physique par des recherches indirectes sera court ou long, mais la plupart d'entre nous sont persuadés d'aller dans la bonne direction. C'est, dit-on, Galilée qui aurait préconisé de « mesurer ce qui est mesurable, et rendre mesurable ce qui ne l'est pas ». Il n'y a pas meilleure devise pour l'expérience *LHCb*. ■



{ Partagez les savoirs }

LES RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

Détails sur mnhn.fr, rubrique : "les rendez-vous du Muséum"

CONFÉRENCES-DÉBATS

Les roches terrestres et les météorites : jeux de miroir

Lundi 5 mars - 18h : À la recherche des plus anciennes traces du vivant sur Terre et ailleurs

Avec *S. Bernard*, géochimiste et minéralogiste (IMPMC), CNRS et Muséum

UNE EXPO, DES DÉBATS

Animé par *M.-O. Monchicourt*, journaliste scientifique à France Info

Lundi 12 mars - 18h : Exploration spatiale

Avec *J.-P. Bibring*, astrophysicien, coordinateur des Programmes d'Exploration de la planète Mars, Institut d'astrophysique spatiale ; *F. Rocard*, responsable des programmes d'exploitation du système solaire, CNES et *V. Sautter*, géologue, spécialiste des roches martiennes, CNRS

UN CHERCHEUR, UN LIVRE

Lundi 19 mars - 18h : Les météorites et leurs secrets, Ed. Ellipses

De et présenté par *E. Jacquet*, cosmochimiste

Lundi 26 mars - 18h : Impacts, des météores aux cratères, Ed. Belin

Collectif sous la direction de *S. Bouley*, présenté par *S. Bouley*, planétologue, Geosciences Paris Sud et *B. Zanda*, météoritologue, Muséum, co-directrice de l'ouvrage

MÉTIER DU MUSÉUM

Dimanche 25 mars - 15h : Minéralogiste naturaliste

avec *P.-J. Chiappero*

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution

36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5^e



L'ESSENTIEL

> En 2017, un vieux télescope est redécouvert lors de l'inventaire des collections patrimoniales de l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la Ville de Paris (ESPCI).

> Il s'agit d'un télescope dit pyrhéliométrique, conçu

en 1906 par un professeur de l'école, Charles Féry.

> Cet instrument très particulier permet à l'astronome Gaston Millochau de fournir une très bonne estimation de la température à la surface du Soleil... depuis le sommet du mont Blanc.

LES AUTEURS



GUILLAUME DUREY
doctorant en physique
de la matière molle
à l'ESPCI Paris



**ANDRÉ PIERRE
LEGRAND**
professeur émérite
à l'ESPCI Paris



DENIS BEAUDOUIN
auteur,
petit-neveu de
Charles Beaudouin

Le télescope oublié de Charles Féry

Un télescope récemment retrouvé dans les greniers de l'ESPCI, une école d'ingénieurs de Paris, s'est révélé un acteur clé, au début du ^{xx}e siècle, d'une aventure qui occupait les savants depuis plusieurs siècles : la mesure de la température du Soleil.

Paris, mars 2017. À la veille d'importants travaux de rénovation de l'École supérieure de physique et de chimie industrielles (ESPCI), nous poursuivons l'inventaire de son patrimoine scientifique, d'étagères poussiéreuses en placards oubliés. Fondée en 1882 sur la montagne Sainte-Geneviève, l'école a amassé au fil des années des instruments de toutes tailles, de toutes formes. Nous identifions au mieux leurs fonctions, leurs principes, leurs dates de fabrication, leurs constructeurs, mais quelques-uns restent réfractaires aux investigations. L'un d'eux frappe particulièrement notre curiosité : c'est un long tube équipé de plusieurs accessoires, en particulier de deux bornes électriques. Il ressemble à un télescope d'environ 1 mètre de long et 12 centimètres de diamètre et, sur la collerette d'entrée de la lumière, on déchiffre sous la poussière du ^{xx}e siècle :

«Télescope pyrhéliométrique Ch. Féry
Ch. Beaudouin Constructeur Paris»

Découverte notable, car c'est avec cet instrument, reposant sur un procédé mis au point par le physicien Charles Féry, que l'astronome Gaston Millochau mesura en 1906 avec une précision remarquable la température de la surface solaire depuis l'observatoire Janssen, au sommet du mont Blanc : «5663° absolus, soit environ 5400° vulgaires», selon l'expression de Millochau. Une erreur qui ne diffère que de 2% de la valeur moderne, 5778 kelvins.

MESURER LA TEMPÉRATURE DU SOLEIL

Ce n'était pas la première fois qu'une telle mesure était effectuée. L'histoire de l'actinométrie solaire – l'étude des rayonnements issus du Soleil – était même déjà assez longue, mais les mesures restaient peu précises. Aux

