

> 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.

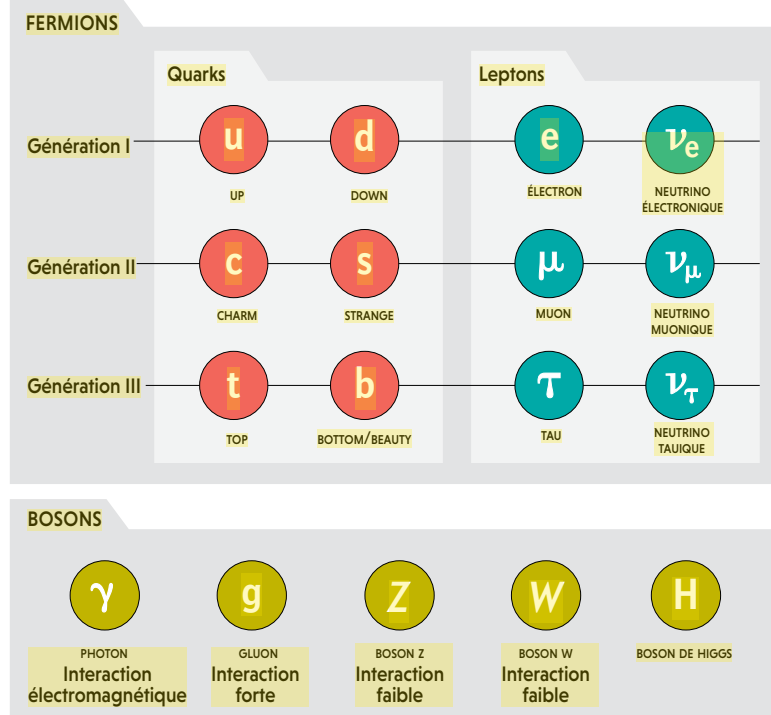
En effet, quand des hadrons beaux se forment au LHC, seule une petite partie de l'énergie accumulée dans la collision des protons est convertie en masse, car les hadrons beaux sont relativement légers (en unités d'énergie, autour de 5 GeV, ou gigaélectronvolts, ce qui est juste un peu plus lourd qu'un 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

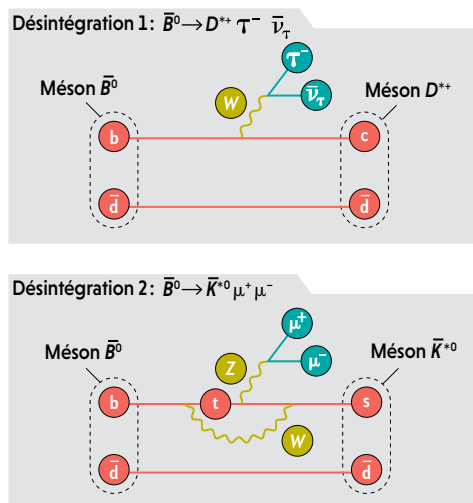
Hadron contenant au moins un quark b ou un antiquark $\bar{b}$

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