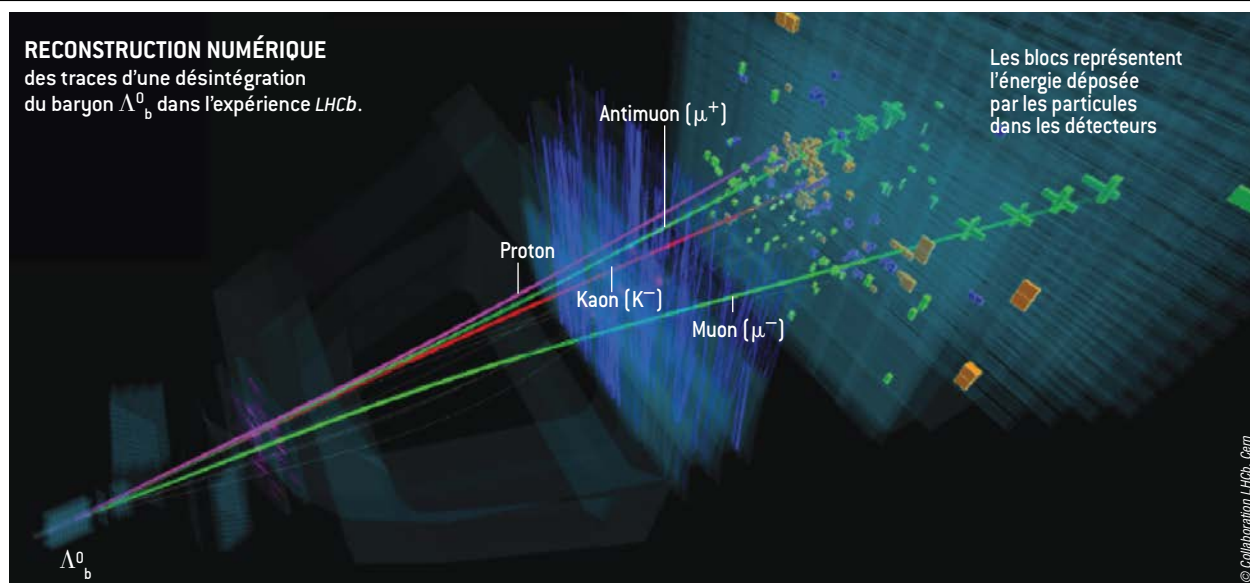
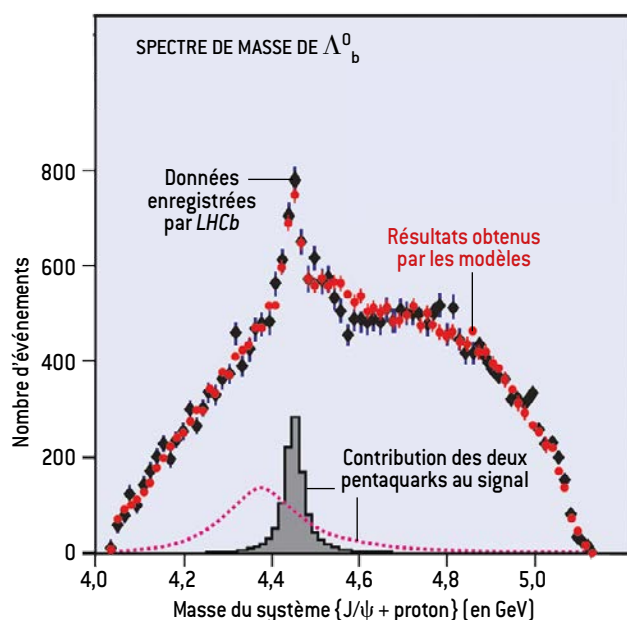


RECONSTRUCTION NUMÉRIQUE des traces d'une désintégration du baryon Λ_b^0 dans l'expérience *LHCb*.



Les collisions proton-proton au LHC ont permis d'observer pour la première fois dans l'expérience *LHCb* la désintégration d'un baryon Λ_b^0 [composé de quarks u , d et b] en trois particules : un kaon K^- , un méson J/ψ [qui se désintègre très vite en deux muons de charges opposées] et un proton. Dans l'expérience *LHCb*, un champ magnétique dévie les particules en fonction de leur masse, leur énergie cinétique et leur charge électrique (en haut). Divers détecteurs enregistrent ces données pour permettre l'identification des particules. Le processus principal de désintégration du baryon Λ_b^0 suppose d'abord une désintégration en un méson J/ψ et un baryon instable Λ^* , qui se désintègre à son tour en un proton et un kaon. Une autre voie possible de désintégration est d'abord la formation d'un kaon et d'un pentaquark, qui se désintègre en un proton et un méson J/ψ . Pour vérifier que ce pentaquark se forme parfois, les physiciens étudient le nombre de désintégrations de Λ_b^0 en fonction de la masse du système J/ψ -proton détecté (à droite). En unités d'énergie, le pic, ou résonance, survient vers 4,45 gigaélectronvolts [GeV]. Il est compatible avec la formation de l'un ou l'autre de deux états pentaquarks ($uccud$, de charge +1) lors de la désintégration du baryon Λ_b^0 .



Hambourg, dans l'expérience *PETRA*. Lors de collisions électron-positron à haute énergie, les chercheurs produisaient des paires quark-antiquark, chaque particule s'échappant dans une direction différente. Or, comme un quark ne peut être ainsi isolé, l'énergie de la collision produisait un grand nombre d'autres quarks et d'antiquarks qui se combinaient avec les premiers pour former des hadrons. Dans les détecteurs, les chercheurs observaient donc deux jets de hadrons, chacun correspondant au quark ou à l'antiquark initial. Mais parfois, un troisième jet survenait – signe qu'une particule supplémentaire participait à la

réaction. Des analyses plus précises ont montré qu'il s'agissait d'un gluon.

Ainsi, les quarks se révélaient bien réels et s'associaient en duos ou en trios pour former respectivement les mésons et les baryons. Mais d'autres associations étaient-elles possibles ? Aussi bien George Zweig que Murray Gell-Mann avaient déjà prédit en 1964 la possibilité de systèmes constitués de quatre quarks (deux couples quark-antiquark) ou de cinq quarks (trois quarks et un couple quark-antiquark). En d'autres termes : des tétraquarks et des pentaquarks. Du point de vue théorique, ces systèmes multi-quarks sont tout à fait

compatibles avec le modèle standard de la physique des particules.

Les calculs théoriques indiquent que ces états ont une durée de vie très courte, inférieure à 10^{-21} seconde. Ils sont donc impossibles à détecter directement dans des expériences. Ils se désintègrent en d'autres particules moins éphémères, que les détecteurs sont en mesure d'enregistrer. À partir de l'angle de diffusion de ces particules, de leur énergie, etc., il est possible de déterminer si un tel système multi-quarks s'est formé et, si oui, d'en déduire certaines propriétés telles que sa masse, son spin et sa parité (c'est-à-dire

son comportement vis-à-vis d'une inversion des axes du repère de coordonnées spatiales).

La recherche de tels systèmes multiquarks s'est alors développée. Elle est devenue, en l'espace de quelques années, un domaine d'étude à part entière de la physique expérimentale des particules, forte de nombreux succès. En 2003, les physiciens de l'expérience *Belle*, au centre japonais de recherches KEK à Tsukuba, ont découvert une nouvelle résonance dans des collisions électron-positron. En physique des particules, on entend par « résonance » un système instable, un état intermédiaire d'une très courte durée de vie qui apparaît dans un processus de désintégration. La résonance découverte dans l'expérience *Belle* se désintègre en un méson J/ψ (composé d'un quark c et d'un antiquark $\bar{c}$, on l'appelle aussi charmonium) et en deux pions. Cette résonance ressemble à celle que l'on observe pour le méson J/ψ lui-même, mais la durée de vie de cette nouvelle résonance est bien plus longue que celle du méson J/ψ .

La fructueuse chasse aux tétraquarks

La nouvelle résonance a été examinée avec précision dans d'autres expériences, à Stanford, au Fermilab ou au LHC, de sorte qu'il n'y a maintenant aucun doute quant à son existence. Une analyse précise par la collaboration *LHCb* a permis de déterminer son spin et sa parité. La particule a été nommée $X(3872)$, où le nombre correspond à la masse de la particule en mégaelectronvolts, soit 3,872 GeV. Elle est donc près de quatre fois plus lourde qu'un proton.

Au vu de son possible contenu en quarks de valence ($c\bar{c}u\bar{u}$), il pourrait s'agir d'un véritable tétraquark ; sa structure n'est toutefois pas encore complètement élucidée. En effet, cette résonance pourrait ne pas être une particule unique, mais une association formée d'un méson D^0 ($c\bar{u}$) et d'un antiméson $\bar{D}^0$ ($\bar{c}u$). Le contenu en quarks de valence est le même, mais la structure est différente. Les deux mésons seraient liés par une force résiduelle de l'interaction forte agissant entre les quarks, une force résiduelle analogue à celle qui maintient les protons et les neutrons au sein du noyau atomique ou les atomes au sein d'une molécule ; on parle pour cette raison d'état dimoléculaire.

L'hypothèse d'un méson habituel, fait d'un quark et d'un antiquark, n'est pas non plus complètement exclue, mais semble moins probable au vu de résultats de la collaboration *LHCb* publiés en 2013. Les données les plus récentes du LHC, obtenues avec des collisions proton-proton à une énergie de 13 téraélectronvolts (1 téraélectronvolt, ou TeV, correspond à 1 000 GeV, soit 10^{12} électronvolts), sont en cours d'analyse et permettront peut-être d'en savoir plus sur cette résonance.

En 2007, la collaboration *Belle* a détecté un autre candidat au titre de tétraquark, le $Z^+(4430)$, dont le contenu en quarks de valence serait $c\bar{c}u\bar{d}$. Sa détection a été confirmée en 2014 par la collaboration *LHCb*.

La liste de potentiels tétraquarks continue de s'allonger avec le $Z_c(3900)$ – observé en 2013 par la collaboration *Belle* et au BEPC (le collisionneur électron-positron de Beijing, en Chine) – et quatre candidats annoncés en juin 2016 par la collaboration *LHCb* (voir l'encadré page 23).

Mais qu'en est-il des pentaquarks ? Leur recherche a été plus longue et houleuse. Par exemple, en 2002, dans l'expérience SPring-8 au Japon, la résonance notée Θ^+ a été interprétée comme étant un pentaquark. D'après les données, cette résonance correspondait à une particule environ 1,6 fois plus massive que le proton et de très courte durée de vie, de l'ordre de 10^{-23} seconde. On supposait que son contenu en quarks était $uudd\bar{s}$. La valeur de sa masse était très encourageante, car elle était très proche de celle d'un pentaquark prévu par des théoriciens en 1997. Plusieurs autres groupes d'expérimentateurs à travers le monde ont cru aussi avoir obtenu des indices de l'existence de ce pentaquark. Cependant, en reprenant les analyses statistiques de ces expériences, certains physiciens ont émis des doutes. D'autres expériences ont alors été conçues pour traquer le pentaquark, sans succès, et il est aujourd'hui très peu probable que Θ^+ soit bien un pentaquark.

La recherche de pentaquarks composés de quarks légers u , d et s semble n'avoir donné que des résultats négatifs. En 2015, la collaboration *LHCb* a publié un article annonçant la détection de pentaquarks contenant des quarks c (voir l'encadré page 26). Les chercheurs de cette expérience étudiaient les désintégrations d'un type

Glossaire

INTERACTION FORTE

L'une des quatre interactions fondamentales, les autres étant la gravitation, la force électromagnétique et l'interaction faible. Les interactions faible et forte n'agissent qu'à des distances subatomiques.

QUARK

Constituant élémentaire de la matière, sensible à l'interaction forte.

GLUON

Particule élémentaire qui véhicule l'interaction forte et qui lie les quarks entre eux.

HADRON

Particule constituée de quarks.

MÉSON

Hadron constitué d'un quark et d'un antiquark liés.

BARYON

Hadron constitué de trois quarks liés. Le proton et le neutron sont les baryons les plus légers.

La recherche des pentaquarks et des tétraquarks est devenue un sujet d'étude à part entière en physique expérimentale