

la classification des particules élémentaires et leurs interactions», mais pas spécifiquement pour l'idée des quarks. Cela explique probablement pourquoi le comité Nobel n'a pas également honoré George Zweig cette année-là.

En réalité, Murray Gell-Mann, au début, ne croyait pas à l'existence physique des quarks. Il les voyait plutôt comme des artifices de calcul. À l'inverse, George Zweig était convaincu dès le début que les quarks avaient une réalité physique, et il proposa de les rechercher expérimentalement. Mais le fait que les quarks ne peuvent exister de façon isolée hors des hadrons était un obstacle à leur détection.

Dans la seconde moitié des années 1960, les théoriciens James Bjorken et Richard Feynman ont esquissé un moyen de mettre en évidence les quarks : en bombardant des protons avec des électrons très énergétiques, les physiciens pouvaient sonder la structure interne des premiers.

Cette idée a été mise en œuvre au SLAC, le centre de l'accélérateur linéaire de Stanford, aux États-Unis. Les chercheurs ont étudié la diffusion d'électrons ayant une énergie de plus de 7 gigaélectronvolts (GeV) et dirigés contre une cible constituée d'hydrogène liquide. De façon analogue aux célèbres expériences de diffusion de noyaux d'hélium (issus de la radioactivité α) par une feuille d'or menées au début du XX^e siècle par Ernest Rutherford, qui avaient permis de comprendre que l'atome est formé d'un tout petit noyau autour duquel des électrons sont en orbite relativement lointaine, les expériences de 1969 ont mis en évidence que le proton contient des constituants chargés et au moins 100 000 fois plus petits que le proton, que l'on a dénommés « partons ».

Des propriétés essentielles de ces partons concordaient avec celles des quarks. Ces derniers étaient donc bien réels. On constata aussi une propriété contre-intuitive : l'interaction forte est d'autant plus faible que l'on s'introduit davantage en profondeur dans le proton. Plus précisément, si l'on rapproche beaucoup deux quarks l'un de l'autre, la force (non électromagnétique) qui les lie devient nulle. C'est la « liberté asymptotique », une propriété fondamentale dont rend compte la chromodynamique quantique.

Des indices expérimentaux de l'existence des gluons ont été obtenus ensuite au synchrotron allemand DESY, près de

Un quatuor de tétraquarks découvert à LHCb

En juin 2016, les membres de la collaboration LHCb ont annoncé avoir détecté quatre tétraquarks, bien que la recherche de telles particules exotiques ne soit pas l'objectif principal du complexe expérimental LHCb.

L'expérience LHCb a été conçue à la fin des années 1990 pour étudier la différence de comportement entre particules et antiparticules. Les premières données ont été collectées en 2010. Installée auprès du LHC, l'anneau de collisions proton-proton au Cern, cette expérience compare surtout l'évolution au cours du temps des mésons contenant un quark b ou un quark c et celle de leurs antimésons. Il s'agit de mesurer des différences de propriétés entre la matière et l'antimatière, et en particulier d'étudier ce que les physiciens nomment la violation de la symétrie CP. L'asymétrie entre la matière et l'antimatière expliquerait en particulier pourquoi l'Univers contient de la matière et pas d'antimatière.

L'expérience LHCb permet aussi d'étudier avec précision les interactions des quarks et expliquera peut-être pourquoi les amplitudes de ces interactions varient, selon les saveurs des quarks en jeu, d'environ trois ordres de grandeur.

Le dispositif offre aussi la possibilité de mettre en évidence de nouvelles particules qui ne sont pas prédites par le modèle standard de la physique des particules.

Les collisions proton-proton engendrent un très grand nombre de particules instables telles que le méson K^+ ou le méson B^+

(comme ce dernier contient un quark b , il est nommé méson beau), mais aussi des baryons beaux. L'expérience LHCb permet d'isoler les mésons et les baryons beaux, d'identifier leurs produits de désintégration et de mesurer avec précision leurs propriétés cinématiques. Grâce à ce dispositif complexe, constitué de nombreux détecteurs, il est possible de rechercher dans la désintégration de mésons beaux des états exotiques tels que les tétraquarks et les pentaquarks, et de sonder du même coup le modèle des quarks.

En juin 2016, la collaboration LHCb a confirmé l'existence du tétraquark noté $X(4140)$. La découverte de cette particule avait été annoncée en 2009 par la collaboration CDF, à l'accélérateur Tevatron du Fermilab, aux États-Unis, puis confirmée par une seconde analyse de CDF et par les collaborations CMS, au LHC, et D0, au Tevatron. Mais le spin et la parité de cet état exotique étaient restés inconnus.

La collaboration LHCb ajoute à ce tétraquark trois autres, notés $X(4274)$, $X(4500)$ et $X(4700)$. Les quatre tétraquarks ont été détectés dans les désintégrations d'un méson B^+ dont les produits finaux sont les trois mésons J/ψ , ϕ et K^+ . Le tétraquark formé dans ce processus se désintègre rapidement pour donner les mésons J/ψ et ϕ

observés. Les nouvelles particules ont toutes la même composition en quarks ($c\bar{c}s\bar{s}$), mais sont de masses différentes.

Pour mener ces recherches, les physiciens ont analysé l'ensemble des données collectées entre 2010 et 2012. Ils ont notamment reconstruit les distributions de masse des sous-systèmes J/ψ et ϕ , d'une part, et de K^+ et ϕ , d'autre part (nombre d'événements observés en fonction de la masse du sous-système). Ces distributions sont ensuite interprétées en fonction de toutes les résonances (particules de courte durée de vie produites lors d'une désintégration) connues. En comparant les données aux calculs, les physiciens de LHCb ont conclu que de nouvelles particules étaient bien produites dans la désintégration du méson B^+ et ils ont pu déterminer leur spin et leur parité.

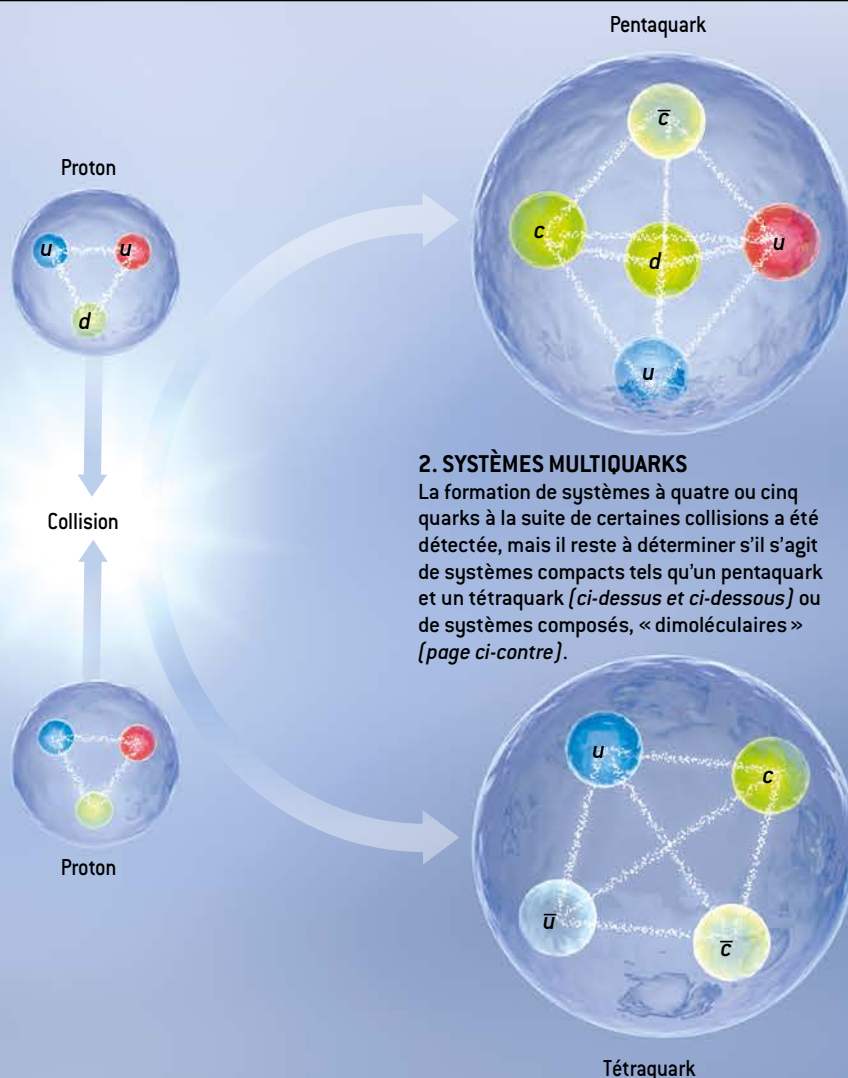
Ces quatre particules sont intéressantes, car il s'agit des seules structures connues de quatre quarks ne contenant ni quark u ni quark d , les quarks les plus légers dont est formée la matière ordinaire. La nature de ces particules pose encore question : s'agit-il de véritables tétraquarks, c'est-à-dire d'états liés de quatre quarks ($c\bar{c}s\bar{s}$), ou de « molécules » $D_s^+ D_s^*$, associant deux mésons $c\bar{s}$ et $c\bar{s}$? Il faudra attendre les données de la seconde phase d'exploitation du LHC, de 2015 à 2018, pour mieux comprendre leur structure.

— Renaud Le Gac
Centre de physique des
particules de Marseille (CPPM)

COMMENT LES TÉTRAQUARKS ET LES PENTAQUARKS SONT PRODUITS

1. COLLISION

Au collisionneur LHC du Cern, près de Genève, les physiciens accélèrent des protons dans un anneau de 27 kilomètres de circonférence. La moitié des protons parcourent ce trajet à une vitesse proche de celle de la lumière dans un sens, et l'autre moitié dans le sens contraire. En quatre sites sur l'anneau, correspondant aux quatre grandes expériences, dont *LHCb*, les faisceaux de protons se croisent et créent des collisions proton-proton. L'énergie des collisions était de 7-8 téraélectronvolts (TeV) dans une première phase du LHC; elle est maintenant de 13 TeV. Ces collisions énergétiques produisent de nouvelles particules, parmi lesquelles peuvent émerger d'éphémères tétraquarks ou pentaquarks.



2. SYSTÈMES MULTIQUARKS

La formation de systèmes à quatre ou cinq quarks à la suite de certaines collisions a été détectée, mais il reste à déterminer s'il s'agit de systèmes compacts tels qu'un pentaquark et un tétraquark (*ci-dessus et ci-dessous*) ou de systèmes composés, « dimoléculaires » (*page ci-contre*).

LES PRINCIPALES PROPRIÉTÉS DES QUARKS

Il existe six types ou « saveurs » de quarks, répartis en trois « générations ». Étant de spin 1/2, ce sont des fermions : deux quarks identiques ne peuvent pas être dans le même état quantique. Ces six particules élémentaires ont des masses différentes. Leur charge électrique est une fraction (1/3 ou 2/3) de la charge élémentaire e . Les quarks portent en outre une charge de « couleur », liée à l'interaction forte (tout comme la charge électrique est liée à l'interaction électromagnétique). Les médiateurs de cette force sont les gluons. La charge de couleur peut être le « rouge », le « bleu » et le « vert ». L'addition des trois couleurs ou l'addition d'une couleur et de son anticouleur donnent un résultat neutre, qui est le seul observable. Par ailleurs, pour chaque quark, il existe un antiquark, de mêmes propriétés mais avec des signes opposés.

Génération		Quark / Antiquark	Charge(e)	Masse(MeV)
1	up		+ 2/3	2,3
	anti-up		- 2/3	2,3
	down		- 1/3	4,8
	anti-down		+ 1/3	4,8
2	strange		- 1/3	95
	anti-strange		+ 1/3	95
	charm		+ 2/3	1 275
	anti-charm		- 2/3	1 275
3	bottom		- 1/3	4 180
	anti-bottom		+ 1/3	4 180
	top		+ 2/3	173 210
	anti-top		- 2/3	173 210

Selon les règles de la chromodynamique quantique, une particule portant une couleur, tel le quark, ne peut être isolée. Celui-ci se combine à d'autres pour former des assemblages neutres de couleur, dont les plus simples sont :

