

■ L'AUTEUR



Georg WOLSCHIN est professeur à l'Institut de physique théorique de l'université de Heidelberg, en Allemagne.

de particules. Ce zoo était au début très confus, mais les théoriciens sont parvenus à l'ordonner à l'aide de la théorie mathématique des groupes de symétrie. Ces travaux suggéraient que la plupart des particules alors connues n'étaient pas des particules élémentaires, mais qu'elles étaient formées d'un petit nombre de constituants élémentaires. Lesquels ?

En 1964, deux théoriciens américains ont conçu, indépendamment l'un de l'autre, le modèle des quarks, selon lequel le proton et le neutron, par exemple, sont formés de trois particules ponctuelles. L'un d'eux, Murray Gell-Mann, à l'institut de technologie de Californie (Caltech), a nommé « quarks » ces particules élémentaires, en s'inspirant d'un extrait du roman *Finnegans Wake* de l'auteur irlandais James Joyce. De son côté, George Zweig, qui travaillait au Cern, a utilisé le terme d'« as » (*aces* en anglais), mais c'est l'expression proposée par Murray Gell-Mann qui a fini par s'imposer.

Le modèle suppose différentes sortes, ou « saveurs », de quarks, dont les premières sont le quark *up* (ou *u*), le quark *down* (ou *d*) et le quark *strange* (ou *s*). Plus tard, essentiellement pour expliquer les propriétés de particules nouvellement découvertes, se sont ajoutées trois variantes plus lourdes : les quarks *charm* (ou *c*), *bottom* (ou *b*) et *top* (ou *t*).

Les quarks sont caractérisés par des « nombres quantiques » tels qu'un spin (moment cinétique intrinsèque) égal à $1/2$ dans les unités usuelles, une charge électrique fractionnaire ($+2/3$ ou $-1/3$ de la charge de l'électron), ainsi qu'une « couleur » pouvant prendre trois valeurs nommées « rouge », « vert », et « bleu » (propriétés qui n'ont cependant rien à voir avec la notion habituelle de couleur, liée à la longueur d'onde de la lumière). Il existe aussi des antiquarks, de même masse que leur quark associé, mais ayant une charge électrique opposée et une « anticouleur ».

Les quarks s'attirent entre eux par une force fondamentale, l'interaction forte. Celle-ci est réalisée par un échange de particules électriquement neutres, mais porteuses d'une charge de couleur, nommées gluons. Ces derniers sont de masse nulle, comme les photons médiateurs de l'interaction électromagnétique. Les spécificités de l'interaction forte sont décrites

par une théorie quantique des champs, la chromodynamique quantique.

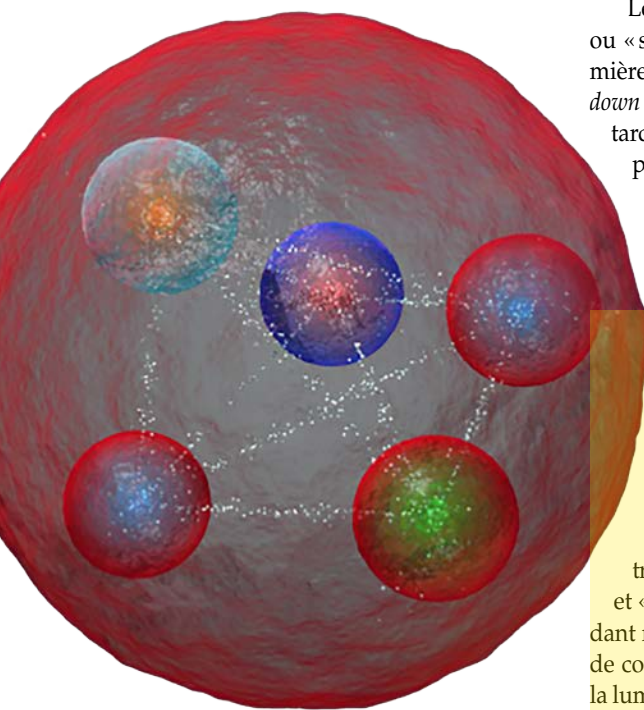
Cette théorie, proposée en 1973 par les Américains David Politzer, Frank Wilczek et David Gross, stipule que les quarks ne peuvent exister isolément, sauf dans des conditions extrêmes de température et de pression qui régnaient au tout début de l'Univers – environ dix microsecondes après le Big Bang. La matière était alors sous la forme d'une mer de quarks et de gluons libres, un « plasma quarks-gluons ». Des collisions d'ions de haute énergie dans les accélérateurs de particules permettent aujourd'hui de reproduire ces conditions particulières pendant une fraction de seconde. Mais en dehors de ces situations, les quarks s'associent spontanément pour former des structures – des « hadrons » – de telle façon que la « somme » des couleurs de leurs quarks produise une charge globale de couleur neutre (voir l'illustration page 24, en bas).

Cette règle de couleur neutre implique que l'on peut avoir des baryons, composés de trois quarks (portant chacun une des trois couleurs possibles), tels que les neutrons (*ddu*) et les protons (*uud*), et des mésons, constitués d'un quark et d'un antiquark de saveurs différentes (portant une couleur et l'anticouleur associée, rouge et antirouge par exemple), tels que les pions, kaons, etc.

Sous le proton, la mer de quarks

Cette description des hadrons est cependant incomplète. Aux quarks ci-dessus, dits de valence, il faut ajouter une « mer de quarks ». D'après la physique quantique, le vide est le siège d'un phénomène étonnant : la naissance à des instants aléatoires de paires particule-antiparticule qui s'annihilent et disparaissent aussitôt. Au cœur des hadrons, il en va de même : des paires quark-antiquark se créent et disparaissent presque immédiatement. Cette mer de quarks ne détermine pas les nombres quantiques (spin, charge) des hadrons, mais influe sur leur masse et certaines autres propriétés.

Dans les années 1960, le concept de quark n'allait pas du tout de soi. L'influent Murray Gell-Mann avait certes réussi à faire une place à son modèle, mais celui-ci n'était pas encore fermement admis par les physiciens. D'ailleurs, il obtint le prix Nobel de physique en 1969 pour ses « contributions et découvertes concernant



TROIS QUARKS PEUVENT SE LIER et former ainsi un baryon, type de particules dont les plus légères sont le proton et le neutron. Par ailleurs, un quark peut se lier à un antiquark et former ainsi un méson, type de particule instable qui comprend notamment les pions et les kaons. On ne connaissait pas d'autres états liés de quarks. En 2015, le premier pentaquark, formé de quatre quarks et d'un antiquark, a été mis en évidence au LHC (*Large Hadron Collider*, ou Grand collisionneur de hadrons).

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 $\bar{c}s$? 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)