

Tétraquarks et pentaquarks : d'autres structures hadroniques

Dans son article de 1964 décrivant les hadrons comme constitués de quarks, le physicien Murray Gell-Mann suggérait l'existence possible de structures à quatre ou cinq quarks différentes des baryons, particules composées de trois quarks, et des mésons, particules composées d'une paire quark-antiquark.

L'un des présupposés de la chromodynamique quantique, la théorie de l'interaction forte, est le « confinement », à savoir que la charge de « couleur » d'une particule libre est toujours nulle. Ainsi, les quarks ne sont jamais observés isolément, ils sont toujours associés pour former des hadrons « incolores » ou « blancs ». Par exemple, le proton est « blanc » car il est composé d'un quark « rouge », d'un « bleu » et d'un « vert ». Le méson J/ψ est incolore car il contient un quark d'une couleur et un antiquark portant

l'anticouleur, « bleu » et « anti-bleu » par exemple. En suivant ces règles sur les couleurs, il est possible d'imaginer au moins deux autres configurations incolores : le tétraquark, composé de deux quarks et deux antiquarks, et le pentaquark, que l'on peut aussi voir comme un baryon et un méson fortement liés.

En 2013, les expériences Belle, au Japon, et Bes III, en Chine, ont mis en évidence le tétraquark $Z_c(3900)$ formé d'un quark c , un quark u , un antiquark d et un antiquark c . L'année suivante, un autre tétraquark, $Z(4430)$, était

confirmé par l'expérience LHCb, au Cern. Il contient un quark c , un quark d , un antiquark u et un antiquark c . La quête des pentaquarks a été plus longue et plus tumultueuse. En 2003, une première détection potentielle d'un pentaquark, 1,5 fois plus lourd que le proton, au synchrotron japonais SPring-8, avait ensuite été infirmée par une expérience similaire à l'accélérateur américain JLab.

L'existence des pentaquarks s'est manifestée par hasard grâce à des physiciens de l'expérience LHCb. Ils étudiaient le processus de désintégration d'une particule nommée B^0 dans les données enregistrées entre 2009 et 2012. Mais en cherchant à estimer comment la désintégration d'une autre particule, Λ_b^0 , interférerait avec leur résultat, ils ont découvert que

cette désintégration passait par deux états intermédiaires ne correspondant pas à des particules classiques. Ces états intermédiaires seraient des pentaquarks de masses 4380 et 4450 mégaelectronvolts.

Ces pentaquarks seraient constitués de deux quarks u , un quark d , un quark c et un antiquark c . Ils sont d'une certaine manière l'association d'un proton et d'un méson J/ψ . Les cinq quarks sont-ils fortement liés entre eux ou le pentaquark est-il plutôt une sorte de molécule baryon-méson dont la liaison provient des effets résiduels de l'interaction forte ? Avec le redémarrage du LHC depuis juin 2015, les physiciens espèrent collecter plus de données pour étudier de plus près ces pentaquarks et en découvrir d'autres.

— Sean Bailly

Dans les années 1970, les physiciens ont construit la théorie qui décrit mathématiquement l'interaction forte et que l'on nomme chromodynamique quantique (ou QCD, pour *Quantum ChromoDynamics*). Au cœur de cette théorie, on trouve une notion de charge, analogue à la charge électrique pour l'interaction électromagnétique. La charge en QCD, nommée « couleur », se décline en trois variétés fondamentales (notées par exemple « rouge », « vert » et « bleu »).

Chaque quark porte l'une de ces trois couleurs. Il semble que la nature interdise qu'une particule colorée se déplace librement : on parle de confinement des quarks et des gluons. Ainsi, les quarks s'associent de façon à former des hadrons « sans couleur » ou « blancs ». Par exemple, le proton est constitué de trois quarks portant chacun une couleur différente (« rouge », « vert » et « bleu » donnent du « blanc ») ; le méson π , ou pion, se compose d'un quark d'une certaine couleur et d'un antiquark portant l'« anticouleur » correspondante (par exemple, « rouge » et « antirouge » donnent du « blanc »).

Les gluons portent aussi une charge de couleur (en huit combinaisons possibles).

Ils interagissent donc directement non seulement avec les quarks, mais aussi entre eux. Ce comportement est très différent de l'électromagnétisme, où le photon ne porte pas de charge électrique et n'interagit donc pas directement avec d'autres photons.

Liberté asymptotique et confinement

Les physiciens ont montré que l'auto-interaction des gluons joue un rôle central dans la « liberté asymptotique », le fait que l'interaction de deux quarks devienne très faible à très courte distance. Voyons comment.

Autour d'un quark A, des paires quark-antiquark éphémères peuvent, selon les principes de la mécanique quantique, se former spontanément. Ces paires de quarks virtuels tendent à masquer un peu la charge de couleur du quark A aux « yeux » d'un quark B situé à proximité : il y a « écran-tage » de la charge de couleur.

Si le quark B se rapproche du quark A, il y aura moins de paires de quarks virtuels pour écranter la charge de A. Ainsi, la force s'exerce entre les quarks A et B, qui dépend de la charge de couleur visible,

augmenterait quand la distance AB diminue, comme dans l'interaction électromagnétique. Cependant, en QCD, il faut aussi considérer les paires de gluons virtuels qui apparaissent autour du quark A. En 1973, les physiciens américains David Gross, Frank Wilczek et David Politzer ont calculé qu'une paire de gluons virtuels a un effet opposé et supérieur à celui d'une paire de quarks virtuels. Ainsi, quand la distance entre les quarks A et B diminue, la force décroît et devient quasi nulle : c'est la liberté asymptotique. Les trois physiciens ont été récompensés par le prix Nobel en 2004 pour ces travaux.

Lorsque la distance entre les particules est très faible, la force est peu intense du fait de la liberté asymptotique. Il est alors possible d'utiliser des méthodes éprouvées pour calculer, par approximations successives, les grandeurs physiques. Dans les décennies qui ont suivi l'élaboration de la QCD, de nombreuses expériences ont confirmé les prévisions de cette théorie, qui est désormais l'un des piliers du modèle standard de la physique des particules.

En revanche, lorsqu'il faut considérer des distances plus importantes, ne serait-ce