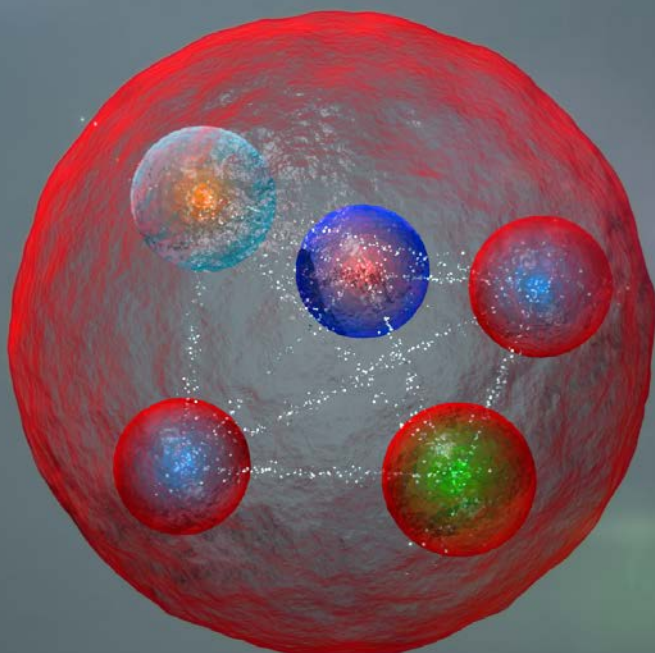




VUE D'ARTISTE DU PENTAQUARK découvert dans l'expérience LHCb.

© CERN / LHCb Collaboration

que pour calculer la masse d'un proton, d'importantes difficultés surgissent. Les équations de la QCD deviennent fortement non linéaires et nécessitent d'utiliser une approche numérique particulière, développée en 1974 par le physicien américain Kenneth Wilson et nommée QCD sur réseau.

Le principe de la QCD sur réseau est de discrétiser l'espace-temps (les trois dimensions d'espace et la dimension de temps) selon un réseau dont les mailles ont des côtés de longueur a . Il est alors possible de réexprimer les équations de la QCD dans un formalisme de physique statistique pour lequel les physiciens savent conduire les calculs. On fait ensuite tendre le paramètre a vers zéro pour retrouver le cas physique d'un espace-temps continu. En 2015, en améliorant cette méthode, Laurent Lellouch, physicien du CNRS et de l'université d'Aix-Marseille, et ses collègues ont réussi à calculer la différence de masse entre le proton et le neutron avec une très grande précision.

Cependant, si l'on considère des échelles de distance encore plus grandes, il est très difficile d'utiliser le formalisme de la QCD pour calculer des propriétés

Un problème à un million de dollars : prouver que les équations de la QCD garantissent le confinement des quarks et des gluons au sein d'assemblages incolores.

en physique nucléaire, par exemple pour expliquer comment les effets résiduels de l'interaction forte dans les protons et les neutrons suffisent à surmonter la répulsion entre protons et à maintenir la cohésion du noyau.

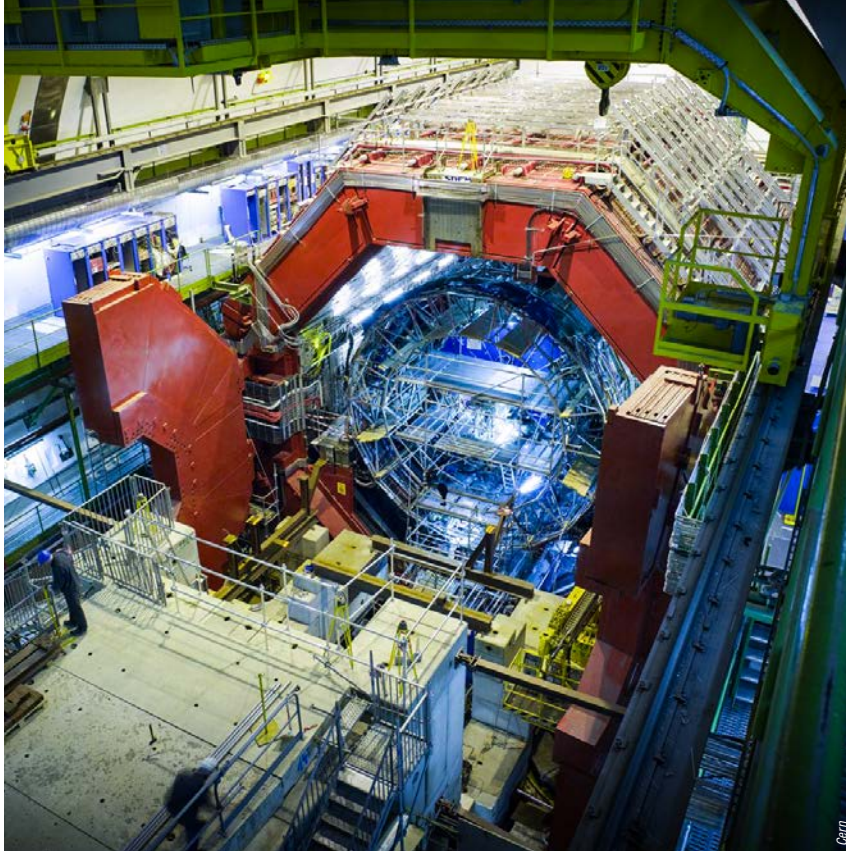
À ces échelles se pose aussi la question du confinement, à savoir que seuls des systèmes incolores de quarks et de gluons sont observés. Les physiciens cherchent encore à comprendre en vertu de quel principe fondamental un hadron doit être incolore, la QCD ne donnant pas d'explication à ce fait. Il manque une preuve mathématique que les équations de la QCD garantissent la propriété de confinement. Cette question constitue d'ailleurs l'un des six problèmes du prix du millénaire de l'institut Clay de mathématiques, dont la solution vaudra à son auteur une récompense de un million de dollars.

Une mousse quantique de particules

L'une des conséquences remarquables de la QCD est que le nombre de gluons et de quarks présents à l'intérieur du proton peut varier considérablement. Outre les trois quarks principaux, un nombre variable de gluons et de paires quark-antiquark naissent et disparaissent en permanence; le résultat est une «mousse quantique» fluctuante de particules. D'après les physiciens, quand les protons et les neutrons sont accélérés et atteignent des énergies extrêmes, les gluons présents à l'intérieur des protons se scindent en paires de nouveaux gluons, dont chacun a moins d'énergie que son parent. Ces gluons produisent à leur tour d'autres gluons d'énergie encore inférieure.

Cette multiplication en cascade des gluons évoque une machine à pop-corn qui s'emballe. La théorie suggère qu'elle pourrait se poursuivre sans fin – mais nous savons que ce n'est pas le cas. Si les gluons continuaient de se multiplier, le couvercle de la machine à pop-corn finirait par sauter; en d'autres termes, le proton deviendrait instable.

La matière étant à l'évidence stable, l'emballement doit être maîtrisé d'une façon ou d'une autre. Une hypothèse est qu'un effet de saturation interviendrait quand les gluons sont si nombreux qu'ils commencent à se chevaucher au sein du proton. Les gluons les moins énergétiques se recombineraient pour former des gluons



LE DÉTECTEUR ALICE AU LHC est dédié à l'étude du plasma de quarks et de gluons qui se forme lors de collisions d'ions lourds de plomb.

plus énergétiques. Le proton atteindrait un état d'équilibre, entre les divisions et les recombinaisons des gluons, qui ramènerait la machine à pop-corn sous contrôle.

Les physiciens n'ont que des indices de l'existence de cet hypothétique état saturé en gluons – aussi nommé « condensat de verre de couleur » – et ses propriétés ne sont pas complètement comprises. En sondant les protons par des expériences de diffusion profondément inélastique plus puissantes que celles actuellement à notre portée, les physiciens seront en mesure d'examiner les gluons de près dans leur forme la plus dense. Une question est, par exemple, de savoir si le phénomène qui limite la quantité de gluons s'accumulant au sein du condensat de verre de couleur est le même que celui qui assure le confinement. Si oui, l'observation du même phénomène dans des contextes différents apporterait de nouveaux éclairages sur le comportement des gluons.

Une autre question intrigue encore les chercheurs, celle du spin. En principe, le spin du proton provient de l'ensemble des spins des quarks et des gluons qui le composent. On s'attendait à ce que les quarks contribuent le plus mais, dans les années 1980 et 1990, grâce à des expériences de diffusion profondément inélastique, les physiciens ont estimé cette part à environ 30 % seulement du spin total. La détermination de

la part des gluons, plus difficile à mesurer, a exigé des expériences de diffusion plus précises. En 2014, les résultats obtenus par les expériences au RHIC (*Relativistic Heavy Ion Collider* ou Collisionneur d'ions lourds relativistes), aux États-Unis, et ceux de l'expérience Compass, au Cern, ont conduit à l'estimation que les spins des gluons représentent quelques dizaines de pour cent du spin du proton, mais avec des incertitudes importantes.

Spin du proton : le compte n'y est pas

Une autre contribution au spin pourrait venir du moment cinétique orbital des quarks et des gluons. Une analogie céleste illustre cette possibilité. Le moment cinétique du Système solaire est dû à la rotation des planètes sur leur axe auquel s'ajoute leur mouvement orbital autour du Soleil. Les quarks, antiquarks et gluons confinés au sein des protons bougent et sont donc associés à un mouvement orbital. Pour comprendre l'importance de ce mouvement orbital, nous devons cartographier les vitesses et les positions des quarks et des gluons au sein d'un proton. L'un de nous (Rolf Ent) travaille actuellement sur des expériences de diffusion profondément inélastique avec des faisceaux d'électrons de très haute intensité. La résolution atteinte devrait permettre

d'obtenir des images en trois dimensions de la matière au cœur des protons.

Les quarks et les gluons nous réservent encore des surprises et, pour approfondir notre compréhension de leurs interactions, nous devons les étudier non seulement dans les cas familiers des protons, neutrons et autres particules bien connues des physiciens, mais aussi dans des configurations plus exotiques.

En effet, la chromodynamique quantique prévoit l'existence d'états hadroniques très différents. Par exemple, des simulations suggèrent qu'il pourrait exister des « boules de gluons » contenant exclusivement des gluons, des « molécules » composées de quatre ou cinq quarks ou des entités hybrides répertoriées comme des états liés quark-antiquark-gluon. Mais les indices expérimentaux en faveur de l'existence de ces hadrons exotiques sont encore limités (voir l'encadré page 32). Cette situation pourrait changer grâce à des recherches expérimentales en cours. En particulier, une installation dédiée, GlueX, entre en service à l'accélérateur américain Thomas Jefferson (le « JLab ») de Newport, en Virginie.

Les physiciens étudient également un autre état extrême de la matière connu sous le nom de plasma de quarks et de gluons. Il se forme quand des noyaux atomiques entrent en collision à des vitesses proches de celle de la lumière. Les théoriciens soupçonnent que, dans ces conditions, les neutrons et les protons des deux noyaux voient leurs condensats de verre de couleur voler en éclats, cassant le confinement des quarks et des gluons et libérant l'énergie du condensat pour créer une « soupe » de quarks et de gluons. Ce plasma est la matière la plus chaude jamais créée sur Terre, avec une température de plus de 4000 milliards de degrés Celsius (voir l'entretien avec François Gelis page 36).

Le plasma de quarks et de gluons présente une forte ressemblance avec les conditions de l'Univers primordial. Les chercheurs des laboratoires qui créent ces plasmas (au RHIC américain et dans les expériences ALICE, ATLAS et CMS au LHC, voir la figure ci-dessus) analysent maintenant les fluides les plus petits et les plus parfaits au monde. En observant le refroidissement de ces plasmas, deux d'entre nous (Thomas Ullrich et Raju Venugopalan) et d'autres physiciens accèdent à de nouveaux éléments pour