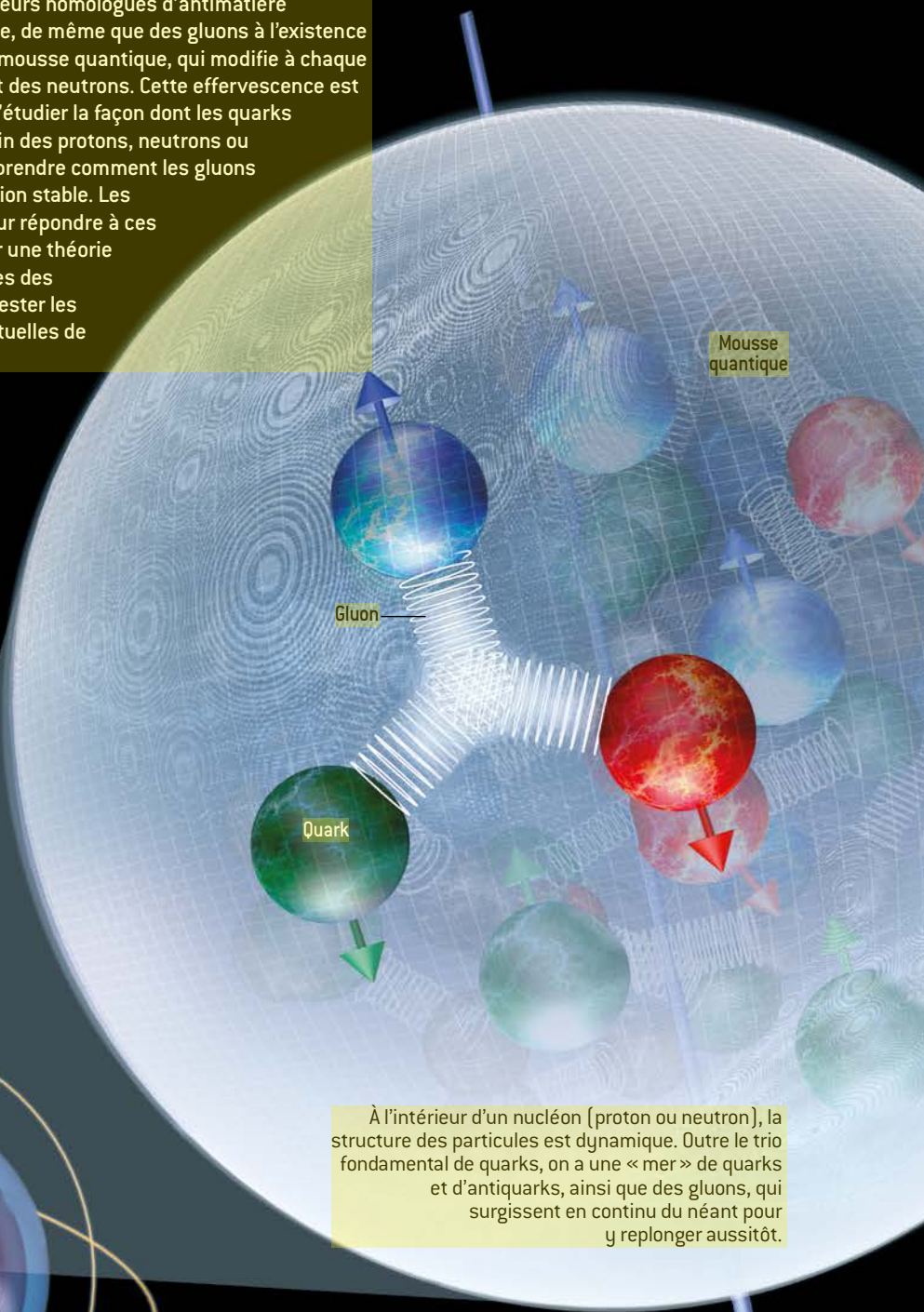
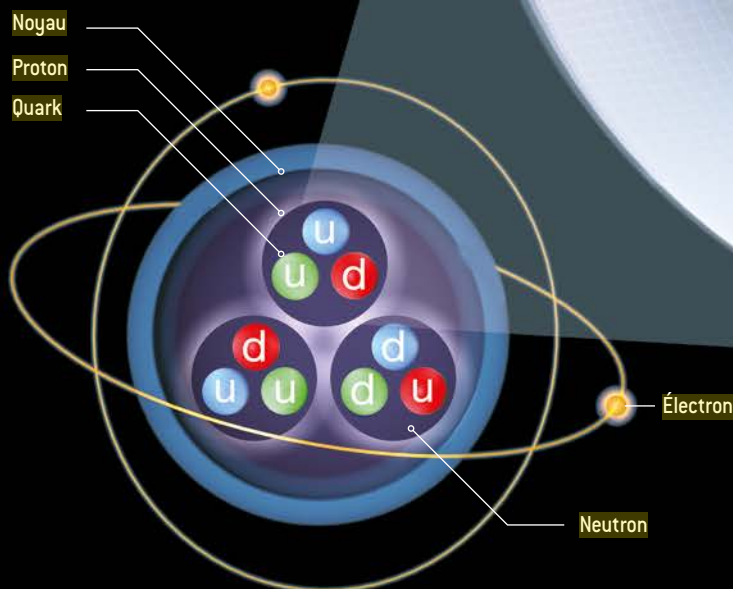


Chacun des protons et des neutrons qui constituent les noyaux des atomes contient trois quarks primaires liés par des gluons. Outre ces trois quarks principaux, des paires supplémentaires de quarks et de leurs homologues d'antimatière apparaissent et disparaissent en permanence, de même que des gluons à l'existence éphémère. Il en résulte ce qu'on nomme une mousse quantique, qui modifie à chaque instant le paysage à l'intérieur des protons et des neutrons. Cette effervescence est difficile à prendre en compte lorsqu'il s'agit d'étudier la façon dont les quarks et les gluons contribuent à la masse et au spin des protons, neutrons ou autres hadrons. De même, on cherche à comprendre comment les gluons maintiennent les quarks dans une configuration stable. Les physiciens explorent plusieurs approches pour répondre à ces questions. L'une d'elles consiste à développer une théorie précise de ces interactions, de la tester auprès des accélérateurs de particules mais aussi d'en tester les limites en étudiant des configurations inhabituelles de gluons et de quarks.

STRUCTURE ATOMIQUE : DEUX VISIONS

Le schéma classique d'un atome présenté ci-dessous comprend des électrons en orbite autour d'un noyau de protons et de neutrons constitués de trois quarks chacun *(les dimensions ne sont pas respectées)*. Plus proche de la réalité, l'image ci-contre représente la mousse quantique du proton ou du neutron, avec d'éphémères paires quark-antiquark et gluons.



À l'intérieur d'un nucléon (proton ou neutron), la structure des particules est dynamique. Outre le trio fondamental de quarks, on a une « mer » de quarks et d'antiquarks, ainsi que des gluons, qui surgissent en continu du néant pour y replonger aussitôt.

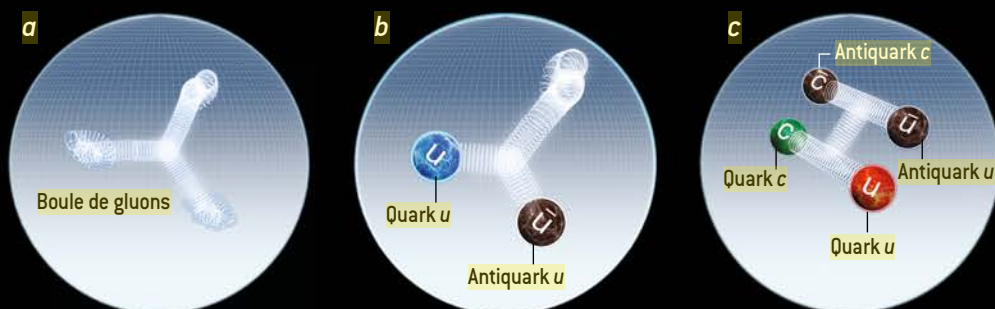
Le spin total du nucléon (flèche) dépend du spin individuel de ses constituants ainsi que du mouvement orbital de ces derniers.

ÉTATS EXOTIQUES DE LA MATIÈRE

Les physiciens ont imaginé, et dans certains cas créé, des combinaisons inhabituelles de quarks et de gluons se démarquant des protons et des neutrons familiers. Ces états exotiques offrent de nouvelles possibilités pour étudier les interactions susceptibles de se produire entre quarks et gluons.

Boules de gluons et autres édifices

Des simulations théoriques suggèrent que les quarks et les gluons peuvent se combiner pour créer, par exemple, des « boules de gluons » [a] constituées exclusivement de gluons, ou des particules « hybrides » formant un assemblage quark-antiquark-gluon [b], ou encore des « tétraquarks », états liés de deux antiquarks et de deux quarks [c]. Plusieurs indices expérimentaux suggèrent que des tétraquarks ont été observés. Les boules de gluons et les états hybrides restent à découvrir.



État saturé

Quand le proton (ou le neutron) est accéléré à des vitesses extrêmes, la théorie prévoit que ses gluons se multiplient. À mesure que son énergie augmente, le proton atteint un état d'occupation maximale qui ne peut plus loger davantage de gluons, un état théorique nommé « condensat de verre de couleur ». Des indices obtenus auprès des accélérateurs de particules suggèrent que ces condensats existent, mais une preuve décisive manque.

Quantité de mouvement croissante



Condensat de verre de couleur



Reproduire l'Univers des débuts

Quand le cosmos était jeune, il était trop chaud pour que des protons et des neutrons stables se forment. Les quarks et les gluons s'agitaient librement, en tous sens, dans ce qu'on nomme un plasma de quarks et de gluons (vue d'artiste ci-dessous à gauche). Sur Terre, des accélérateurs reproduisent cet état en fracassant des noyaux atomiques les uns contre les autres à des vitesses proches de celle de la lumière. En étudiant le plasma qui se refroidit, les physiciens glanent des informations sur le comportement des quarks et des gluons, mais aussi sur l'évolution de l'Univers juste après sa formation.



Moanumer Design

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 « écrantage » 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