

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES par Gérald Bronner



La souris et l'effet papillon

Un incident récent au Maroc illustre le fait que, dans les sociétés humaines aussi, de petites causes peuvent avoir de grands effets imprévisibles.

Une curieuse affaire est survenue récemment dans une mosquée au Maroc : une petite souris a fait 81 blessés. Cet événement présente de l'intérêt pour qui veut penser la complexité des phénomènes sociaux.

Que s'est-il passé le 13 juillet 2015 à la mosquée Hassan II de Casablanca ? Difficile de le savoir exactement, mais les témoignages indiquent que le bâtiment religieux, plein comme un œuf pour la nuit du Destin, un moment important du Ramadan, a été le théâtre d'une panique collective. À l'origine, une souris se serait faufilée dans la salle dévolue à la prière des femmes et l'une d'elles se serait mise à crier. Les autres femmes ont-elles aussi vu la souris ? Toujours est-il que plusieurs se sont mises à hurler à leur tour et à s'enfuir, amplifiant le premier moment de terreur. Le mouvement s'est alors étendu aux autres croyants qui, probablement sans connaître l'origine de la panique, ont contribué à une bousculade de grande ampleur.

Ce qui est frappant ici, c'est qu'une cause minuscule, dans tous les sens du terme, a eu des conséquences importantes et difficilement prévisibles.

Dans l'une de ses nouvelles de science-fiction intitulée *Un coup de tonnerre*, Ray Bradbury narre une histoire se déroulant en 2055 et mettant en scène un chasseur nommé Eckels. Celui-ci résiste difficilement à la proposition d'une agence de voyage lui offrant d'aller chasser le tyrannosaure 60 millions d'années plus tôt. Un tel voyage est périlleux et le protocole imposé par l'agence de voyage est drastique : il ne faut pas prendre le risque de modifier l'histoire universelle. Une passerelle flottant à quelques centimètres de sol lui sert de frontière à ne dépasser en aucun cas. Un incident contraint malgré tout Eckels à poser un pied sur le sol du Mésozoïque. Rien de grave semble-t-il. Pourtant, à son retour en 2055, les choses paraissent changées : un fasciste vient d'arriver au pouvoir, le climat n'est plus du tout le même, etc. Sous la botte de Eckels, il y a non seulement de la boue, mais aussi un papillon écrasé par inadvertance. L'avertissement donné par Bradbury est clair : la moindre modification dans un système peut aboutir à des conséquences vertigineuses.

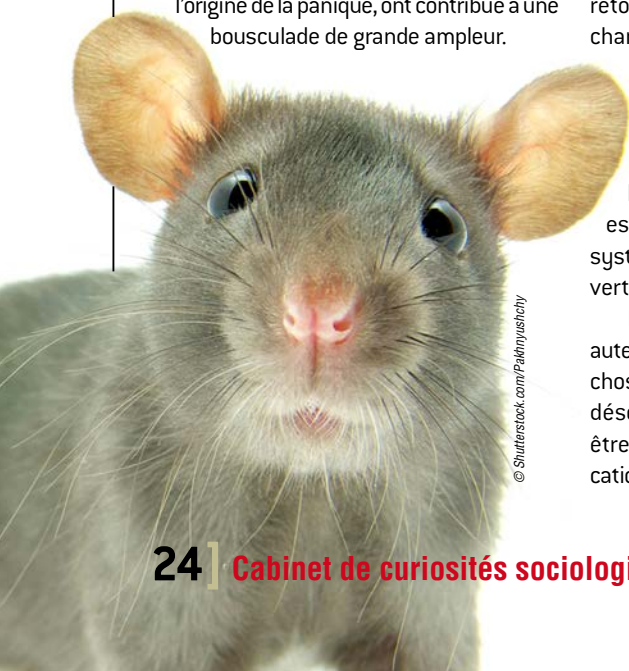
Difficile de savoir si la nouvelle du célèbre auteur de science-fiction y est pour quelque chose, mais la figure du papillon incarne désormais cette idée qu'un système peut être profondément altéré par une modification infime de ses conditions initiales. En

physique, c'est le météorologue américain Edward Lorenz qui popularisa cette idée, notamment lors d'une conférence de 1972 intitulée : « Le battement d'ailes d'un papillon au Brésil peut-il provoquer une tornade au Texas ? ». La réponse à cette question est à présent bien connue du grand public sous le nom d'effet papillon et constitue souvent une introduction idéale à la notion de chaos déterministe.

L'hypersensibilité aux conditions initiales rend assez bien compte de l'anecdote tragique de la souris dans la mosquée et de nombre de faits sociaux qui, pour cette raison, appartiennent sans doute à la famille des phénomènes chaotiques. Ici, le contexte de tension et de crainte d'une action terroriste, notamment durant le Ramadan, a dû contribué à l'interprétation par excès dont ont été victimes les nombreux croyants présents ce soir-là à Casablanca. En même temps, on constate que cette panique s'est dissipée et n'a pas essaimé au-delà des murs de la mosquée. C'est là un exemple passionnant pour qui cherche à modéliser les phénomènes sociaux.

Cette anecdote nous rappelle aussi un fait simple, mais qui donne à méditer : les systèmes dans lesquels nous vivons sont étonnamment solides, car ils paraissent souvent indifférents à de nombreuses perturbations, et en même temps paradoxalement fragiles quand ils se montrent, de façon imprédictible, hypersensibles à certaines conditions initiales. ■

Gérald BRONNER est professeur de sociologie à l'université Paris-Diderot.



© Shutterstock.com/Pakinyushchy

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

Les gluons nous posent encore des colles

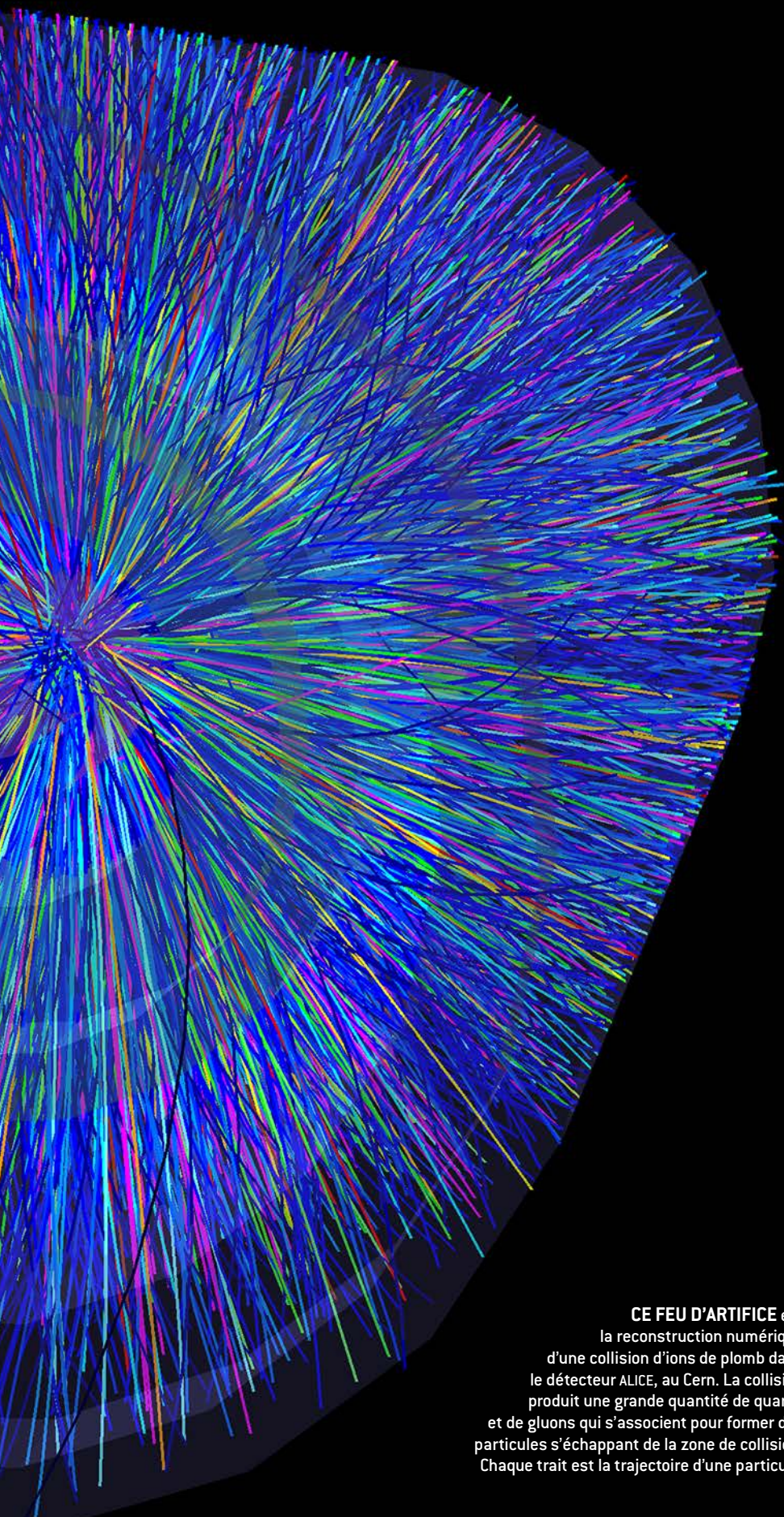
Rolf Ent, Thomas Ullrich et Raju Venugopalan

En liant les quarks, les gluons assurent la cohésion du proton ou du neutron, ainsi que celle des noyaux atomiques. Par quels mécanismes ? Les physiciens n'ont pas encore toutes les réponses.

L'ESSENTIEL

- Les particules du noyau atomique et d'autres sont composées de quarks, liés entre eux par des gluons.
- Les physiciens cherchent à comprendre les propriétés du proton et du neutron, telles que leur masse ou leur spin, à partir de celles des quarks et des gluons.
- Malgré de nombreux progrès, des énigmes demeurent.
- Grâce à des expériences futures, les physiciens comprendront mieux les assemblages de quarks et de gluons, voire découvriront de nouveaux états de la matière.

© CERN/ALICE



CE FEU D'ARTIFICE est la reconstruction numérique d'une collision d'ions de plomb dans le détecteur ALICE, au Cern. La collision produit une grande quantité de quarks et de gluons qui s'associent pour former des particules s'échappant de la zone de collision. Chaque trait est la trajectoire d'une particule.

Pour certains philosophes grecs de l'Antiquité, les atomes étaient les plus petits constituants de l'Univers. Or les physiciens du XX^e siècle ont cassé l'atome, révélant des ingrédients plus petits encore : des protons, des neutrons et des électrons. Par la suite, ils ont montré que les protons et les neutrons étaient eux-mêmes constitués de particules plus petites, les quarks, maintenues solidaires par des gluons, des particules qui servent de « colle » comme leur nom l'indique. Grâce à diverses expériences, les chercheurs ont découvert que la structure des protons et des neutrons cache un foisonnement de particules : trois quarks, mais aussi des gluons et une « mer » de paires quark-antiquark qui naissent et disparaissent en permanence.

Les expériences ont en outre montré que les protons et neutrons ne sont pas les seules particules de l'Univers à être constituées de quarks. Une multitude d'autres particules, collectivement nommées hadrons, sont des assemblages de trois quarks ou des combinaisons d'un quark et d'un antiquark.

Depuis l'hypothèse de l'existence des quarks, émise il y a près de cinquante ans, les physiciens ont développé une théorie pour décrire les interactions des quarks et des gluons. Cette théorie a été confirmée auprès des accélérateurs de particules, mais, malgré une bonne compréhension de la façon dont les quarks et les gluons interagissent, certaines propriétés de ces particules échappent encore aux chercheurs. Par exemple, les physiciens ont tenté d'expliquer les caractéristiques des protons, des neutrons et des autres hadrons à partir de celles des quarks et des gluons, mais ils se heurtent à des difficultés. Ainsi, la somme des masses des quarks et des gluons contenus dans un proton est très

loin de rendre compte de la masse totale du proton, ce qui nous laisse face à une première question : d'où provient le reste ? Nous ne comprenons pas non plus comment une grandeur quantique, le spin (le moment cinétique intrinsèque) du proton, découle des spins des quarks et des gluons qu'il contient : la somme de ces spins ne correspond pas à celui du proton.

Si les physiciens parvenaient à répondre à ces questions, nous pourrions comprendre comment la matière fonctionne à son niveau le plus fondamental, mais aussi comment

se comportait l'Univers à ses premiers instants. L'étude des quarks et des gluons conduit en effet à étudier des états exotiques de la matière qui ont été ceux de l'Univers primordial.

Pour comprendre pourquoi les rouages de la physique des quarks et des gluons sont si difficiles à appréhender, prenons l'exemple du calcul de la masse du proton, qui taraude les physiciens depuis longtemps. Nous avons une relativement bonne compréhension de la façon dont les particules fondamentales (voir l'encadré ci-dessous)

acquièrent leur masse. D'après le modèle standard de la physique des particules, le mécanisme est lié au boson de Higgs et au champ de Higgs associé, qui est omniprésent dans l'espace. Les interactions d'une particule avec ce champ lui confèrent une masse (qui est proportionnelle à l'intensité de ces interactions). Le boson de Higgs, clef de voûte du modèle standard, a été découvert en 2012 au LHC (le *Large Hadron Collider* ou Grand collisionneur de hadrons) du Cern, près de Genève, confirmant ainsi une nouvelle fois la validité de cette théorie.

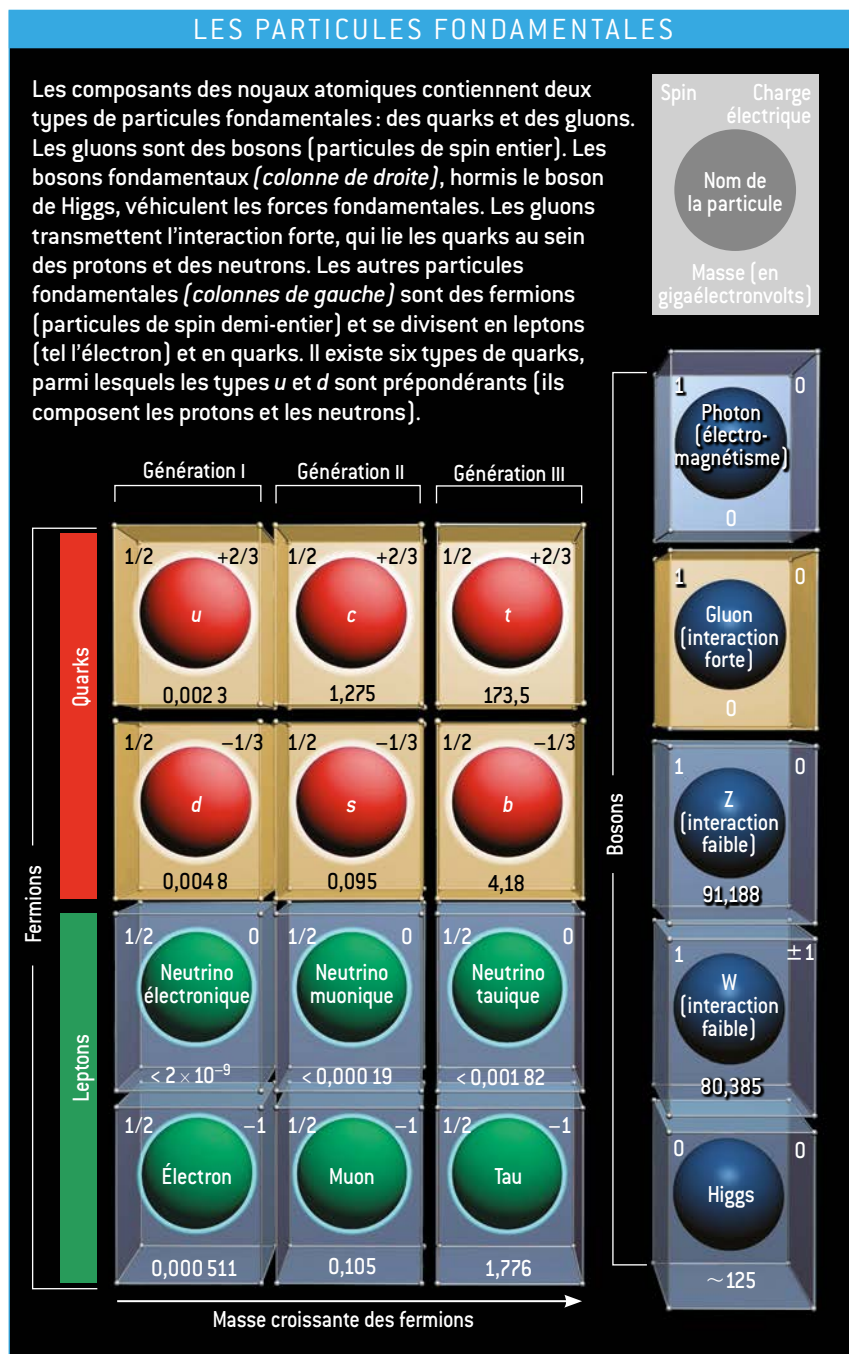
On entend souvent dire que le mécanisme de Higgs est à l'origine de la masse de toute la matière visible dans l'Univers, mais cette affirmation est incorrecte. Cette matière est constituée d'atomes, donc principalement de protons et de neutrons. Or la masse des quarks qui les composent ne représente que 2% de leur masse. Les 98% restant seraient le fait des gluons, qui sont pourtant dépourvus de masse (ils n'interagissent pas avec le champ de Higgs).

Pour comprendre la nature de la contribution des gluons, il faut se rappeler la célèbre relation de la théorie de la relativité restreinte d'Albert Einstein, $E = mc^2$, qui montre une équivalence entre la masse m d'une particule au repos et son énergie E , la lettre c désignant la vitesse de la lumière dans le vide. En principe, il faudrait donc déterminer l'énergie des gluons pour obtenir celle du proton ou du neutron, et en déduire la masse correspondante $m = E/c^2$.

Les gluons font 98 % de la masse du proton

Il est difficile de calculer l'énergie des gluons, en partie parce qu'elle provient de plusieurs contributions. Quand une particule est libre, c'est-à-dire non liée à d'autres, son énergie est celle de son mouvement (l'énergie cinétique) ; mais les quarks et les gluons ne sont pratiquement jamais libres. Ils ne subsistent en tant que particules libres que très brièvement (moins de 3×10^{-24} seconde) avant de se retrouver liés au cœur des hadrons. L'énergie d'un gluon ne provient donc pas seulement de son mouvement ; elle résulte aussi de l'énergie dépensée dans sa liaison avec les autres particules, les quarks.

Pour calculer la masse du proton, il faut donc bien comprendre comment les gluons « collent ». Quel a été, pour ce faire, le cheminement des physiciens ? Revenons



sur les étapes qui ont conduit au développement de la théorie qui décrit l'interaction des quarks et des gluons.

Avant les années 1960, les physiciens ne comprenaient pas la stabilité d'un noyau atomique, composé de neutrons et de protons : la répulsion électromagnétique entre protons, particules de charge positive, devait rompre la cohésion du noyau. Les chercheurs ont donc supposé qu'une force attractive, plus forte que la répulsion électrique entre protons, s'exerce entre les nucléons (protons et neutrons) : l'« interaction forte ».

Par ailleurs, la découverte de plusieurs hadrons dans les années 1950 a conduit les physiciens américains Murray Gell-Mann et George Zweig à postuler que les hadrons ne sont pas des particules élémentaires, mais qu'ils sont composés de « quarks ». Les physiciens ont confirmé l'existence des quarks en 1969 dans des expériences de « diffusion profondément inélastique » au SLAC, le Centre de l'accélérateur linéaire de Stanford. Il s'agit de bombarder des cibles composées de protons avec des électrons accélérés. En général, les électrons traversent les protons sans dévier, mais parfois ils heurtent quelque chose et rebondissent. L'analyse des vitesses et directions des électrons déviés a révélé la présence de particules chargées ponctuelles – les quarks – à l'intérieur des protons. Aujourd'hui, nous en connaissons six types, notés d , u , s , c , b et t . Le proton est ainsi composé de deux quarks u et un d ; le neutron, de deux quarks d et un u .

L'interaction forte maintient les quarks au sein des hadrons et assure la cohésion de l'assemblage de protons et neutrons qu'est le noyau atomique. Elle est la plus puissante des quatre forces fondamentales de la nature (les autres sont la force gravitationnelle, la force électromagnétique et l'interaction faible). De la même façon que le photon véhicule l'interaction électromagnétique, le gluon véhicule l'interaction forte : cette force agit entre deux quarks par des échanges de gluons, dont l'existence a été confirmée à partir de 1979 grâce à l'accélérateur PETRA, à Hambourg.

Les gluons assurent la cohésion

des assemblages de quarks que sont le proton et le neutron, ainsi que celle du noyau atomique.

Si l'on poursuit la comparaison entre les interactions forte et électromagnétique, on trouve des différences surprenantes. D'après la mécanique quantique, la portée d'une force est inversement proportionnelle à la masse de ses médiateurs. L'interaction électromagnétique a ainsi une portée infinie, car son médiateur, le photon, est de masse nulle. À l'inverse, la portée de l'interaction forte ne s'étend pas au-delà du noyau atomique. Cela suggère que les gluons seraient massifs. Or, comme nous l'avons dit, ils sont de masse nulle comme le photon.

L'interaction forte a une autre particularité : la force s'exerçant entre deux quarks est d'autant plus intense qu'ils sont distants l'un de l'autre. C'est le contraire de l'interaction électromagnétique entre deux charges ou deux aimants. Les expériences de diffusion profondément inélastique ont montré que l'attraction entre quarks est faible à courte distance ; mais à plus grande distance, à cause du phénomène de confinement sur lequel nous reviendrons plus tard, on n'observe aucun quark isolé, ce qui implique que leur attraction mutuelle est extrêmement forte.

Pour visualiser comment fonctionne cette force, imaginez deux quarks reliés par un élastique. Quand ils sont proches l'un de l'autre, la tension de l'élastique se relâche et les quarks ne semblent être soumis à aucune force. Mais quand ils s'éloignent l'un de l'autre, la tension de l'élastique les retient. L'intensité de cette force agissant entre quarks est de l'ordre de 160 000 newtons (soit le poids d'une masse de 16 tonnes à la surface de la Terre) s'exerçant sur des distances de l'ordre de la taille d'un proton.

L'interaction forte maintient les quarks dans les hadrons, mais que se passe-t-il si une force extérieure s'y oppose et la dépasse ? L'élastique casse. Comment précisément cette rupture se produit-elle ? Nous n'avons pas encore de description satisfaisante du processus, qui est pourtant un élément clef pour comprendre comment les gluons collent à l'intérieur des noyaux atomiques, mais ne se dispersent pas au-delà.

■ LES AUTEURS



Rolf ENT est directeur adjoint pour la physique nucléaire expérimentale à l'accélérateur américain Thomas Jefferson de Newport News.



Thomas ULLRICH est chercheur au Laboratoire américain de Brookhaven et à l'université Yale.

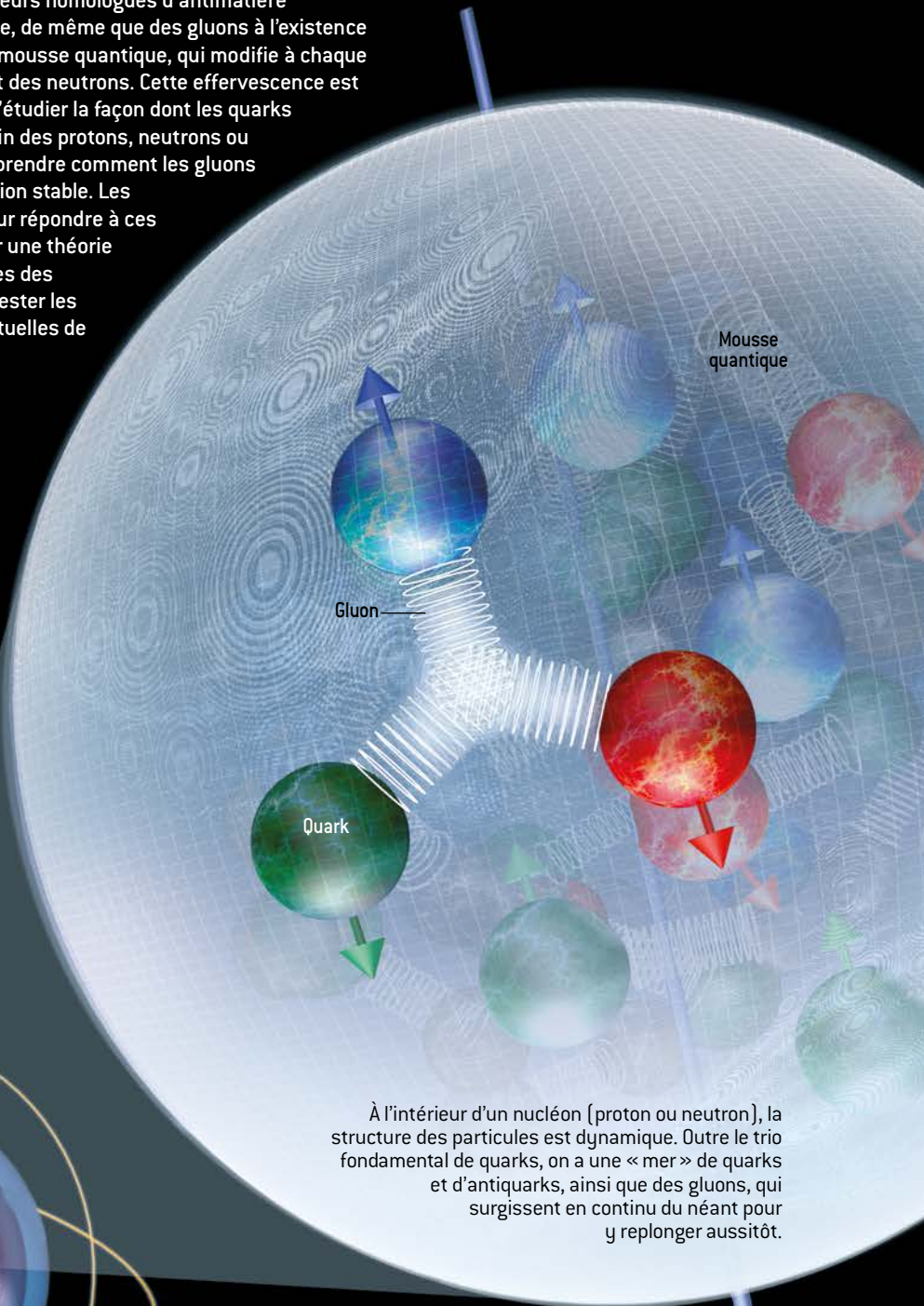
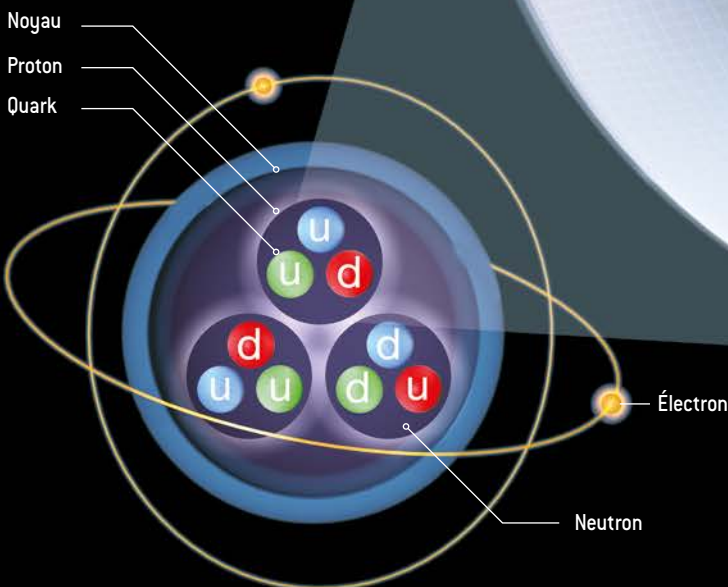


Raju VENUGOPALAN dirige le groupe de théorie nucléaire au Laboratoire américain de Brookhaven.

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.

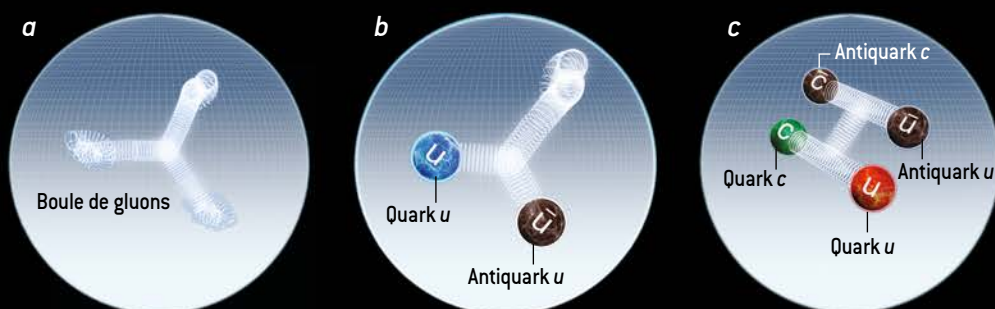
Le spin total du nucléon (*flèche*) dépend du spin individuel de ses constituants ainsi que du mouvement orbital de ces derniers.

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.

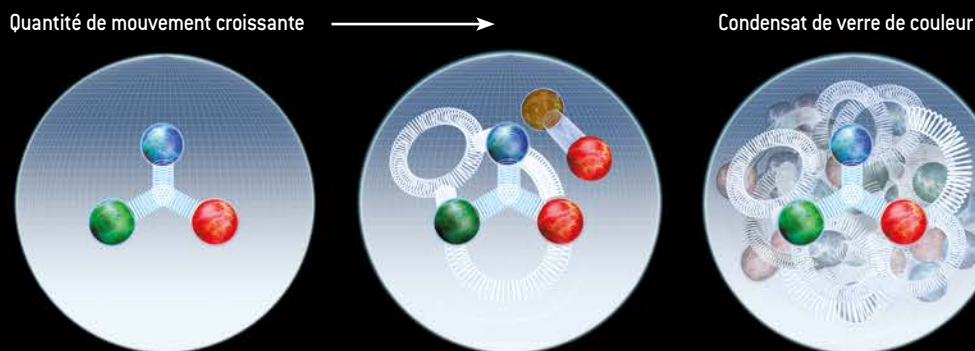
Boules de gluons et autres édifices

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.



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.



Tétraquarks et pentaquarks : d'autres structures hadroniques

Dans son article de 1964 décrivant les hadrons comme constitués de quarks, le physicien Murray Gell-Mann suggérerait 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.

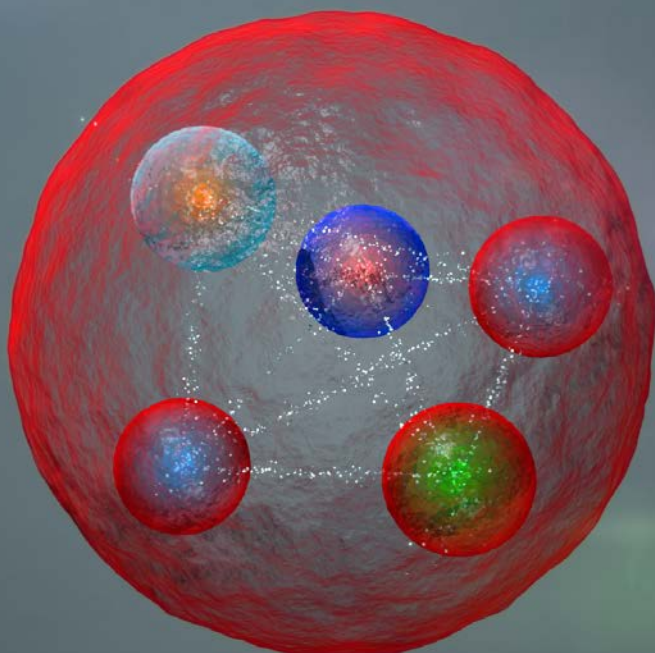
Autour d'un quark A, des paires quark-antiquark éphémères peuvent, selon les principes de la mécanique quantique, se former spontanément. Ces paires de quarks virtuels tendent à masquer un peu la charge de couleur du quark A aux « yeux » d'un quark B situé à proximité : il y a « écrantage » de la charge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



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.

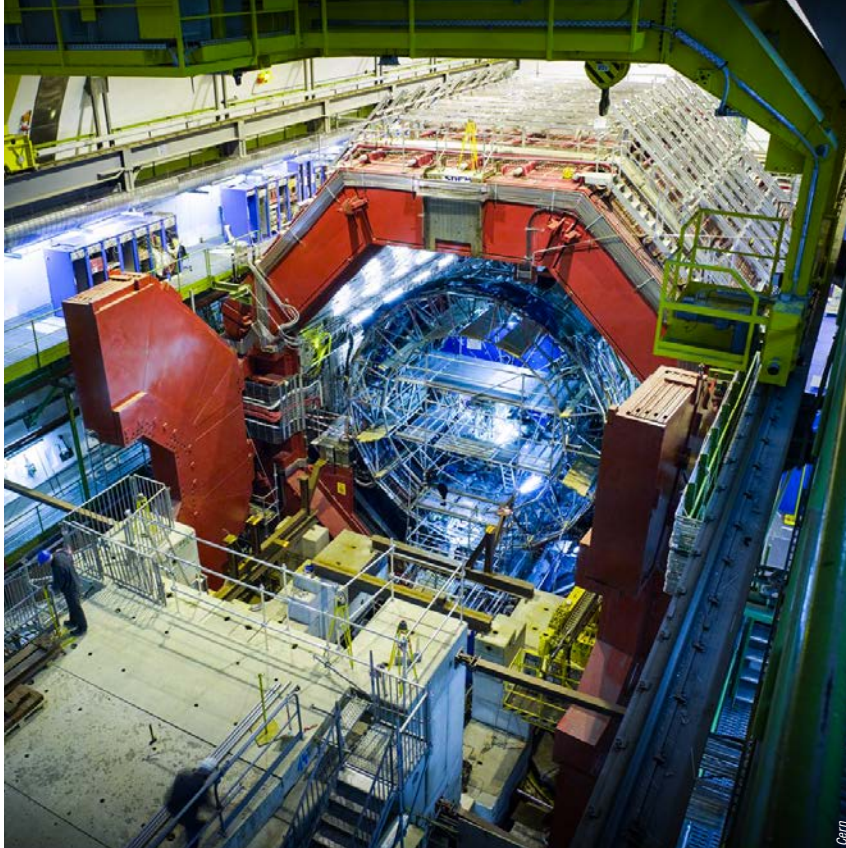
À ces échelles se pose aussi la question du confinement, à savoir que seuls des systèmes incolores de quarks et de gluons sont observés. Les physiciens cherchent encore à comprendre en vertu de quel principe fondamental un hadron doit être incolore, la QCD ne donnant pas d'explication à ce fait. Il manque 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

comprendre comment l'Univers a évolué. En outre, en orchestrant précisément la destruction de protons et de neutrons en plasma, les chercheurs peuvent étudier à rebours le confinement, en espérant y découvrir les secrets de l'assemblage des quarks et des gluons.

Un avenir qui s'annonce riche en résultats

En plus des projets que nous avons cités, d'autres sont déjà à l'étude. Pour cartographier avec encore plus de précision la configuration des quarks et des gluons au sein des hadrons, il faudrait augmenter l'énergie des collisions. Ainsi, au lieu d'accélérer des électrons et les projeter contre des noyaux immobiles, les deux types de particules seraient accélérés à des vitesses proches de celle de la lumière avant de subir une collision frontale. Des projets sont à l'étude au JLab et à Brookhaven pour atteindre une résolution de l'ordre d'un millièème du rayon du proton.

■ BIBLIOGRAPHIE

Collaboration LHCb, **Observation of J/ψ resonances consistent with pentaquark states in $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ decays**, soumis à *Phys. Rev. Lett.*, 2015.

M. Riordan et W. A. Zajc, **Les premières microsecondes de l'Univers**, *Dossier Pour la Science*, n° 62, janvier-mars 2009.

H. D. Politzer, **Reliable perturbative results from strong interactions ?**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 30(26), pp. 1346-1349, 1973.

D. J. Gross et F. Wilczek, **Ultraviolet behavior of non-abelian gauge theories**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 30(26), pp. 1343-1346, 1973.

Un projet tel que le collisionneur électron-ion EIC (*Electron-Ion Collider*) atteindrait des intensités de faisceaux inégalées. Avec une plus grande densité de particules dans les faisceaux, les collisions de diffusion profondément inélastique seraient plus fréquentes que dans les expériences précédentes. Les chercheurs produiront alors de nombreux clichés révélant les entrailles des protons et des neutrons.

Durant les quatre décennies qui ont suivi la formulation de la chromodynamique quantique, les physiciens ont réalisé de nombreuses avancées pour expliquer pourquoi l'interaction forte se comporte comme elle le fait. Mais il manque encore quelques pièces pour créer un tableau simple et cohérent de la façon dont les gluons collent. Les dispositifs en cours de développement aujourd'hui nous donnent l'espoir que, d'ici une quarantaine d'autres années, nous aurons enfin percé le mystère de la constitution de la matière à son niveau le plus fondamental. ■



LES {Partagez les savoirs} RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

COURS PUBLICS

Cycle : « Préhistoire, préhistoriens, Préhistoriques : Naissance, pratiques et imaginaire de la Préhistoire au XIX^e siècle »

Jeudi 24 septembre - 18h : Préhistoire. La possibilité d'une Préhistoire.
Arnaud Hurel, historien des sciences, ingénieur de recherche au Département de Préhistoire du Muséum, Membre associé du Centre Koyré en Histoire des sciences et des techniques.

Grand Amphithéâtre du Muséum 57 rue Cuvier, Paris 5^e

Entrée gratuite

PROGRAMMATION AUDIOVISUELLE

Samedi 26 septembre - 15h30 : La nuit des éléphants
Réalisation : **Thierry Machado (2014, 86')**
En présence des producteurs **Jacques Perrin et Barthélémy Fougea**

Au Jardin des Plantes

Détails sur mnhn.fr, rubrique : "les rendez-vous du Muséum"

MÉTIER DU MUSEUM

Dimanche 27 septembre - 15h : Primatologue, spécialiste des gorilles, Shelly Masi

SCIENCE

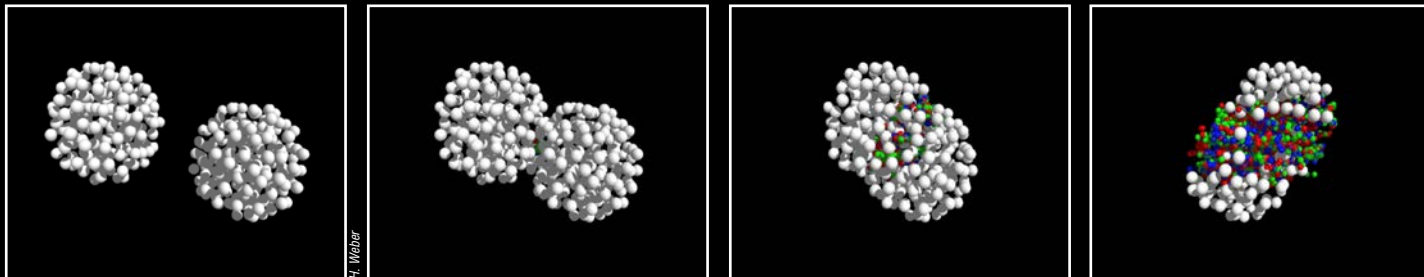
POUR LA

UN CHERCHEUR / UN LIVRE

Lundi 28 septembre - 18h : Une ethnologue au Jardin des Plantes, dix petits terrains, Éditions Petit Génie / MNHN, 2015, 368p.
Avec **Bernadette Lizet**, ethnologue, Muséum

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution
36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5^e





« Le plasma quarks-gluons se comporte comme un fluide parfait »

Entretien avec François Gelis



François GELIS est physicien à l'Institut de physique théorique du CEA-Saclay.

Au moyen de collisions à haute énergie entre noyaux atomiques, les physiciens créent un « plasma quarks-gluons ». Ils étudient les propriétés de cet état de la matière qui s'est aussi formé dans les premiers instants de l'Univers.

POUR LA SCIENCE

Qu'est-ce qu'un plasma de quarks et de gluons ?

FRANÇOIS GELIS : Il s'agit d'un état de la matière composé de quarks et de gluons où ces particules sont quasi libres et ne sont plus confinées dans des états liés de deux ou trois quarks, les hadrons. Ce plasma se forme dans des conditions extrêmes qui étaient celles de l'Univers quelques microsecondes après sa naissance : une température de l'ordre de 2 000 milliards de degrés et une densité six fois supérieure à celle d'un noyau atomique. L'Univers s'est ensuite refroidi. Du fait du phénomène de confinement de l'interaction forte, les quarks et les gluons ont formé des hadrons, tels les protons et les neutrons. Sur le plan cosmologique, le

plasma de quarks et de gluons primordial n'a pas laissé de traces observables.

PLS

Dès lors, comment peut-on étudier cet état de la matière ?

F.G. : Nous sommes capables de créer les conditions appropriées dans un accélérateur de particules en procédant à des collisions de noyaux atomiques lourds, tel le plomb. La collision de protons, par exemple, ne donnerait pas une densité suffisante pour former un plasma quarks-gluons. Les premières expériences datent des années 1970, mais le premier plasma a été observé au Cern en 2000. En 2004, les physiciens du collisionneur RHIC, aux États-Unis, ont montré que le plasma de quarks et de gluons se

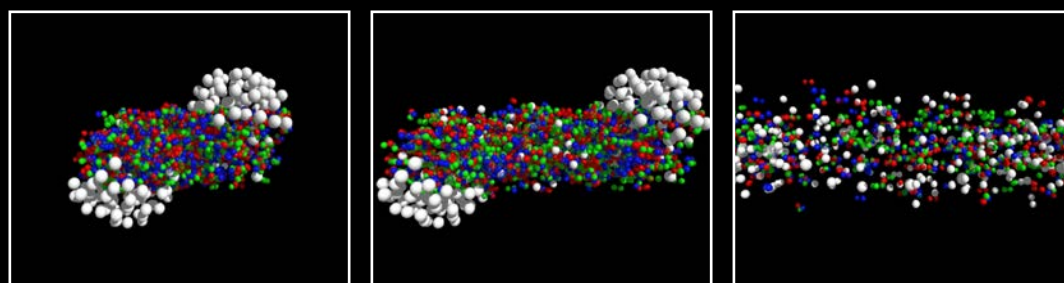
comporte comme un fluide parfait, c'est-à-dire qu'il s'écoule sans résistance.

Le LHC, au Cern, est l'accélérateur le plus puissant actuellement. Il procède principalement à des collisions de protons (ce qui a permis la découverte du boson de Higgs en 2012), mais une partie de son programme est consacrée à des collisions proton-noyau et noyau-noyau. Avec une expérience dédiée à l'étude de ces plasmas, ALICE, mais aussi avec les expériences CMS et ATLAS, les physiciens du LHC ont confirmé les résultats de RHIC et ont obtenu des mesures quantitatives montrant qu'il est possible de décrire l'expansion du plasma de quarks et de gluons au moyen de modèles hydrodynamiques.

PLS

En quoi le plasma quarks-gluons a-t-il des propriétés comparables à celles d'un fluide ?

F.G. : Par exemple, il est caractérisé par une viscosité, et l'une des grandes découvertes dans ce domaine a été sa mesure. Quand deux noyaux entrent en collision (*voir les premières images ci-dessus*), une goutte de plasma (*les particules en couleur dans les images*) se forme puis se dilate dans le vide environnant. On mesure sa viscosité par des moyens



LA COLLISION DE NOYAUX LOURDS
(à gauche), composés de protons et neutrons (boules blanches), conduit à la formation d'un plasma de quarks et de gluons (boules de couleur). Les images de cette simulation illustrent comment le plasma s'étend et se refroidit. Puis les quarks se recombinaient pour former des hadrons dont des protons et des neutrons (les boules blanches, à droite).

indirects, car la durée de vie du plasma est trop courte pour que l'on accède directement à ses caractéristiques. Lorsque le plasma devient moins dense, les quarks se lient et forment des hadrons (les boules blanches sur la dernière image) qui filent jusqu'aux détecteurs. On analyse alors la nature des particules détectées, leur énergie et leur impulsion. Ces informations dépendent de la viscosité du plasma. En comparant les données obtenues aux modèles, on trouve que le plasma a une viscosité très faible.

PLS

En termes d'interactions des particules, que signifie un plasma peu visqueux ?

F.G. : De façon contre-intuitive, la faible viscosité du plasma est ici synonyme d'interactions fortes. En effet, une petite viscosité signifie que les ondes acoustiques sont très faiblement atténuées dans le fluide, c'est-à-dire que les transferts d'impulsion d'un constituant à un autre *via* leurs collisions sont très efficaces, ce qui n'est possible que s'ils interagissent fortement. Au début de la collision, le couplage qui quantifie l'intensité de l'interaction forte est petit car la distance entre particules est courte (c'est le phénomène de liberté asymptotique). Mais la densité du plasma étant élevée, les interactions sont nombreuses, ce qui compense la faible intensité de la force. Quand la densité baisse à mesure que la goutte de plasma grossit, le couplage augmente, d'où le maintien d'une forte interaction entre les constituants.

PLS

Qu'en est-il de la température ?

F.G. : Mesurer la température du plasma est complexe, étant donné la très courte durée de vie de la goutte. L'approche est, là encore, indirecte. Nous étudions

la formation de différents mésons lourds (constitués d'un quark et d'un antiquark). Au-dessus d'une certaine température, les interactions empêchent ces mésons de se former. Ils apparaissent au-dessous d'un seuil de température que l'on peut calculer avec les modèles. Ces mésons ont une durée de vie très courte et se désintègrent en d'autres particules avant d'atteindre les détecteurs. Nous déterminons leur présence en reconstruisant à l'envers le processus de désintégration.

Nous évaluons ainsi deux moments clefs dans le plasma qui se refroidit : celui où la température est assez basse pour que les réactions qui changent la nature des particules soient négligeables (on parle de « gel chimique ») et celui où la température a assez diminué pour que les collisions élastiques qui transfèrent de l'énergie d'une particule à une autre soient faibles (on parle de « gel cinétique »).

PLS

Quelle température atteint ainsi le plasma ?

F.G. : Les gels se produisent autour de 1500 milliards de degrés (environ 140 mégaelectronvolts, ou MeV). On met ainsi une borne inférieure à la température à laquelle se produit la transition quarks-hadrons, quand les quarks échappent au confinement en hadrons et forment un plasma. Cette transition se ferait autour de 1750 milliards de degrés (150 MeV).

Au LHC, on accède à la température maximale atteinte lors d'une collision de noyaux en analysant l'émission de photons par le plasma. Elle est comparable à celle d'un corps noir, et son intensité est proportionnelle à la puissance 4 de la température. On estime ainsi la température maximale du plasma, qui est un record de température produite par l'homme : 4000 milliards de degrés !

PLS

Quelles sont les autres caractéristiques du plasma que l'on observe ?

F.G. : Le « jet quenching » est un phénomène que nous voyons très bien dans les données. Quand une paire quark-antiquark se forme dans le plasma, les particules s'extraient de celui-ci dans des directions opposées et créent des jets de particules. Si la paire se forme près du bord de la goutte de plasma, l'une des particules traverse une grande distance dans le plasma avant de sortir et perd plus d'énergie en chemin que l'autre. Cette asymétrie, le « jet quenching », peut être mise en évidence en analysant l'énergie des jets.

Ce phénomène est spécifique au plasma quarks-gluons et ne s'observe pas dans une collision proton-proton. Un autre effet caractéristique de la production d'un plasma est celui de la corrélation entre les angles d'émission des particules. La distribution angulaire dépend de la façon dont les noyaux sont entrés en collision : un léger décalage se répercute sur les corrélations entre les directions des particules émises. Cette observation dans des collisions proton-noyau au LHC a permis de conclure que l'on a peut-être formé des gouttes de plasma quarks-gluons malgré une zone d'interaction bien plus petite.

PLS

C'était une surprise ?

F.G. : Il y a quelques années, nous pensions que ces collisions ne formeraient pas de plasma. Or en 2013, au LHC, nous avons observé dans ces collisions proton-noyau des signatures similaires à celles que l'on attribue au plasma quarks-gluons. Sur cet état de la matière, nous avons encore beaucoup à apprendre !

Propos recueillis par Sean BAILLY

Vers la reconstruction de la moelle épinière

Alain Privat et Florence Perrin

La rééducation n'est plus l'unique horizon des personnes paralysées. On comprend mieux aujourd'hui pourquoi une moelle épinière lésée ne se répare pas spontanément et l'on sait mieux comment favoriser sa régénération.

En octobre 2014, Darek Fidyka a fait la une de nombreux médias. Paralysé des membres inférieurs jusqu'à la poitrine à la suite d'une agression au couteau, ce Polonais de 40 ans a recouvré un usage partiel de ses jambes après une transplantation de cellules dans la lésion de sa moelle épinière. Pawel Tabakow, de l'université médicale de Wroclaw, et ses collègues ont ôté la cicatrice qui s'était formée autour de la lésion et ont introduit une population de cellules – des cellules olfactives engainantes – cultivées à partir d'un bulbe olfactif prélevé sur le patient. Après 21 mois d'entraînement intensif, Darek Fidyka a retrouvé des sensations et est à nouveau capable de mouvements volontaires des jambes.

On ne peut être sûr que ce succès soit le fruit de la transplantation : l'homme a suivi un entraînement intensif avant et après l'opération, et chaque étape du protocole opératoire a pu influencer sur le résultat. Pour le confirmer, il faudrait une étude clinique sur plusieurs patients, notamment des patients contrôles qui suivraient le même programme, mais sans transplantation. Néanmoins, ces travaux sont révélateurs des progrès réalisés dans la

L'ESSENTIEL

■ La France compte 40 000 paraplégiques et tétraplégiques.

La plupart de leurs paralysies résultent d'accidents qui ont lésé la moelle épinière.

■ On a longtemps cru qu'il était impossible de réparer une moelle épinière abîmée et que le seul traitement possible était la rééducation fonctionnelle.

■ Mais depuis une vingtaine d'années, grâce à une meilleure compréhension des mécanismes en jeu, d'autres pistes se dessinent : régénération neuronale, thérapie cellulaire, robotique...

© Shutterstock.com/Morphart Creation, Seamartini Graphics, LHF Graphics

compréhension de la moelle épinière et de ses lésions. Aujourd'hui, la rééducation fonctionnelle n'est plus la seule stratégie envisagée pour traiter ces pathologies. Régénération neuronale, thérapie cellulaire, robotique, les pistes explorées sont nombreuses et prometteuses.

Une lésion sur deux due à un accident de la route

Selon la Haute Autorité de santé, la France compte environ 40 000 paraplégiques et tétraplégiques, respectivement paralysés des membres inférieurs et des quatre membres. En 2013, une étude épidémiologique a répertorié l'ensemble des données publiées entre 1950 et 2012 sur les lésions de la moelle épinière (dites médullaires), responsables de telles paralysies dans le monde. Elle évalue le nombre de nouveaux cas par an – l'incidence annuelle de ces lésions – entre 8 (Espagne) et 246 (Chine) par million d'habitants selon les pays (20 en France), et le nombre total de cas répertoriés entre 236 et 1 298 par million (600 en France). L'incidence annuelle varie assez peu depuis un demi-siècle. En revanche, le nombre total de cas augmente régulièrement depuis vingt ans, en raison des