

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.

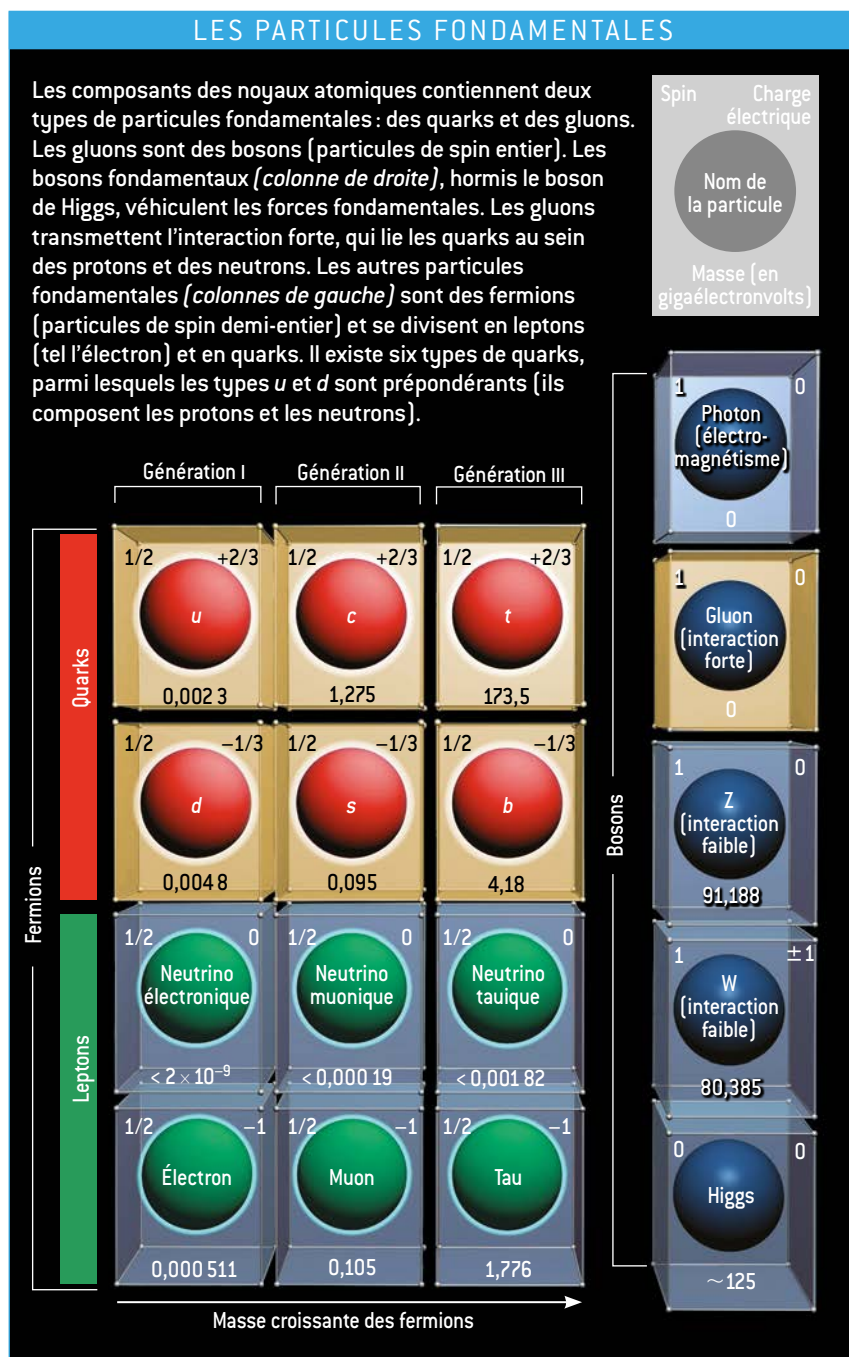
On entend souvent dire que le mécanisme de Higgs est à l'origine de la masse de toute la matière visible dans l'Univers, mais cette affirmation est incorrecte. Cette matière est constituée d'atomes, donc principalement de protons et de neutrons. Or la masse des quarks qui les composent ne représente 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.