

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

