

Pourquoi le neutron est-il plus lourd que le proton ?

Le fait que le neutron est légèrement plus massif que le proton est essentiel pour comprendre le processus d'assemblage des noyaux atomiques dans l'univers primordial, ainsi que nombre de leurs propriétés observées aujourd'hui. À l'aide de superordinateurs parmi les plus performants au monde, une équipe de physiciens principalement de France, d'Allemagne et de Hongrie, a calculé la différence de masse minime entre neutrons et protons et a confirmé que celle-ci résulte d'une compensation partielle entre effets de masse des quarks et effets électromagnétiques.

Bien qu'ils se distinguent par leur charge électrique, le neutron, neutre comme son nom l'indique, et le proton, positif, sont quasiment jumeaux. Ces deux particules qui composent les noyaux atomiques partagent de très nombreuses propriétés physiques. Leur masse, notamment, est quasiment identique, avec un neutron plus massif que le proton de seulement un dixième et demi de pour cent. Cette légère différence est cruciale, autant pour assurer la stabilité des éléments chimiques que pour déterminer l'abondance relative de ces éléments dans l'univers. Elle résulte d'une compensation partielle entre deux effets contraires : d'une part, la masse associée à l'énergie du champ électrique créé par le proton, alourdit ce dernier par rapport au neutron, mais d'autre part les quarks qui composent le neutron sont en moyenne plus lourds que ceux qui composent le proton. Tout dépend de l'importance relative de ces deux effets, qui n'avaient jusqu'à présent pas été calculés de façon fiable à partir du modèle standard de la physique des particules. C'est ce qu'ont fait, pour la première fois, des physiciens principalement du Centre de Physique Théorique de Marseille (CNRS / Aix-Marseille Univ.), de la Bergische Universität Wuppertal et de l'Université Eötvös de Budapest. Ce calcul, réalisé à l'aide des superordinateurs du Forschungszentrum Jülich et de l'Institut du développement et des ressources en informatique scientifique - IDRIS (CNRS), parmi les plus performants au monde, leur a permis de confirmer quantitativement que les effets de masse des quarks l'emportent dans ce cas sur les effets électromagnétiques. L'équipe a également étudié ces effets sur les masses d'autres particules constituées de quarks, et a fait trois prédictions qui doivent encore être vérifiées avec une précision équivalente par l'expérience. Ce travail est publié dans la revue *Science*.

Un défi conceptuel, algorithmique et technologique

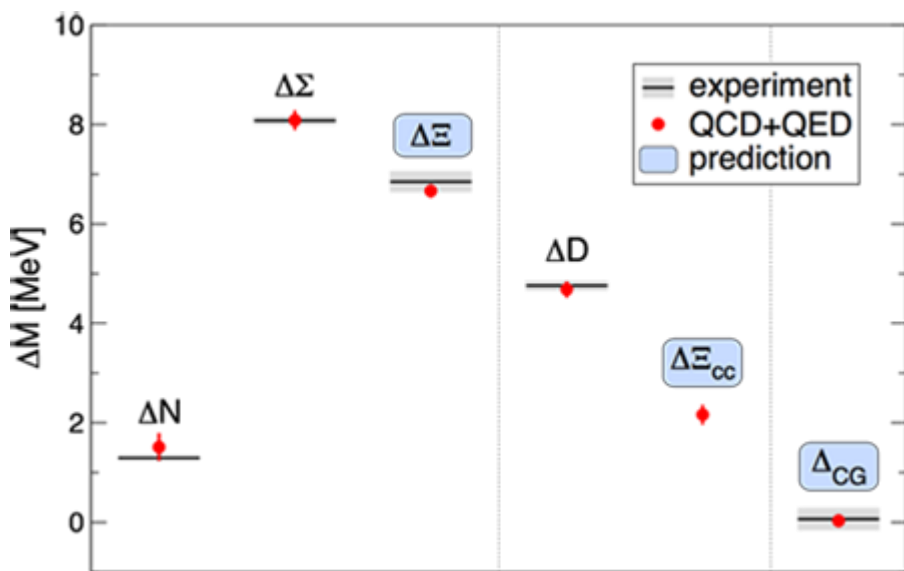
En 2008, cette même collaboration internationale avait déjà calculé numériquement la masse du proton et du neutron. Cela avait contribué à montrer que cette masse résulte essentiellement de l'énergie cinétique et d'interaction entre les quarks qui composent proton et neutron, la masse des quarks ne contribuant tout au plus que de l'ordre d'1 % du total. Ce résultat utilisait des simulations numériques en chromodynamique quantique (QCD), la composante du modèle standard qui décrit l'interaction forte. Avec une précision de 4 %, ce travail ne donnait en revanche aucune indication sur l'origine de la différence de masse entre proton et neutron, laquelle est 30 fois plus petite que ces 4 %. Le défi relevé par les chercheurs était donc de taille et a nécessité d'importantes avancées conceptuelles, algorithmiques et technologiques.

Tout d'abord, du point de vue théorique, les physiciens ont dû prendre en compte la masse associée à l'énergie du champ électrique du proton, et donc pour cela inclure dans leurs calculs l'électrodynamique quantique qui avait pu être négligée dans les calculs de 2008. Cela a demandé de comprendre comment formuler cette théorie dans un espace-temps fini, tel que celui qui est utilisé dans les calculs numériques, comment contrôler les distorsions importantes induites par les dimensions finies de cet espace-temps et comment simuler efficacement cette nouvelle interaction. Il leur a également fallu traiter indépendamment les quarks *up* et *down*. D'un point de vue numérique, les chercheurs ont dû implémenter de nouveaux algorithmes pour travailler dans des volumes d'espace-temps jusqu'à 16 fois plus grands et avec une statistique de l'ordre de 1000 fois supérieure à ceux de 2008. Ils ont aussi dû développer de nouvelles méthodes d'analyse des résultats bruts des simulations. Les physiciens ont enfin bénéficié d'une nouvelle génération de supercalculateurs capables de millions de milliards d'opérations par seconde.

Une dernière astuce a permis aux chercheurs d'obtenir ce résultat. En se concentrant sur ce qui différencie proton et neutron, plutôt que sur ce qu'ils ont en commun, ils ont pu calculer la différence de masse avec une incertitude de

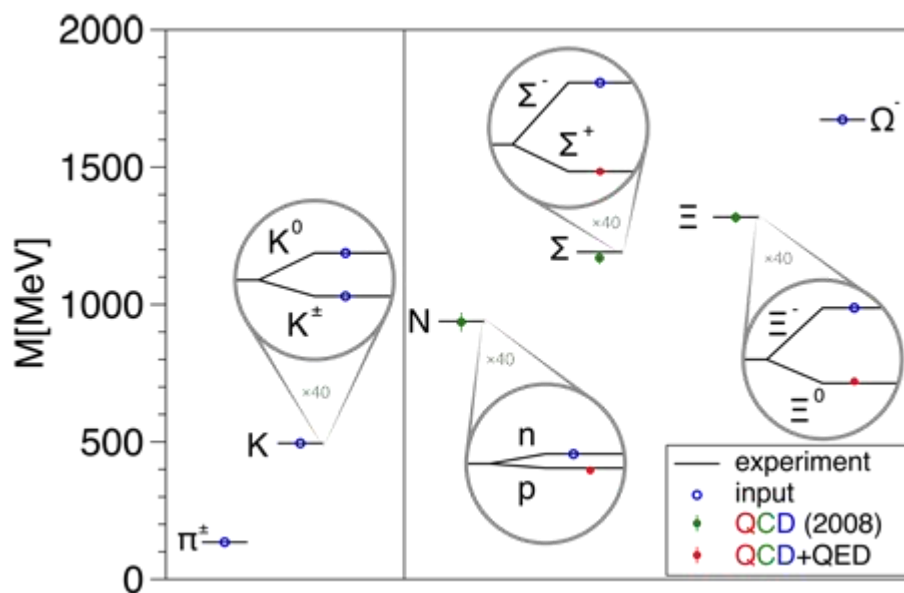
seulement 20 %. Cela correspondrait à une précision, sur chacune des deux masses prises individuellement, 150 fois supérieure à celle de 2008.

À plus long terme, ce travail ouvre la porte à une nouvelle génération de calculs des propriétés de quarks et de hadrons, potentiellement dix fois plus précis que les calculs actuels, dont la précision est de l'ordre du pour cent. Une telle amélioration est nécessaire pour continuer à tester le modèle standard de la physique des particules, et peut-être découvrir une nouvelle physique fondamentale, à l'aide d'expériences de plus en plus précises impliquant des quarks au sein de hadrons.



Différences de masse entre paires de hadrons, particules ici constituées de quarks et/ou d'antiquarks

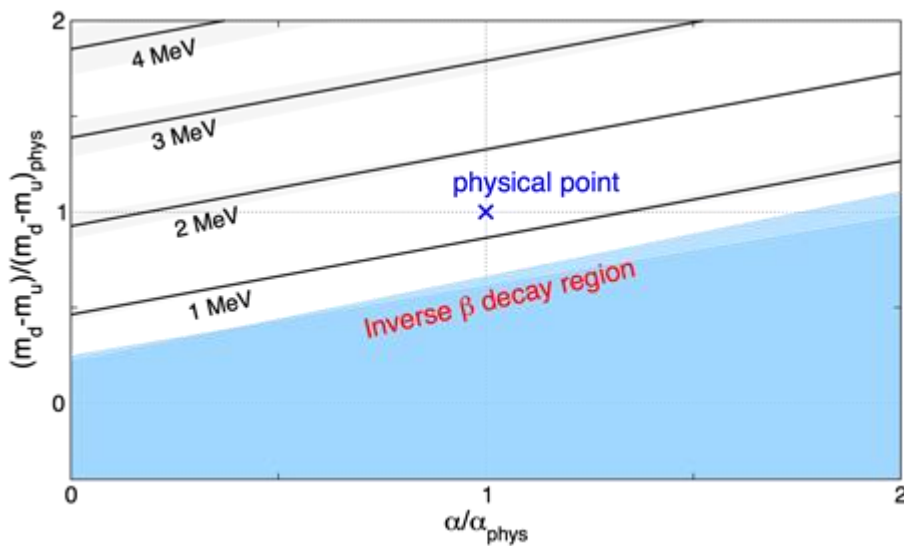
En l'absence de l'interaction électromagnétique et pour des quarks *up* et *down* de masse égale, ces différences seraient nulles. Le fait qu'elles ne le sont pas est la conséquence de ces effets. Les points rouges représentent les résultats des calculs, avec leurs barres d'erreur. Les traits horizontaux noirs, entourés de bandes grises, sont les mesures expérimentales et leurs incertitudes. Les légendes entourées de bleu représentent des prédictions qui doivent encore être vérifiées avec une précision équivalente par l'expérience. La différence de masse neutron-proton est dénotée ΔN et se trouve à gauche. Les unités utilisées sont les méga-électron-volts (MeV). La masse d'un atome d'hydrogène est environ 1000 MeV.



Comparaison de résultats de 2008 avec quelques un de ceux obtenus ici pour des masses de hadrons légers

Les hadrons légers sont des particules constituées de quarks et/ou d'antiquarks, *up*, *down* ou *strange*. En 2008, seulement la masse moyenne d'une paire de hadrons d'un même multiplet, dit d'isospin, avait pu être calculée. Ces résultats, avec leurs incertitudes, correspondent aux points verts, et les traits horizontaux noirs qui les traversent représentent les mesures expérimentales. Pour visualiser les résultats du nouveau calcul il faut imaginer regarder la figure sous un microscope qui grossit 40 fois. On verrait alors que les traits horizontaux noirs se décomposent en deux nouveaux traits qui indiquent les valeurs expérimentales des masses des deux hadrons d'une même paire. Sous ce

microscope, les points rouges correspondent aux résultats des nouveaux calculs. Le neutron et le proton sont indiqués par n et p, respectivement. Les points ouverts bleus indiquent que les masses de hadrons correspondantes ont été utilisées pour fixer l'un des six paramètres de la théorie fondamentale employée dans le nouveau calcul, ou l'une des deux masses d'une paire (seule la différence de masse est calculée ici). Les unités utilisées sont les méga-électron-volts (MeV). La masse d'un atome d'hydrogène est environ 1000 MeV.



Cette figure montre comment la différence de masse entre neutron et proton dépend de deux combinaisons de paramètres fondamentaux

Sur l'axe horizontal, la constante de structure fine, proportionnelle au carré de l'unité de charge électrique élémentaire, est variée de zéro à deux fois sa valeur mesurée. Le long de l'axe vertical, c'est la différence de masse entre quarks down et up qui est variée. La croix bleue indique le point correspondant à notre univers. Les courbes noires correspondent à des contours de différence de masse neutron-proton constante. Elles ont chacune une légende indiquant la valeur de la différence de masse neutron-proton à laquelle elle se rapporte. Tout point dans la région bleue correspondrait à un univers très différent du nôtre, dans lequel le proton pourrait se désintégrer en neutron par l'interaction faible.

En savoir plus

Ab initio calculation of the neutron-proton mass difference, Sz. Borsanyi, S. Durr, Z. Fodor, C. Hoelbling, S. D. Katz, S. Krieg, L. Lellouch, T. Lippert, A. Portelli, K. K. Szabo, B. C. Toth. *Science*, 27 mars 2015. DOI : 10.1126/science.1257050

Retrouvez l'article sur la [base d'archives ouvertes arXiv](#)