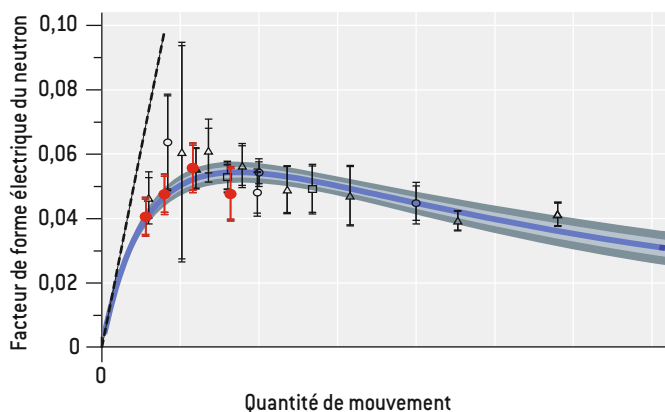
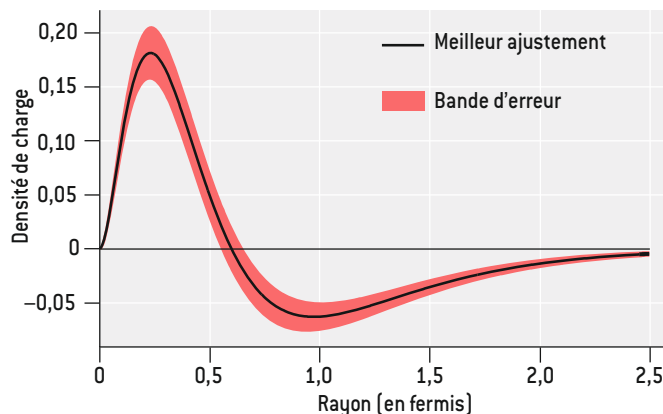
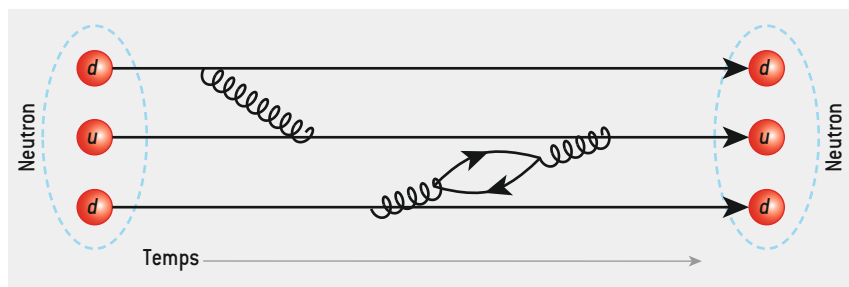




5. DIFFÉRENTES EXPÉRIENCES ont permis d'évaluer le facteur de forme électrique du neutron, une mesure de la probabilité qu'un électron accéléré soit diffusé par un neutron en raison de leur interaction électrique (à gauche). Quand l'électron a une quantité de mouvement faible, l'absence de charge du neutron fait disparaître la diffusion électrique. Quand la quantité de mouvement est élevée, l'électron traverse le neu-



tron sans être perturbé. Mais pour des quantités de mouvement intermédiaires, l'interaction a lieu. Elle indique que la périphérie du neutron porte une charge légèrement négative : quand les données concernant le facteur de forme électrique sont converties en mesures de position, on constate que le centre du neutron porte une charge positive et sa périphérie une charge négative (à droite).



6. UN NEUTRON CONTIENT TROIS QUARKS de valence (en rouge), deux quarks *d* et un quark *u*, décrits ici sur un diagramme chronologique. Un gluon (spirale) est créé par un quark *d*, puis absorbé par le quark *u*. Plus tard, l'autre quark *down* émet un gluon qui se scinde en une paire quark-antiquark, laquelle se recombine en gluon qui est lui aussi absorbé.

L'AUTEUR



Timothy SMITH, physicien à l'Université de Dartmouth, aux États-Unis, a dirigé le développement logiciel du projet BLAST (Bates Large Acceptance Spectrometer Toroid, pour Spectromètre toroïdal à large acceptation de Bates), à l'Institut de technologie du Massachusetts.

Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.

concilier, il nous faut revenir à notre représentation du neutron et du pion en faisant intervenir les quarks.

Ainsi, le neutron est constitué de trois quarks de valence, ainsi que de gluons et de paires quark-antiquark éphémères. Jusqu'à présent, nous ne nous sommes intéressés qu'aux trois quarks de valence : il nous faut faire intervenir les autres. Observons comment les quarks *uud* d'un neutron évoluent au cours du temps (voir la figure 6). Au bout d'un certain temps, un quark *d* émet un gluon, qui est absorbé par un quark *u*. Plus tard, un autre gluon est émis ; il donne alors une paire quark-antiquark, qui se recombine en un autre gluon, absorbé à son tour par un des quarks de valence.

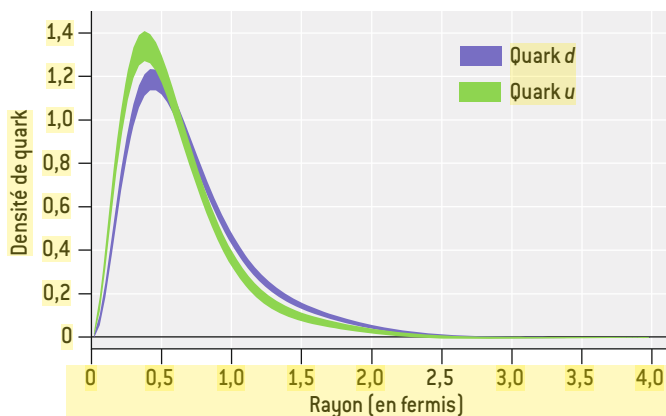
Les quarks et antiquarks éphémères constituent une mer de quarks. Ces quarks de la mer sont aussi réels que les quarks de valence : si un antiquark se combinait avec un quark de valence, le système serait en équilibre. Cette paire quark-antiquark pourrait former une nouvelle particule, tel

un pion, au moins pour un bref instant. Le pion formé serait alors réabsorbé dans le nuage de pions du neutron, où il pourrait être échangé avec un nucléon voisin, puis absorbé en tant que médiateur de l'interaction nucléaire forte. Ainsi, le nuage de pions est lié aux gluons et à la mer de quarks, et nous renseigne sur leur activité.

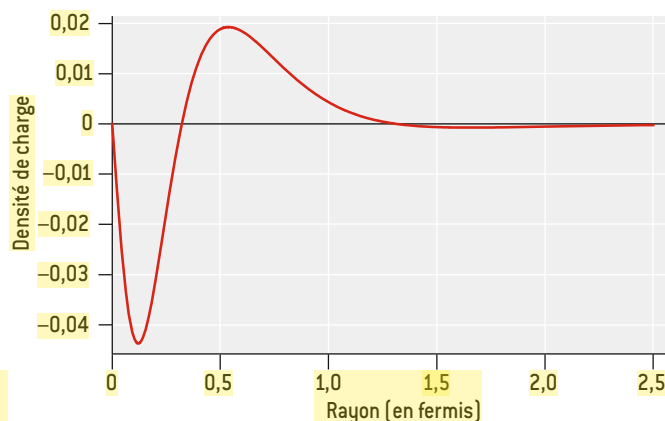
Si la façon la plus simple d'associer un quark et un antiquark est de former un pion, ce n'est pas la seule. Lorsque les spins de la paire quark-antiquark sont alignés, ils forment une particule plus massive, un méson ρ ou un méson ω , ou peut-être un méson plus exotique, tel le méson ϕ . Ainsi, il serait plus correct de parler d'un nuage de mésons, au lieu d'un nuage de pions, entourant le neutron.

Un cœur très relatif

Que se passe-t-il à l'intérieur du nuage, à une distance inférieure à un fermi, ce qui est normalement considéré comme la frontière d'un nucléon ? Le quark *u* semble plus près du centre, avec un rayon d'environ 0,35 fermi, et les quarks *d* en sont plus éloignés, à environ 0,5 fermi. On aboutit alors, par la transformée de Fourier du facteur de forme électrique, à une description du neutron considérée par certains physiciens comme notre meilleure représentation actuelle : un nuage de mésons, une surface de quarks *d* et un cœur de quark *u*. Mais ce « portrait », pour instructif et attrayant qu'il soit, n'en présente pas moins quelques difficultés. Ce que nous voulions vraiment savoir, c'est à quoi ressemble un



7. AU SEIN MÊME DU NEUTRON, les données indiquent que le quark u est près du centre, alors que les quarks d se situent davantage vers l'extérieur (à gauche). Mais cette représentation ne montre pas le neutron au repos, avant qu'il n'ait été sondé par le faisceau. Une procédure différente consiste à étudier le neutron dans un référentiel dans lequel il se déplacerait à une vitesse proche de celle de la lumière. Cependant, cette procé-



dure modifie le « centre » du neutron, qui est alors défini comme la zone de plus grande quantité de mouvement, et non plus comme le centre de masse. Dans ce référentiel nommé IMF, le neutron semble doté d'un cœur négatif plutôt que positif (à droite). Cette réponse est correcte, mais elle ne correspond pas à la question que les physiciens se posaient au départ : quelle est la structure du neutron au repos ?

neutron « normal », au repos. Or la transformée de Fourier est à mi-chemin entre le neutron de départ, au repos, et le neutron d'arrivée, après la collision. C'est un peu comme prendre une photo au flash, et s'apercevoir ensuite que les personnes ont les yeux rouges, ou ont sursauté à cause du flash. Nous aimerions penser que notre image est celle d'un neutron au naturel, mais c'est en fait celle d'un neutron subissant une exploration invasive, qui le perturbe.

Ces dernières années, les physiciens ont donc mis au point une procédure différente. Elle consiste à examiner le neutron dans un référentiel de moment infini (IMF pour *Infinite Momentum Frame*), ce qui équivaut à étudier le neutron comme s'il se propageait pratiquement à la vitesse de la lumière. Cette procédure est compatible avec la théorie de la relativité, elle est mathématiquement correcte, mais elle ne permet pas vraiment de répondre à notre question : à quoi ressemble un neutron au repos ? Le facteur de forme électrique comme le facteur de forme magnétique interviennent dans cette procédure, car ils se mélangent à ces vitesses. Étant donné que le facteur de forme magnétique est négatif, la distribution de charge résultante est modifiée (voir la figure 7). Dans ces conditions, le cœur du neutron est chargé négativement, un résultat qui gêne de nombreux physiciens.

En première analyse, on définit le cœur du neutron comme le centre de masse des trois quarks de valence. Ils sont tous en orbite autour d'un même point, situé quelque part au milieu du triangle qu'ils forment. Dans le référentiel IMF, le neutron a un mouve-

ment relativiste, à la vitesse de la lumière, si bien qu'il s'aplatit dans la direction du mouvement. Dans cette situation, la masse joue un rôle beaucoup moins important que la quantité de mouvement ; le centre, correspondant alors à la plus grande quantité de mouvement, est imposé par les quarks d . Puisque les quarks d sont négatifs, le centre est également négatif. Le modèle IMF est cohérent et correct, mais il répond à une question encore un peu différente. Le « centre », tel qu'il apparaît dans ce modèle, n'est pas le centre d'un neutron immobile, tel que nous voulions l'observer ; cela explique pourquoi les deux modèles donnent des résultats contradictoires.

Une vision encore floue

À quoi ressemble un neutron ? Ce n'est pas un minuscule caillou inerte, il est dynamique, constamment en train d'éjecter et d'absorber des mésons de toutes sortes. Sa surface est dominée par des quarks d négatifs. L'intérieur abrite un quark u positif. Son cœur, soumis à d'intenses effets relativistes, serait dominé par les quarks d .

Quelle sera la suite du programme ? Il reste beaucoup à apprendre sur la structure du neutron et la façon dont ses constituants lui confèrent son spin. Le neutron, en perpétuel renouvellement, crée et absorbe sans cesse des mésons. En précisant la nature et le comportement de ces particules, peut-être finirons-nous par retrouver le modèle élaboré par Heisenberg et Fermi dans les années 1940... ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

C. Crawford *et al.*, The role of mesons in the electromagnetic form factors of the nucleon, *Physical Review C.*, vol. 82, n° 4, 045211, 2010.

D. Hassel *et al.*, The BLAST experiment, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A*, vol. 603, n° 3, pp. 247-262, 2009.

T. P. Smith, *Hidden Worlds: Hunting for Quarks in Ordinary Matter*, Princeton University Press, 2002.

R. Kranner, La vie intérieure du proton, *Pour la Science*, n° 284, juin 2001.

R. Hofstadter *et al.*, Electromagnetic structure of the proton and neutron, *Review of Modern Physics*, vol. 30, pp. 482-497, 1958.

J. Chadwick, The existence of a neutron, *Proceedings of the Royal Society A*, vol. 136, pp. 692-708, 1932.

Les surprises de l'évolution humaine

Jonathan Pritchard

De nouvelles analyses génétiques suggèrent que l'évolution récente de l'homme a suivi un cours plus lent que celui prévu par les biologistes.

Il y a quelques milliers d'années, des hommes venant de Chine ont accédé pour la première fois au Plateau tibétain, vaste étendue de steppes qui culmine à quelque 4 200 mètres au-dessus du niveau de la mer, au Nord de l'Himalaya. Ces pionniers ont colonisé cet écosystème nouveau pour eux, mais ils n'étaient pas adaptés à la faible concentration d'oxygène régnant à cette altitude, qui devait entraîner un mal des montagnes chronique et une forte mortalité infantile.

En 2010, plusieurs études génétiques ont identifié des variants de gènes impliqués dans l'utilisation de l'oxygène. Ces variants, fréquents chez les Tibétains, mais rares dans les autres groupes humains, expliqueraient l'adaptation des pionniers aux rudes conditions du Plateau tibétain. C'est là un exemple spectaculaire d'une adaptation biologique rapide de l'homme à de nouvelles conditions environnementales, dans un passé récent. Une étude a estimé que l'un de ces variants s'est répandu chez près de 90 pour cent de la population tibétaine en moins de 3 000 ans

– un très bref instant à l'échelle des temps de l'évolution.

Le passage aux milieux d'altitude n'est qu'une des contraintes auxquelles notre espèce, *Homo sapiens*, a dû faire face quand elle a migré des chaudes savanes africaines vers les toundras glaciales, les forêts tropicales humides et les déserts brûlés par le soleil, il y a peut-être 60 000 ans (les estimations vont de 50 000 ans à 100 000 ans).

L'adaptation génétique

Bien sûr, une grande part de l'adaptation de l'homme à son milieu de vie a été technique, par exemple en luttant contre le froid par le feu et les vêtements. Mais les techniques n'ont pu suffire à l'adapter au manque d'oxygène en altitude, aux ravages des maladies infectieuses, au rayonnement ultraviolet et à d'autres contraintes de l'environnement. L'adaptation s'est aussi produite par le jeu de variations génétiques aléatoires qui ont ensuite été sélectionnées par l'environne-

ment. Il est donc raisonnable de s'attendre à ce que nos génomes révèlent des preuves de mutations génétiques que la sélection naturelle a répandues dans différentes populations : les individus porteurs des mutations protectrices ont, plus que les autres, des enfants en bonne santé qui deviennent à leur tour des adultes capables de se reproduire.

En 2004, mes collègues et moi avons entrepris de rechercher les empreintes des changements environnementaux dans le génome humain. Nous voulions comprendre comment les hommes ont évolué depuis que leurs ancêtres sont sortis d'Afrique. Dans quelle mesure les populations de diverses régions du monde diffèrent-elles génétiquement sous l'action de la sélection naturelle, due à différentes pressions environnementales ? En quelles proportions ces différences découlent-elles d'autres influences que la sélection naturelle ? Grâce aux progrès des techniques permettant d'étudier les variations ponctuelles des génomes, nous avons commencé à aborder ces questions.