

tron du faisceau, qui traverse la cible deux millions de fois par seconde, ne rencontre un deuteron qu'après une vingtaine de minutes. Il aura alors parcouru dans l'anneau de stockage une distance équivalente au diamètre de l'orbite de la Terre!

Seuls quelques milliers d'électrons diffusent donc sur la cible chaque seconde. Parce que nous voulons détecter les particules éjectées dans une large gamme d'angles et d'énergies, nous avons placé le détecteur tout autour de la cible. Les particules diffusées passent dans un champ magnétique intense qui permet de mesurer leur énergie: elles sont d'autant plus déviées que leur quantité de mouvement est faible.

Pour résumer, BLAST est un détecteur enroulé autour d'une cible polarisée de neutrons, placé dans un faisceau d'électrons fortement polarisé. Ce faisceau de 850 mégaelectronvolts a une intensité atteignant 200 microampères. Si l'énergie n'est pas très élevée, l'intensité est impressionnante, similaire à celle du LHC, le grand collisionneur de hadrons du CERN. Le dispositif a la structure d'un oignon, le détecteur étant constitué de nombreuses couches entourant la cible placée en son centre.

Quand un électron heurte un deuteron, il est diffusé, avec un proton ou un neutron et parfois un pion. La particule pénètre d'abord dans une chambre remplie de centaines de fils sensibles à une particule passant à proximité: on détecte ainsi sa position. La chambre à fils, contenant de nombreuses couches, est plongée dans un champ magnétique, de telle sorte que nous pouvons utiliser les signaux des fils de détection pour déterminer la trajectoire de la particule et sa quantité de mouvement.

Ensuite, la particule traverse plusieurs épaisseurs d'un scintillateur qui émet de la lumière en réponse au rayonnement ionisant de la particule et indique le temps d'arrivée de la particule avec une précision de 300 picosecondes (10^{-9} seconde). Dans environ dix pour cent des cas, les scintillateurs arrêtent également les neutrons: on peut alors évaluer leur énergie.

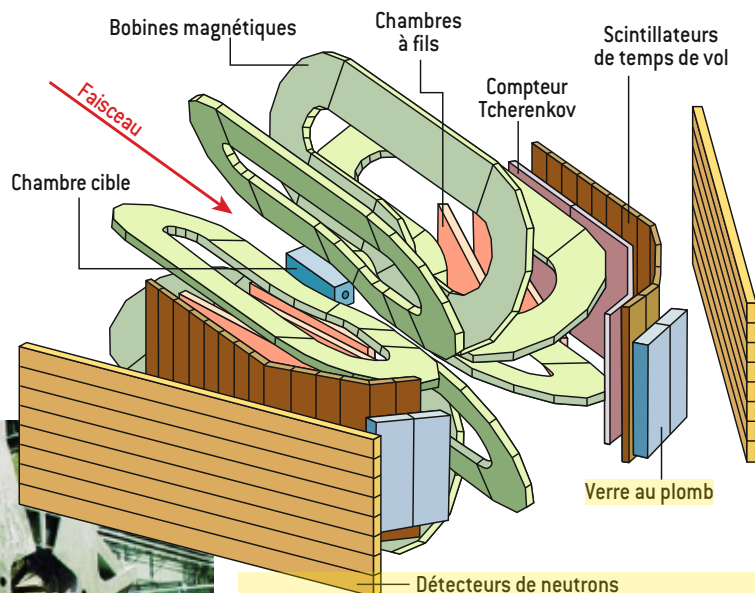
Le neutron n'est pas si neutre

Après quelques années de conception, la construction de BLAST a démarré en 1999. De 2003 à 2005, l'expérience a enregistré des données presque en continu. Les résultats de l'expérience sont parmi les meilleures mesures au monde, mais seulement dans une plage limitée de quantité de mouvement. Il a donc fallu compléter ces mesures avec celles d'autres laboratoires, en particulier de l'Université Johannes Gutenberg de Mayence, en Allemagne, et de l'accélérateur Thomas Jefferson en Virginie.

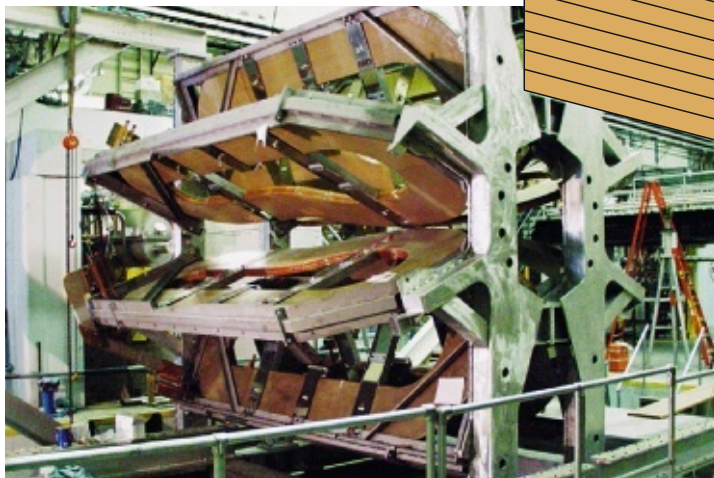
Qu'avons-nous appris de toutes ces expériences? Avant tout, que le facteur de forme électrique du neutron n'est pas nul. Ce facteur est relié à la probabilité que

le neutron puisse absorber une certaine fraction de la quantité de mouvement transmise par l'électron lors de l'impact tout en restant un simple neutron. En représentant le facteur de forme électrique en fonction de la quantité de mouvement de l'électron, on voit qu'un électron ayant une faible quantité de mouvement interagit avec la particule dans sa globalité: cette mesure à basse résolution indique un neutron de charge globale nulle. Quant à un électron beaucoup plus énergétique, il peut traverser le neutron et ainsi sonder des échelles beaucoup plus petites.

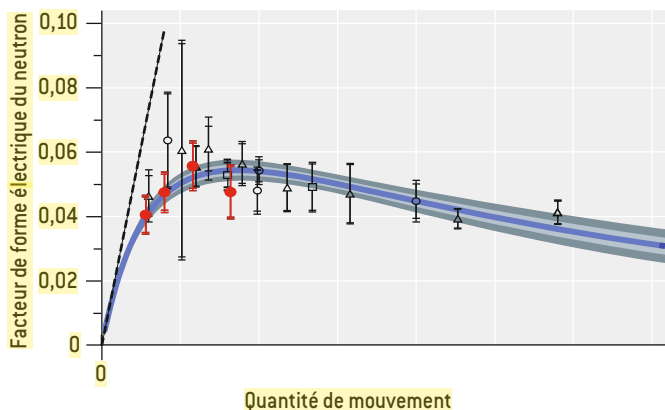
En physique, on interprète habituellement le facteur de forme comme la transformée de Fourier de la densité de charge électrique de la particule (la transformée de Fourier relie quantité de mouvement et position). On peut ainsi transformer la courbe donnant le facteur de forme pour obtenir la densité de charge du neutron: le cœur de la particule est positif et sa périphérie négative (voir la figure 5). Différents modèles ont été introduits il y a une dizaine d'années, tels le modèle du nuage de pions ou celui de répulsion des spins de quark. On confirme aujourd'hui que ces deux modèles semblent corrects. Pour les



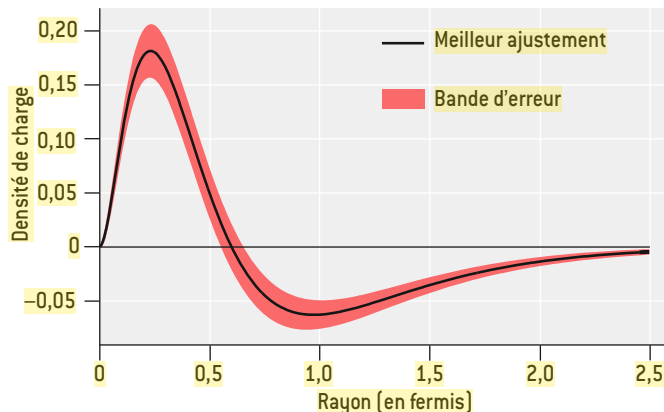
4. LE DÉTECTEUR DE L'EXPÉRIENCE BLAST est constitué de plusieurs couches de capteurs entourant la cible centrale. Les bobines magnétiques [ci-contre] permettent de déterminer la quantité de mouvement des particules éjectées, et les chambres à fils détectent la position et la trajectoire d'une particule. Les compteurs Tcherenkov distinguent les pions des électrons. Les scintillateurs de temps de vol, des couches de plastique émettant de la lumière en réponse à un rayonnement ionisant, déterminent avec précision le moment où la particule a traversé le détecteur. Les scintillateurs peuvent parfois arrêter les particules et enregistrer alors leur quantité d'énergie.



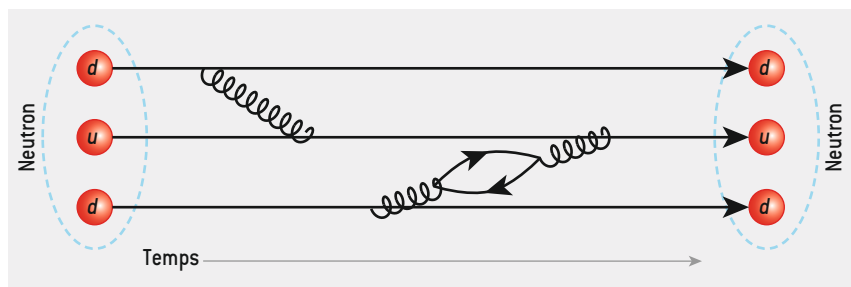
Slim Sobczak / MIT - Centre Bates



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