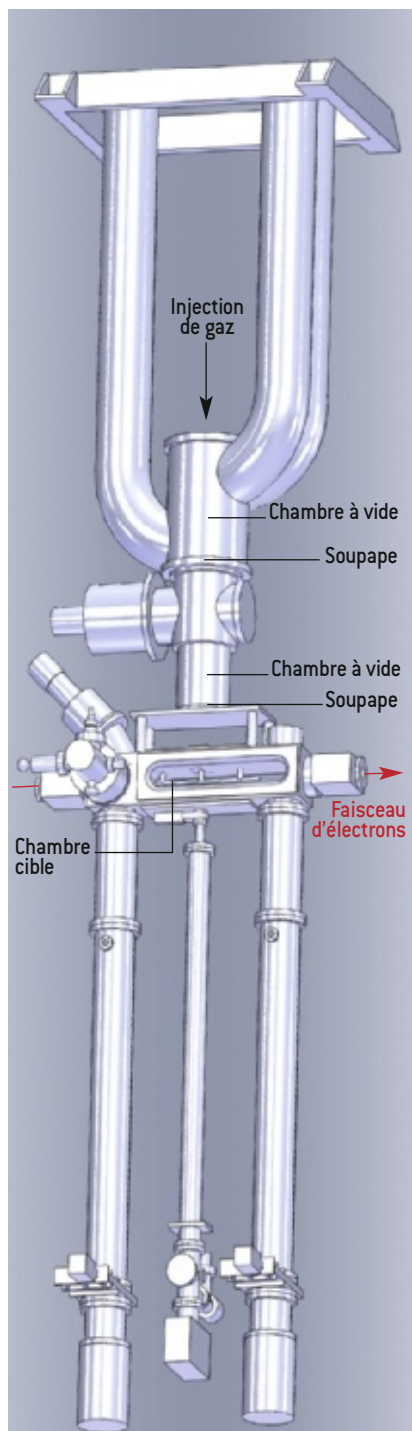


particules identiques, telles que des quarks ou des électrons, sont présentes au même endroit, leurs propriétés globales doivent être différentes, plus exactement antisymétriques. Examinons par exemple les deux quarks *d* du neutron. Dans le modèle CQM, leurs orbites sont symétriques (facteur associé: +1); chaque quark portant une couleur différente, leurs charges de couleur sont antisymétriques (-1). Ainsi, les spins portés par les quarks doivent être symétriques (+1), c'est-à-dire parallèles, afin que le total soit antisymétrique $[(+1) \times (-1) \times (+1) = -1]$. Donc dans ce modèle simplifié, l'interaction répulsive des spins parallèles déforme légèrement les orbites des quarks.

Pour le proton, cette déformation orbitale se traduit par une légère modification de la distribution de charge. Mais pour le neutron, l'effet est bien plus prononcé. Les quarks *d* se situent un peu plus loin du centre que le quark *u*: les charges portées par les quarks ne sont pas réparties de façon uniforme, et ne s'annulent pas exactement quelle que soit la distance du centre. Si ce modèle est correct, nous devrions nous attendre à ce que le neutron soit légèrement négatif en périphérie, et légèrement positif à proximité du centre. Cet écart par rapport à une densité de charge uniformément nulle est ce qui rend le neutron si singulier. Si l'on réussissait à mesurer une distribution de densité de charge non nulle, cela nous renseignerait sur l'équilibre entre les effets des spins et ceux de la chromodynamique quantique, une information difficile à obtenir pour le proton. C'est ce qui rend le neutron particulièrement intéressant.

Regard neuf sur le neutron

De nouvelles techniques récemment mises au point améliorent la sensibilité des appareils de mesure, notamment pour la densité de charge et le facteur de forme électrique. Toutefois, la principale difficulté reste l'inexistence de cible de neutrons isolés. Les physiciens utilisent des faisceaux de neutrons, mais ils contiennent peu de neutrons: la probabilité pour des électrons d'être diffusés est extrêmement faible. Par conséquent, on utilise plutôt des cibles de deutérium. Un électron diffuse sur un noyau de deutérium lorsqu'il a heurté soit un proton, soit un neutron. Si l'on savait lequel, on n'aurait pas à soustraire les sections efficaces. Notre méthode



3. LA SOURCE DU FAISCEAU ATOMIQUE

de BLAST, qui produit le flux d'atomes de deutérium faisant office de cible, mesure environ quatre mètres de haut. Le deutérium gazeux est injecté par le haut et traverse des chambres à vide, séparées par des soupapes télécommandées. Des champs magnétiques variables polarisent le gaz qui pénètre dans la chambre cible située en bas, où il entre en collision avec le flux d'électrons issus de l'accélérateur de particules.

consiste à détecter non seulement l'électron issu de l'accélérateur, puis diffusé, mais également le neutron éjecté lors de la collision: ainsi, nous ne serons pas confrontés aux mêmes incertitudes qu'Hofstadter.

Une autre technique consiste à repenser la séparation des facteurs de forme électrique et magnétique. Celle-ci s'effectue en comparant les sections efficaces mesurées à différents angles et énergies. Cependant, les détecteurs ont des sensibilités qui dépendent de l'énergie et de l'angle, de sorte que les mesures et les calculs doivent être très précis, car les différences de section efficace sont très faibles.

Nous avons utilisé le fait que les orientations des spins de l'électron et du neutron apparaissent explicitement dans l'expression de la section efficace. Quand leurs spins sont parallèles, leurs facteurs de forme magnétique s'ajoutent à la section efficace; ce n'est pas le cas quand les spins sont antiparallèles ou perpendiculaires. Il est très difficile de modifier l'orientation des spins, autrement dit la polarisation du faisceau d'électrons et de la cible de neutrons, mais cela permet, en effectuant deux mesures pour différentes orientations relatives des spins, d'extraire soit le facteur de forme électrique, soit le facteur de forme magnétique.

Je me contenterai de décrire ici l'expérience BLAST (*Bates Large Acceptance Spectrometer Toroid*, Spectromètre toroïdal à large acceptance de Bates), à laquelle j'ai collaboré pendant près de 20 ans. Installée au Centre de l'accélérateur linéaire Bates de l'Institut de technologie du Massachusetts, MIT, près de Boston, cette expérience a rassemblé plus de 50 scientifiques, étudiants et ingénieurs issus d'une dizaine d'institutions.

Le Centre Bates a deux atouts. Son accélérateur produit un faisceau d'électrons polarisé à 66 pour cent; cela signifie que 83 pour cent des spins des électrons ont la même orientation. De plus, l'accélérateur est associé à un anneau de stockage: les électrons sont accumulés dans une boucle de 180 mètres, parcourant cet anneau un grand nombre de fois jusqu'à heurter un deutéron de la cible – un faisceau de deutérium gazeux polarisé (voir la figure 3). Les spins des atomes de deutérium sont préalablement alignés grâce à une série d'aimants et de cavités radiofréquence. Ce processus permet de former une cible contenant 70 billions (70×10^{12}) d'atomes par centimètre cube – une densité généralement considérée comme un bon vide. Un élec-

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 mégaélectronvolts 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.

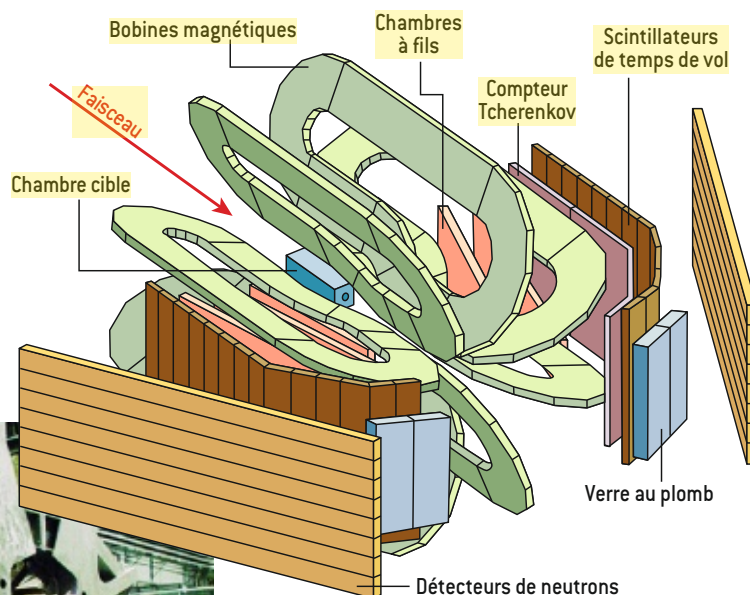
Le neutron n'est pas si neutre

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.

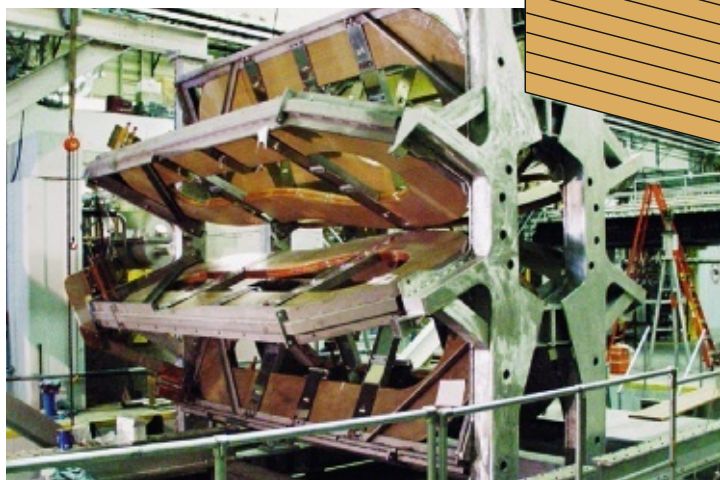
Qu'avons-nous appris de toutes ces expériences? Avant tout, que le facteur de forme électrique du neutron n'est pas nul. Ce facteur est relié à la probabilité que

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.



Stan Sobczak / MIT - Centre Bates