

de l'hydrogène. Le deutéron contient un proton et un neutron, assez peu liés. En mesurant la section efficace du deutéron et en soustrayant la section efficace du proton, on déduit la section efficace d'un neutron, à quelques ajustements près.

De cette façon, Hofstadter a également déterminé le rayon magnétique du neutron : 0,8 fermi, quasi identique à celui du proton. L'expérience donna un rayon électrique nul, résultat en accord avec le fait que le neutron est dépourvu de charge.

Notre vision de l'intérieur des protons, neutrons et autres pions a radicalement changé en 1964, année où Murray Gell-Mann, de l'Institut de technologie de Californie, et George Zweig, de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (le CERN), ont chacun proposé un modèle faisant intervenir de nouvelles particules : les quarks. Dans ce cadre, des particules lourdes (protons, neutrons, et d'autres particules exotiques), regroupées dans la famille des baryons, sont constituées de trois quarks. Les mésons (les particules de masses intermédiaires, tels les pions) sont formés d'une paire quark-antiquark (les antiquarks sont des particules d'antimatière qui ont les mêmes propriétés que les quarks, telles que leur charge ou leur couleur, mais de signe opposé). Les particules légères, comme les électrons, sont des particules fondamentales qui ne sont pas composées de quarks : ce sont des leptons.

Saveurs et couleurs des quarks

Il existe six types de quarks, six « saveurs ». La plupart des particules (en particulier les plus courantes, évoquées ici) sont composées des deux saveurs de quarks les plus légères : les quarks *u* ou *up* (haut) et *d* ou *down* (bas). Ce modèle, qui présente l'intérêt de pouvoir décrire une multitude de particules avec seulement six types de particules, est au cœur de la chromodynamique quantique. Le terme fait référence aux « couleurs » des quarks, une autre de leurs propriétés. C'est aujourd'hui la meilleure théorie pour décrire les particules à l'échelle du nucléon et en deçà.

Le proton est composé de deux quarks *u* et de un quark *d* (on le note souvent *uud*), tandis que le neutron est constitué de deux quarks *d* et de un quark *u* (noté *udd*). Ces quarks *u* et *d* sont dits quarks de valence : ils confèrent aux particules leurs propriétés, telle la charge. Des gluons

participent à la cohésion des quarks, comme le font les pions pour les nucléons : ils sont une sorte de glu à quarks. À l'intérieur du nucléon existe une mer de quarks où se forment d'éphémères paires quark-antiquark. Le tableau complet de la chromodynamique quantique, décri-

LES EFFETS CONJUGUÉS DES SPINS et des charges de couleur modifient les orbites des quarks, qui ne sont pas répartis uniformément dans le neutron.

vant ce qui se passe à l'intérieur du nucléon, est difficile à dresser ; c'est pourquoi les physiciens se concentrent sur les quarks de valence pour décrire les nucléons dans le cadre du modèle des quarks constituants (CQM pour *Constituent Quark Model*).

Étant donné que les protons ont une charge +1 (l'unité étant la charge du proton) et les neutrons une charge nulle, on en déduit que les quarks *u* ont une charge égale à +2/3 et les quarks *d* à -1/3. Dans le modèle CQM, les trois quarks formant le nucléon sont en orbite à la même distance du centre du groupe. Pour le proton, les rayons électrique et magnétique, qui dépendent des orbites des quarks *uud* et de leurs spins, sont en accord avec les résultats obtenus par Hofstadter. La situation du neutron est différente. Son rayon magnétique, déterminé par la position moyenne des quarks, est non nul. Quant à son rayon électrique, il devrait s'annuler : les charges des quarks *u* et *d* devraient s'équilibrer quelle que soit la distance au centre du groupe puisque la charge du neutron est nulle. Mais...

Les quarks, comme les électrons, portent un spin. Cette propriété quantique fait ressembler ces particules à des balles en rotation autour de leur axe. Assimilons le quark à une boule de billard : lorsque celle-ci touche la bande, elle est déviée, et cette déviation dépend de l'effet (du spin) que l'on donne à la boule (au quark). Les mathématiques décrivant l'interaction de boules en rotation aident à décrire les particules dotées d'un spin. L'orientation du spin a son importance : les particules interagissent différemment selon les orientations de leurs spins.

Les quarks ont également une *charge de couleur*. L'interaction forte qui en résulte est bien supérieure (de deux ordres de grandeur) à la force électrique qui s'exerce entre les charges électriques des quarks. D'après le principe d'exclusion de Pauli, si deux

Glossaire

✓ **Baryon** : les neutrons et les protons appartiennent à la famille des baryons, particules constituées de trois quarks.

✓ **Quarks** : ces particules sont des constituants élémentaires de la matière, et ne peuvent être scindées en particules plus petites.

✓ **Saveur** : les quarks se classent en six types, nommés saveurs. Les neutrons sont constitués de deux quarks *d* et d'un quark *u*.

✓ **Charge** : les quarks ont une charge électrique (+ 2/3 pour le quark *u* et - 1/3 pour le quark *d*), et confèrent leur charge globale au proton (+1) et au neutron (nulle).

✓ **Couleur** : chaque quark porte une « couleur », une propriété de l'interaction forte responsable de la cohésion du baryon. Les quarks ont trois couleurs possibles, les gluons huit, et tout assemblage de quarks ou gluons est « incolore ».

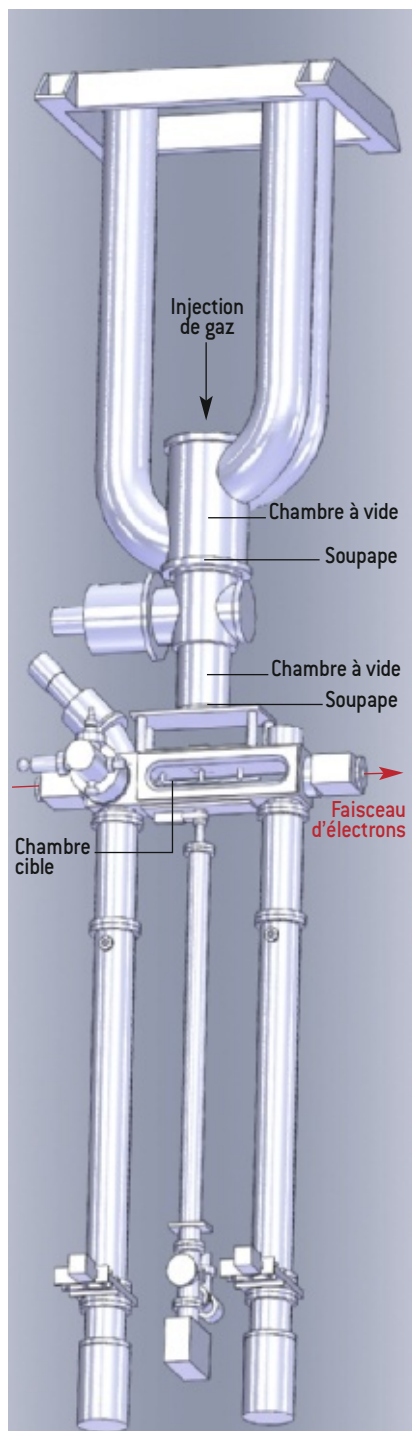
✓ **Spin** : les quarks sont des particules magnétiques, caractérisées par un spin. L'orientation relative des spins des quarks du neutron influe sur leurs orbites : deux spins parallèles se repoussent, comme deux aimants.

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-