

des électrons ou des muons (le muon est un cousin de l'électron, environ 200 fois plus massif et instable). Ces particules de la famille des leptons, ne sont pas soumises à l'interaction forte : les collisions obtenues ne sont régies que par les lois de l'interaction électromagnétique. En outre, les leptons semblent se comporter comme des particules parfaitement ponctuelles. Les équations de leurs interactions avec les nucléons en sont considérablement simplifiées et bien comprises : toutes les complications des calculs proviennent des caractéristique des nucléons, que l'on détermine ainsi.

Quand un électron ou un muon passe à proximité d'un nucléon de la cible, il est attiré ou repoussé par les charges électriques des constituants du nucléon. En termes de théorie quantique des champs, on dit que le lepton et le nucléon échangent un photon, ce qui transfère de l'énergie et dévie le lepton (voir l'encadré de la page 85). En mesurant soigneusement la déviation des leptons et les pertes d'énergie lors des collisions, on obtient une image de la répartition des particules chargées, les quarks, au sein du nucléon.

L'accélérateur de leptons et le détecteur qui les piège, derrière la cible, constituent une sorte de microscope géant. On «grossit l'image» en augmentant la quantité de mouvement du photon échangé. On doit donner à un lepton une énergie d'environ 100 gigaélectronvolts pour déceler des détails de l'ordre de quelques pour cent de la taille du nucléon (le gigaélectronvolt est l'unité d'énergie habituellement utilisée en chromodynamique quantique ; elle est environ égale à la masse d'un proton ou d'un neutron au repos).

Pour étudier la structure du spin des nucléons, on doit polariser (aligner dans une même direction) les spins des projectiles et de la cible. Quand un spin des leptons est aligné avec leur direction de propagation, les leptons échangent des photons surtout avec les quarks de spin opposé. Ainsi les déviations des leptons nous apprennent-elles comment les quarks ayant une orientation de spin donnée sont répartis à l'intérieur du nucléon. En particulier, des mesures faites pour deux polarisations opposées du faisceau révèlent l'asymétrie des spins des quarks de

valence, le déséquilibre entre les spins parallèles et antiparallèles.

Les premières expériences avec un faisceau polarisé ont été réalisées au SLAC à la fin des années 1970 : un faisceau d'électrons était projeté contre une cible de butanol solide. Les résultats, publiés au début des années 1980, confirmaient les prévisions : environ deux tiers du spin du proton devaient provenir de ses quarks de valence, le tiers restant venant du mouvement orbital de ces quarks à l'intérieur du proton. De plus, la contribution des quarks *étrange* était très faible. Cette valeur provenait toutefois d'une extrapolation aux hautes énergies des mesures réalisées avec un faisceau limité à 10 ou 20 gigaélectronvolts.

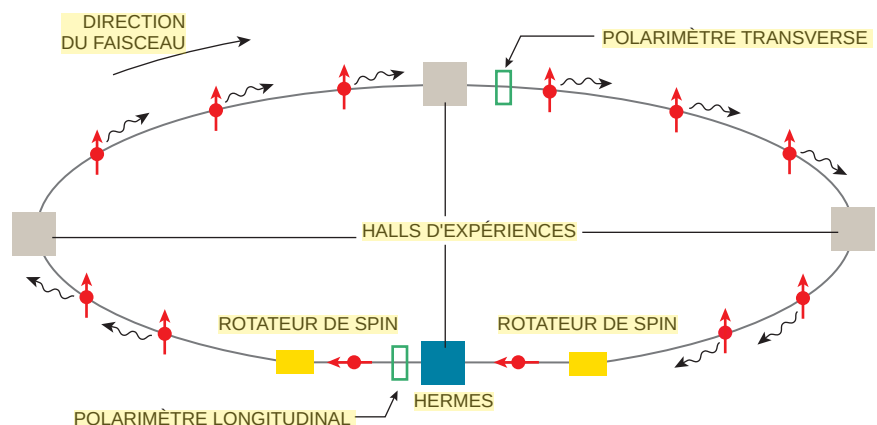
Au milieu des années 1980, des expériences à plus haute énergie furent menées au CERN, le Laboratoire européen de physique des particules, à Genève. Cette fois, un faisceau de muons de 200 gigaélectronvolts était envoyé sur une cible d'ammoniac solide. Les muons ont la particularité d'être naturellement polarisés lorsqu'ils sont créés dans les désintégrations des pions, ceux-ci étant les particules les plus légères formées de quarks. L'accélérateur créait d'abord un faisceau de pions très énergétiques, qui se désintégraient spontanément, en vol, en muons polarisés à 80 ou 90 pour cent. Comme l'intensité du faisceau de

muons ainsi obtenu était un million de fois inférieure à celle du faisceau d'électrons polarisés du SLAC, on a augmenté le nombre de muons interagissant avec des protons polarisés de la cible en employant des cibles plus grandes, de 72 centimètres de long.

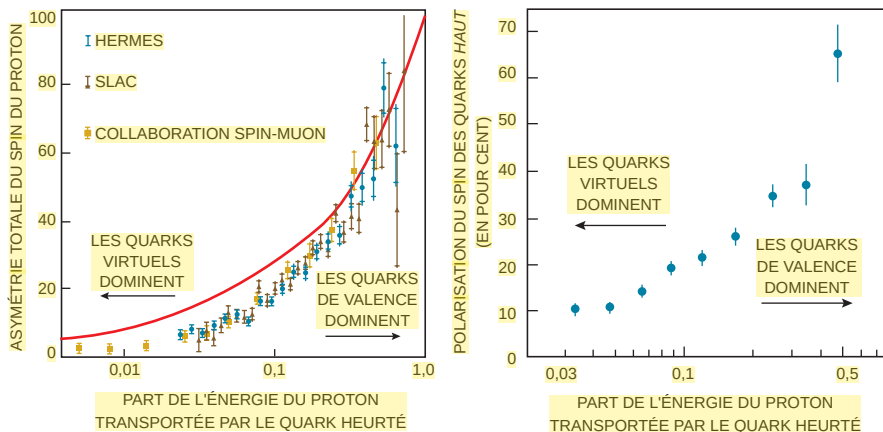
L'origine de la crise

Le groupe du CERN a ainsi découvert que le spin des quarks de valence n'apporte qu'un tiers du spin du proton. De plus, les quarks *étrange* virtuels, au sein des protons, semblaient fortement polarisés et, de façon inattendue, contribuaient fortement (et négativement) au spin total.

Quelques années plus tard, les mesures sont devenues plus précises grâce à une meilleure polarisation des faisceaux et des cibles. La Collaboration spin muon, au CERN, a utilisé une nouvelle cible, de 1,2 mètre de long (la plus longue jamais construite) contenant du deutérium (une forme d'hydrogène dont le noyau contient un proton et un neutron). De nouvelles expériences ont commencé aussi au SLAC, avec des cibles d'hydrogène, de deutérium et d'hélium 3. Le noyau de l'hélium 3 contient un neutron et deux protons de spins opposés, dont la somme s'annule : les expériences utilisant du deutérium et de l'hélium 3 fournissent des données importantes sur la structure du spin du



2. LE COLLISIONNEUR HERA accélère les électrons dans un anneau de stockage d'une circonférence de 6,3 kilomètres. Les électrons (en rouge) y font 47 000 tours par seconde, émettant en continu des rayons X de haute énergie nommés rayonnement synchrotron (en noir). Progressivement, en 30 minutes environ, le rayonnement synchrotron polarise le spin des électrons (flèches rouges) dans une direction perpendiculaire à celle du faisceau (en pratique, 60 pour cent des électrons sont convenablement polarisés) : une petite partie du rayonnement synchrotron provoque un changement de l'état de spin des électrons. La cible HERMES et les détecteurs (en bleu) occupent le hall expérimental Est ; trois autres expériences (en beige) partagent le faisceau de HERA. Des aimants spéciaux (en jaune) font pivoter la polarisation afin de la placer dans la direction du faisceau avant son arrivée au point de collision d'HERMES, puis la ramènent à son orientation transverse initiale à la sortie d'HERMES. Des polarimètres contrôlent la polarisation.



3. LA POLARISATION DU SPIN du proton est mesurée par de nombreuses expériences. L'asymétrie du spin total mesurée par le groupe HERMES au SLAC et par la Collaboration spin-muon (à gauche) montre que le spin des quarks n'apporte qu'une faible contribution au spin du proton. Des données ajustées à la courbe auraient indiqué une contribution plus importante, ce que l'on attendait au début des années 1980. La contribution des seuls quarks et antiquarks haut (à droite) a récemment été mesurée par le groupe HERMES.

neutron, qui devrait ressembler à celle du proton.

En 1988, un groupe international de physiciens, HERMES, proposa d'adapter le collisionneur d'électrons et de protons HERA, à Hambourg, afin de mesurer le spin du nucléon. Les électrons font le tour de l'anneau de HERA environ 47 000 fois par seconde, produisant un faisceau moyen 1 000 fois plus intense que celui du SLAC. Ce faisceau intense est utilisable avec des cibles gazeuses de faible densité, constituées d'hydrogène atomique, de deutérium ou d'hélium 3 purs. De telles cibles ne posent plus le problème de «dilution» du spin qui se produit avec des cibles de butanol et d'ammoniac, où de nombreuses paires de protons et de neutrons ne sont pas polarisées dans les atomes de carbone, d'azote et d'oxygène (par exemple, un seul des 15 nucléons d'un atome d'azote est polarisé).

L'obtention systématique d'un faisceau polarisé sur l'accélérateur HERA nécessita quatre ans de mise au point. Puis on a installé les détecteurs. L'équipe HERMES a commencé l'enregistrement de données à l'été 1995.

Les expériences de Hambourg et du CERN donnent des résultats très analogues (voir la figure 4), confirmant qu'un tiers seulement du spin du proton provient du spin de ses quarks de valence. De plus, on commence à identifier la contribution de chaque type de quark, en étudiant les débris de nucléons produits par les collisions. Ainsi, le groupe HERMES a récemment mesuré la relation entre le mouvement des quarks haut à l'intérieur du proton et leur polarisation, et il

devrait effectuer bientôt la première mesure directe des polarisations des quarks étrange, en analysant les collisions qui produisent un kaon négatif (particule constituée d'un quark étrange et d'un antiquark haut).

Parallèlement, les théoriciens ont amélioré les modèles : les 70 pour cent manquants dans le spin ne provoquent plus de crise. Ils semblent provenir des gluons (chaque gluon a un spin égal à un) et du mouvement orbital de tous les quarks et gluons à l'intérieur du nucléon. Mieux encore, la théorie décrit bien les mesures si l'on admet que la contribution totale des gluons est de une ou deux unités de spin et si le moment cinétique orbital est égal à moins un.

La présence de tels spins élémentaires, dans un nucléon dont le spin total est égal à seulement 1/2, était imprévue. Peut-on vérifier indépendamment ces contributions inattendues des gluons et du mouvement orbital? Personne n'a encore proposé de méthode de mesure de la contribution orbitale. Les données du groupe HERMES indiquent que les gluons contribuent effectivement au spin du nucléon, mais l'importance de cette contribution ne peut pas encore être évaluée. Des études utilisant des collisions entre protons à haute énergie devraient aussi permettre la détermination du spin des gluons. De telles expériences commenceront l'année prochaine au Collisionneur d'ions lourds relativistes, en construction à Brookhaven, aux États-Unis. Au CERN, l'expérience COMPASS mesurera aussi la contribution des gluons.

La compréhension de la structure interne des nucléons aura des retombées dans d'autres domaines de la physique des particules. La distribution du spin entre les différents éléments est intimement liée à des structures mathématiques qui apparaissent non seulement en chromodynamique quantique, mais aussi dans l'étude des interactions faibles (qui sont responsables de la désintégration de certains noyaux et participent à la fusion nucléaire dans le Soleil). En particulier, la règle de sommation établie en 1966 par James Bjorken, de l'Université Stanford, relie la dispersion des électrons autour des nucléons polarisés (un phénomène électromagnétique) et la désintégration d'un neutron (un phénomène d'interaction faible). Cette règle relie aussi la structure en quarks et en gluons des nucléons, régie par l'interaction forte, et la durée de vie du neutron. Elle est au cœur de notre description du monde de l'infiniment petit, au point que Richard Feynman déclara en 1972 que : «Sa vérification ou la démonstration de sa violation auraient un impact déterminant sur la physique des hautes énergies.»

Les expériences sur le spin vérifient la règle de sommation de Bjorken avec une précision croissante, et corroborent donc la structure mathématique de base de la chromodynamique quantique et du modèle standard de la physique des particules. Ainsi les scientifiques en apprennent-ils davantage sur les propriétés fondamentales de notre Univers, en cherchant une réponse complète à cette question, simple en apparence : qu'est-ce qui produit le spin d'un nucléon?

Klaus RITH dirige le groupe HERMES à l'Université d'Erlangen-Nuremberg. Andreas SCHÄFER dirige le groupe de théorie des hautes énergies et de chromodynamique quantique de l'Université de Regensburg.

Alan D. KRISCH, *Collisions between Spinning Protons*, in *Scientific American*, vol. 257, n° 2, pp. 42-50, août 1987.

F.E. CLOSE, M. MARTEN et C. SUTTON, *The Particle Explosion*, Oxford University Press, 1987.

Robert L. JAFFE, *Where Does the Proton Really Get Its Spin?*, in *Physics Today*, vol. 48, n° 9, pp. 24-30, septembre 1995.