

La contribution des gluons

Comment mesurer la contribution des gluons au spin du nucléon ? Pas avec les leptons (électrons ou muons), car ceux-ci n'interagissent qu'avec les particules chargées ; or les gluons, vecteurs de l'interaction forte, sont électriquement neutres. Deux démarches complémentaires sont suivies par les physiciens.

Les physiciens de l'expérience COMPASS, au CERN, contournent la difficulté en examinant les collisions de muons avec des quarks charmés. Ces derniers ne font pas partie de la matière ordinaire ; plus lourds que les quarks étranges, ils apparaissent et disparaissent presque instantanément dans le proton, sous la forme de paires de quark et d'antiquark charmés. La probabilité qu'un muon interagisse avec un quark charmé est faible, mais elle n'est pas nulle. Comme on sait aussi calculer la probabilité qu'un gluon se matérialise en une paire de quark et d'antiquark charmés, on peut remonter du nombre de muons ayant diffusé sur des quarks charmés au nombre de gluons dans le nucléon. Si, en outre, les muons et les nucléons sont polarisés, la variation du nombre de muons diffusés sur des quarks charmés en fonction de l'orientation des spins donnera accès à la polarisation des gluons. Les premiers résultats sont attendus vers 2002...

Une autre méthode, indirecte, mais plus rapide pour le calcul de la contribution des gluons au spin du nucléon, utilise les résultats des expériences de diffusion des leptons déjà réalisées. Ces expériences mesurent les déviations et les pertes d'énergie des leptons pour différentes orientations de leur spin et de celui des nucléons cibles, proton ou neutron. À l'intérieur du proton, les gluons se matérialisent en permanence en paires de quark et d'antiquark, qui se recombinent ensuite et reforment des gluons. La densité de quarks et d'antiquarks dépend donc de la densité de gluons dans le proton. La polarisation du gluon est transférée au quark et à l'antiquark créés par la matérialisation de ce gluon. Cette corrélation entre la polarisation des gluons et celle des quarks est décrite mathématiquement dans les «équations d'évolution» de la chromodynamique quantique dans le nucléon, établies indépendamment par deux physiciens italiens, G. Altarelli et G. Parisi, et trois physiciens russes, Y. L. Dokshitzer, V. N. Gribov et L. N. Lipatov.

Comme les collisions des leptons et des quarks sont élastiques (l'énergie est conservée), les trois quantités, angle et énergie du lepton diffusé, et énergie du faisceau incident, permettent aussi de calculer l'impulsion du quark sur lequel le lepton a tapé dans le nucléon. On détermine la polarisation des quarks en fonction de leur impulsion à l'intérieur du nucléon, appelée fonction de structure polarisée, en faisant la différence des nombres de leptons entre les deux configurations où les spins du lepton et du nucléon sont parallèles ou antiparallèles.

L'ensemble formé de l'accélérateur de leptons et du détecteur est comparable à un énorme microscope.

Pour un angle de diffusion et une énergie de faisceau donnés, la mesure de l'énergie de chaque lepton diffusé permet le calcul du grossissement avec lequel le lepton «voit» le proton. Comme, dans un microscope, l'aspect des objets observés varie avec le grossissement, les caractéristiques observées pour le proton, en particulier la fonction de structure polarisée, varient avec le «grossissement» de l'ensemble formé par l'accélérateur et le détecteur. Les équations d'évolution de la chromodynamique quantique décrivent aussi comment les densités de quarks, d'antiquarks et de gluons dans le proton varient avec l'échelle à laquelle on sonde le proton : la mesure précise de cette variation permet donc de connaître la polarisation des gluons, c'est-à-dire leur contribution au spin total du nucléon.

Pour accéder à la polarisation des gluons par cette méthode, les expérimentateurs comparent les différences de comptage, entre les situations parallèle et antiparallèle, pour plusieurs expériences faites avec des énergies de faisceau différentes. Ces comparaisons requièrent des expériences d'une grande précision. Celles qui se sont déroulées au SLAC, à Stanford, de 1995 à 1997, collaboration d'instituts américains et japonais, et, pour la France, du CNRS et du CEA, apportent aujourd'hui les mesures les plus précises au monde des fonctions de structure polarisées du neutron et du proton.

Proton et neutron sont deux particules jumelles : elles ont exactement la même structure, à l'échange près des quarks *hauts* et *bas*. Ainsi, le proton a deux quarks de valence *haut* et un *bas*, d'où sa charge électrique de un, tandis que le neutron a deux quarks de valence *bas* et un *haut*, d'où sa charge électrique nulle. Mais proton et neutron ont la même densité de gluons.

Sur le plan expérimental, il est plus facile de polariser des protons que des neutrons : il suffit d'orienter les spins des noyaux d'hydrogène de molécules de butanol ou d'ammoniac réfrigérées à environ un kelvin dans un champ magnétique intense. Les électrons ou les muons sont ensuite envoyés sur cette cible pour ricocher sur les quarks des protons polarisés. Pour polariser les neutrons, la technique est de polariser des noyaux légers comme le deutérium, formé d'un proton et d'un neutron, l'hélium 3, formé de deux protons et d'un neutron ou le lithium 6, formé de trois protons et trois neutrons.

C'est l'étude comparée de l'ensemble des mesures mondiales, au SLAC, au CERN et à HERMES, des fonctions de structure polarisées sur le proton et le neutron qui a montré que la contribution des gluons au spin du nucléon est égale à un, plus ou moins un. Ce résultat indirect doit être vérifié et amélioré par l'expérience COMPASS du CERN, mais il est déjà une importante indication qu'il n'y a pas de «crise du spin» pour les gluons comme il y en a eu, il y a dix ans, pour les quarks.

Vincent BRETON

Laboratoire de physique corpusculaire
de Clermont-Ferrand

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.

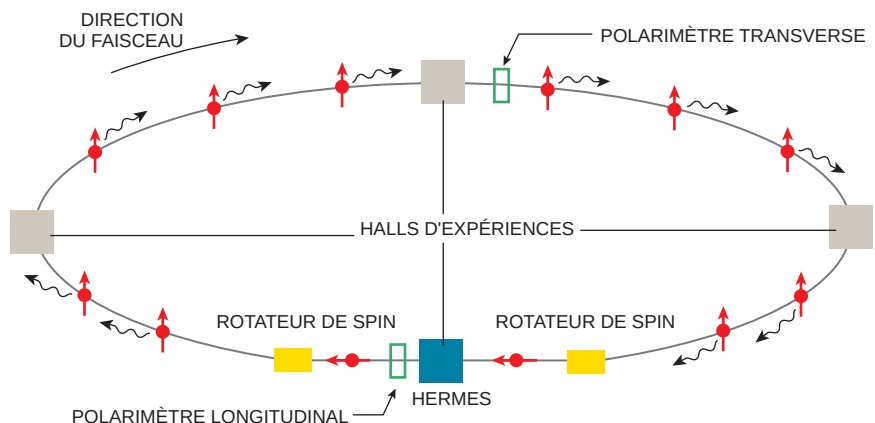
Au milieu des années 1980, des expériences à plus haute énergie furent menées au CERN, le Laboratoire européen de physique des particules, à Genève. Cette fois, un faisceau de muons de 200 gigaélectronvolts était envoyé sur une cible d'ammoniac solide. Les muons ont la particularité d'être naturellement 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 énergiques, 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.