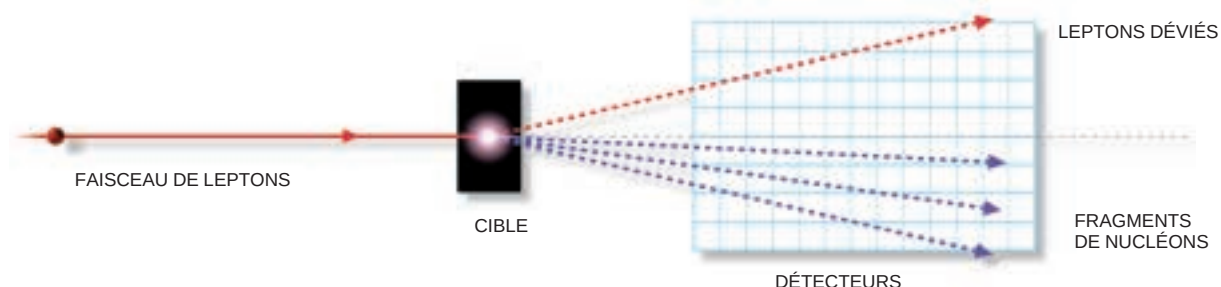


Mise en évidence de la structure du spin d'un électron

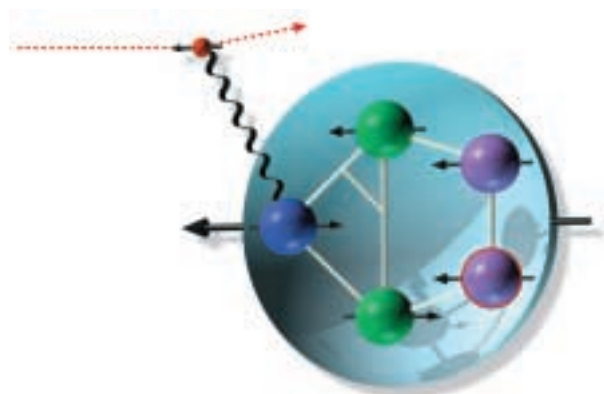
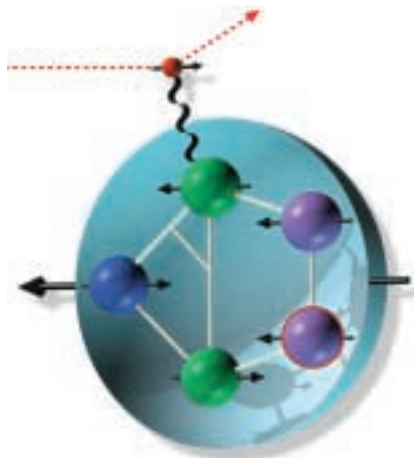
Un accélérateur projette un faisceau d'électrons ou de muons (des leptons, c'est-à-dire des particules ponctuelles qui ne sont pas soumises à l'interaction forte) polarisés sur une cible de nucléons polarisés. Des détecteurs mesurent les déviations et les pertes

d'énergie des leptons, ce qui renseigne sur la polarisation du spin des quarks dans les nucléons. Des expériences récentes analysent aussi les débris des nucléons, afin de déterminer, pour chaque déviation, le type de quark à l'origine de celle-ci.



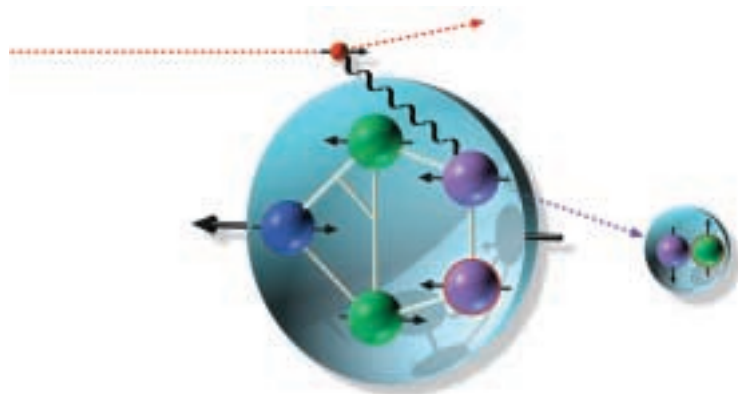
Un lepton est dévié quand il échange un photon avec l'un des quarks du nucléon. Les leptons qui ont un spin parallèle à l'axe du faisceau interagissent surtout avec des quarks dont le spin est de sens opposé (à gauche). Quand la polarisation du faisceau

(ou la polarisation des nucléons) est inversée (en bas, à droite), les leptons interagissent avec des quarks différents, ce qui change la déviation. La différence révèle l'asymétrie des spins des quarks dans le nucléon.



Parfois un kaon négatif (un quark *étrange* et un antiquark *haut*) est éjecté du nucléon, parce que le photon, échangé entre le lepton et le nucléon, a interagi avec un constituant de ce dernier. En comptant les déviations de leptons correspondant à de telles éjections, les physiciens déter-

minent la polarisation des quarks dans les nucléons. Dans l'expérience HERMES (photographie), le faisceau d'électrons circule dans le tuyau gris vers l'aimant du spectromètre (en bleu). La cible et de petits détecteurs sont installés devant l'aimant ; les principaux détecteurs sont derrière.



Slim Films, Heike Thum-Schmiedau DESY (photographie)

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