

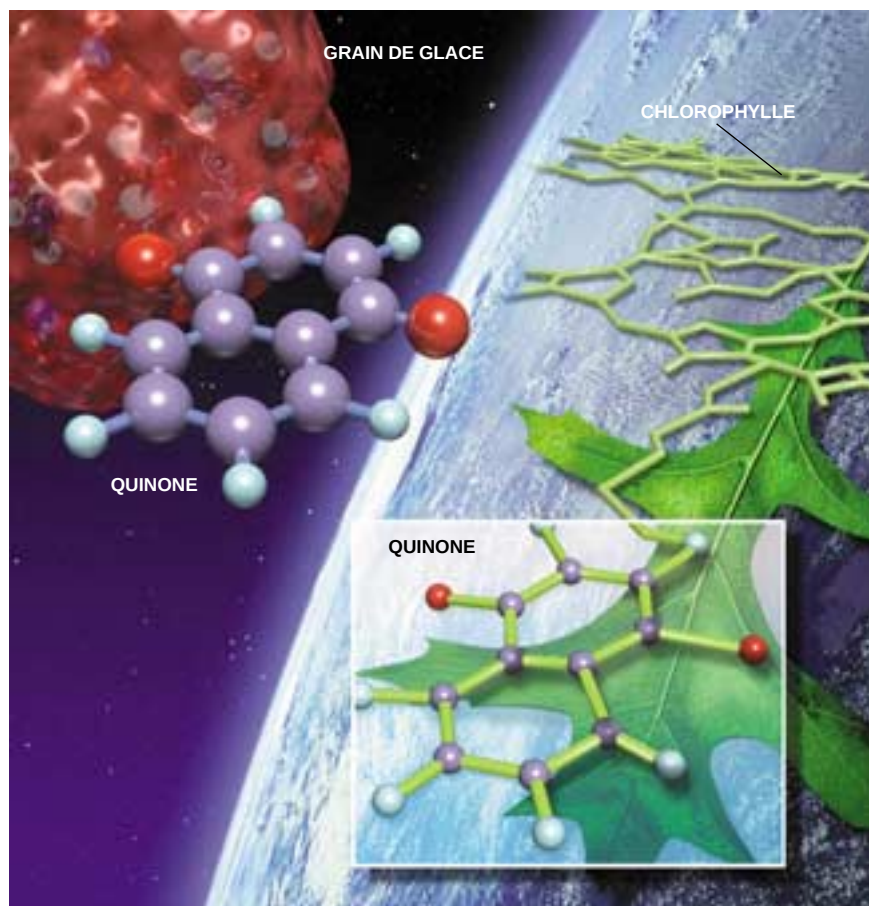
été obtenues à partir de glaces composées d'eau et des hydrocarbures aromatiques polycycliques qui sont abondants dans les nuages. Dans les conditions interstellaires, ces hydrocarbures des météorites riches en carbone se transforment en de nombreux composants, notamment en alcools, en éthers ou en quinones. Omniprésents dans les systèmes vivants contemporains, les quinones stabilisent les électrons libres, propriété nécessaire aux cellules vivantes pour diverses activités de transfert d'énergie.

Cette aptitude joue un rôle essentiel dans la conversion de la lumière en énergie chimique, dans la photosynthèse. En outre, les quinones absorbent le rayonnement ultraviolet, qui menace les molécules fragiles comme les acides aminés. Les quinones extraterrestres auraient-elles protégé la Terre des ultraviolets avant que la couche d'ozone protectrice ne se forme? Les premières formes de vie terrestre ont-elles utilisé ces molécules pour capter la lumière et la transformer en énergie à l'aide d'un mécanisme primitif de photosynthèse?

Des molécules à la vie

Les expériences en laboratoire et les observations astronomiques nous ont appris que les conditions apparemment stériles de l'espace engendrent des composés organiques complexes, qui sont acheminés ensuite jusqu'à la Terre par les météorites et par les poussières. Les acides aminés, les quinones, les molécules amphiphiles et d'autres composés organiques extraterrestres semblent avoir favorisé l'apparition de la vie. Les acides aminés extraterrestres ont peut-être composé les premières protéines, et les molécules amphiphiles ont peut-être abrité des quinones qui auraient contribué à la récupération de l'énergie lumineuse ; toutefois, le rôle exact de ces différents composés organiques reste à élucider.

On peut aussi supposer que les molécules organiques extraterrestres n'aient été que des réactifs, à partir desquels la vie s'est formée. On peut imaginer qu'une molécule « tombée du ciel » a amorcé ou accéléré une réaction chimique importante pour le fonctionnement d'une vie primitive. Si les molécules initiatrices de la vie ont bien été réunies dans une soupe primordiale, les acides aminés de l'espace ont pu fournir les quantités critiques pour



6. LES QUINONES DE L'ESPACE ont une structure presque identique à celle des molécules qui aident la chlorophylle à transporter l'énergie lumineuse dans les cellules de plante.

permettre ces réactions. De même, si les événements prébiotiques ont eu lieu dans les fonds marins, ils ont pu bénéficier de composés extraterrestres qui tombaient en pluie dans les océans. En augmentant le rendement des réactions chimiques, l'apport de composés organiques a pu conférer un avantage évolutif certain. À la longue, cet ensemble de réactions chimiques simples serait devenu profondément ancré dans ce qui est aujourd'hui un ensemble de réactions biochimiques régulées par une protéine.

L'écart est colossal entre les composés organiques les plus complexes de l'espace et les molécules de l'héré-

dité et du métabolisme actuels. Cependant, l'omniprésence de ces molécules organiques spatiales indique que, si elles ont contribué à la vie sur Terre, elles ont également contribué, et contribuent toujours, au développement de la vie ailleurs que sur la Terre.

Des traces de conditions propices à la vie sur Mars suggèrent que d'autres lieux du Système solaire ont pu bénéficier d'une contribution extraterrestre. L'ubiquité des molécules organiques complexes dans l'espace et l'existence de planètes autour d'autres étoiles incitent à penser que la vie est présente sur d'autres systèmes planétaires que le nôtre.

Max BERNSTEIN, Scott SANDFORD et Louis ALLAMANDOLA travaillent au Laboratoire d'astrochimie du Centre de recherche Ames de la NASA, en Californie.

F. RAULIN, F. RAULIN-CERCEAU et J. SCHNEIDER, *La bioastronomie*, collection «Que-sais-je?», PUF, 1997.

J. CRONIN, *Pasteur, Light and Life*, in

Physics World, vol. 11, n° 10, pp. 23-24, octobre 1998.

A. BRACK et F. RAULIN, *La vie dans le Système solaire*, in *Dossier Pour la Science*, «Les terres célestes», pp. 40-42, 1999.

M. P. BERNSTEIN et al., *UV Irradiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Ices : Production of Alcohols, Quinone And Ethers*, in *Science*, vol. 283, pp. 1135-1138, 19 février 1999.

Le spin des nucléons

KLAUS RITH • ANDREAS SCHÄFER

Grâce à des accélérateurs de particules plus performants, les expériences sur la structure interne des protons et des neutrons ont fait progresser la description théorique de ces particules.

Quoi de plus commun que les protons et les neutrons ? Ces composants des noyaux d'atomes, ou nucléons, constituent 99,9 pour cent de la matière qui nous entoure, nous y compris (le 0,1 pour cent restant est formé d'électrons). Ils sont parmi les premières particules subatomiques découvertes au XX^e siècle, mais 80 années d'études expérimentales et théoriques ne nous ont pas tout révélé sur leur nature et sur leurs propriétés. En particulier, dans les années 1980, est apparue la « crise du spin » : la théorie n'expliquait pas les résultats des expériences qui étudiaient l'origine du spin, ou moment cinétique intrinsèque, des nucléons.

Le modèle qui domine aujourd'hui la théorie des particules subatomiques est celui des quarks. Il a été proposé en 1963 par les physiciens américains Murray Gell-Mann et George Zweig, qui souhaitaient uniformiser la description de la myriade de particules qui avaient été découvertes dans les années 1950 et 1960, ainsi que celle des particules déjà connues, tels le proton et le neutron. Toutes sont constituées de trois particules fondamentales : les quarks *haut*, *bas* et *étrange*. Ainsi, un proton est constitué de deux quarks *haut* et d'un quark *bas* ; un neutron, d'un quark *haut* et de deux quarks *bas*. Beaucoup de propriétés des nucléons sont la simple combinaison des propriétés des quarks qui les constituent. Par exemple, comme la charge électrique d'un quark *haut* est égale à $2/3$ (celle de l'électron étant prise égale à 1) et que celle d'un quark *bas* est égale à $-1/3$, la charge électrique du proton est égale à 1, et celle du neutron est nulle.

De la même façon, le spin du proton semble être la somme des spins des trois quarks qui le composent et qui valent chacun $1/2$ (ou $-1/2$) : deux

des quarks auraient des spins opposés, dont la somme serait nulle, et le spin du dernier quark serait celui du nucléon. Toutefois, au milieu des années 1980, des expériences ont révélé que le spin des nucléons ne résultait pas de celui des trois quarks constitutifs ! Des quarks « virtuels », qui se matérialisent et disparaissent très vite en permanence dans les nucléons, en particulier des quarks *étrange*, que l'on croyait cantonnés au domaine des particules exotiques à courte durée de vie et aux interactions à haute énergie, semblent déterminer le spin des nucléons ordinaires.

Les théoriciens ont aujourd'hui révisé les modèles pour expliquer ces caractéristiques. Pour l'instant, les expériences en cours avec des accélérateurs de particules européens et américains s'accordent entre elles et avec ces nouveaux modèles. Les informations qu'elles apporteront confirmeront-elles notre compréhension ou nécessiteront-elles des avancées théoriques plus profondes ?

Des particules vraiment élémentaires

Lorsque le modèle des quarks fut présenté, de nombreux physiciens le considérèrent comme une astuce mathématique, un système de comptabilité pour décrire les interactions ; les quarks ne semblaient pas être des objets « réels » que l'on pourrait étudier. L'échec des premières tentatives d'observation de quarks isolés leur donnaient raison. Notamment, on avait sondé la structure du proton en bombardant de l'hydrogène liquide avec des électrons : comme le noyau de l'atome d'hydrogène ne contient qu'un proton, les électrons sont surtout déviés par des protons isolés. Ces expériences n'avaient pas

révélé de structure interne du proton, qui apparaissait comme une grosse goutte sphérique et « molle », chargée électriquement.

Toutefois, à la fin des années 1960, des physiciens de l'Institut de technologie du Massachusetts et du Centre de l'accélérateur linéaire de Stanford (dont l'acronyme américain est SLAC) réalisèrent une expérience analogue avec un nouvel accélérateur, qui produisait des collisions à plus haute énergie. Ils observèrent que des électrons étaient déviés comme s'ils frappaient de minuscules points durs, électriquement chargés, au sein des protons. Ces expériences, bientôt confirmées, prouvèrent que les quarks étaient des objets réels.

Ils montrèrent aussi que les nucléons n'étaient pas constitués que de trois quarks, mais qu'ils abritaient un incessant ballet de particules évanescences et éphémères. Les trois principaux quarks constituant les nucléons, les quarks de valence, échangent incessamment des gluons, qui les lient en transportant l'interaction forte. En outre, des paires de quarks et d'antiquarks « virtuels », de très courte durée de vie, se matérialisent et disparaissent en permanence, apportant leur contribution aux propriétés du nucléon (voir la figure 1), y compris au spin : la somme des spins de tous les gluons et de toutes les paires de quarks et d'antiquarks virtuels n'est pas nulle.

Qu'est-ce exactement que le spin ? On caractérise les rotations, soit intrinsèques (pour les corps qui tournent comme une toupie), soit orbitales (comme pour les planètes) par leur moment cinétique. La Terre, par exemple, a un moment cinétique orbital, qui caractérise sa course annuelle autour du Soleil, et un moment cinétique intrinsèque, qui caractérise sa

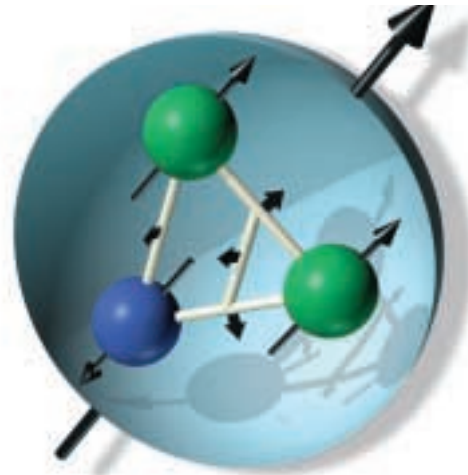
Quatre descriptions du proton



a. Vu de loin, le proton est une grosse goutte molle (*en gris*), d'environ deux milliardième de mètre de diamètre, de charge électrique égale à un, et de moment cinétique, ou spin, égal à $1/2$ (*représenté par la flèche*). Le moment cinétique d'un objet en rotation est représenté par une flèche dirigée selon l'axe de rotation et qui pointe vers nous, si nous nous plaçons de façon à voir la rotation s'effectuer dans le sens des aiguilles d'une montre. Les particules quantiques ont un spin intrinsèque de valeur fixe, qui ne peut s'interpréter avec la notion classique de rotation.

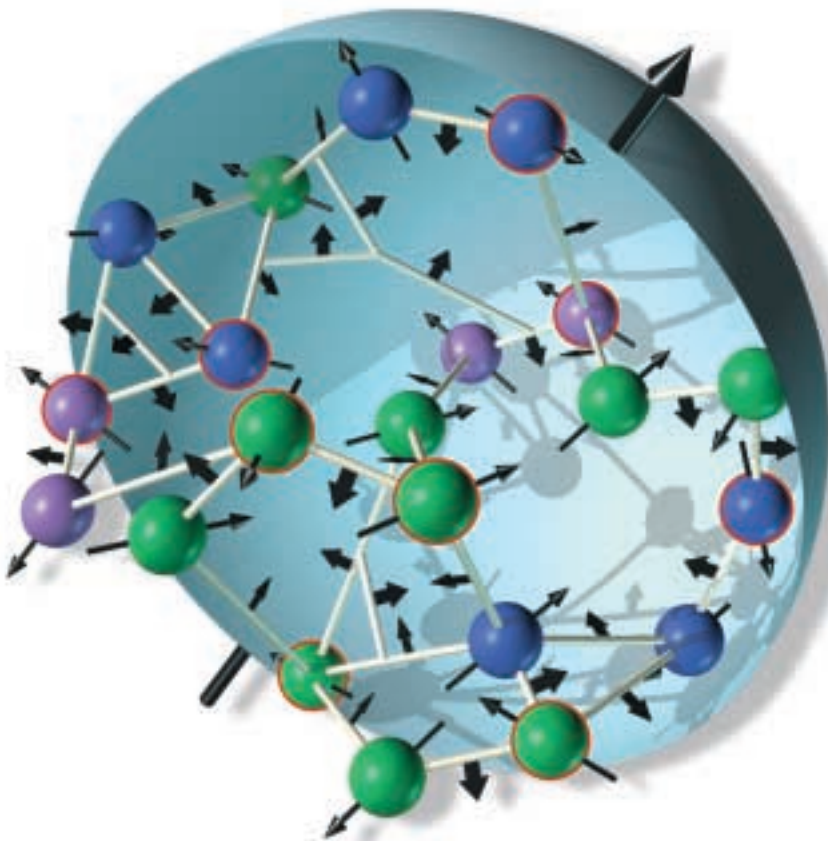


b. La théorie des quarks décrit le proton comme la somme de deux quarks *haut* (*en vert*) et d'un quark *bas* (*en bleu*), dont les charges et les spins respectifs s'additionnent pour donner les valeurs caractéristiques du proton. Chaque quark a un spin égal à $1/2$, mais le spin total est encore $1/2$ si deux des quarks ont des spins d'orientation contraire dont la somme s'annule.



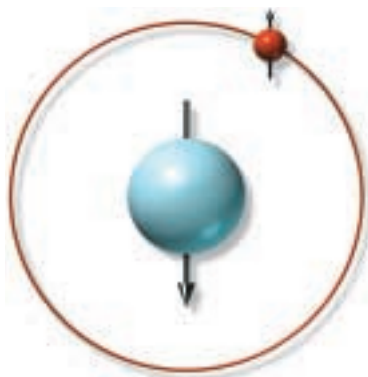
c. Les expériences de la fin des années 1960 ont donné des quarks l'image de particules ponctuelles à l'intérieur du proton, et la chromodynamique quantique décrit la force qui les lie comme une sorte d'élastique (*en blanc*). L'élastique est constitué de particules, les gluons, qui possèdent chacune un spin égal à un. Le mouvement des quarks et des gluons, au sein du proton, peut aussi engendrer du moment cinétique contribuant au spin du proton.

d. La description quantique complète, celle de la chromodynamique quantique, ajoute à la description précédente un ballet compliqué et instable de quarks et d'antiquarks (*contours rouges*) virtuels, y compris des quarks *étrange* (*en violet*) qui ne sont pas considérés comme des constituants de la matière ordinaire. Ce dessin n'est qu'une évocation des incertitudes quantiques et des fluctuations dynamiques. Les détails de la production du spin du proton à partir de ce ballet sont trop compliqués pour être calculés ; on les détecte lentement, par les expériences dans de grands accélérateurs de particules.

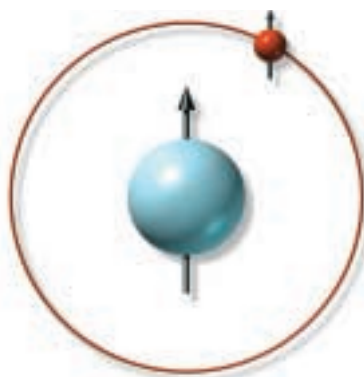


	QUARK HAUT
	QUARK BAS
	QUARK ÉTRANGE
	ANTIQUARK
	GLUON
	SPIN $1/2$
	SPIN 1

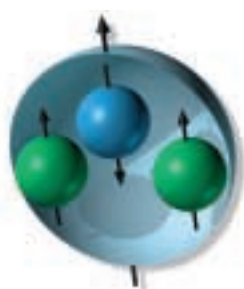
a ATOME D'HYDROGÈNE DE SPIN NUL
MASSE = 0,9 GEV



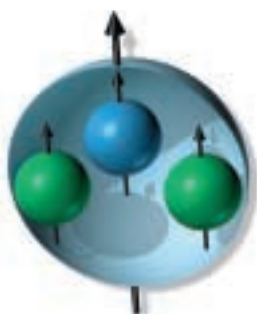
ATOME D'HYDROGÈNE DE SPIN UN
MASSE = 0,9 GEV + 6×10^{-15} GEV



b PROTON (SPIN 1/2)
MASSE = 0,9 GEV



PARTICULES Δ^+ (SPIN 3/2)
MASSE = 12 GEV



Sim Films

1. LA STRUCTURE DU SPIN a plus de conséquences sur les particules élémentaires que sur les atomes. Dans un atome d'hydrogène (a), l'alignement des spins du proton (en gris) et de l'électron (en rouge) fait passer le spin total de l'atome de zéro à un, mais il n'augmente la masse de l'atome que de quelques milliardièmes d'électronvolts. La particule Δ^+ et le proton (b) sont tous deux constitués de deux quarks *haut* et d'un quark *bas* ; ils ne diffèrent que par leur spin, mais le Δ^+ est 30 pour cent plus lourd que le proton.

rotation quotidienne autour de son axe. Le spin d'une particule élémentaire est le moment cinétique de rotation intrinsèque, mais il présente des propriétés quantiques particulières : c'est nécessairement un multiple entier ou demi-entier d'une quantité fondamentale, le moment de Planck $\hbar$. Les particules qui constituent la matière (électrons, protons, neutrons et quarks) ont un spin minimal égal à $\hbar/2$. On écrit que ces particules ont un spin de 1/2.

Le spin d'une particule composée n'est pas simplement la somme des valeurs des spins de ses constituants, car le moment cinétique est vectoriel : il a une intensité et une direction. Ainsi, le moment cinétique de la Terre est-il représenté par une flèche qui suit l'axe de la Terre en pointant vers le Nord. On sait calculer le spin de particules composées, tels des atomes entourés de dizaines d'électrons : les cours de mécanique quantique, en maîtrise de physique, sont farcis de tels calculs. Malheureusement,

personne ne sait le faire pour les quarks et les gluons qui constituent les protons et les neutrons.

Une interaction forte et complexe

La difficulté provient de la théorie qui décrit l'interaction forte : la chromodynamique quantique. On en connaît les équations depuis les années 1970, mais certaines de leurs caractéristiques compliquent leur utilisation. Aujourd'hui encore, même les techniques mathématiques les plus perfectionnées et les ordinateurs les plus puissants, travaillant en parallèle, ne permettent pas de résoudre exactement ces équations pour un nucléon.

L'interaction forte est assurée par un échange de gluons entre les quarks, tout comme la force électromagnétique provient d'un échange de photons entre des particules chargées. Toutefois, les gluons interagissent, contrairement aux photons qui sont électriquement neutres et qui ne sont pas eux-mêmes

soumis à la force électromagnétique. En outre, l'interaction forte est 100 fois plus intense que la force électromagnétique (d'où son nom) : en chromodynamique quantique, on ne peut pas négliger des phénomènes complexes que l'on néglige dans la théorie électromagnétique, et les équations qui en résultent n'ont pas de solutions simples.

Comme les gluons interagissent fortement, la chromodynamique quantique est une théorie «non linéaire» : une légère modification des conditions initiales peut être amplifiée et avoir des conséquences importantes. La dynamique non linéaire est au cœur de la théorie du chaos, que les physiciens et mathématiciens explorent depuis quelques années... non sans mal. De surcroît, la chromodynamique quantique est une théorie quantique des champs : des quarks et des gluons virtuels sont créés et annihilés en permanence ; chaque interaction avec les quarks réels est brève, mais leurs effets cumulés doivent être pris en compte. Enfin, le principe d'incertitude d'Heisenberg impose que les quarks, confinés à l'intérieur d'un proton ou d'un neutron minuscule, soient en mouvement à une vitesse proche de celle de la lumière.

Le spin a de grandes conséquences sur le comportement des particules. Ainsi, si le spin des électrons était différent de 1/2, leur disposition autour du noyau atomique serait radicalement transformée : la classification périodique des éléments et toute la chimie seraient méconnaissables. Toutefois, le spin est encore plus important en chromodynamique quantique qu'en physique atomique. Ainsi, un atome d'hydrogène peut avoir un spin total égal à zéro ou à un, selon que les spins de son proton et de l'électron gravitant autour de lui sont parallèles ou opposés (voir la figure 2) : la différence d'énergie entre ces deux situations est faible. En revanche, la particule Δ^+ , formée des trois mêmes quarks qu'un proton, mais de spin 3/2 plutôt que 1/2, est 30 pour cent plus massive qu'un proton : l'alignement des spins nécessite de l'énergie.

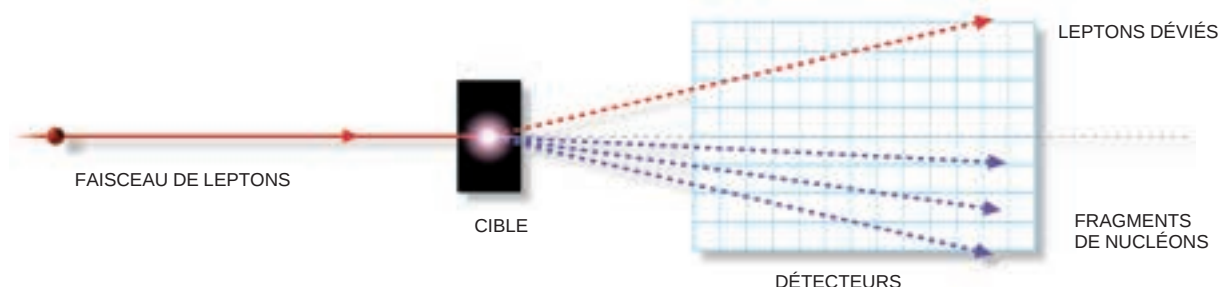
Un coup d'accélérateur

Afin d'étudier la structure des nucléons, les expérimentateurs bombardent une cible de nucléons avec des faisceaux de particules énergétiques,

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

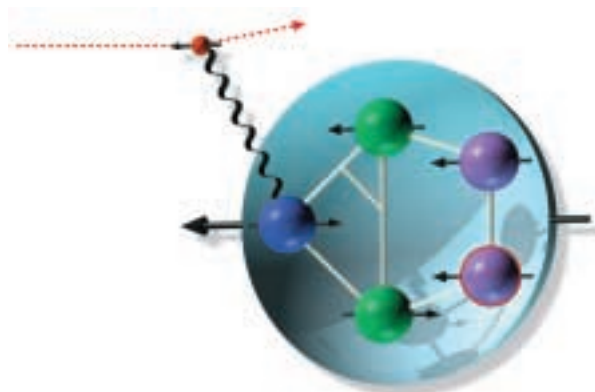
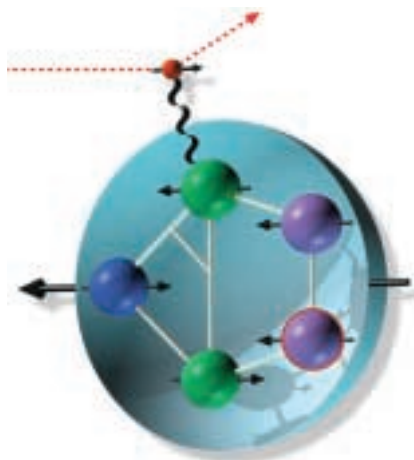
Un accélérateur projette un faisceau d'électrons ou de muons (des leptons, c'est-à-dire des particules ponctuelles qui ne sont pas soumises à l'interaction forte) polarisés sur une cible de nucléons polarisés. Des détecteurs mesurent les déviations et les pertes

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.



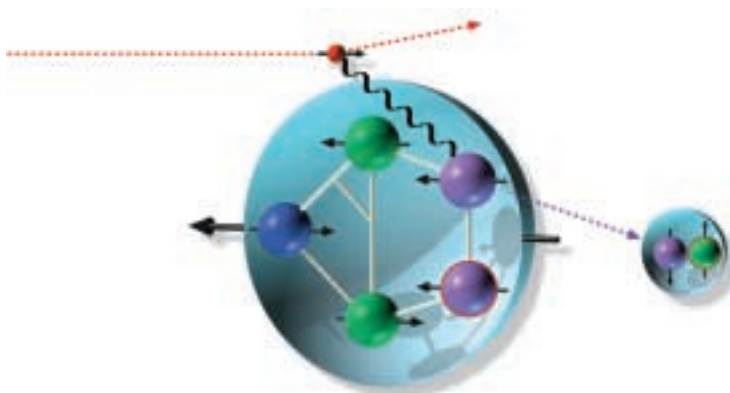
Un lepton est dévié quand il échange un photon avec l'un des quarks du nucléon. Les leptons qui ont un spin parallèle à l'axe du faisceau interagissent surtout avec des quarks dont le spin est de sens opposé (à gauche). Quand la polarisation du faisceau

(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.

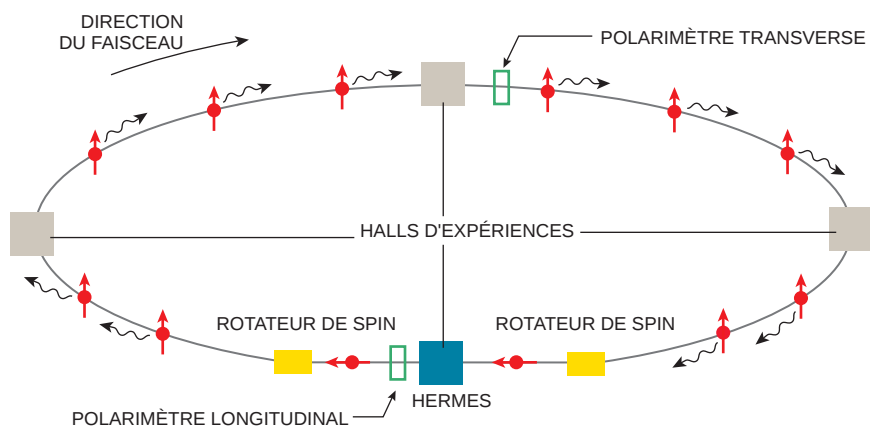
Vincent BRETON

Laboratoire de physique corpusculaire
de Clermont-Ferrand

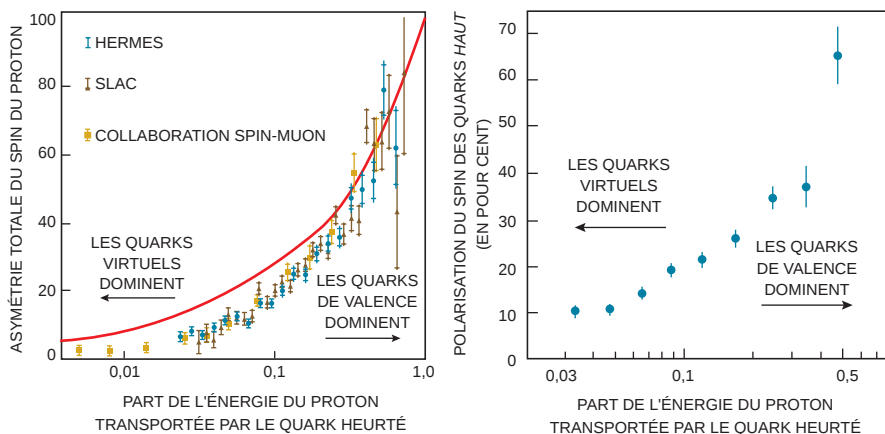
Pour étudier la structure du spin des nucléons, on doit polariser (aligner dans une même direction) les spins des projectiles et de la cible. Quand un spin des leptons est aligné avec leur direction de propagation, les leptons échangent des photons surtout avec les quarks de spin opposé. Ainsi les déviations 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

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

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.
