

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

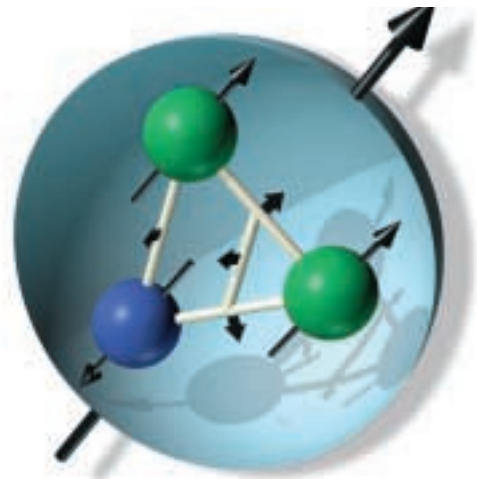
Quatre descriptions du proton



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.

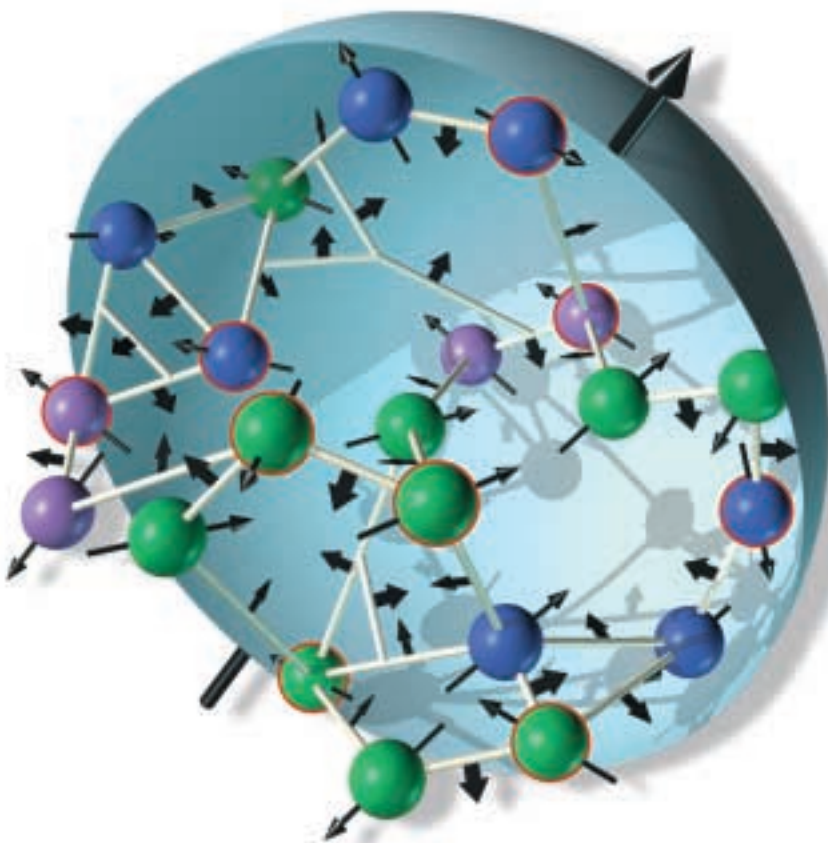


b. La théorie des quarks décrit le proton comme la somme de deux quarks *haut* (*en vert*) et d'un quark *bas* (*en bleu*), dont les charges et les spins respectifs s'additionnent pour donner les valeurs caractéristiques du proton. Chaque quark a un spin égal à $1/2$, mais le spin total est encore $1/2$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



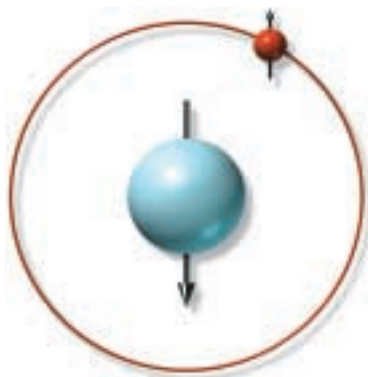
c. Les expériences de la fin des années 1960 ont donné des quarks l'image de particules ponctuelles à l'intérieur du proton, et la chromodynamique quantique décrit la force qui les lie comme une sorte d'élastique (*en blanc*). L'élastique est constitué de particules, les gluons, qui possèdent chacune 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.

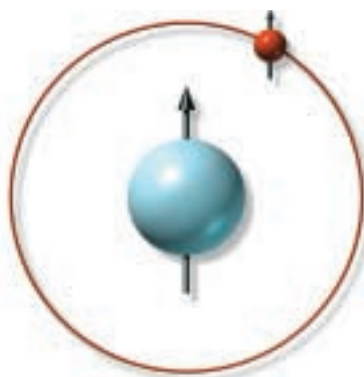


	QUARK HAUT
	QUARK BAS
	QUARK ÉTRANGE
	ANTIQUARK
	GLUON
	SPIN $1/2$
	SPIN 1

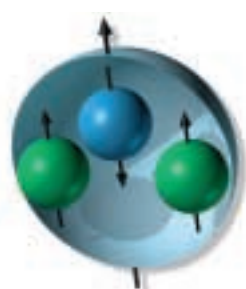
a ATOME D'HYDROGÈNE DE SPIN NUL
MASSE = 0,9 GEV



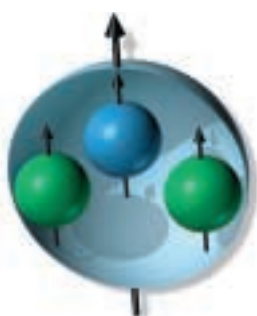
ATOME D'HYDROGÈNE DE SPIN UN
MASSE = 0,9 GEV + 6×10^{-15} GEV



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,