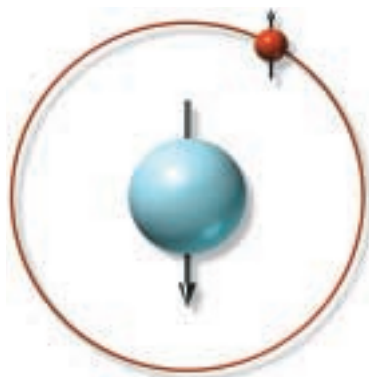
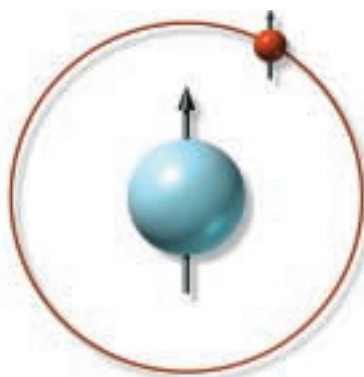


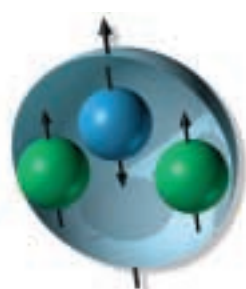
a ATOME D'HYDROGÈNE DE SPIN NUL
MASSE = 0,9 GEV



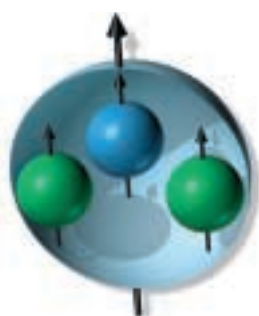
ATOME D'HYDROGÈNE DE SPIN UN
MASSE = 0,9 GEV + 6×10^{-15} GEV



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.

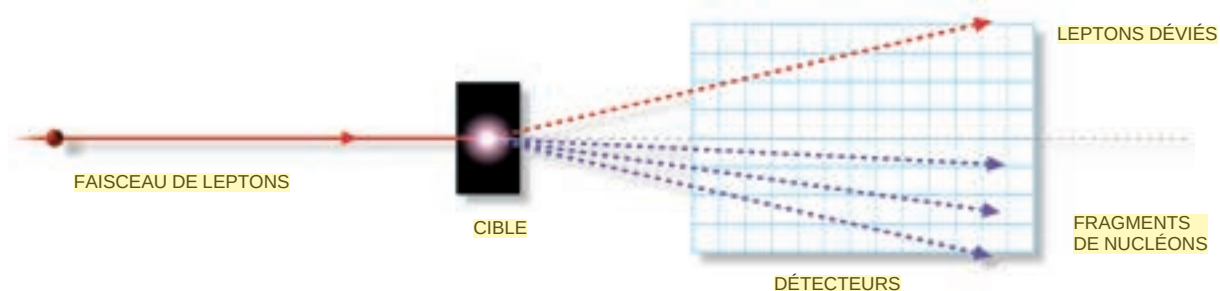
Un coup d'accélérateur

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

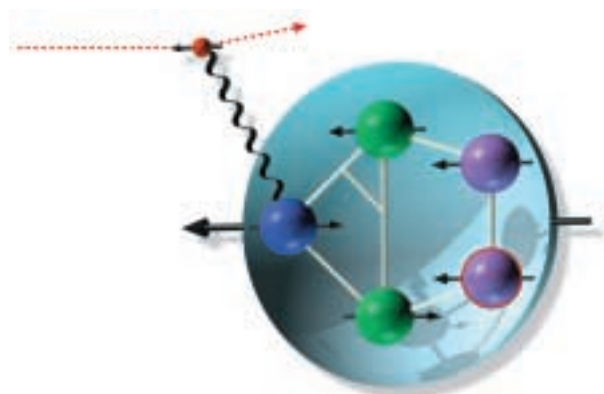
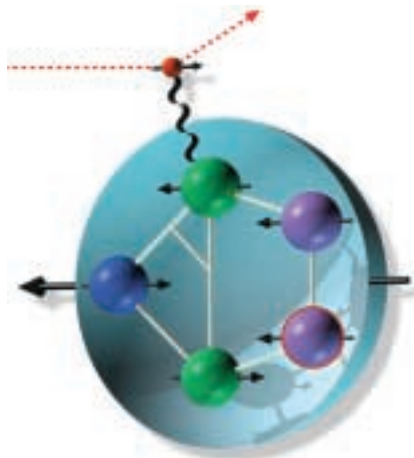
Un accélérateur projette un faisceau d'électrons ou de muons (des leptons, c'est-à-dire des particules ponctuelles qui ne sont pas soumises à l'interaction forte) polarisés sur une cible de nucléons polarisés. Des détecteurs mesurent les déviations et les pertes

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.



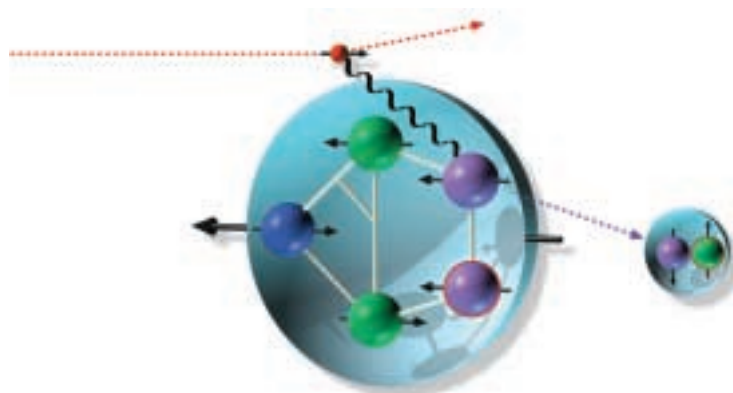
Un lepton est dévié quand il échange un photon avec l'un des quarks du nucléon. Les leptons qui ont un spin parallèle à l'axe du faisceau interagissent surtout avec des quarks dont le spin est de sens opposé (à gauche). Quand la polarisation du faisceau

(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)