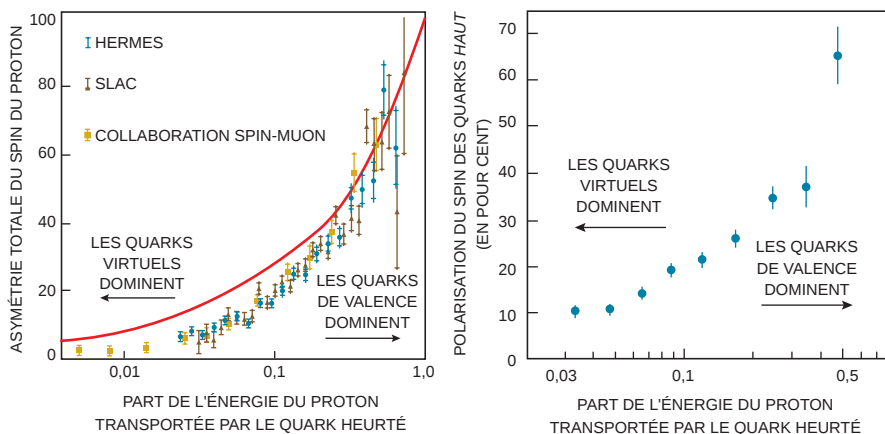




3. LA POLARISATION DU SPIN du proton est mesurée par de nombreuses expériences. L'asymétrie du spin total mesurée par le groupe HERMES au SLAC et par la Collaboration spin-muon (à gauche) montre que le spin des quarks n'apporte qu'une faible contribution au spin du proton. Des données ajustées à la courbe 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.

L'Odyssée abrégée

MARTIN GRÖTSCHEL • MANFRED PADBERG

La recherche du circuit le plus court entre plusieurs villes est le prototype d'une classe importante de problèmes d'optimisation. Parfois cette recherche est si difficile qu'on se contente d'une solution approchée. De nouveaux algorithmes donnent souvent la meilleure solution.

Ulysse, le légendaire roi d'Ithaque, erra pendant 20 ans avant de serrer dans ses bras sa chère Pénélope. Les historiens ont identifié les 16 étapes de l'*Odyssée* (voir la figure 1), et les mathématiciens ont calculé que le périple aurait été plus court si les dieux ne s'en étaient pas mêlés... et si Ulysse avait bénéficié des résultats récents en théorie de l'optimisation.

Le monde moderne a ses Ulysses : les voyageurs de commerce et les hommes d'affaires, qui vont de ville en ville. Imaginons que l'un d'entre eux doive visiter les 16 villes où Ulysse est passé. L'ordre de parcours des villes lui importe peu, mais il se préoccupe de la longueur totale du circuit : le temps, c'est de l'argent. Ce problème est nommé problème du voyageur de commerce. De formulation anodine, il devient si difficile, quand le nombre de villes est notable, que les mathématiciens en cherchent encore une solution. Mieux encore, le problème du voyageur de commerce est un exemple d'une classe de problèmes qui se posent chaque fois qu'on doit identifier une combinaison optimale parmi de nombreuses possibilités. Par exemple, on le rencontre à propos de chargements de camions, de bateaux ou d'avions, de gestion du personnel, d'utilisation de machines, de détermination d'horaires de sociétés, de réalisation de circuits intégrés, d'investissements, de configuration de réseaux de communication...

Entre les 16 villes de l'*Odyssée*, le circuit le plus court mesure 6 859 kilomètres (voir l'encadré de la page 92), et Ulysse n'aurait parcouru que 9 913 kilomètres si, ayant emprunté les ailes de Dédale, il avait volé en ligne droite entre les étapes imposées par les dieux. Comment avons-nous déterminé le

circuit le plus court, parmi les 653 837 184 000 possibilités ? Nous avons successivement calculé la longueur de tous les circuits, à l'aide d'un ordinateur de bureau qui a fonctionné pendant 92 heures.

Un tel examen constitue la méthode la plus simple de résolution de problèmes combinatoires, quand le nombre de possibilités est fini. Toutefois, cette utilisation de la puissance de calcul brute n'est possible que dans de rares cas, et elle devient rédhibitoire pour des problèmes à peine plus compliqués que celui d'Ulysse. Nous avons choisi cet exemple, parce qu'il est à la limite des possibilités des ordinateurs actuels, quand ceux-ci font l'examen systématique des combinaisons. Pour 25 villes, en revanche, même les ordinateurs les plus puissants du monde seraient incapables d'examiner toutes les possibilités en un temps raisonnable.

En pratique, les problèmes d'optimisation sont souvent bien plus difficiles que celui d'Ulysse. Des avancées théoriques récentes permettent aujourd'hui de les résoudre. Ainsi, au cours de l'été 1998, David Applegate, Robert Bixby et William Cook, de l'Université de Houston, et Vasek Chvatal, à New Brunswick, ont utilisé les techniques que nous examinerons plus loin pour déterminer le circuit le plus court entre plus de 13 000 villes des États-Unis (voir la figure 2), battant de loin leur propre record, de 7 397 villes seulement.

La modélisation et les graphes

L'analyse d'un problème d'optimisation commence avec sa formalisation mathématique : on remplace chaque ville par un point, ou «sommets», et l'on relie chaque sommet du réseau par

un segment (une «arête»). Quand toutes les paires de sommets sont reliées par une arête, le graphe formé par les sommets et par les arêtes est dit complet. Un graphe complet à 16 sommets comporte exactement 120 arêtes.

Chacune des arêtes est, dans le problème d'Ulysse, affectée d'une valeur : la distance entre les deux villes associées aux sommets. Toutefois d'autres types de valeurs sont possibles : montant de transactions, durée de fabrication, quantité de matière, etc. Un circuit n'est composé que de certaines arêtes, et un circuit complet qui passe par toutes les arêtes une seule fois est un circuit hamiltonien, ainsi nommé d'après le mathématicien irlandais William Hamilton (1805-1865). La longueur du circuit est la somme des longueurs des arêtes empruntées.

Pourquoi la recherche du plus court circuit hamiltonien est-elle si difficile ? Parce que le nombre de circuits possibles devient considérable quand le nombre de villes augmente ? Non : le nombre de solutions possibles n'est pas une bonne mesure du degré de la complexité des problèmes combinatoires. En effet, imaginons que l'on veuille créer un réseau de télécommunications entre des villes, en faisant éventuellement passer les lignes par des villes intermédiaires, et supposons que le coût de liaison soit proportionnel à la longueur des lignes empruntées par les communications. La solution la plus onéreuse est celle qui correspond au graphe complet, où chaque ville est directement reliée à toutes les autres, mais il existe des solutions moins coûteuses : on élimine progressivement du graphe l'arête la plus longue que l'on puisse ôter sans dissocier le réseau en deux moitiés disjointes, puis on répète l'opération avec le graphe