

cul n'a plus rien d'exceptionnel : c'est celle de 200 ordinateurs personnels équipés de la dernière puce de la Société Pentium).

En 1991, après huit ans d'études, nous avons utilisé l'ordinateur pour nos premiers calculs de chromodynamique quantique. Puis, après environ un an de calcul, notre ordinateur, GF11, a produit son premier résultat, en déterminant la masse du proton et de sept autres hadrons. Les différences entre nos prévisions et les mesures expérimentales, inférieures à six pour cent, résultaient de l'algorithme utilisé pour les statistiques plutôt que des incertitudes dues à la théorie elle-même.

En novembre 1995, nous avons achevé un autre ensemble de calculs, obtenu cette fois en faisant fonctionner l'ordinateur en continu pendant deux ans. En examinant une table de résultats expérimentaux du passé, l'ordinateur détermina la masse et le taux de désintégration d'une particule subatomique insaisissable appartenant à la sous-famille des hadrons, les «boules

de glu». Cette boule de glu, créée lors d'une expérience, n'avait pas été reconnue ; c'était la première fois que des calculs massifs identifiaient une nouvelle particule.

Simultanément, ce travail sur les masses des hadrons et sur la masse et le taux de désintégration des boules de glu a confirmé la chromodynamique quantique, et il a indiqué une nouvelle façon de traiter les problèmes de physique fondamentale. En raison des coûts exorbitants des accélérateurs de particules et de la complexité des problèmes théoriques actuels, les calculs numériques deviendront, dans certains cas, le seul recours possible pour les physiciens.

## Les quarks et le champ de couleur

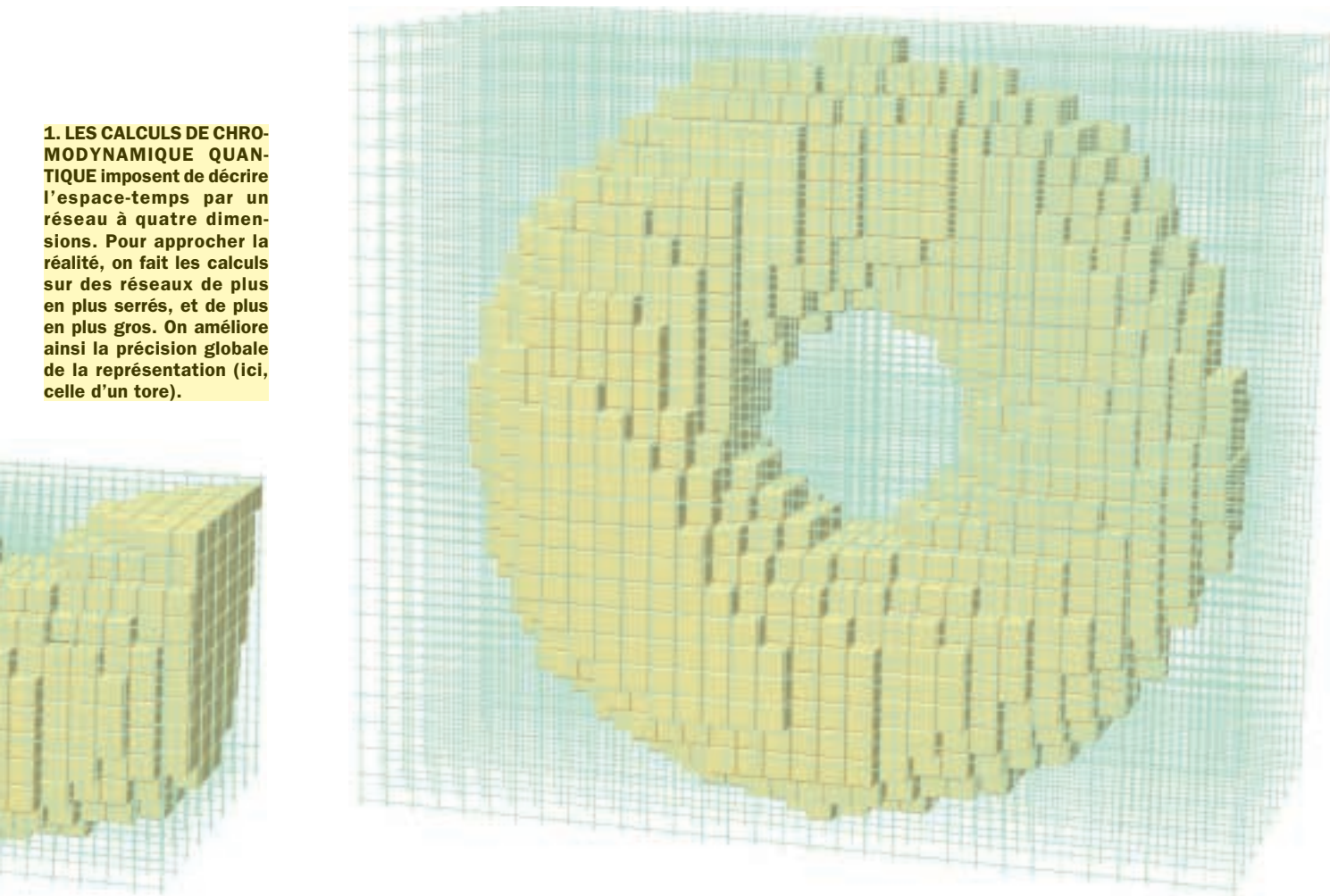
Pourquoi les quarks ont-ils un comportement si complexe ? En partie, parce qu'ils s'associent de façons variées. Il existe six «saveurs», c'est-à-dire six sortes de quarks :  $u$ ,  $d$ ,  $s$ ,  $c$ ,  $t$

et  $b$ . Chacun peut porter l'une des trois «couleurs de charge» dénommées rouge, vert et bleu.

Ainsi les caractéristiques des quarks sont décrites par 18 combinaisons possibles de saveurs et de couleurs. En outre, à chaque type de quark correspond un antiquark, caractérisé par son antisaveur et son anticouleur. La chromodynamique quantique stipule que les quarks ou les antiquarks ne peuvent être isolés ; aussi les physiciens déduisent leurs propriétés en observant les interactions entre des paires de hadrons ou entre des hadrons et d'autres particules élémentaires, tels les électrons et les photons.

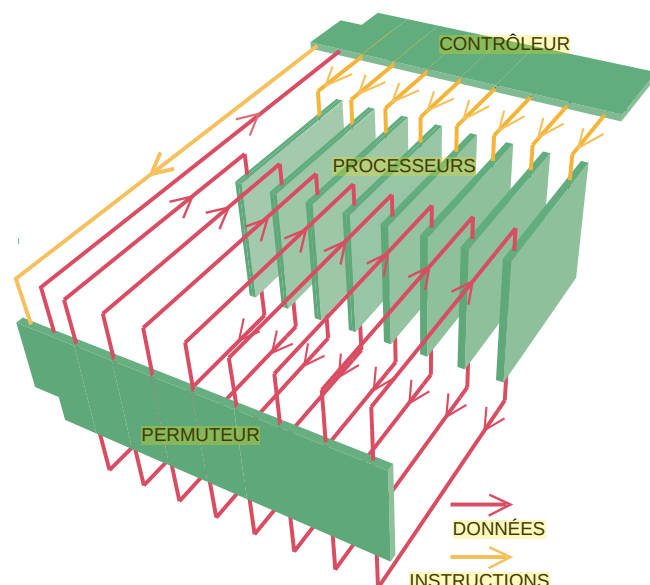
La chromodynamique quantique est complexe, parce que les charges de couleur engendrent un champ confinant, nommé «champ chromoélectrique» : les charges de couleur des quarks sont analogues aux charges électriques ordinaires, qui créent un champ électromagnétique autour des particules chargées. Et tout comme un champ électromagnétique lie les électrons chargés

**1. LES CALCULS DE CHROMODYNAMIQUE QUANTIQUE** imposent de décrire l'espace-temps par un réseau à quatre dimensions. Pour approcher la réalité, on fait les calculs sur des réseaux de plus en plus serrés, et de plus en plus gros. On améliore ainsi la précision globale de la représentation (ici, celle d'un tore).





**2. LE SUPERORDINATEUR GF11** est composé de 566 processeurs qui calculent en parallèle. Le «permuteur» collecte et redistribue les données aux processeurs ; le contrôleur coordonne toutes les activités. Sur la photographie, les processeurs sont les cartes couleur bronze qui coulisent dans les armoires ; les câbles font partie du système contrôleur-permuteur.



négativement aux charges positives présentes dans le noyau d'un atome, le champ chromoélectrique lie les quarks et les antiquarks en hadrons (la matière et l'antimatière peuvent coexister pendant un temps limité avant de s'annihiler mutuellement). La chromodynamique quantique prévoit donc une vaste gamme de hadrons, qui résultent des différentes combinaisons possibles entre les 36 types de quarks et d'antiquarks.

Le champ chromoélectrique est toujours plus compliqué que le champ électromagnétique : il peut interagir fortement avec lui-même pour créer des agrégats variés. Dans un hadron, le champ se condense en une corde dense et fine qui contient une partie notable de la masse totale du hadron. C'est la raison principale pour laquelle on n'obtient pas la masse d'un hadron en additionnant simplement les masses des quarks qu'il contient. C'est aussi, en dernière analyse, la raison pour laquelle on détermine si difficilement la masse des hadrons par la chromodynamique quantique.

Les cordes du champ chromoélectrique peuvent aussi former une boucle fermée, créant ainsi une particule sans quarks ni antiquarks. Comme le champ chromoélectrique «colle» les hadrons faits de quarks, les particules composées uniquement de ce champ sont nommées des boules de glu.

## Un réseau d'espace

La prévision de phénomènes physiques nouveaux à partir de la chromodynamique quantique impose une inter-

prétation mathématique plus spécifique du comportement des quarks et du champ chromoélectrique. Les méthodes numériques qui ont été appliquées sont toutes fondées sur une formulation de la théorie proposée en 1974 par Kenneth Wilson, de l'Université de l'Ohio.

K. Wilson a proposé de décrire comment la configuration des quarks et du champ chromoélectrique dans le monde réel change au cours du temps. Par exemple, dans une configuration, un quark serait sur le point d'entrer en collision, à midi pile, avec un autre quark, à une vitesse de un mètre par seconde, le champ chromoélectrique étant nul partout dans l'espace. Dans une autre configuration, à deux heures de l'après-midi par exemple, les quarks repartiraient dans des directions opposées et à 90 degrés de leur trajectoire initiale, le champ chromoélectrique étant devenu non nul en certains points de l'espace.

La théorie de K. Wilson permet de calculer la probabilité que la transition entre les deux configurations survienne entre midi et 14 heures. La chromodynamique quantique donne ainsi des prévisions, parce qu'elle permet de calculer des probabilités de transition.

La formulation de K. Wilson s'applique à un monde assez inhabituel, où l'espace-temps, continu et illimité, est approché par un réseau, c'est-à-dire une sorte de damier à quatre dimensions (trois dimensions pour l'espace et une pour le temps). On limite l'étendue de ce réseau, de sorte que l'en-

semble de l'espace et du temps est approché par un nombre fini de points ; à chaque point correspond une configuration spécifique des quarks et du champ chromoélectrique. C'est la raison pour laquelle la formulation donnée par K. Wilson est nommée chromodynamique quantique sur réseau.

Comme le monde ainsi modélisé diffère du monde réel, on cherche une meilleure description en considérant des réseaux de plus en plus serrés et de plus en plus gros : on fait tendre vers zéro la distance entre deux nœuds adjacents du réseau et l'on fait tendre vers l'infini le volume du réseau.

En principe, on doit additionner un très grand nombre de termes afin d'obtenir la probabilité d'une transition : à chacune des façons possibles de construire une sorte de tableau correspondant un terme de la somme. Plus précisément, les colonnes et les rangées du tableau correspondent respectivement aux points du réseau et aux configurations de quarks et du champ chromoélectrique en chaque point.

Le nombre de tableaux possibles est vertigineux : pour chaque point du réseau, on doit utiliser 32 nombres réels pour représenter le champ chromoélectrique, de sorte que, pour un réseau de seulement dix unités de côté, dans chaque dimension, le tableau du champ est composé de 320 000 nombres réels (32 nombres pour chacun des  $10 \times 10 \times 10 \times 10$  points du réseau). Pour les besoins d'un calcul d'ordre de grandeur, négligeons la

nécessité de conserver en mémoire la trace des quarks au cours des calculs et supposons (ce qui n'est pas exact) que les 320 000 nombres valent seulement zéro ou un. Chaque tableau possible serait composé d'une série de 320 000 zéros et uns, et le nombre total de ces tableaux possibles – c'est-à-dire le nombre total de termes dans la somme de K. Wilson – serait égal à 2 à la puissance 320 000, un nombre qui s'écrit en système décimal par un 1 suivi de 96 000 zéros!

## Casino et mécanique quantique

En 1979, au Laboratoire de Brookhaven, Michael Creutz, Lawrence Jacobs et Claudio Rebbi reprirent une idée de K. Wilson et inventèrent une méthode numérique pour venir à bout de ces calculs rédhibitoires. Leur méthode est une forme d'«intégration de Monte-Carlo», qui consiste à approcher la solution d'un problème complexe par le biais d'un échantillonnage statistique, un peu comme on utilise des sondages pour prédire le résultat des élections (voir l'encadré ci-contre).

Plutôt que d'additionner la totalité des termes associés aux configurations possibles du réseau, on effectue un échantillonnage et l'on estime la somme cherchée en additionnant un petit nombre de termes sélectionnés aléatoirement. Par cette méthode, on traite le cas d'un réseau de dix unités de côté en seulement 20 milliards d'opérations arithmétiques. En 1979, un ordinateur de puissance moyenne effectuait un demi-million d'opérations arithmétiques par seconde : la méthode de Monte-Carlo donnait une approximation suffisamment précise en moins d'un jour.

Malheureusement on n'obtenait ce résultat qu'en appliquant une forme simplifiée de la chromodynamique quantique, où l'on ne tient compte que du champ chromoélectrique et pas des quarks. Avant d'effectuer des calculs similaires en utilisant la théorie complète, on a dû résoudre une série de problèmes techniques. En 1981, Federico Fucito, Enzo Marinari et Giorgio Parisi, à Rome, Donald Petcher et moi, à Yorktown Heights, et d'autres physiciens ont proposé des versions de l'algorithme de Monte-Carlo qui prenaient

## Chromodynamique quantique et méthode de Monte-Carlo

**P**our résoudre les équations de la chromodynamique quantique sur des réseaux, les physiciens utilisent la méthode de Monte-Carlo. Ils déterminent ainsi des «amplitudes de transition», c'est-à-dire la probabilité que les quarks et le champ chromoélectrique évoluent vers un état final particulier. Quand on jette un dé, l'amplitude de transition est simplement la probabilité d'apparition d'une des faces. Supposons maintenant que le dé soit pipé et que vous ignoriez quelles faces sont chargées. Le résultat dépend de l'orientation du dé avant le jet et du temps pendant lequel il est secoué avant d'être lancé.

La méthode de Monte-Carlo consiste à lancer le dé et à observer ce qui se passe, comme un joueur le ferait lors d'une véritable partie dans un casino (d'où le nom de la méthode). Pour trouver l'amplitude de transition du dé entre la position avec un point sur la face visible et la position avec six points une minute plus tard, par exemple, vous tiendriez le dé avec la face à un point en l'air, le secoueriez pendant un moment et le jetteriez de sorte qu'il s'arrête au bout d'une minute ; puis vous regarderiez si la face à six points est sortie ou non. Vous répéteriez l'opération plusieurs fois. La proportion de lancers qui aboutissent à un six serait l'amplitude de transition désirée.

En chromodynamique quantique, la détermination des amplitudes de transition n'est pas très différente. Initialement on spécifie la configuration du champ désirée au temps initial (ce qui correspond à l'orientation particulière du dé dans la main). L'ordinateur crée alors une série temporelle aléatoire de champs selon la dimension temps du réseau (il secoue le dé), et il s'arrête dans une configuration de champ au temps final spécifiée (il lance le dé). On examine alors le résultat pour déterminer si la configuration finale souhaitée a été obtenue (on regarde si un six est sorti). La proportion de tirages conduisant à la configuration finale spécifiée donne l'amplitude de transition recherchée. Une fois l'amplitude de transition trouvée, on déduit les masses des hadrons.



**UN LANCER DE DÉ ne contribue à l'amplitude de transition 1-6 que si un six est finalement obtenu (premier et troisième jet).**

Dans les calculs de chromodynamique quantique, on confie à chacun des 566 processeurs parallèles de l'ordinateur GF11 une partie des calculs. Les algorithmes qui engendrent des champs chromoélectriques aléatoires et déterminent les mouvements des quarks sont intégrés dans des programmes qui déterminent en détail les calculs, dans la partie confiée à chaque processeur. En chaque point du réseau, le processeur «secoue» le champ chromoélectrique – l'analogie chromodynamique de l'agitation du dé – d'une façon qui dépend du champ en ce point et aux sites voisins.

Avec le GF11, nous avons comparé des masses calculées aux masses observées dans le monde réel, où la distance entre deux points adjacents du réseau tend vers zéro et où le volume du réseau tend vers l'infini. Nous avons calculé les masses pour des volumes et des mailles de réseau différentes. Tout d'abord, nous avons considéré de grands volumes, en choisissant une maille de  $1,5 \times 10^{-14}$  centimètre, connue pour donner des résultats pas trop éloignés des masses limites obtenues quand la maille tend vers zéro. Nous avons alors calculé les masses des hadrons pour différents volumes du réseau. Les résultats obtenus pour un réseau de 16 unités de côté étaient cohérents à cinq pour cent près avec les valeurs limites pour un réseau infini, et à un pour cent près pour un réseau de 24 unités de côté. Puis nous avons entrepris de faire tendre la maille du réseau vers zéro. Nous avons calculé les masses des hadrons sur un réseau de 24 unités de côté et de maille égale à  $1 \times 10^{-14}$  centimètre, puis sur un réseau de 32 unités de côté et de maille égale à  $0,75 \times 10^{-14}$  centimètre, toujours avec un volume de 16 unités de côté. Ces trois calculs nous ont permis d'extrapoler nos prédictions à la limite où la maille du réseau tend vers zéro.