

Quarks et simulation numérique

DONALD WEINGARTEN

Des années de calculs numériques ont confirmé la théorie qui décrit les quarks. Simultanément les physiciens ont identifié une nouvelle particule dans des enregistrements anciens.

Plus d'un comptable froncerait les sourcils s'il apprenait que nous avons fait fonctionner en continu un supercalculateur durant plusieurs années pour n'obtenir qu'une dizaine de résultats. Pourtant nous n'avons pas perdu notre temps : seul l'ordinateur pouvait venir à bout des tâches que nous lui avons confiées, afin de résoudre des problèmes clés de la théorie des particules fondamentales.

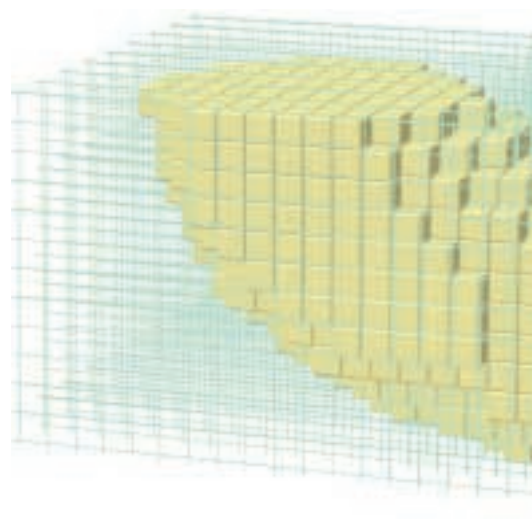
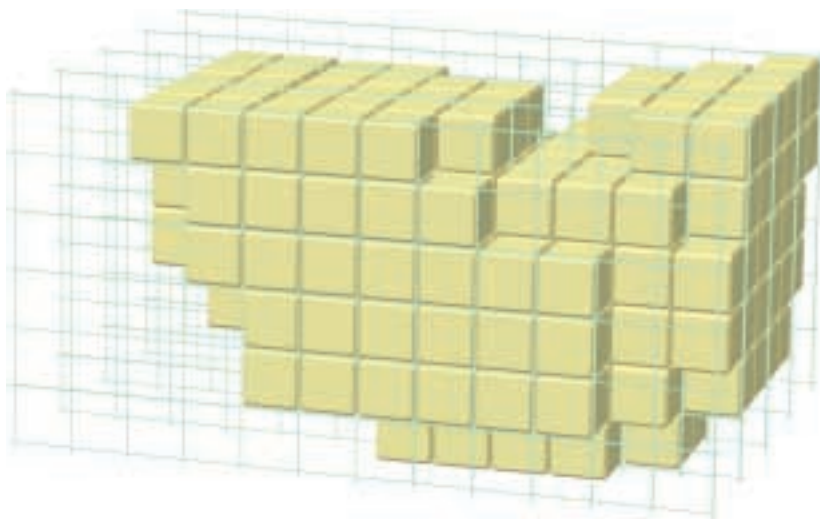
Les problèmes qui nous intéressaient sont nés de la chromodynamique quantique, la théorie qui décrit le comportement des quarks. Formulée dans les années 1970, cette théorie stipule que les quarks s'associent par deux ou par trois pour former des hadrons, c'est-à-dire des particules sur lesquelles s'exerce la force nucléaire forte. Cette famille comprend les protons et les neu-

trons, qui composent les noyaux atomiques, ainsi que d'autres particules moins familières qui apparaissent brièvement dans les accélérateurs de particules ou dans les gerbes de rayons cosmiques. Les expériences qui consistent à bombarder des hadrons à l'aide d'électrons, afin de sonder la structure interne des particules, ont contribué à corroborer la chromodynamique quantique, laquelle est devenue l'une des clefs de voûte du Modèle standard, la théorie la mieux admise de la physique des particules.

Cependant la confirmation était imparfaite, car la chromodynamique quantique aurait dû permettre de calculer la masse du proton, du neutron ou de n'importe quel hadron (le problème était de calculer la masse des hadrons et non de la mesurer, ce qui a été fait depuis longtemps ; les masses

du proton et du neutron, par exemple, ont été découvertes au début de ce siècle). Toutefois la résolution des équations mathématiques requise pour déduire de telles masses de la théorie était largement au-delà des capacités de calcul humaines. Même les ordinateurs les plus rapides des années 1970 auraient mis plus de 100 ans pour faire les calculs.

Aussi, en 1983, au Centre de recherches IBM de Yorktown Heights, nous avons commencé la construction d'un ordinateur parallèle spécialisé dans la résolution des équations de la chromodynamique quantique. L'ordinateur devait effectuer jusqu'à 11 milliards d'opérations arithmétiques par seconde et devait être ainsi plusieurs centaines de fois plus puissant que les ordinateurs les plus puissants de l'époque (aujourd'hui une telle puissance de cal-



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).

