

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

Pour 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 désignée 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'analogue 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 1×10^{-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.

en compte la présence de quarks. Ces divers algorithmes comprenaient notamment une mesure de la difficulté pour les quarks et les antiquarks à passer de leur configuration initiale à une configuration finale.

La prise en compte des quarks et des antiquarks imposait toutefois un accroissement excessif du nombre d'opérations arithmétiques : le plus rapide des ordinateurs de l'époque n'aurait donné des résultats réalistes qu'en un siècle et demi de calcul ininterrompu !

Cette difficulté provenait de l'énergie de chaque configuration de quarks et du champ chromoélectrique : dans toute région de l'espace où un champ chromoélectrique est présent, une énergie importante est émise quand des paires de quarks-antiquarks apparaissent fugacement, puis disparaissent.

En 1981, j'ai imaginé une technique d'«approximation de valence» pour compenser cet effet : on supprime la contribution des paires de quarks-anti-

quarks en divisant toutes les charges de couleur par une constante «chromoélectrique». Puis nous avons découvert qu'on atteignait une bonne description du monde réel en considérant des réseaux de 32 unités de côté, par dimension ; 10^{17} opérations arithmétiques permettaient d'effectuer un calcul complet.

Toutefois les ordinateurs les plus rapides du début des années 1980 exécutaient 40 millions d'opérations arithmétiques par seconde, soit 10^{15} opérations par an. Ainsi, même avec la méthode de l'approximation de valence, le calcul des masses des hadrons aurait pris 100 ans. C'était encore excessif.

Enfin des prévisions

En 1983, avec mes collègues Monte Deneau et John Beetem, j'ai entrepris la construction d'un ordinateur spécialisé dans les calculs de chromodynamique quantique. Nous visions une

puissance de 11 milliards d'opérations arithmétiques par seconde, soit 11 gigaflops (d'où le nom de l'ordinateur : GF11).

Pour obtenir une telle machine, 250 fois plus rapide que les meilleurs ordinateurs de l'époque, nous avons prévu de faire travailler 566 processeurs en parallèle. La fréquence d'horloge, correspondant à la vitesse à laquelle un processeur peut exécuter une addition ou une multiplication, devait être égale à 50 milliards de hertz, et chaque processeur, d'une capacité de 20 mégaflops, devait envoyer une donnée aux autres processeurs toutes les 200 nanosecondes (plusieurs dizaines de superordinateurs d'aujourd'hui sont plus rapides que GF11 ; le plus rapide de tous est environ dix fois plus rapide). Avec James Sexton, j'ai réalisé les programmes du système d'exploitation, du compilateur et un jeu de programmes de diagnostic du matériel. Puis nous avons collaboré avec un groupe important du Centre de recherche pour la mise au point finale de la machine.

À la fin de 1991, nous avons fait les premiers calculs de masses hadroniques. Nous avons d'abord étudié les masses de 11 hadrons formés de combinaisons des trois saveurs des quarks et des antiquarks les plus légers, *u*, *d* et *s*. Les quarks *u* et les quarks *d* sont les constituants des neutrons (un *u* et deux *d*) et des protons (deux *u* et un *d*). Les quarks *s* sont présents dans un grand nombre de hadrons instables. Nous avons calculé la masse de chaque hadron pour des réseaux de tailles diverses. Dans chaque cas, nous avons ajusté des paramètres en utilisant la masse connue de trois hadrons : nous avons modifié ces paramètres jusqu'à ce que la masse calculée concorde avec la masse connue.

Il nous est ainsi resté huit prédictions de masse à faire pour chaque type de réseau. Pour trouver la valeur des masses aux limites, quand le réseau a un volume infini et une maille de longueur nulle, nous avons extrapolé les prédictions obtenues pour des réseaux de volume croissant et de maille décroissante.

La différence entre chaque prédiction et la masse déterminée expérimentalement a été, dans tous les cas, inférieure à six pour cent, ce qui était dans la gamme des incertitudes que nous attendions, du fait de l'utilisa-

Calcul et physique théorique

La simulation numérique sur réseau prend une importance croissante dans un domaine de la physique des particules nommé physique des interactions fortes. La disponibilité de moyens de calcul de puissance, rapidement croissante, permet maintenant une exploration de la chromodynamique quantique dont l'étude avait résisté à des efforts plus analytiques. Des résultats, que je qualifierais de semi-quantitatifs, ont été obtenus, qui valident définitivement, à la fois la théorie et cette démarche numérique. Il est possible d'envisager dans un avenir proche, non seulement une reproduction de résultats déjà établis expérimentalement, mais aussi la prédiction de résultats nouveaux. Il faut noter toutefois que la prise en compte précise des degrés de liberté des quarks exigera des puissances de calcul encore supérieures, probablement d'un facteur 100 à 1 000.

Dans certains domaines de la physique, la simulation numérique pourrait-elle, à terme, remplacer l'expérience quand cette dernière est trop

difficile ou trop onéreuse? La simulation numérique ne peut intervenir que dans des domaines où la théorie a déjà des bases suffisamment solides, elle ne peut rien tant que les modèles physiques ne sont pas encore connus. Croire qu'un jour le calcul rendra l'expérience totalement inutile est absurde. Ainsi il est très peu vraisemblable que la simulation numérique joue le moindre rôle dans la solution d'un problème aussi fondamental que celui de la particule de Higgs.

La France est peu présente dans ce domaine d'activité, alors même que nos physiciens (en particulier au Service de physique théorique du CEA-Saclay) ont contribué de façon très importante aux premières études de la chromodynamique sur réseau. Cependant l'absence de moyens de calcul compétitifs pendant les années 1980, au moment où le sujet s'est développé, ont conduit plusieurs équipes à abandonner le domaine. La situation est aujourd'hui meilleure, mais le changement est apparu tardivement.

Jean ZINN-JUSTIN
CEA-Saclay