

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 avions 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