

La méthode d'unitarité a également facilité la recherche du boson de Higgs, une particule postulée dans les années 1960 pour compléter le modèle standard. Une manifestation possible de cette particule est la production d'un unique électron, une paire de jets et un neutrino, le neutrino qui donne dans ce cas encore l'impression que de l'énergie a disparu. Le même résultat peut également être produit par des réactions de particules où le boson de Higgs n'intervient pas. Une des premières utilisations de la méthode d'uni-

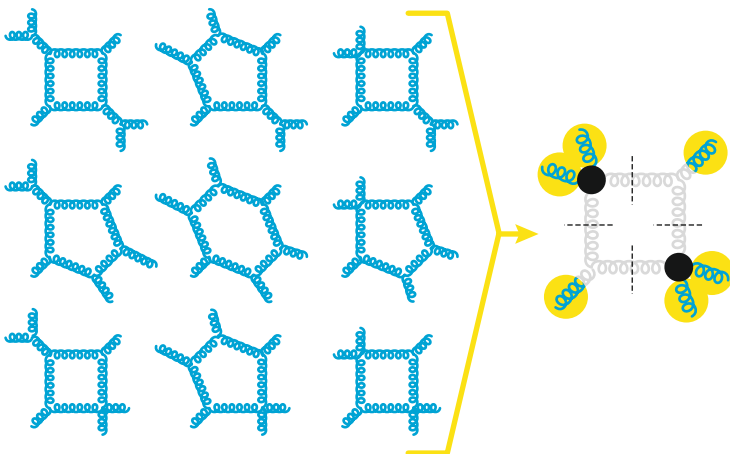
tarité a été de calculer la probabilité précise de ces réactions qui sont sources de confusion. Et en juillet 2012, les physiciens du LHC ont annoncé la découverte d'une nouvelle particule, qui est probablement le boson de Higgs.

Une utilisation encore plus impressionnante de la méthode d'unitarité est l'étude de la gravitation quantique. Pour que les physiciens puissent développer une théorie entièrement cohérente de la nature, on doit trouver un moyen de faire entrer la gravitation dans le cadre de la physique quantique. Si la gravitation se comporte comme les autres interactions de la nature, elle devrait être véhiculée par des particules, les gravitons, qui entreraient en collision et seraient diffusées comme les autres particules. Et nous pourrions dessiner des diagrammes de Feynman.

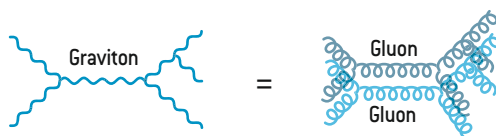
SE SIMPLIFIER LA VIE

Les auteurs ont développé une alternative aux diagrammes de Feynman nommée « méthode d'unitarité ». Ci-dessous, à gauche, on a représenté quelques exemples de diagrammes de Feynman à une boucle pour un processus à six gluons. Dans la méthode d'unitarité, quelques diagrammes généraux (dont un est représenté à droite) suffisent pour calculer le processus complet.

Contrairement aux diagrammes de Feynman, les échanges de particules virtuelles ne sont pas détaillés. On fixe les particules entrantes et sortantes (*en bleu*) et le diagramme est découpé selon les lignes pointillées pour obtenir quatre sous-diagrammes plus petits et plus simples à calculer. Les disques noirs représentent des processus calculés au niveau des arbres. Le produit des valeurs associées à chaque sous-diagramme correspond à un coefficient qui pondère une intégrale représentative du diagramme. Il faut calculer le coefficient et l'intégrale pour chaque diagramme de la méthode d'unitarité. La somme des intégrales pondérées permet alors de calculer la probabilité liée au processus.



La technique a mis en évidence des propriétés de la nature, implicites dans les théories, mais que le foisonnement des diagrammes de Feynman masquait. La plus frappante de ces découvertes est une voie possible pour inclure la force de gravitation. Celle-ci pourrait être véhiculée par des particules, les gravitons, qui présentent une remarquable ressemblance avec les gluons; mathématiquement, chaque graviton équivaut à une sorte de combinaison de deux gluons. Plus précisément, la valeur correspondant à un diagramme avec gravitons s'apparente à un produit des valeurs correspondant à deux diagrammes identiques où les gravitons sont remplacés par des gluons.



À la poursuite de la gravitation

Cependant, les premières tentatives visant à décrire la diffusion de gravitons en créant le plus simplement possible une version quantique de la théorie d'Einstein ont conduit à des prédictions aberrantes: des valeurs infinies pour des quantités qui devraient clairement être finies. Les quantités infinies ne sont pas, en elles-mêmes, un problème. Elles peuvent apparaître à des étapes intermédiaires des calculs même dans des théories bien sages comme le modèle standard, mais elles devraient s'annuler pour toutes les quantités mesurables. Pour la gravitation, ces annulations ne semblaient pas avoir lieu.

Une issue possible est l'existence de particules non encore découvertes qui mettraient au pas ces effets quantiques. Cette idée, incorporée par les théories dites de supergravité, a été très étudiée dans les années 1970 et au début des années 1980. Mais l'enthousiasme est retombé quand des arguments indirects ont suggéré que des infinis dépourvus de sens apparaîtraient toujours dans les diagrammes à trois boucles ou davantage. La supergravité semblait vouée à l'échec.

Cette déception a conduit beaucoup de physiciens à se tourner vers la théorie des cordes. Celle-ci se démarque du modèle standard: les particules élémentaires ne sont plus de minuscules points, mais des oscillations de cordes unidimensionnelles. Les interactions des particules sont réparties sur les cordes plutôt que

concentrées en un point, ce qui évite les infinis. Mais d'un autre côté, la théorie des cordes se heurte à ses propres problèmes; par exemple, elle ne fait pas de prédictions théoriques fermes pour les phénomènes observables.

La supergravité remise au goût du jour

Au milieu des années 1990, le Britannique Stephen Hawking a plaidé pour un réexamen des théories de supergravité. Il faisait remarquer que les études des années 1980 avaient pris des raccourcis qui rendaient leurs conclusions douteuses. Mais S. Hawking ne parvint pas à convaincre, car les physiciens avaient une bonne raison de prendre ces raccourcis: les calculs complets étaient hors de portée, même des plus brillants mathématiciens. Pour savoir avec certitude si un diagramme de Feynman à trois boucles de gravitons virtuels produit des quantités infinies, il faudrait évaluer 10^{20} termes. La question semblait devoir finir sur l'étagère des problèmes indécidables.

La méthode d'unitarité a changé la donne et a remis en selle la supergravité. Ce qui aurait nécessité 10^{20} termes avec la technique de Feynman, nous le faisons maintenant avec quelques dizaines. Avec plusieurs collègues, nous avons trouvé que les spéculations des années 1980 étaient fausses. Des quantités qui semblaient vouées à être infinies se révélèrent finies. Cela signifie que les fluctuations quantiques de l'espace et du temps sont beaucoup plus inoffensives dans le cadre de la supergravité qu'on ne le pensait. La supergravité est moins absurde qu'elle ne le semblait.

Plus remarquable, trois gravitons interagissent exactement comme deux copies de trois gluons en interaction. Cette propriété de double exemplaire semble persister quel que soit le nombre de particules en interaction ou le nombre de boucles de particules virtuelles impliquées. Il reste à interpréter physiquement ce résultat mathématique et à vérifier s'il est toujours vrai. Pour l'instant, le point crucial est que la gravitation pourrait en fait ne pas être très différente des autres interactions fondamentales.

Comme souvent en science, à chaque fois qu'un débat se clôt, un autre s'ouvre. Immédiatement après nos calculs pour trois boucles, les sceptiques se sont

demandé si les problèmes n'allaient pas surgir avec quatre boucles. Quand nous avons fait le calcul, nous n'avons pas décelé de difficultés. Ce succès nous a permis de remporter un pari mettant en jeu de bonnes bouteilles de vin.

La théorie de la supergravité est-elle complètement dépourvue d'infinis? Ou bien son niveau élevé de symétrie limite-t-il ses excès pour un faible nombre de boucles? Dans ce dernier cas, les problèmes devraient s'insinuer à partir de cinq boucles, et à sept boucles les effets quantiques devraient être suffisamment forts pour produire des infinis. David Gross, de l'Université de Californie à Santa Barbara, offre une bouteille de zinfandel californien si les infinis ne sont pas présents à sept boucles. Pour trancher ce dernier pari, certains d'entre nous ont entrepris de nouveaux calculs. Une absence d'infinis à sept boucles stupéfierait les sceptiques et pourrait enfin les persuader que la supergravité peut être une théorie cohérente. Mais même si elle l'est, cette théorie ne rend pas compte d'autres types d'effets, non perturbatifs, qui sont trop infimes pour être vus dans l'approche boucle-par-boucle que nous avons suivie. Pour traiter ces effets, on risque d'avoir besoin d'une théorie plus fondamentale, peut-être la théorie des cordes.

Les physiciens aiment bien se représenter les nouvelles théories comme émergeant de nouveaux principes – relativité, physique quantique, symétrie. Mais parfois, ces théories émergent simplement d'un réexamen minutieux des principes que nous connaissons déjà. La révolution silencieuse de notre compréhension des collisions de particules nous a permis de déterminer les conséquences du modèle standard avec un luxe de détails, conduisant à des améliorations significatives de notre potentiel de découverte de la physique plus fondamentale. Plus surprenant, elle nous permet de suivre les implications non explorées de la physique d'hier, parmi lesquelles une piste négligée d'unification de la gravité avec les autres interactions connues. À de nombreux égards, la route qui mène à la compréhension des interactions des particules élémentaires n'est pas du tout comparable à un trajet dans le très prévisible métro de Londres; elle s'apparente plutôt à une virée dans le magicobus de Harry Potter, où vous ne savez jamais ce qui va se passer au prochain tournant. ■


Institut de recherche pour le développement

Un éditeur pour le développement

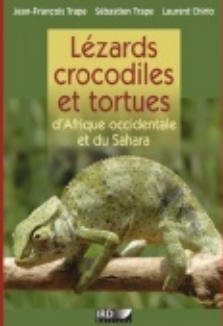
Les éditions de l'IRD vous accueilleront sur leur stand au Festival international de géographie de Saint-Dié-Les-Vosges, du 12 au 14 octobre 2012



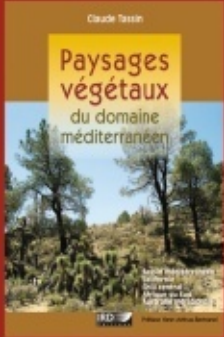
Hommes et natures
E. Motte-Florac, Y. Aumeerud-Thomas, E. Dounias
176 p., 120 photos, 35 €
978-2-7099-1724-7



Le Caire
Centre en mouvement
G. El Kadi
288 p., 247 photos, 35 €
978-2-7099-1717-9



Lézards, crocodiles et tortues d'Afrique occidentale et du Sahara
J.-F. Trape, S. Trape, L. Chirio
504 p., 750 photos, 64 €
978-2-7099-1726-1



Paysages végétaux du domaine méditerranéen
Bassin méditerranéen, Californie, Chili central, Afrique du Sud, Australie méridionale
C. Tassin
424 p., 270 photos, 45 €
978-2-7099-1731-5

Diffusion libraires : Eyrolles/Géodif
Vente par correspondance : IRD Diffusion
32, av. Varagnat - F 93143 Bondy cedex
Tél : 01 48 02 56 49 Fax : 01 48 02 79 09
diffusion@ird.fr
www.ird.fr